

Gunnar Ziehmann

Setzung von Abfalldeponien

**- Theorie und Laborversuche zur Kennzeichnung
von Einflussgrößen -**



Cuvillier Verlag Göttingen

Setzung von Abfalldeponien
- Theorie und Laborversuche zur Kennzeichnung
von Einflussgrößen –

Vom Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen
Der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Gunnar Ziehmann
aus Flensburg

| | |
|-----------------------|------------------------------|
| Eingereicht am: | 04. Juli 2001 |
| Mündliche Prüfung am: | 23. November 2001 |
| Berichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. H.-J. Collins |
| Berichterstatter: | Prof. Dr.-Ing. B. Walz |

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Ziehmann, Gunnar:

Setzung von Abfalldeponien: Theorie und Laborversuche zur Kennzeichnung von Einflussgrößen / von Gunnar Ziehmann. -

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2002

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2001

ISBN 3-89873-348-3

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2002

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2002

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-89873-348-3

Vorwort

Zu jeder Dissertation gehört eine Eidesstattliche Erklärung, in der bekundet wird, dass die Arbeit selbstständig erstellt wurde, was auch bei dieser Arbeit der Fall ist. Dabei ist glücklicherweise „selbstständig“ gemeint und nicht „allein“, denn ohne die Hilfe vieler anderer Menschen wäre diese Arbeit niemals zustande gekommen.

Bedanken möchte ich mich daher bei meinen Kollegen, die mich in meiner Zeit am Leichtweiß-Institut begleitet haben und bei den „unzähligen“ Hiwis, von denen ich besonders Olli herausheben möchte.

Speziell möchte ich mich bei Dr.-Ing. Kai Münnich bedanken, der mir in dieser Zeit fachlich und menschlich sehr nahe gestanden hat. Seine stetige Diskussionsbereitschaft und seine nahezu unendliche Geduld hat mir über etliche Hürden hinweggeholfen.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Fricke bedanken, der mich immer angetrieben und ermuntert hat und es mir ermöglichte, diese Arbeit im Rahmen meines Dienstvertrages zu beenden.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Collins, der mich ermutigt hat, dieses spannende Forschungsthema auch außerhalb eines „bezahlten“ Forschungsvorhabens zu bearbeiten. Er gab mir die finanziellen und zeitlichen Mittel, die Versuchsgeräte zu konstruieren und zu bauen und schließlich die Versuche durchzuführen. Herr Prof. Collins hat den Fortschritt der Ergebnisse stets mit Interesse verfolgt und mit immer neuen Anregungen und Gedanken die endgültige Zielstellung maßgeblich mitgeformt. Ohne die stetigen und langen Diskussionen und fachlichen Auseinandersetzungen mit Herrn Prof. Collins wäre diese Arbeit nicht in der Form erschienen, in der sie jetzt vorliegt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Walz gilt ebenfalls mein Dank für seine Bereitschaft das Korreferat meiner Dissertationsschrift zu übernehmen und für die damit verbundenen Mühen. Dies gilt besonders für seinen sehr konstruktiven Umgang mit meinen Theorien und Vorstellungen.

An meine Familie richtet sich mein spezieller Dank, da Saskia, Bojan und Janek, vor allem in der letzten Phase dieser Arbeit, häufig zurückstehen mussten.

Der größte Dank geht an meine Eltern, ohne deren offene Erziehung, ihren Einsatz und ihre Unterstützung es mir nicht möglich gewesen wäre, diese Arbeit zu erstellen.

Widmung

Diese Arbeit widme ich meinen Eltern, Anne-Christa und Edmund Ziehmann, die aufgrund der Kriegs- und Nachkriegswirren selbst nie die Chance besaßen, sich Ihre beruflichen Ziele eigenständig auszusuchen und sie zu verwirklichen.

Mir gaben Sie jederzeit die Möglichkeit und die Freiheit meinen eigenen Berufsweg auszusuchen und ihn zu verfolgen. Diese Dissertation wäre ohne Ihren Einsatz niemals entstanden. Sie ist daher auch ein Stück Ihrer Leistung.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. EINLEITUNG | 1 |
| 2. STAND DES WISSENS..... | 3 |
| 2.1. Geotechnische Grundlagen..... | 3 |
| 2.1.1. Vorbemerkung..... | 3 |
| 2.1.2. Mechanismen der Kraftübertragung in Böden | 3 |
| 2.1.3. Setzungen | 5 |
| 2.1.3.1. Allgemeine Betrachtungen..... | 5 |
| 2.1.3.2. Konsolidationstheorie..... | 8 |
| 2.2. Setzungsverhalten von Abfallkörpern..... | 12 |
| 2.2.1. Abfalltechnische Besonderheiten | 12 |
| 2.2.1.1. Allgemeines..... | 12 |
| 2.2.1.2. Abfallzusammensetzung | 12 |
| 2.2.1.3. Stückgrößen..... | 14 |
| 2.2.1.4. Stückformen | 15 |
| 2.2.1.5. Porenzahl und -zustand | 16 |
| 2.2.2. Literatursauswertung | 17 |
| 2.2.3. Zusammenfassung des Wissensstandes zum Setzungsverhalten von Abfallkörpern | 31 |
| 3. VERSUCHE..... | 32 |
| 3.1. Modellvorstellung und Arbeitsprogramm | 32 |
| 3.1.1. Modellvorstellung | 32 |
| 3.1.2. Ziel der Untersuchung..... | 36 |
| 3.1.3. Arbeitsprogramm und Materialauswahl..... | 38 |
| 3.2. Beschreibung der Versuchsmaterialien | 45 |
| 3.2.1. Allgemeines..... | 45 |
| 3.2.2. Chemische Analysen und biologische Stabilität der Grundmaterialien..... | 45 |
| 3.2.3. Physikalische Kenngrößen | 46 |
| 3.2.3.1. Bestimmungsmethoden | 46 |
| 3.2.3.2. Grundmaterialien..... | 47 |
| 3.2.3.3. Zusätze | 52 |
| 3.3. Versuchsgeräte | 54 |
| 3.3.1. Standardödometeter..... | 55 |
| 3.3.2. Ödometer Ø 60 cm..... | 56 |
| 3.3.3. Ödometer Ø 23 cm..... | 59 |
| 3.3.4. Übergreifende Betrachtungen bei den Versuchsgeräten | 63 |
| 3.3.4.1. Wandreibung | 63 |
| 3.3.4.2. Auflasteinheit | 72 |
| 3.3.4.3. Messgenauigkeit der vertikalen Verformung | 73 |
| 3.4. Durchgeführte Versuche..... | 75 |

| | |
|--|------------|
| 4. ERGEBNISSE | 80 |
| 4.1. Nicht-volumenkonstante Verformung fester Bestandteile während des Versuches..... | 80 |
| 4.2. Einfluss der Abfallzusammensetzung auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern | 91 |
| 4.2.1. Allgemeines..... | 91 |
| 4.2.2. Versuchsergebnisse | 91 |
| 4.3. Versuchstechnischer Nachweis der nicht-ausschließlichen Anwendbarkeit der Konsolidationstheorie zur Erklärung des Setzungsverhaltens von Abfallkörpern | 97 |
| 4.4. Einfluss der Größenverhältnisse zwischen maximaler Stückgröße und Geräteabmessung auf die Ergebnisse im Ödometerversuch..... | 101 |
| 4.4.1. Allgemeines..... | 101 |
| 4.4.2. Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse | 102 |
| 4.4.2.1. Allgemeines..... | 102 |
| 4.4.2.2. Versuchsreihe 1 und 2 | 104 |
| 4.4.2.3. Versuchsreihe 3 | 107 |
| 4.4.2.4. Versuchsreihe 4 | 107 |
| 4.4.3. Einfluss auf die absoluten Ergebnisse | 108 |
| 4.4.3.1. Allgemeines..... | 108 |
| 4.4.3.2. Versuchsreihe 1 | 108 |
| 4.4.3.3. Versuchsreihe 1, 3 und 4 | 112 |
| 4.4.4. Zusammenfassende Betrachtung..... | 115 |
| 4.5. Ergebniszusammenfassung und –bewertung..... | 117 |
| 5. ZUSAMMENFASSUNG | 124 |
| 6. LITERATUR | 129 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|---|----|
| Abb. 2.1-1: | Vertikaler Schnitt durch zwei sich berührende Bodenteilchen [modifiziert nach MITCHEL (1993)]..... | 4 |
| Abb. 2.1-2: | Zeitliche Abfolge der Setzungsarten | 6 |
| Abb. 2.1-3: | Modell zur Konsolidationstheorie (aus Schulze/muhs 1967)..... | 9 |
| Abb. 2.2-1: | Abfallzusammensetzung verschiedener Frischabfälle bzw. Abfälle aus Bohrungen an bestehenden Deponien [modifiziert nach COLLINS et al. (1997)] | 13 |
| Abb. 2.2-2: | Stückgrößenverteilung verschiedener Frischabfälle bzw. von Abfällen aus Bohrungen an bestehenden Deponien | 14 |
| Abb. 2.2-3: | Dimensionsverteilung verschiedener Frischabfälle bzw. von Abfällen aus Bohrungen an bestehenden Deponien [modifiziert nach COLLINS et al. (1997)]. | 15 |
| Abb. 2.2-4: | Anteil der Deponien, an denen vertikale Verformungsmessungen durchgeführt werden, bezogen auf die Grundgesamtheit der 20 annähernd vollständig ausgefüllten Fragebögen von 449 Befragungen (aus JESSBERGER et al. (1995)) | 18 |
| Abb. 2.2-5: | Setzungsmessungen an der Deponie Wiesbaden (aus GERTLOFF 1993)..... | 20 |
| Abb. 2.2-6: | Zeit-Setzung-Kurve des Versuches 120/1/1 der Laststufe 800 kN/m ² [aus COLLINS und RAMKE (1986)]..... | 23 |
| Abb. 2.2-7: | Zeit-Setzungsverlauf eines Großödometersversuches [aus JESSBERGER und KOCKEL (1993)];..... | 25 |
| Abb. 2.2-8: | Setzungsabschätzung mit Meßwerten aus Laborversuchen (a) und Setzungsprognose mit fortschreitender In-Situ-Beobachtungsdauer (b und c) [aus GDA-Empfehlungen (1997)]...... | 26 |
| Abb. 2.2-9: | Kompressionsapparatur nach SOLER (1995) | 27 |
| Abb. 2.2-10: | Setzungsprognose basierend auf Parametern aus Laborversuchen und Anwendung verschiedener Setzungstheorien und Vergleich mit den In-Situ-Messungen unter einer Probelastung [aus Rao et al. (1997)]..... | 30 |
| Abb. 3.1-1: | Modellvorstellung des aus der nicht-volumenkonstanter Verformung resultierenden Setzungsanteils..... | 33 |
| Abb. 3.1-2: | Auswirkungen der Stückform verformbarer Bestandteile auf das Setzungsverhalten..... | 34 |
| Abb. 3.1-3: | Modellvorstellung der durch faser- oder folienförmige Bestandteile hervorgerufenen Spannungumlagerung | 35 |
| Abb. 3.1-4: | Chemische Reaktionsgleichung des mikrobiellen Abbaus von Glucose unter aeroben (a) und anaeroben (b) Bedingungen..... | 36 |
| Abb. 3.1-5: | Schematische Versuchskonzeption zur Bestimmung des Einflusses einzelner Setzungsprozesse auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern..... | 39 |
| Abb. 3.1-6: | Schematische Versuchskonzeption zur Bestimmung des Einflusses der Größenverhältnisse zwischen Abfallstückgröße und Geräteabmessung bzw. der Größenverhältnisse der Geräteabmessungen..... | 44 |

| | | |
|---------------|--|----|
| Abb. 3.2-1: | Stückgrößenverteilung für die Grundmaterialien NW und R..... | 48 |
| Abb. 3.2-2: | Dimensionsverteilung des Grundmaterials NW | 49 |
| Abb. 3.2-3: | Proctorkurven für die Grundmaterialien NW und R | 50 |
| Abb. 3.2-4: | Beziehung zwischen Materialdichte und Wassergehalt bzw. Einbaudichte bei der Verwendung des Luftpyknometers nach Loebell und Untersuchung des Grundmaterials R. | 52 |
| Abb. 3.3-1: | Standardödometernach DIN 18135 (Entwurf), \varnothing 10 cm [aus „Smoltczyk (1990)] | 56 |
| Abb. 3.3-2: | Quer- und Vertikalschnitt durch ein Ödometern \varnothing 60 cm | 58 |
| Abb. 3.3-3: | Anordnung der Ödometern \varnothing 60 cm inklusive Hydraulikeinrichtung..... | 59 |
| Abb. 3.3-4: | Schnitt durch einen Ödometerversuchsstand \varnothing 23 cm..... | 61 |
| Abb. 3.3-5: | Schnitt durch einen Ödometerring \varnothing 23 cm mit Abfallprobe..... | 62 |
| Abb. 3.3-6: | Anordnung der Ödometern \varnothing 23 cm und Hydraulikeinrichtung | 62 |
| Abb. 3.3-7: : | Ermittlung des Wandreibungsanteils in Abhängigkeit vom Verhältnis d/h, vom Produkt $\mu \cdot \lambda_0$ und von der Belastung für drei verschiedene Bodenarten [aus SCHULTZE, MUHS (1958)]..... | 64 |
| Abb. 3.3-8: | Skizze des Versuchsstandes zur Bestimmung der Wandreibung der Ödometern \varnothing 23 | 66 |
| Abb. 3.3-9: | Wandreibung der Ödometern \varnothing 120 in Abhängigkeit von der Auflast [Modifiziert nach COLLINS und RAMKE (1986)]..... | 71 |
| Abb. 3.4-1: | Grafische Darstellung der durchgeführten Versuche zur Bestimmung des Einflusses der ausschließlichen Anwendbarkeit der Konsolidationstheorie, der Abfallzusammensetzung, der nicht-volumenkonstanten Verformung und der Stückform auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern..... | 77 |
| Abb. 3.4-2: | Grafische Darstellung der durchgeführten Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Verhältnissgrößen zwischen Abfallstück- und Geräteabmessungen auf das Ergebnis von Ödometerversuchen | 79 |
| Abb. 4.1-1: | Materialdichte des Grundmaterials R vor dem Versuch sowie nach der 1., 2. und 3. Laststufe (250, 500 und 1000 kN/m ²) im Versuch V27 | 82 |
| Abb. 4.1-2: | Räumliche Darstellung von Holz und Bast eines Nadelbaumes (Lärche) [Aus GROSSER (1997)] | 87 |
| Abb. 4.1-3: | Strang- und nesterförmige Verteilung der Rohdichte in einem Rotbuchenstammabschnitt [aus KOLLMANN (1982)] | 88 |
| Abb. 4.1-4: | Struktur eines Cellulosemoleküls | 88 |
| Abb. 4.2-1: | Zeit-Setzungsverlauf der Versuche V5_1 und V5_2 mit dem Grundmaterial R | 92 |
| Abb. 4.2-2: | Zeit-Setzungsverläufe der Versuche mit den quaderförmigen (R+G) und folienförmigen (R+P) Zusätzen, | 96 |
| Abb. 4.3-1: | Zeit-Setzungsverlauf in den Ödometern \varnothing 23 cm, Materialien: R+S (V17) und R+T (V18), 1. LS: 250 kN/m ² ; 2. LS: 500 kN/m ² ; 3. LS: 1000 kN/m ² | 99 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Abb. 4.3-2: | Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V21_2 (R+S (40 %)) im Ödometern \varnothing 23 cm,..... | 100 |
| Abb. 4.4-1: | Zeit-Setzungsverlauf der ersten Laststufe der Parallelversuche V29_1 und V29_2 (H = 18 cm);..... | 105 |
| Abb. 4.4-2: | Stützgerüsteffekt bei geringen Größenverhältnissen zwischen Probenhöhe und maximaler Stückgröße des Abfallstückes..... | 106 |
| Abb. 4.4-3: | Auf die Ausgangshöhe der jeweiligen Laststufen bezogene Setzung der Versuche in den Ödometern \varnothing 23 cm bei unterschiedlichen Probenhöhen als Funktion der mittleren Spannung..... | 110 |
| Abb. 4.4-4: | Steifemodul der Versuche in den Ödometern \varnothing 23 cm bei unterschied- lichen Probenhöhen als Funktion der mittleren Spannung..... | 111 |
| Abb. 4.4-5: | Setzung der Versuche in den Ödometern \varnothing 23 cm bei unterschiedlichen Probenhöhen als Funktion der Probenhöhe bei Versuchsbeginn | 112 |
| Abb. 4.4-6: | Mit polynomischer Ausgleichsfunktion berechnete Steifemoduli der Versuche in den Ödometern \varnothing 23 cm und 60 cm als Funktion der Spannung | 114 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tab. 3.2-1: | Beschreibung der Grundmaterialien – biochemischer Zustand | 46 |
| Tab. 3.2-2: | Wasserdurchlässigkeitsbeiwert, Proctorkennwerte und Materialdichte für die Grundmaterialien NW und R | 50 |
| Tab. 3.2-3: | Steifemoduli der Einzelstücke und des Stück-Poren-Gemenges der Zusatzstoffe | 54 |
| Tab. 3.3-1: | Verhältnis von Durchmesser zu Probenhöhe für verschiedene Ödometer..... | 65 |
| Tab. 3.3-2: | Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Wandreibung der Ödometer Ø 23..... | 67 |
| Tab. 3.3-3: | Reibungsbeiwert μ für die Ödometer mit Reduzierung der Wandreibung durch eine geschmierte doppelte Teflonfolie | 68 |
| Tab. 3.3-4: | Unter Ansatz des aktiven Erddruckes berechnete Wandreibungskräfte und der Quotient der gemessenen zu den berechneten Wandreibungskräften im Ödometer Ø 23 mit doppelter geschmierter Teflonfolie..... | 69 |
| Tab. 3.3-5: | Anteil der Wandreibungskraft an der vertikal eingeleiteten Kraft sowie die resultierenden in der Abfallprobe wirkenden Spannungen für eingeleitete Spannungen von 250, 500 und 1000 kN/m ² | 72 |
| Tab. 3.3-6: | Absolute und auf die Probenhöhe bezogene Messgenauigkeiten in den Ödometern Ø 10, 23 und 60 cm sowie nach DIN 18135 (Entwurf) und der Ö-Norm B 4420..... | 74 |
| Tab. 3.4-1: | Zusammenstellung der durchgeführten Versuche zur Bestimmung des Einflusses der ausschließlichen Anwendbarkeit der Konsolidationstheorie, der Abfallzusammensetzung, der nicht-volumenkonstanten Verformung und der Stückform auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern | 76 |
| Tab. 3.4-2: | Zusammenstellung der durchgeführten Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Verhältnisgrößen zwischen Abfallstück- und Geräteabmessungen auf das Ergebnis von Ödometerversuchen..... | 78 |
| Tab. 4.1-1: | Luftporenvolumina und fiktive Materialdichten am Versuchsende | 81 |
| Tab. 4.1-2: | Verhältnis des Gewichtsanteiles von Weich- zu Hartkunststoffen der von COLLINS et al. (1997) untersuchten mechanisch-biologisch behandelten Abfälle..... | 85 |
| Tab. 4.2-1: | Steifemoduli der Versuche V5, V6 und V12 nach 24 Stunden Belastungsdauer je Laststufe | 92 |
| Tab. 4.2-2: | Steifemoduli der Versuche mit Inertzusätzen sowie zum Vergleich des Grundmaterials R | 93 |
| Tab. 4.2-3: | Steifemoduli der Versuche mit Organik- und Holzzusätzen sowie zum Vergleich des Grundmaterials R | 94 |
| Tab. 4.2-4: | Steifemoduli der Versuche mit weichen Kunststoffen sowie zum Vergleich des Grundmaterials R..... | 95 |
| Tab. 4.3-1: | Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Materialien R, R+S (20% und 40%) und R+T (20% und 40%)..... | 98 |
| Tab. 4.4-1: | Variationskoeffizient und relativer Variationskoeffizient für jede Probenabmessung und jedes Grundmaterial | 103 |

Verzeichnis der häufig verwendeten Abkürzungen und Symbole

Geometrischen Größen:

| | | |
|------------------|---|------|
| D: | Durchmesser der Probe | [cm] |
| H: | Höhe der Probe | [cm] |
| D _s : | Durchmesser der Abfallbestandteile | [cm] |
| S: | Setzung | [cm] |
| ε: | Auf die Ausgangshöhe der Probe vor jeder Laststufe bezogene Setzung | [-] |

Spannungen und daraus resultierende Rechenwerte:

| | | |
|--------------------|--|----------------------|
| E _s : | Steifemodul | [kN/m ²] |
| σ: | Vertikale totale Spannung | [kN/m ²] |
| σ _{eff} : | Effektive vertikale Spannung, die in der Probe wirkt | [kN/m ²] |
| φ: | Reibungswinkel | [°] |

Materialabkürzungen:

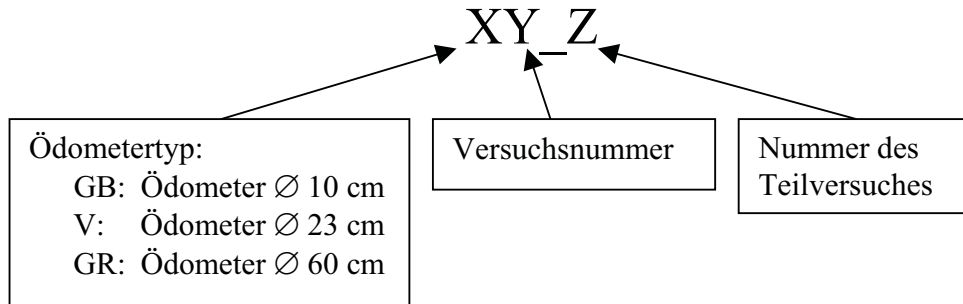
| | |
|---------------------|--------------------------------------|
| R: | Grundmaterial 1 |
| NW: | Grundmaterial 2 |
| NW _{ges} : | Grundmaterial 2, gesiebt auf < 8 mm |
| NW _{gem} : | Grundmaterial 2, gemahlen auf < 8 mm |
| T: | Bindiger Inertstoff (Ton) |
| S: | Rolliger Inertstoff (Sand) |
| G: | Quaderförmiger Kunststoff |
| P: | Folienförmiger Kunststoff |
| O: | Frische biologisch abbaubare Organik |
| H: | Holz |

Bezeichnungen aus der Literatur:

Bei der Verwendung von Bezeichnungen aus der Literatur werden diese im Original wiedergegeben und jeweils erläutert.

Verzeichnis der häufig verwendeten Bezeichnungen und Definitionen

Bezeichnungen der Versuche:



Beispiel: V5_2: Versuch Nummer 5 im Ödometer Ø 23 cm; Teilversuch 2

Abfalltechnische Definition:

Der Wassergehalt wird auf die Feuchtsubstanz bezogen. Dies wird durch das Kürzel (FS) hinter der Wassergehaltsangabe verdeutlicht. Der Wassergehalt berechnet sich zu

$$WG = \frac{M_w}{M_f} * 100 \quad [\%]$$

mit: WG : Wassergehalt M_w : Masse des Wassers M_f : Masse der Feuchtsubstanz

1. Einleitung

Vor der Errichtung von Bauwerken werden die zukünftigen Setzungen des Untergrundes unter der zusätzlichen Auflast durch das Bauwerk berechnet. Diese Berechnungen werden vor allem mit dem Ziel durchgeführt, mögliche Schäden durch Setzungen des Untergrundes an den Bauwerken zu erkennen und diese vorab durch geeignete Konstruktionen oder Ertüchtigungen des Untergrundes zu vermeiden. Die Baustoffe der Bauwerke weisen in der Regel nur sehr geringe eigene Setzungen auf.

Siedlungsabfalldeponien reagieren auf eine Auflasterhöhung hingegen, zusätzlich zu den Setzungen des Untergrundes, mit eigenen internen Setzungen. Die Setzungen betragen dabei oft mehr als 20 % der Ausgangshöhe (KÖLSCH 1994), was für große Deponien, wie z. B. die Zentraldeponie Hannover mit einer Einlagerungshöhe von bis zu 60 m, Setzungen von mehreren Metern bedeutet. Die Betrachtung der Setzungen des Abfallkörpers war in früheren Jahren in Deutschland meist nur von Interesse, um das einzulagernde Abfallvolumen in der vorgegebenen Geometrie der Deponie abschätzen zu können. Diese Frage nach dem noch zur Verfügung stehenden Einlagerungsvolumen konnte durch Oberflächenvermessungen mit ausreichender Genauigkeit beantwortet werden. Eine Berechnung der zukünftigen Setzungen des Abfallkörpers war von untergeordnetem Interesse. Eine spätere Wiedernutzung der Deponie, z. B. als Untergrund für Verkehrsbauten, wurde nicht in Betracht gezogen.

Mit der Einführung der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASi, 1993) im Jahre 1993 änderte sich diese Situation in Deutschland entscheidend, da die TASi eine Oberflächenabdichtung für alle noch in Betrieb befindlichen Deponien vorschreibt. Die Oberflächenabdichtung ist, sofern kein Nachweis der Gleichwertigkeit anderer Lösungsmöglichkeiten erbracht wird, als Kombinationsabdichtung in der TASi verankert. Dadurch soll der Eintrag von Niederschlag in den Deponiekörper und die damit verbundene Neubildung von Sickerwasser, sowie die unregelmäßige Emission von Gas aus dem Deponiekörper unterbunden/minimiert werden. Da die Funktion der Oberflächenabdichtung durch Setzungen des Untergrundes, der in diesem Falle durch den Abfallkörper gebildet wird, eingeschränkt bzw. aufgehoben werden kann, ist eine möglichst exakte Prognose der Setzungen des Abfallkörpers erforderlich.

In vielen Ländern ist der Deponiebetrieb gekennzeichnet durch zum Teil tägliche Abdeckung des Abfalls mit Bodenmaterial. Durch die in der Regel geringere hydraulische Leitfähigkeit der Abdeckschicht gegenüber dem Abfall kann es in den Abfallsschichten zu Porenwasserdrücken kommen. Bilden sich in den Bodenschichten Setzungsrisse, so können eingestaute

Wasservolumina relativ zügig abfließen und so in großen Abschnitten von Deponien die Porenwasserdrücke deutlich erhöhen (KÖLSCH (2000b)). Dadurch kommt es zu einer Reduzierung der Scherfestigkeit des Abfalls und die Standsicherheit des Deponiekörpers ist gefährdet. Es kann, wie 1996 im Falle der Deponie Rumpke in den USA zum Abrutschen großer Abfallmassen (1,2 Mio m³) kommen (KÖLSCH, 2000a).

Für Abfallkörper (Deponien) existiert bisher keine einheitliche Versuchsanordnung zur Bestimmung der setzungsrelevanten Parameter und auch kein spezielles Berechnungsverfahren zur Bestimmung der zukünftig zu erwartenden Setzungen. Zur Zeit ist es üblich bodenmechanische Ansätze auf den Abfall zu übertragen. Einige Voraussetzungen für die Anwendung der bodenmechanischen Ansätze, wie z. B. die annähernd unendliche Steifigkeit der Körner, treffen auf Siedlungsabfälle jedoch nicht zu. Deshalb können bisher unter Ansatz der bodenmechanischen Theorien nur Setzungsabschätzungen für Deponien erstellt werden. Diese Abschätzungen müssen durch wiederkehrende Verformungsmessungen an Deponien überprüft werden. Mit den Ergebnissen jeder neuen Verformungsmessung wird dann mit mathematischen Modellen eine verbesserte Setzungsprognose erstellt. Dies bedeutet einen großen Mess- und Rechenaufwand sowie kaum aussagefähige Ergebnisse zu Beginn des Betrachtungszeitraumes. Die physikalischen Ursachen für die Setzungen sowie die Abhängigkeit von den in der Deponie herrschenden Randbedingungen werden dabei nicht berücksichtigt. Eine zuverlässige Prognose, auch bei Änderung der Randbedingungen, ist somit nicht möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit soll daher das Setzungsverhalten von Abfall untersucht werden, um den Einfluss spezieller physikalischer Eigenschaften einzelner Bestandteile oder Stoffgruppen des Abfalls zu bestimmen. Weiterhin sollen Anhaltspunkte zum Einsatz der erforderlichen Probenabmessungen für Druck-Setzungsversuche erarbeitet werden. Damit sollen die ersten Schritte für die Erarbeitung einer auf den physikalischen Grundlagen basierenden Setzungsprognose für Abfallkörper durchgeführt werden.

2. Stand des Wissens

2.1. Geotechnische Grundlagen

2.1.1. *Vorbemerkung*

Bei der Betrachtung von Setzungen von Abfallkörpern werden in der Regel Grundlagen zum Setzungsverhalten von Böden auf den Abfall übertragen. Es werden daher in diesem Kapitel die für das Verständnis des Setzungsverhaltens von Boden notwendigen Grundlagen dargestellt. Dabei werden, abweichend von der Nomenklatur dieser Arbeit, die Originalbezeichnungen der verschiedenen Autoren übernommen. Die Bezeichnungen von Einflussgrößen durch Buchstaben wie auch die verwendeten Dimensionen werden deshalb stets erläutert.

2.1.2. *Mechanismen der Kraftübertragung in Böden*

Die Geotechnik ist eines der fundamentalen Fachgebiete des Bauingenieurwesens, da bei jeder Bautätigkeit eine Veränderung des anstehenden Bodens stattfindet. In der Regel führen Bautätigkeiten zu Spannungsänderungen im Boden.

Bei der Errichtung von Bauwerken werden zusätzliche Spannungen in den Boden eingeleitet. Diese breiten sich im elastischen Halbraum aus und verursachen eine Spannungserhöhung und eine vertikale Verformung des Bodenelementes (Setzung). Die zusätzliche Spannung - bzw. bezogen auf die Fläche - die zusätzlich wirkende Kraft wird maßgeblich über zwei Mechanismen abgetragen:

- Porenwasserdruckkräfte und
- Interpartikuläre Kräfte

Die zwei Kraftübertragungsmechanismen lassen sich veranschaulichen, wenn ein vertikaler Schnitt durch zwei sich berührende Bodenteilchen (In Abb. 2.1-1 als Rechteckformen dargestellt), die vollständig von Wasser umgeben sind, betrachtet wird. Die Kontaktfläche der beiden Bodenteilchen wird als a_c bezeichnet, die gesamte umschlossene horizontale Fläche als a . Wird eine zusätzliche Spannung auf den Boden aufgebracht, so ergibt sich die über den Bodenausschnitt vertikal abzuleitende Kraft aus der Multiplikation der Spannung mit der Gesamtfläche, die von den Bodenteilchen umschlossen wird.

Die interpartikulären Kräfte setzen sich zusammen aus anziehenden und abstoßenden Kräften zwischen den festen Bestandteilen. Sie bestehen hauptsächlich aus:

- Elektrostatischen Anziehungskräften (z. B. Van der Waals-Kräften) (A),
- Elektrostatischen Abstoßungskräften (C) und
- Primären Valenzbindungen und Zementierungen (A')

Die elektrostatischen Anziehungskräfte A wirken auf der Fläche $a-a_c$. Die elektrostatischen Abstoßungskräfte und die primären Valenzbindungen wirken auf der Kontaktfläche a_c .

Der Porenwasserdruck u wirkt auf der Fläche $a-a_c$.

Interpartikuläre Kräfte aufgrund elektromagnetischer Anziehung und Abstoßung sowie aufgrund von Kapillarkräften werden bei dieser Betrachtung vernachlässigt, da sie einzelfall-spezifisch sind.

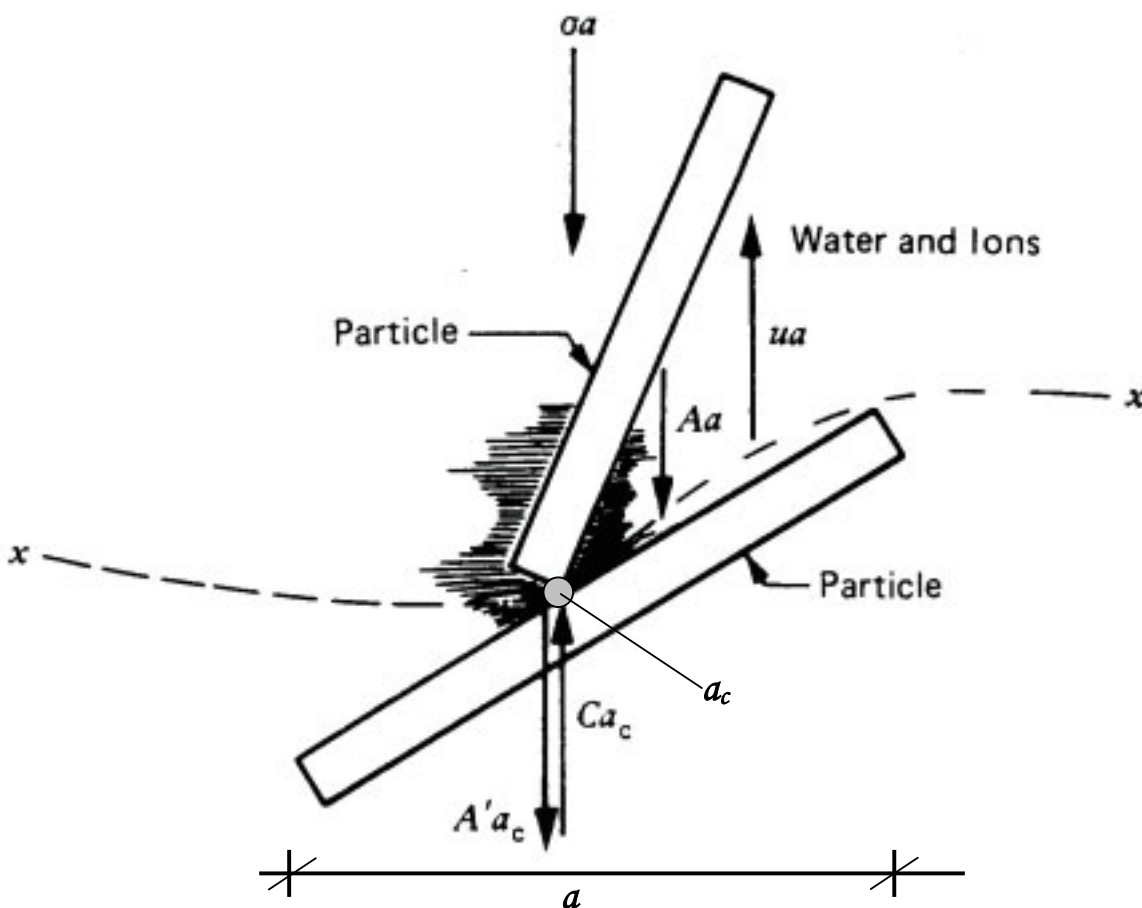


Abb. 2.1-1: Vertikaler Schnitt durch zwei sich berührende Bodenteilchen [modifiziert nach MITCHEL (1993)]

- | | |
|---|--------------------------------|
| A: Elektrostatische Anziehungskräfte; | A': Primäre Valenzbindungen; |
| C: Elektrostatische Abstoßungskräfte; | a: Gesamte horizontale Fläche; |
| a_c : Kontaktfläche; u: Porenwasserdruck; | |
| σ : Vertikale Spannung | |

Die Aufsummierung aller vertikaler Kräfte führt zu

Gleichung 2.1-1

$$\sigma a + A(a - a_c) + A'a_c = u(a - a_c) + Ca_c$$

Da die Kontaktfläche a_c sehr viel kleiner als die Gesamtfläche a ist, kann der Term $(a - a_c)$ ungefähr zu a angenommen werden. Damit vereinfacht sich Gleichung 2.1-1 zu

Gleichung 2.1-2

$$\sigma a + Aa + A'a_c = ua + Ca_c$$

Bei Division durch die Gesamtfläche a erhält man die auf die Gesamtfläche bezogenen Spannungen.

Gleichung 2.1-3

$$\sigma = (C - A') \frac{a_c}{a} + u - A$$

Der Term $(C - A') \frac{a_c}{a}$ beschreibt die Spannungen, die über den direkten Korn zu Korn-Kontakt übertragen werden, also den in der Bodenmechanik als effektive Spannung σ' bezeichneten Spannungsanteil (Intergranularer Druck). Gleichung 2.1-3 lässt sich daher schreiben zu

Gleichung 2.1-4

$$\sigma = \sigma' + u - A$$

Die durch die elektrostatischen Kräfte übertragenen Spannungen werden bei bodenmechanischen Betrachtungen meist vernachlässigt, so dass sich Gleichung 2.1-4 vereinfacht ergibt zu:

Gleichung 2.1-5

$$\sigma = \sigma' + u$$

2.1.3. *Setzungen*

2.1.3.1. **Allgemeine Betrachtungen**

Das Aufbringen einer zusätzlichen Spannung auf den Boden verursacht nicht nur eine Erhöhung der Spannung im Boden sondern ebenfalls eine Volumenänderung. Die vertikale Komponente der Volumenänderung wird als Setzung bezeichnet. Die Setzungen werden, bei Annahme starrer Körner, hervorgerufen durch die Kompression des Luftporenvolumens und durch das Auspressen von Porenluft und/oder Porenwasser. Durch die Verringerung des Porenvolumens kommt es zu einer Umlagerung der Körner. Bei sehr großen Spannungen

kann es bei Erreichen der Kornfestigkeit zu einem Kornbruch und damit zu einer weiteren Kornumlagerung und Verminderung des Porenvolumens kommen.

Generell wird der gesamte Setzungsverlauf in mehrere zeitlich aufeinander folgende Setzungsprozesse untergliedert. Dabei werden die einzelnen Setzungsarten oder -anteile eingeteilt in Sofortsetzung, Primärsetzung und Sekundärsetzung (Abb. 2.1-2). Nach Beendigung der Sekundärsetzung tritt ein Setzungsstillstand ein (COLLINS/RAMKE 1986). Bei der Betrachtung der Setzungen von Böden ist die Unterscheidung von bindigen und nichtbindigen (rolligen) Böden üblich, da die beschriebenen Einzelprozesse einen unterschiedlichen quantitativen Anteil an den Gesamtsetzungen besitzen.

Nach KOPF (1991) können bei bindigen Böden, die sich in Oberflächennähe oberhalb des Grundwasserspiegels befinden, noch zusätzliche Setzungen infolge der Austrocknung des Materials auftreten. Diese Setzungen können zeitparallel zu den Primär- und Sekundärsetzungen erfolgen. Sie sind jedoch gesondert zu betrachten, da sie auf einer anderen Ursache basieren. Ein Ansatz zur Beschreibung der Ursachen ist bei KOPF (1991) veröffentlicht.

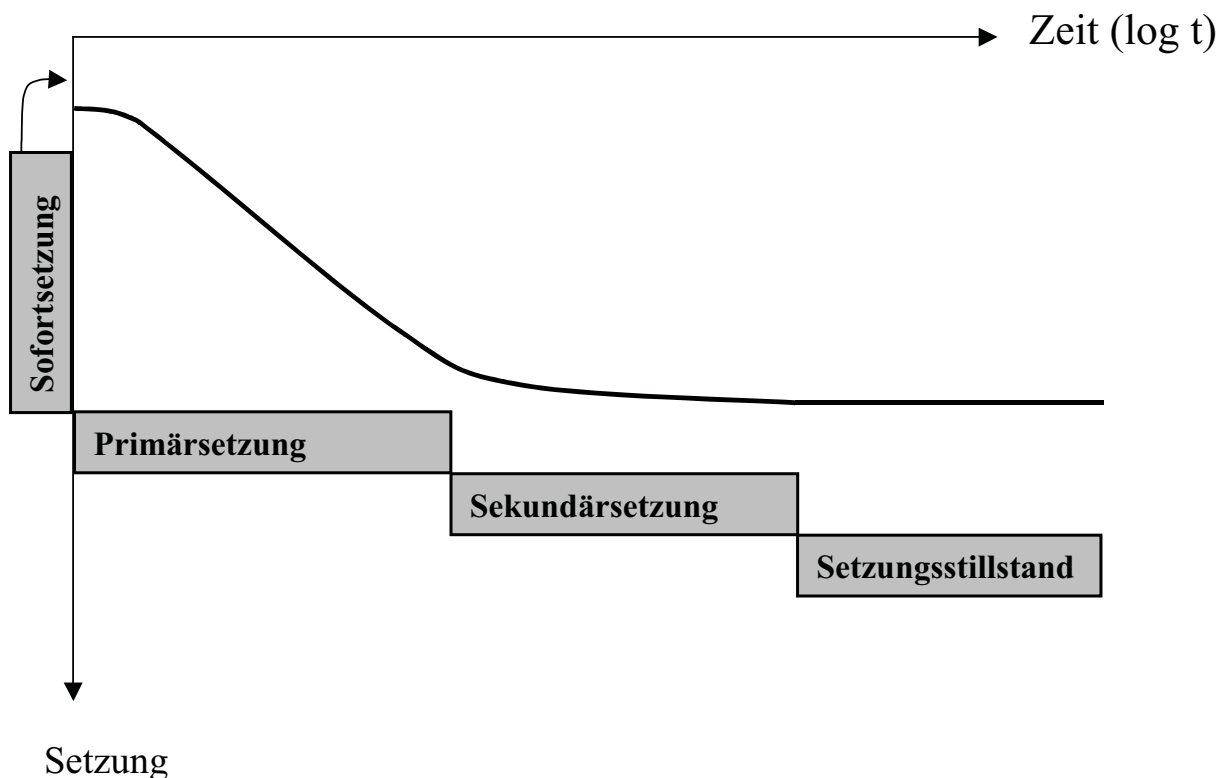


Abb. 2.1-2: Zeitliche Abfolge der Setzungsarten

Die Sofortsetzung eines als wassergesättigt angenommenen Bodens resultiert aus einer volumentreuen Gestaltsänderung unter Auflast ohne zeitliche Verzögerung. Dabei wird ein statisch stabilerer Zustand angestrebt. Bei teilgesättigten Böden kann unmittelbar bei Lastaufbringung eine Volumenveränderung auftreten (GUßMANN 1990), da die in den Poren befindliche Luft kompressibel ist.

Unter Primärsetzung werden die Setzungen verstanden, die infolge des Auspressens von nicht gebundenem Porenwasser entstehen (GUßMANN 1990). Bei rolligen Böden treten aufgrund der hohen Durchlässigkeit die Primärsetzungen bereits zum Zeitpunkt der Lastaufbringung auf (RODATZ 1992), so dass hier nicht zwischen Sofort- und Primärsetzung unterschieden werden kann. Im üblichen bodenmechanischen Sprachgebrauch werden Setzungen, „die durch eine Abnahme des Wassergehalts eines gesättigten Bodens verursacht werden, ohne dabei das Wasser durch Luft zu ersetzen“ als Konsolidation bezeichnet (TERZAGHI/JELINEK 1954).

Als Sekundärsetzung werden Setzungen infolge von viskosem Fließen (GUßMANN 1990) oder Kriechen (RODATZ 1992) bezeichnet. Während dieses Setzungsvorganges tritt kein messbarer Porenwasserdruck auf. „Empirisch ist über weite Zeitbereiche eine lineare Proportionalität zwischen der Setzung und $\log t$ [Anmerkung: Zeit im logarithmischen Maßstab im Zeit-Setzungs-Diagramm] ziemlich einheitlich feststellbar...“ (GUßMANN 1990).

Zusätzlich zu den Setzungen kann eine Sackung eintreten. Der Begriff Sackung wird für verschiedene Vorgänge verwendet. Bei mineralischen Böden ist mit einer Sackung die „Abnahme der Höhe einer teilgesättigten Probe bei Wasserzutritt ohne Änderung der äußeren Belastung“ (DIN 18135, Entwurf, 1999) gemeint. Diese Sackung wird in der Regel durch eine Wassergehaltserhöhung im Boden, die zu einer Reduzierung bzw. zu einem Verschwinden der scheinbaren Kohäsion führt, hervorgerufen. Dadurch wird eine Kornumlagerung ausgelöst, die zu einer plötzlichen Verringerung des Volumens und damit zu einer Erhöhung der Lagerungsdichte führt.

Bei Böden mit organischen Komponenten, wie z. B. bei Torf, wird auch die vertikale Verformung infolge von Entwässerung als Sackung bezeichnet.

Bei Abfall sowie bei organischen Böden kommt mit dem biologischen Abbau der organischen Substanz und dem damit verbundenen Masseverlust eine weitere Komponente der Sackung hinzu. Zusätzlich kann bei Abfällen noch eine Sackung aufgrund des Bruches von Hohlräumen, wie z. B. das Zerbrechen eines offenen Eimers, auftreten.

Die Gesamtsetzungen errechnen sich aus der Addition der einzelnen Setzungsanteile.

Gleichung 2.1-6

$$s = s_0 + s_1 + s_2 (+s_3)$$

s_0 : Sofortsetzung s_1 : Primärsetzung s_2 : Sekundärsetzung s_3 : Sackung

2.1.3.2. Konsolidationstheorie

Der in den Ödometern maßgeblich untersuchte Setzungsanteil ist die Primärsetzung, d. h. die Konsolidation. Daher soll in diesem Abschnitt die Konsolidationstheorie kurz erläutert werden.

Das Prinzip der Konsolidation lässt sich am einfachsten mit dem Modell von Terzaghi veranschaulichen (Abb. 2.1-3). Der Boden als Korngerüst mit wassergesättigtem Porenraum wird in folgender Weise modelliert:

Das Korngerüst wird als einzelne Kolben in einem Zylinder abgebildet, wobei die Kolben untereinander durch Federn gestützt sind. Zwischen den Kolben befindet sich Wasser, welches das Porenwasser beschreibt. Die Kolben haben Bohrungen, deren Anzahl pro Grundfläche eines Kolbens zusammen mit ihrem Durchmesser die Durchlässigkeit (= gesättigte hydraulische Leitfähigkeit) des Bodens modellieren. Die Steifigkeit der Federn gibt die Verformbarkeit des Bodens wider.

Es wird deutlich, dass bei einer großen Anzahl an Bohrungen pro Grundfläche der Kolben bzw. bei großem Durchmesser der Löcher das Wasser bei einer plötzlich aufgebrachten Last schnell durch die Löcher in den Platten entweicht und die Last durch die Federn aufgenommen wird. Es kommt dadurch zu einer Relativverschiebung der Platten zueinander, d. h. zu einer Setzung. Bei geringer Anzahl an Bohrungen pro Grundfläche der Platten bzw. bei kleinen Lochdurchmessern wird eine plötzlich aufgebrachte Last vorerst im Wesentlichen durch das Porenwasser aufgenommen, d. h. es entsteht ein Porenwasserdruck. Die unmittelbare Relativverschiebung der Platten ist gering. Aufgrund des langsamen Entweichens des Wassers durch die Löcher der Platten wird die Last zeitverzögert auf die Federn und damit das Korngerüst umgelagert. Durch das austretende Wasser findet eine Volumenreduktion und damit eine Setzung statt. Diese zeitverzögerte Volumenreduzierung bei plötzlich auftretender Last infolge Wasseraustritt wird als Konsolidation bezeichnet. Die Gesamtverschiebung der Platten ist bei gleicher Federsteifigkeit und derselben aufgebrachten Last in beiden Fällen gleich groß. Die Konsolidation wird nur bei bindigen Böden beobachtet, da diese eine geringe Durchlässigkeit besitzen. Bei rolligen Böden mit hoher Durchlässigkeit spielt die

Konsolidation eine untergeordnete Rolle, da das Wasser, wie oben beschrieben, sehr schnell entweichen kann und die Zusatzlast vom Korngerüst aufgenommen wird.

Die Spannungen, die durch das Korngerüst aufgenommen werden, werden als effektive Spannungen σ' , die durch das Porenwasser aufgenommenen Spannungen als Porenwasserdruck u bezeichnet. Die totale Spannung σ , die in jedem waagerechten Schnitt durch das betrachtete Bodenelement herrscht, setzt sich zusammen aus der effektiven Spannung und dem Porenwasserdruck und den elektrostatischen Kräften (s. Gleichung 2.1-4). Die elektrostatischen Kräfte werden bei praktischen Betrachtungen in der Regel vernachlässigt.

Mit der Konsolidationstheorie von Terzaghi können für eine eindimensionale Porenwasserströmung die effektiven Spannungen und die Porenwasserdrücke berechnet werden.

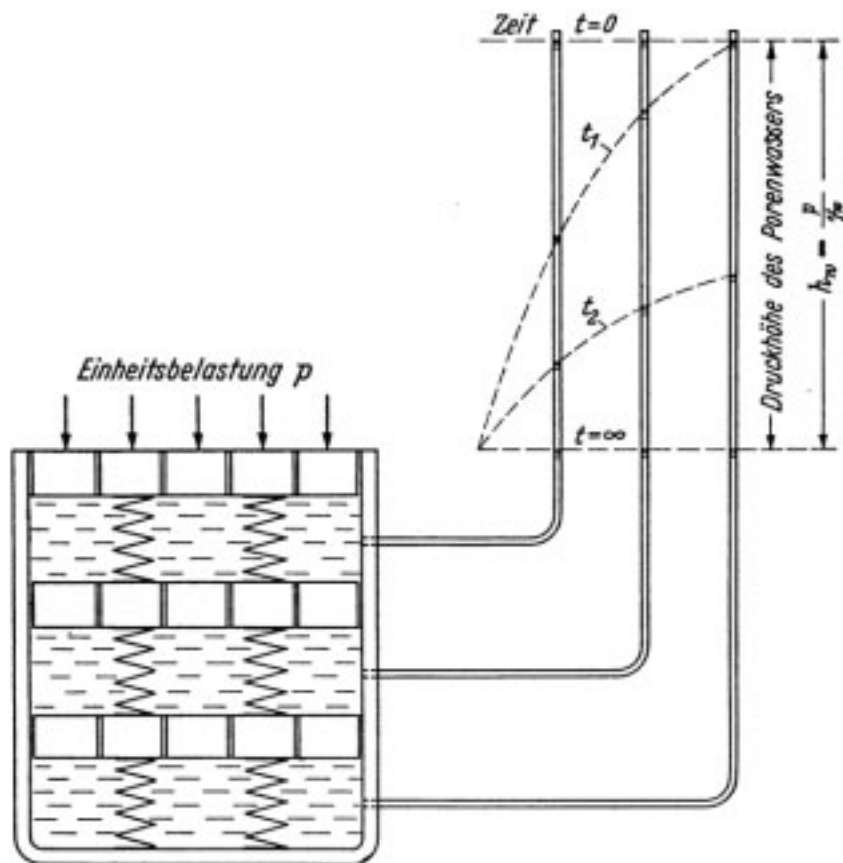


Abb. 2.1-3: Modell zur Konsolidationstheorie (aus SCHULZE/MUHS 1967)

Diese Berechnung kann jedoch nur durchgeführt werden, wenn folgende Voraussetzungen, welche die Grundlage der Konsolidationstheorie bilden, erfüllt sind:

1. Die Einzelkörner besitzen eine deutlich höhere Steifigkeit als das Korngerüst, so dass nur eine vernachlässigbar kleine elastische Verformung der Körner und kein Kornbruch eintritt (KEZDI 1968).
2. Das Wasser ist nicht kompressibel (TERZAGHI/JELINEK 1954)
3. Alle Poren sind wassergesättigt (SCHULZE/MUHS (1967)).
4. Zur Herleitung der eindimensionalen Konsolidationstheorie wird vorausgesetzt, dass für alle Fließvorgänge des Wassers das Gesetz von Darcy ($v=k*i$) gilt (KEZDI 1968). Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, beschrieben durch den Durchlässigkeitsbeiwert k , ist eine Materialkonstante (TERZAGHI/JELINEK 1954).
5. Sowohl die totalen als auch die effektiven Normalspannungen sind an jedem Punkt eines normal zur Belastungsrichtung befindlichen Schnittes und für jedes Stadium der Konsolidation gleich (TERZAGHI/JELINEK 1954).

Bei Böden ist der erste Punkt für praktische Anwendungen in der Regel erfüllt. Der Punkt 5 kann mit guter Näherung in den meisten praktischen Fällen der Bodenmechanik als gegeben angesehen werden (TERZAGHI/JELINEK 1954). Eine vollständige Wassersättigung aller Poren kann hingegen nicht immer vorausgesetzt werden. Bei nicht vollständiger Sättigung muss daher die Kompressibilität der Luftporen berücksichtigt werden. Des Weiteren gilt das Gesetz von Darcy nur für laminare Strömungen. Bei sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten bzw. turbulenten Strömungsverhältnissen, die lokal im Boden auftreten können, ist die lineare Beziehung zwischen gesättigter hydraulischer Leitfähigkeit und Fließgeschwindigkeit nicht gegeben.

Die Kompressibilität der Luftporen kann, z. B. nach MITCHEL (1993), durch die Erweiterung der Gleichung 2.1-5 um einen Term berücksichtigt werden. Die totalen Spannungen in einer Ebene und zu einem Zeitpunkt berechnen sich nach MITCHEL (1993) bei ungesättigten Verhältnissen - unter Vernachlässigung der elektrostatischen Anziehungskräfte - daher zu:

Gleichung 2.1-7

$$\sigma = \sigma' + u_a + \frac{a_w}{a_a} * (u_w - u_a)$$

σ : Totale Spannung
 u_a : Porenluftdruck

σ' : Effektive Spannung
 a_w : Wasserfläche

u_w : Porenwasserdruck
 a_a : Luftfläche

Die Gleichung 2.1-7 lässt sich auch schreiben als (MITCHEL 1993):

Gleichung 2.1-8

$$\sigma = \sigma' + u_a - \chi^* (u_a - u_w)$$

mit

Gleichung 2.1-9

$$\chi = \frac{a_w}{a}$$

Der Beiwert χ wird für trockene (vollkommen wasserungesättigte) Böden zu 0 und für gesättigte Böden zu 1.

KOPF (1991) beschreibt die Setzung einer oberhalb des Grundwasserspiegels befindlichen Masse mit einer negativen Exponentialfunktion. Dabei unterscheidet er Setzungen mit einem hydraulischen Gefälle von $i > 1$ und $i = 1$. Der Anteil der Setzungen mit einem hydraulischen Gefälle $i > 1$ kann in Laborversuchen ermittelt werden, der Anteil mit einem hydraulischen Gefälle $i = 1$ wird über die Annahme, dass beide Setzungsanteile zum Zeitpunkt des Setzungsstillstandes gleich groß sind näherungsweise berechnet. Da laut KOPF (1991) bereits während der Laborversuche Setzungen mit einem hydraulischen Gefälle = 1 auftreten, ist dieser Anteil bei der Berechnung der Gesamtsetzungen zu berücksichtigen.

Die beiden beschriebenen Darstellungsweisen zeigen, wie komplex die physikalischen Vorgänge des Setzungsverhaltens bereits bei Böden sind. Das Verformungsverhalten von wasserungesättigten oder wasserteilgesättigten Böden ist noch nicht vollständig untersucht. Dieses Thema ist zur Zeit ein Schwerpunkt der bodenmechanischen Forschungen, z. B. „Netzwerk Teilgesättigte Böden“ an der Bauhaus-Universität Weimar (SCHANZ (2000)) oder FREDLUND (1999), University of Saskatchewan, Kanada, so dass in Zukunft weitere Erkenntnisse zum wasserteilgesättigten Verformungsverhalten von Böden zu erwarten sind. Auf eine weiterreichende Darstellung des Verformungsverhaltens wasserteilgesättigter Böden wird hier deshalb verzichtet.

2.2. Setzungsverhalten von Abfallkörpern

2.2.1. *Abfalltechnische Besonderheiten*

2.2.1.1. Allgemeines

Die Theorien zum Setzungsverhalten von Böden beruhen auf den in Abschnitt 2.1.2 dargestellten Annahmen. Viele dieser Annahmen sind aufgrund der Eigenschaften von Siedlungsabfällen nicht auf diese übertragbar. In diesem Abschnitt sollen daher die material-spezifischen Besonderheiten von Abfall gegenüber Boden sowie Publikationen zum Setzungsverhalten von Abfallkörpern dargestellt werden.

2.2.1.2. Abfallzusammensetzung

Die Stückgröße der in der Bodenmechanik betrachteten Materialien schwankt, wenn von Felsen, die ein eigenes Fachgebiet (Felsmechanik) belegen, abgesehen wird, von $< 0,002$ mm (Ton) bis zu 63 mm (Kies). Körper mit einem Durchmesser zwischen 63 und 200 mm (Steine) sind in der Regel nicht Gegenstand bodenmechanischer Untersuchungen. Das mechanische Verhalten der Einzelstücke ist dabei einander ähnlich, die Einzelkörper werden als unverformbar und unzerbrechlich angenommen. Abfall hingegen setzt sich aus mehreren Stoffen unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften zusammen (Abb. 2.2-1). Dabei reicht die Spannweite von Metall mit ideal elastischen Eigenschaften (bei geringen Verformungen) und einem Steifemodul von 210.000 N/mm^2 bis zu Kunststoffen mit thermoplastischen oder viskoelastischen Eigenschaften, für deren Verformung nur ein Bruchteil der Spannungen notwendig ist, die für die Verformungen von Bodenkörnern benötigt wird (ROSTASY (1983)). Aufgrund der unterschiedlichen Spannungs-Verformungseigenschaften der Bestandteile kommt es zu Lastumlagerungsprozessen, so dass die Voraussetzung der Konsolidationstheorie, dass die effektiven Normalspannungen an jedem Ort eines waagerechten Schnittes gleich groß sind, für Abfallkörper nicht gilt.

Ein Versagen der Einzelstücke („Kornbruch“) kann aufgrund der inhomogenen Zusammensetzung des Abfalls sowohl durch Spröbruch und Scherbruch als auch durch plastisches Fließen oder andere Versagensmechanismen erfolgen. Die mechanischen Eigenschaften einiger Einzelfractionen sind bis heute nicht bekannt bzw. zum Teil noch innerhalb der Einzelfractionen sehr verschieden. Bei einigen Abfallbestandteilen verändern sich die mechanischen Eigenschaften weiterhin bei einer Veränderung der Temperatur sowie bei chemischen Beanspruchungen und durch die biologischen Umsetzungsprozesse.

In Abb. 2.2-1 sind einige gemäß GDA-EMPFEHLUNG E 1-7 klassifizierte Siedlungsabfälle dargestellt. Die Abfälle entstammen Regionen, in denen die getrennte Sammlung von Bioabfall bereits eingeführt war. Sie weisen daher, z. B. im Vergleich zur Erhebung im Rhein-Sieg-Kreis von 1994 (CICHONSKI (1998)), einen nur geringen Anteil an Organik auf. Im Falle des Rhein-Sieg-Kreises betrug der Organikanteil 34 %.

Bei der Betrachtung der Abfälle mit dem Kürzel „BS“ handelt es sich um Abfälle von der gleichen Deponie. Die Proben sind lediglich zu verschiedenen Zeitpunkten und an verschiedenen Stellen auf der Deponie entnommen worden. Die Zusammensetzung des Abfalls schwankt jedoch erheblich, wie auch die Gegenüberstellung der anderen unbehandelten Abfälle „GE“ und „KO“ zeigt. Die Abfälle „BS B“ und „GÖ B“ entstammen aus Bohrungen in Altkörpern.

Die Bohrung „BS B“ entstammt der gleichen Deponie wie die Abfälle „BS 1 bis 5“.

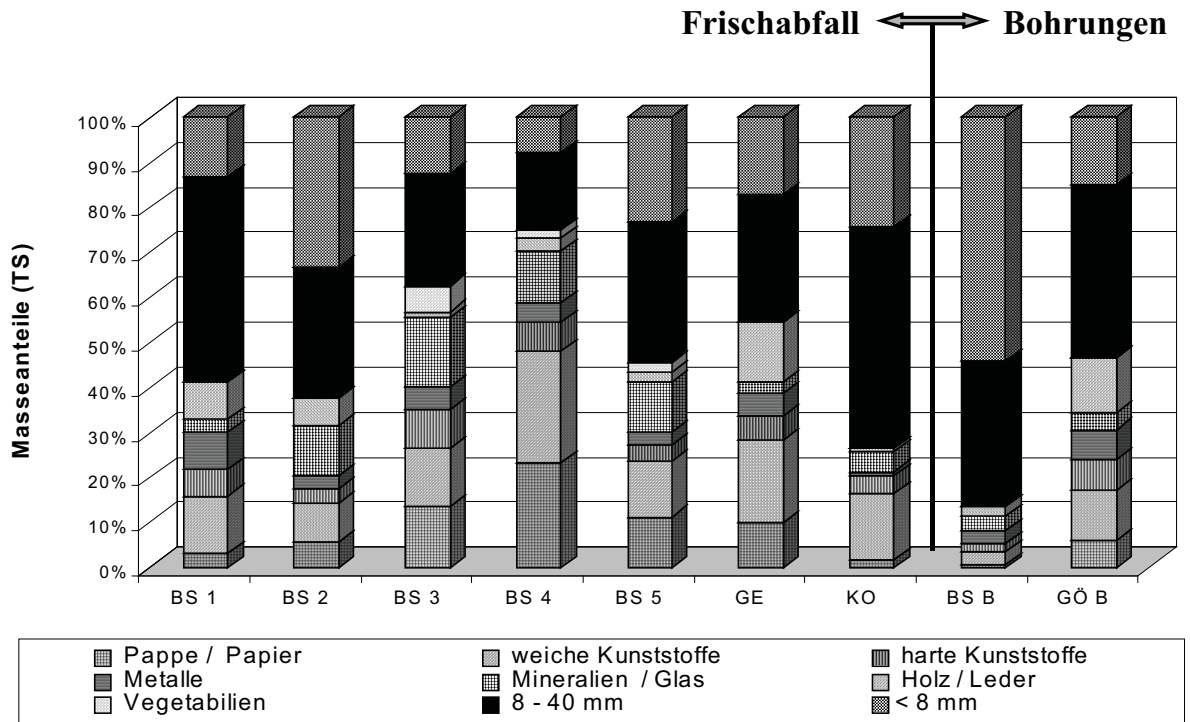


Abb. 2.2-1: Abfallzusammensetzung verschiedener Frischabfälle bzw. Abfälle aus Bohrungen an bestehenden Deponien [modifiziert nach COLLINS et al. (1997)]

2.2.1.3. Stückgrößen

Bei bodenmechanischen Untersuchungen werden in der Regel Böden mit einer Korngröße von < 63 mm betrachtet. Die Maximalstückgrößen von Abfällen in Deponien gehen jedoch weit über eine maximale Seitenlänge von 63 mm hinaus. Zum Teil betragen die maximalen Seitenlängen von Einzelteilen auf Deponien mehrere Meter (z. B. Teppiche). Einen Überblick über die Stückgrößenverteilung verschiedener am Leichtweiß-Institut untersuchter Abfälle gibt Abb. 2.2-2.

Aufgrund der großen Abmessungen von Stücken im Abfall ist es erforderlich in Laboruntersuchungen Versuchsgeräte einzusetzen, die die physikalischen Eigenschaften des In-Situ-Abfallkörpers repräsentativ wiedergeben. Diese Geräte sind oft nicht vorhanden, so dass es notwendig ist, neue Versuchsgeräte zu entwickeln.

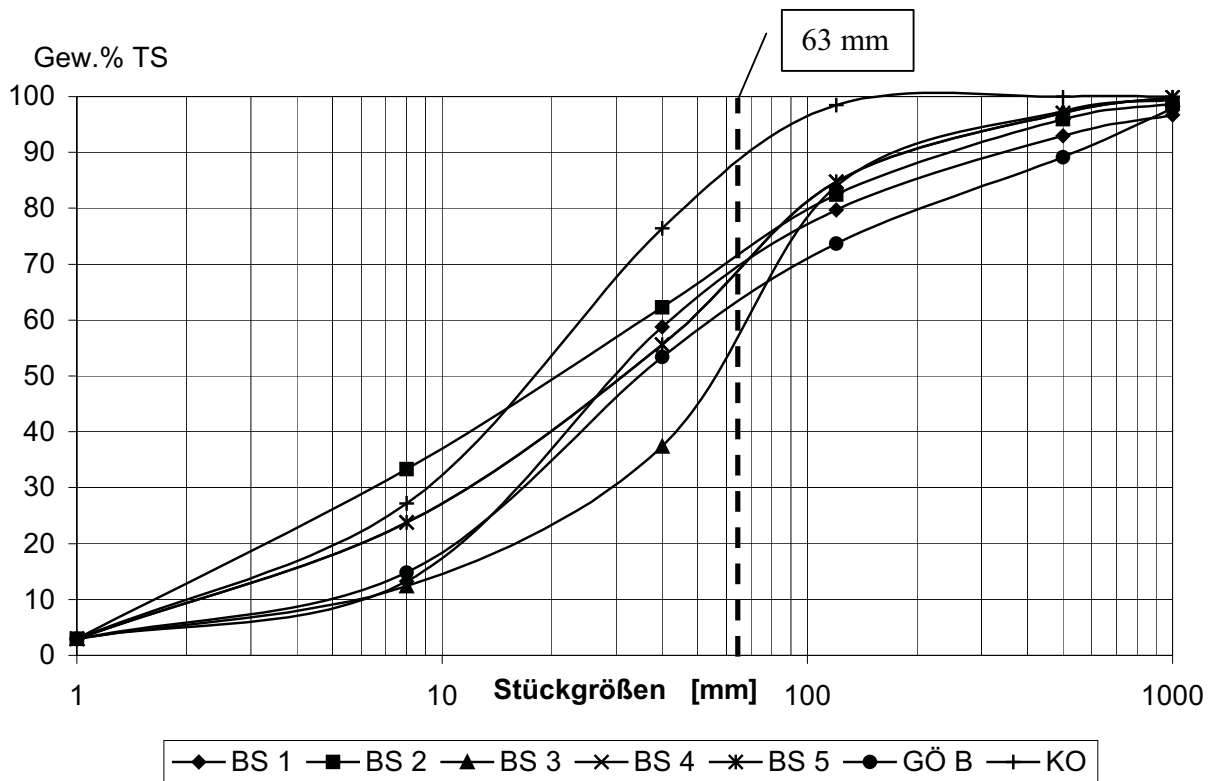


Abb. 2.2-2: Stückgrößenverteilung verschiedener Frischabfälle bzw. von Abfällen aus Bohrungen an bestehenden Deponien

2.2.1.4. Stückformen

Die Stückform der Bodenteilchen wird - mit Ausnahme sehr feiner Teilchen (Ton), die eine blättchenförmige Struktur aufweisen - idealisiert als kugelförmig angenommen (RODATZ 1992). Eine Unterscheidung erfolgt nur aufgrund der Rauigkeit/Kantigkeit des Kornes von scharfkantig bis stark gerundet (SCHULZE/MUHS 1968).

Die Form der Stücke des Abfalls unterscheidet sich wesentlich von der des Bodens. So weist nur ein geringer Teil der Bestandteile des Abfalls eine annähernd kugelige Form auf.

Gemäß GDA-EMPFEHLUNG E 1-7 (1997) werden die Bestandteile daher in Dimensionsklassen (DIM) unterteilt. Dabei werden folgende Dimensionsklassen unterschieden:

DIM 0: Korn (keine Seite > 8 mm; in der Praxis aber häufig auch bis 40 mm)

DIM 1: Faser (eine Seite lang gegenüber den beiden anderen Seiten)

DIM 2: Folie (zwei Seiten lang gegenüber der anderen Seite)

DIM 3: Kasten (alle drei Seiten lang)

Die Dimensionsverteilung einiger am Leichtweiß-Institut untersuchter Abfälle ist in Abb. 2.2-3 dargestellt.

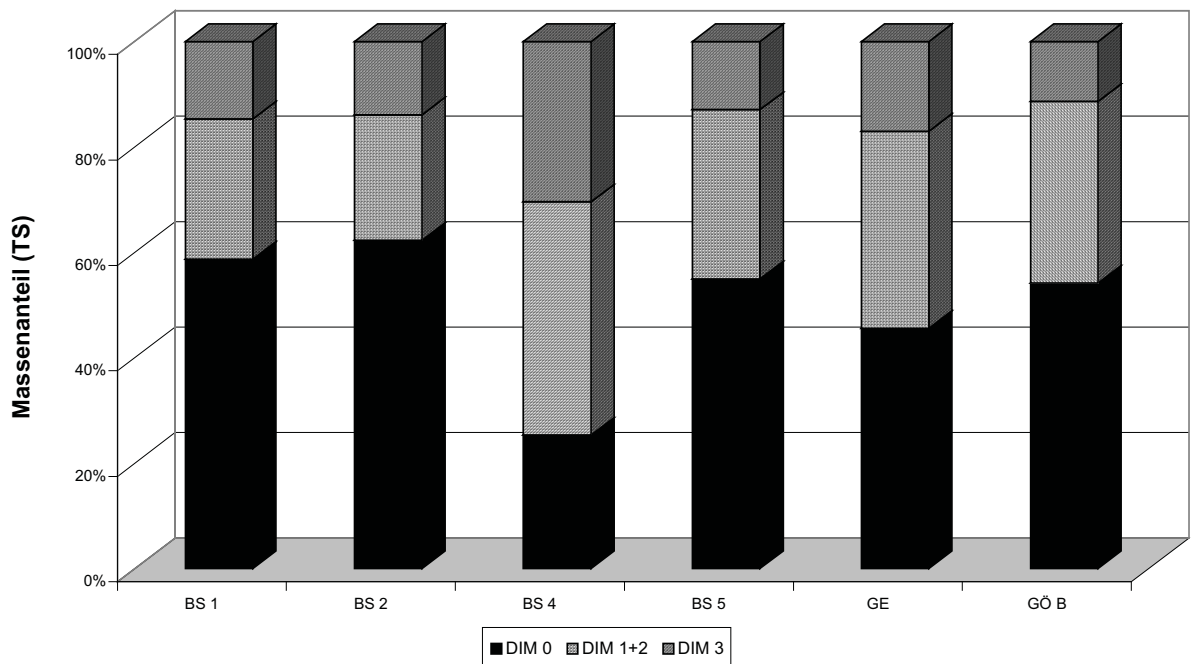


Abb. 2.2-3: Dimensionsverteilung verschiedener Frischabfälle bzw. von Abfällen aus Bohrungen an bestehenden Deponien [modifiziert nach COLLINS et al. (1997)]. Da die Dimensionsklassen 1 und 2 ähnliche Festigkeitseigenschaften besitzen, wurden sie zusammengefasst.

Durch die unterschiedliche Form der Bestandteile verändert sich das mechanische Verhalten von Siedlungsabfällen im Vergleich zu Boden deutlich. So können z. B. durch die faser- und folienförmigen Bestandteile (DIM 1 und 2) Zugspannungen aufgenommen werden, wodurch zum Einen die (Scher-) Festigkeit deutlich erhöht wird und zum Anderen Spannungen innerhalb des Abfallkörpers verlagert werden können.

2.2.1.5. Porenzahl und -zustand

Basierend auf der Konsolidationstheorie von Terzaghi (s. Kap.2.2.2.1) können aus Ödometerversuchen verschiedene Bemessungsgrößen für Setzungsberechnungen abgeleitet werden. Voraussetzung ist bei der Berechnung des Steifemoduls und der Kompressionsbeiwerte jedoch, dass das Setzungsvolumen und die Reduktion des Porenvolumens identisch sind, d. h. sich die Porenzahl mit fortschreitender Setzung verringert. Da die Korndichte von Boden nur geringen Schwankungen unterliegt, kann die Porenzahl für Böden sehr einfach berechnet werden. Bei Abfall hingegen variiert die Materialdichte der Einzelbestandteile (entspricht der Korndichte bei Böden) erheblich. Bei Kunststoffen beträgt sie zum Teil weniger als 1 t/m^3 und bei Stahl ca. 8 t/m^3 . Entsprechend der unterschiedlichen Abfallzusammensetzungen (siehe auch Abschnitt 2.2.1.2) variieren daher auch die Materialdichten des Gemenges Abfall. So gibt z. B. OBERMANN (1999) für fünf untersuchte mechanisch-biologisch behandelte Abfälle Materialdichten zwischen $1,78$ und $2,28 \text{ t/m}^3$ an. Aufgrund der großen Schwankungsbreite der Materialdichte lässt sich das Porenvolumen und damit die Porenzahl nicht mit Literaturwerten der Materialdichte berechnen.

Für die Materialdichtebestimmung von Siedlungsabfällen existiert zur Zeit noch kein genormtes Verfahren. Die Verfahren aus der Bodenkunde und Bodenmechanik lassen sich ebenfalls nicht ungeprüft für Siedlungsabfälle anwenden (s. Kap. 3.2 und 4.1). Die Berechnung des Porenvolumens von Siedlungsabfällen unterliegt daher bisher großen Unsicherheiten. Deshalb gehen einige Autoren bei den Überlegungen zum Setzungsverhalten des Abfalls von wassergesättigten (z. B. KÖNIG und KOCKEL, 1998) oder aber wasserteilgesättigten (z. B. COLLINS und RAMKE 1986) Verhältnissen aus.

Die Berechnung eines Steifemoduls ist gemäß DIN 18135, Entwurf, (1999) auch aus der Druck-Zusammendrückungslinie möglich. Dies ist jedoch nur zulässig, wenn das Setzungsvolumen gleich der Volumenverringerung des Porenraumes ist, was bei Böden in guter Näherung gilt, da das Korn als starr betrachtet wird. Aufgrund der geringen Steifemoduli und der Kompressibilität der im Abfall enthaltenen Materialien sowie des möglicherweise nicht

vollständig wassergesättigten Porenraums bedarf diese Voraussetzung für Siedlungsabfälle jedoch einer sorgsamten Prüfung.

2.2.2. Literaturlauswertung

In den vergangenen 25 Jahren sind eine Reihe von In-Situ-Messungen, hauptsächlich Setzungsmessungen der Oberfläche, an Siedlungsabfalldeponien durchgeführt worden. Die Setzungsmessung zählt dabei jedoch keineswegs zu den regelmäßig durchgeführten Standardmessungen, sondern wird nur in Einzelfällen in einem auswertbaren Zustand durchgeführt (BIENER et al. (1995)). So ergab eine Umfrage unter 449 deutschen Deponiebetreibern, dass nur bei 69 Deponien Verformungsmessungen durchgeführt werden (JESSBERGER et al. (1995)). Einen zweiten, umfangreicheren Fragebogen, der an die 69 Deponiebetreiber versandt worden war, schickten nur 20 der Deponiebetreiber „überwiegend vollständig“ zurück. Werden diese 20 beantworteten Fragebögen als Grundgesamtheit betrachtet, so ergeben sich die in Abb. 2.2-4 dargestellten prozentualen Anteile der Vermessungsarten für vertikale Verformungen. Werden die auswertbaren Rückmeldungen aus den Fragebögen auf die Grundgesamtheit von 449 Deponien bezogen, so ergibt sich ein Prozentsatz von ca. 4,5 % der Deponien, die Vermessungen vertikaler Verformungen durchführen. Horizontale Verformungen, z. B. an der Oberfläche oder in Gassammelschächten, werden nur bei 8 Deponien, d. h. 1,8 % der befragten Grundgesamtheit durchgeführt (JESSBERGER et al. (1995)).

Selbst wenn regelmäßig Verformungsmessungen über viele Jahre durchgeführt worden sind, sind die vorhandenen Daten häufig nicht zielführend auswertbar, so dass sich keine Setzungsprognose, z. B. gemäß GDA-EMPFEHLUNG E 2-24, aus diesen Daten ableiten lässt (GRISOLIA et al. (1993), BIENER et al. (1995)). In all diesen Fällen müssten mehrere Jahre lang neue Messungen durchgeführt werden, um eine Prognose zu erstellen.

In diesem Kapitel sollen nur die Publikationen zu In-Situ-Vermessungen, auf deren Basis ein Setzungsprognosemodell entwickelt wurde, sowie zu Laborversuchen, die der Ermittlung setzungsrelevanter Parameter dienen, betrachtet werden. Zur Vollständigkeit sei an dieser Stelle jedoch erwähnt, dass eine umfangreiche Sammlung von veröffentlichten Setzungsmessungen an Deponien in JESSBERGER et al. (1995) enthalten ist. Eine Zusammenfassung verschiedener Setzungsmessungen an Deponien und Altablagerungen in England ist in CHARLES (1993) dargestellt. Weiterhin seien hier exemplarisch Veröffentlichungen zur Setzungsvermessungen von YEN (1975), WIEMER (1982), DODT (1987), BOUTWELL (1995) und SHARMA (1999) genannt, bei denen verschiedene Setzungsmessverfahren

beschrieben sind und deren Vergleich einen zeitlichen Ablauf der Entwicklung von Setzungsmessungen und -systemen beschreibt.

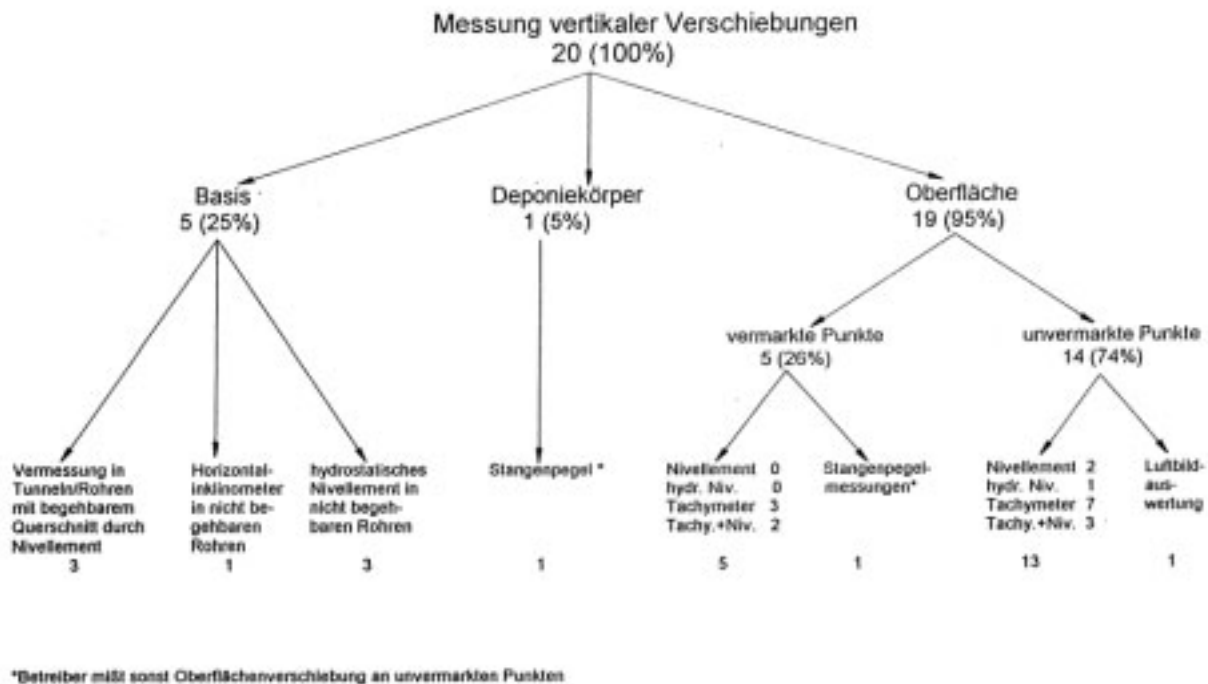


Abb. 2.2-4: Anteil der Deponien, an denen vertikale Verformungsmessungen durchgeführt werden, bezogen auf die Grundgesamtheit der 20 annähernd vollständig ausgefüllten Fragebögen von 449 Befragungen (aus JESSBERGER et al. (1995))

Die Messungen, die an einzelnen Deponien vorgenommen werden, sind in der Regel mit dem Ziel verbunden, entweder eine maximale Volumenausnutzung der Deponie zu erzielen oder den Zeitpunkt zur Aufbringung einer temporären oder endgültigen Oberflächenabdichtung zu bestimmen. So prognostiziert GERTLOFF (1993) die notwendige Überhöhung für die Deponie Wiesbaden zur Erzielung der angestrebten Endkubatur nach Abklingen der Setzungen. Dazu wurden 15 Setzungskontrollpunkte an der Deponieböschung zwischen 22 und 36 m Verfüllhöhe gleichmäßig über die Deponiegrundfläche installiert. Es wurden innerhalb des Messzeitraumes von ca. 3 Jahren Setzungen der Messpunkte von bis zu mehreren Metern (> 10% der Ausgangshöhe) gemessen. Der Verlauf der Setzungen ist für ca. 90 % der Messpunkte stetig. In Abb. 2.2-5a wird der Setzungsverlauf exemplarisch für einen Setzungsmesspunkt dargestellt. Für diese Messpunkte können die Voraussetzungen für eine mathematische Setzungsprognose als gegeben angesehen werden. Die restlichen 10 % der Setzungsmessungen ähneln den in Abb. 2.2-5b und c dargestellten zeitlichen Setzungsverläufen einzelner Messpunkte. Hier ist eine Setzungsprognose nicht möglich (GERTLOFF (1993)).

Aus den für eine Setzungsprognose verwendbaren Messdaten der dreijährigen Messkampagne (GERTLOFF (1993b und 1996)) an der Deponie Wiesbaden entwickelte GERTLOFF (1993) ein Prognosemodell für Setzungen von Deponien. Dabei geht er davon aus, dass es sich bei der ungestörten Setzung um einen asymptotisch abklingenden Vorgang handelt. Diesen Vorgang beschreibt er mathematisch mit:

Gleichung 2.2-1

$$S = S_E * (1 - c^t)$$

S: Setzung zum Zeitpunkt t S_E : Endbetrag der Setzung c^t : Zeitkonstante der Setzung

Aufgrund der festgestellten unterschiedlichen Setzungsraten wurden die Setzungen in Kurzzeit- und Langzeitsetzungen unterteilt. Die Gleichung 2.2-1 erweiterte GERTLOFF (1993) zu:

Gleichung 2.2-2

$$S = S_k * (1 - c_k^t) + S_l(1 - c_l^t)$$

S : Setzung zum Zeitpunkt t S_k : Endbetrag der Kurzzeitsetzung c_k : Zeitkonstante der Kurzzeitsetzung
 S_l : Endbetrag der Langzeitsetzung c_l : Zeitkonstante der Langzeitsetzung

Die Variablen S_k und S_l sowie die Konstanten c_k und c_l müssen aus mehrjährigen Messreihen zur Oberflächensetzung abgeleitet werden. Die Setzungen des Untergrundes werden nicht getrennt betrachtet, so dass nicht der Setzungsverlauf des Abfallkörpers ermittelt wird, sondern der der gesamten Deponie inklusive des Untergrundes.

Den von GERTLOFF (1993) für die Deponie Wiesbaden entwickelten Ansatz haben EGLOFFSTEIN et al. (1996) in ein PC-Berechnungsprogramm umgesetzt, dessen Anwendung auch für andere Deponien möglich sein soll. Dabei sind die „Setzungsberechnungen ...immer ein Näherungsverfahren. Aus Setzungsbeobachtungen über ... mehrere Jahre bis ein Jahrzehnt lässt sich das Setzungsverhalten ... hinreichend genau prognostizieren. ... Derzeit liegen noch zu wenige Erfahrungen vor allem über ...Steifemodule vor.“ (EGLOFFSTEIN et al. (1996). Um dieses Prognoseprogramm zu verwenden ist es daher notwendig, zuverlässige setzungsrelevante Kennwerte im Labor oder durch In-Situ-Messungen zu bestimmen.

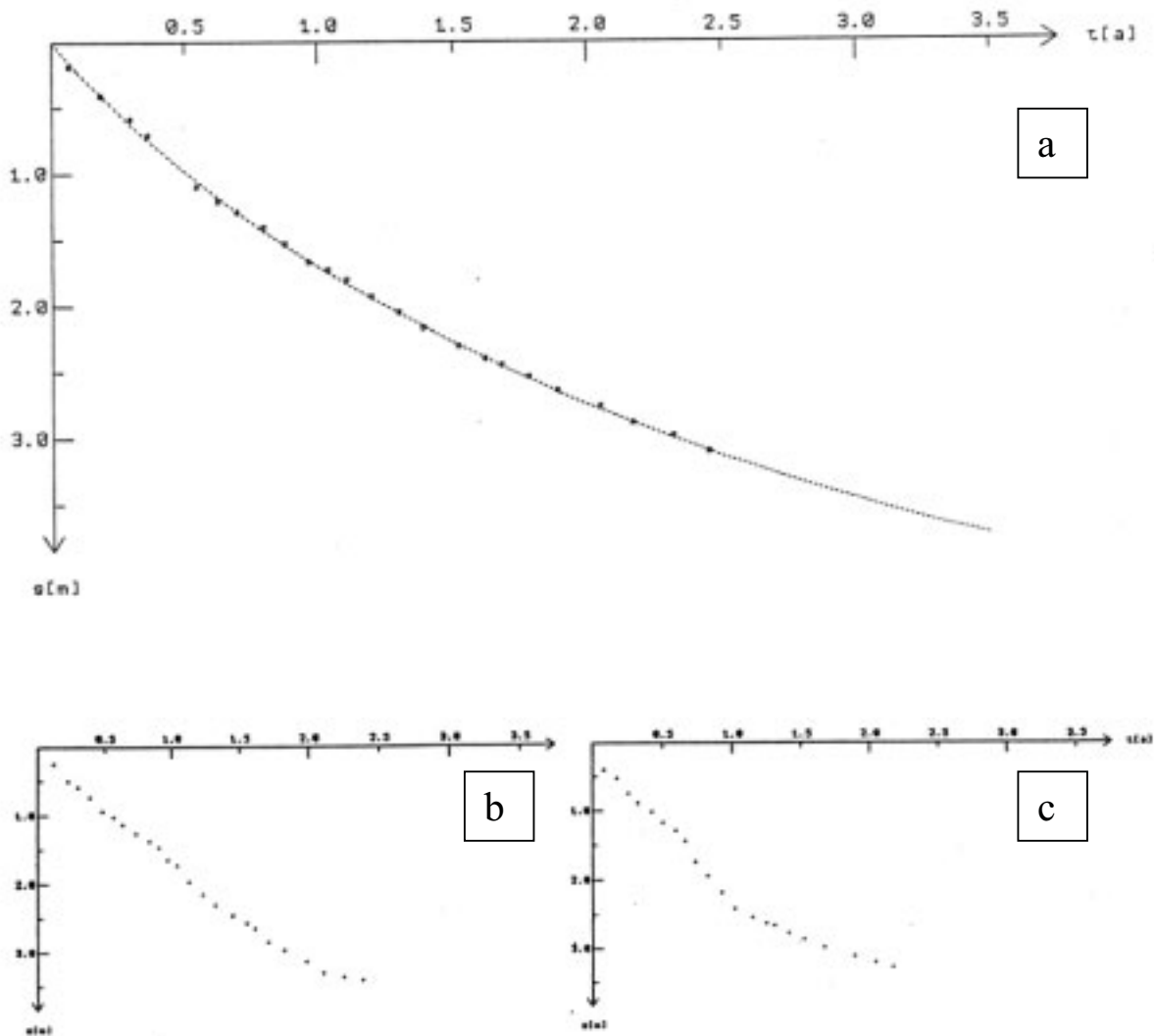


Abb. 2.2-5: Setzungsmessungen an der Deponie Wiesbaden (aus GERTLOFF 1993)

Einen ähnlichen Ansatz, jedoch auf der Konsolidationstheorie von Terzaghi beruhend, wählt ZAMINSKI (1994) zur Setzungsprognose einer Deponie in Syosset, USA. In diesem Falle werden die notwendigen Parameter primärer und sekundärer Konsolidationsindex C_c' und C_α' durch Pressiometerversuche In-Situ bestimmt. Die Pressiometertests sind relativ aufwendig und empfindlich, da sie in Bohrungen ausgeführt werden müssen und der Pressiometerkörper vollständig Kontakt zum umgebenden Medium besitzen muss. Bei Abfall ist dies sehr schwer zu realisieren. Weiterhin setzt die Ermittlung der setzungsrelevanten Parameter mit dem Pressiometer einen homogenen Aufbau des zu prüfenden Körpers und isotrope Materialeigenschaften voraus. Dies ist durch den in der Regel lagenweisen Einbau des Abfalls auf der Deponie nicht gegeben. Die genannten Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung führen,

selbst bei der dargestellten Einzelfallanalyse, zu den starken Schwankungen in den ermittelten Kompressionsindices ($\pm 200\%$).

Den gleichen Ansatz zur Setzungsprognose wählen auch TANG et al. (1994), jedoch werden die zur Prognose notwendigen Parameter In-Situ mit einer Probelastung von nur 3% der später aufzubringenden Last bestimmt. Die erhaltenen Werte werden mit der Literatur verglichen und als hinreichend genau charakterisiert. Die von TANG et al. (1994) gewählte Vorgehensweise widerspricht den in den Normen enthaltenen Anforderungen, die Auflast deutlich höher (in der Regel Faktor 1,2 bis 2,0) als die später aufzubringende Last zu wählen. Bei solch geringen Auflasten werden einige abfallspezifische Eigenschaften, wie z. B. die bewehrenden Effekte der Materialien DIM 1+2, nicht erfasst. Die Prognose der zukünftigen Setzungen wird mit den Ansätzen von LANDVA und CLARK (1990) und EDIL (1990) durchgeführt. Die für die Setzungsprognose nach LANDVA und CLARK (1990) bzw. EDIL (1990) erforderlichen Parameter werden aus Literaturangaben und Messungen auf der Deponie abgeschätzt. Anschließend wird mit probabilistischen Methoden die Versagenswahrscheinlichkeit der Oberflächenabdeckung aufgrund ungleichmäßiger Setzungen berechnet. Mit den prognostizierten Setzungen wird eine Versagenswahrscheinlichkeit der Oberflächenabdichtung berechnet und die wirtschaftlich günstigste Möglichkeit einer Oberflächenkonstruktion prognostiziert. Dabei werden die Kosten für die Konstruktion der Oberflächenabdichtung den Kosten für eine evtl. erforderliche Reparatur gegenübergestellt.

VAN MEERTEN et al. (1995) entwickelten ein Modell zur Setzungsprognose, bei dem zwischen direkter Kompression und Kriechen unterschieden wird. Ein biologischer Abbau von organischer Substanz wird nicht betrachtet.

Die bei VAN MEERTEN et al. (1995) angegebene Formel zur Setzungsprognose lautet:

Gleichung 2.2-3

$$\frac{V}{V_0} = \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{a}{c}} + \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{a}{c}} * \frac{e_0}{c} * \int_0^t \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{b-a}{c}} dt \right]^{-c}$$

mit: V: Volumen;
 b: sekulärer Kompressionsindex (für Kriechen);
 a: direkter Kompressionsindex
 t: vergangene Zeit;
 Der Index 0 weist auf die Anfangsbedingungen hin.

p: vertikale Spannung; ;
 c: Koeffizient der sekulären Kompressionsrate;
 e: Verformungsrate;

Da die in der Formel enthaltenen Parameter für Abfall nicht aus der Literatur bestimmt werden können (VAN MEERTEN et al. (1995)), kann der Prognoseansatz nur in Verbindung mit In-Situ-Messungen zum Einsatz kommen. Die eigentlich für die Prognose erforderlichen Parameter werden dabei iterativ aus den In-Situ-Messungen berechnet. Die physikalischen Prozesse, die zu den gemessenen Verformungen geführt haben, werden dabei nicht beachtet, so dass die Aufteilung in primäre und sekundäre Setzung mit großen Unsicherheiten belegt ist. Weiterhin stützt sich diese Betrachtung bei dem von VAN MEERTEN et al. (1995) aufgeführten Beispiel wiederum nur auf Vermessungen der Deponieoberfläche. Die Setzungen der Basis werden nicht getrennt betrachtet und somit das Verformungsverhalten des Abfallkörpers nur unzureichend beschrieben.

Allen bisher zitierten Veröffentlichungen ist gemein, dass versucht wird, Messergebnisse aus Verformungsmessungen mit bestehenden Ansätzen aus der Bodenmechanik oder anderen Grundlagenwissenschaften zu vergleichen und so Prognosemodelle zu erarbeiten. Dabei werden häufig bodenmechanische Begriffe, wie z. B. Primärsetzung und Konsolidation im eigentlichen Sinne verwendet, obwohl dies mit den erzielten Ergebnissen (Kurvenverläufen) nicht in Einklang zu bringen ist. Diese Tatsache umschreiben THOMAS et al. (1999) vorsichtig mit den Worten „..., it is very difficult to identify the primary settlement and the long term settlement.“

Neben den In-Situ-Messungen wurden von etlichen Autoren Laborversuche durchgeführt, um die für die Berechnung des Setzungsverhaltens erforderlichen Parameter zu bestimmen. Die in Deutschland durchgeführten Versuche sind dabei meist an die DIN 18135 (Entwurf) (1999) angelehnt, jedoch mussten die Geräteabmessungen und damit auch die Versuchsdurchführung aufgrund der höheren Maximalstückgröße von Abfall modifiziert werden.

Erste Versuche in Großödometern wurden von COLLINS und RAMKE (1986) durchgeführt. Untersucht wurde ein mechanisch-biologisch behandelter Abfall mit einer Maximalstückgröße von 120 mm. Die untersuchten Abfallproben besaßen einen Durchmesser von 120 cm, eine Höhe von 80 cm und eine Feuchtmasse von ca. 1 t. Die ermittelten Steifemoduli betragen für das Spannungsintervall von 400 bis 800 kN/m² im Mittel 6900 kN/m² bei einer Spannweite der Einzelwerte von 6300 bis 7700 kN/m². Die Dauer der Laststufe (Spannungsintervall) betrug bis zu 250 Tagen. Bei den Versuchen stellen COLLINS und RAMKE (1986) „...überraschend...“ einen gradlinigen Verlauf der Drucksetzungsbeziehungen fest. Es wird daher die Schlussfolgerung gezogen, dass die Umlagerungsprozesse und der Abfluss von Konsolidationswasser noch nicht abgeschlossen ist, was durch den hohen Restfeuchteanteil

und den großen Porenanteil gestützt wird. Es kann jedoch ebenfalls nicht ausgeschlossen werden, dass auch Kriecherscheinungen zu diesem Verlauf der Druck-Setzungskurve geführt haben.

Die Auflast wurde in diesen Versuchen durch Spannen von Spannstählen aufgebracht. Um die Verringerung der Auflast durch die Setzung der Probe und die Verformung des Spannstahles zu vermindern, wurde zur Lasteinleitung eine Federkonstruktion angebracht. Eine vollständige Kompensation des Spannungsabfalls während des Setzungsprozesses war jedoch nicht möglich. Durch dieses Verfahren der Einleitung der Auflast ergeben sich Sprünge im Zeit-Setzungsverlauf. Der Zeit-Setzungsverlauf wurde - neben anderen Ausgleichsfunktionen - durch eine Ausgleichsfunktion der Form $y = a - b \cdot e^{c \cdot x}$, die der Ausgleichsfunktion der allgemeinen Gleichung der Konsolidierungstheorie entspricht, dargestellt. Daher scheinen viele der Zeitsetzungskurven dem aus der Bodenmechanik bekannten Verlauf zu entsprechen, auch wenn der mathematisch berechnete Kurvenverlauf anhand der einzelnen Messwerte nicht immer nachvollzogen werden kann (Abb. 2.2-6). Die Unähnlichkeit der unter Ansatz bodenmechanischer Theorie berechneten Zeit-Setzungskurven mit den ermittelten Messwerten wird durch die schwache Regression ($r = 0,86$) der von COLLINS und RAMKE (1986) berechneten Verläufe der Konsolidationssetzungen mit den Messwerten bestätigt.

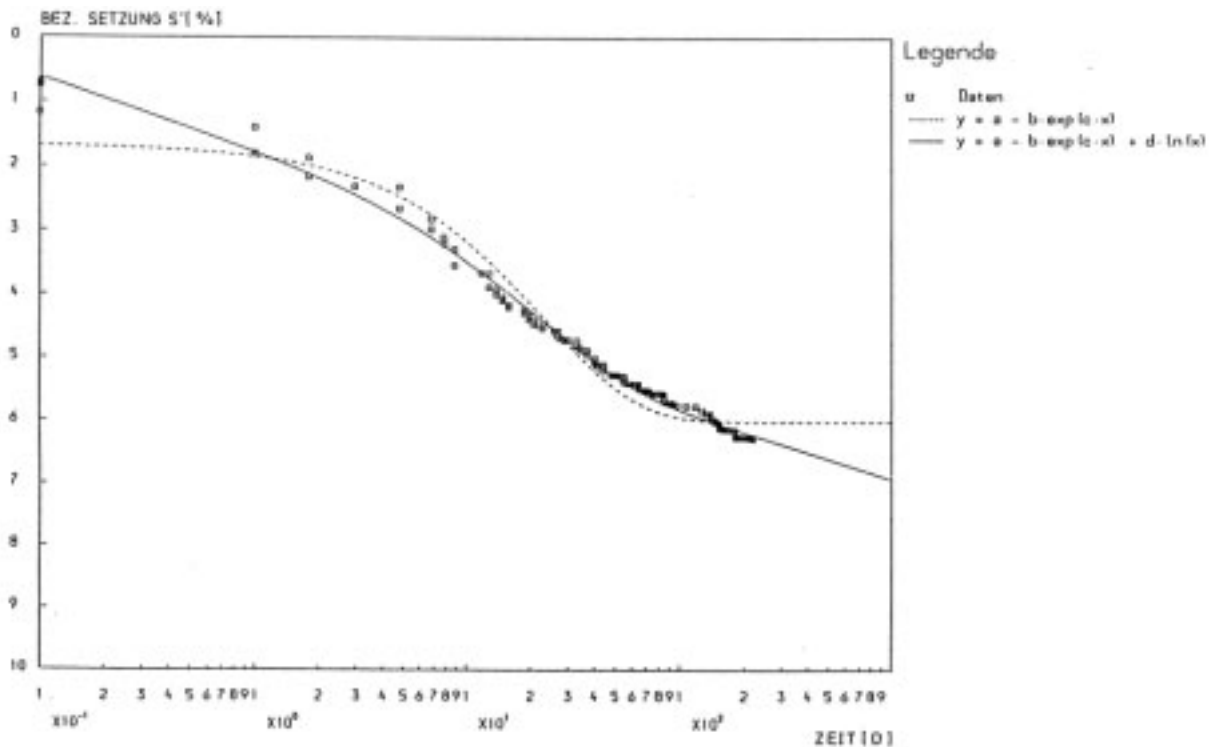


Abb. 2.2-6: Zeit-Setzungskurve des Versuches 120/1/1 der Laststufe 800 kN/m² [aus COLLINS und RAMKE (1986)]

JESSBERGER und KOCKEL (1993) untersuchten Abfälle der Zentraldeponie Hannover in Großödometern. Der Probendurchmesser betrug dabei ca. 100 cm und die Probenhöhe ca. 20 cm. Aufgrund der geringen Probenhöhe müssen die Abfälle vor dem Einbau in die Ödometer behandelt worden sein. In den Veröffentlichungen ist jedoch kein Hinweis auf die Art der Behandlung, z. B. Zerkleinerung oder Siebung, enthalten. Die untersuchten Abfälle entstammten Bohrungen und besaßen ein Alter zwischen einem Jahr und 20 Jahren. Es wurde festgestellt, dass die Setzungseigenschaften der verschieden alten Abfälle ein weitgehend gleichartiges Verhalten aufweisen. Dies ist dadurch bedingt, dass das Alter der Abfälle keinen direkten Rückschluss auf den Zustand bzw. die bio-chemische Zersetzung zulässt (COLLINS (1996)). Die untersuchten Abfälle könnten daher eine ähnliche biologische Stabilität aufweisen, was eine Erklärung für die Ähnlichkeit der erzielten Ergebnisse ist. Der Steifemodul kann nach JESSBERGER und KOCKEL (1993) vereinfachend linear abhängig von der Spannung angenommen werden zu:

$$E_s = 11,84 \cdot \sigma - 195 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

für $\sigma > 37,5 \text{ kN/m}^2$

Der Näherungsberechnung liegen die Daten aus den Großödometerversuchen mit einer maximalen Dauer der einzelnen Laststufen von nur sieben Tagen zu Grunde. Innerhalb dieser sieben Tage konnte kein Setzungsendwert festgestellt werden (Abb. 2.2-7). Der Verlauf der Zeit-Setzungskurven ähnelt dem Kurvenverlauf eines ausgeprägten Kriechvorganges und unterscheidet sich daher deutlich von den Verläufen der Zeit-Setzungskurven für wasser-gesättigte bindige Böden.

Aus diesen und weiteren Untersuchungen in Großödometern an der Ruhr-Universität Bochum ist ein Prognosemodell entwickelt worden, das in den GDA-Empfehlungen (E 2-24) sowie von KÖNIG und KOCKEL (1998) veröffentlicht wurde. In diesem Prognosemodell werden drei Setzungsanteile unterschieden: Auflastabhängige Setzung, Kurzzeitsetzung und Langzeitsetzung. Die auflastabhängige Setzung soll, empirisch bestimmt, nach 10 Tagen beendet sein.

Dies widerspricht den Ergebnissen von COLLINS und RAMKE (1986) sowie RAMKE (1992), die in Laborversuchen mit einer Abfallhöhe von nur 80 cm festgestellt haben, dass die auflastabhängige Setzung etwa 60 Tage beträgt. Bei der Übertragung der von COLLINS und RAMKE (1986) und RAMKE (1992) ermittelten Ergebnisse auf die bei Deponien vorhandenen Abfallhöhen, müssen sich wesentlich größere Zeiträume der auflastabhängigen Setzung als die von KÖNIG und KOCKEL (1998) angegebenen 10 Tage ergeben.

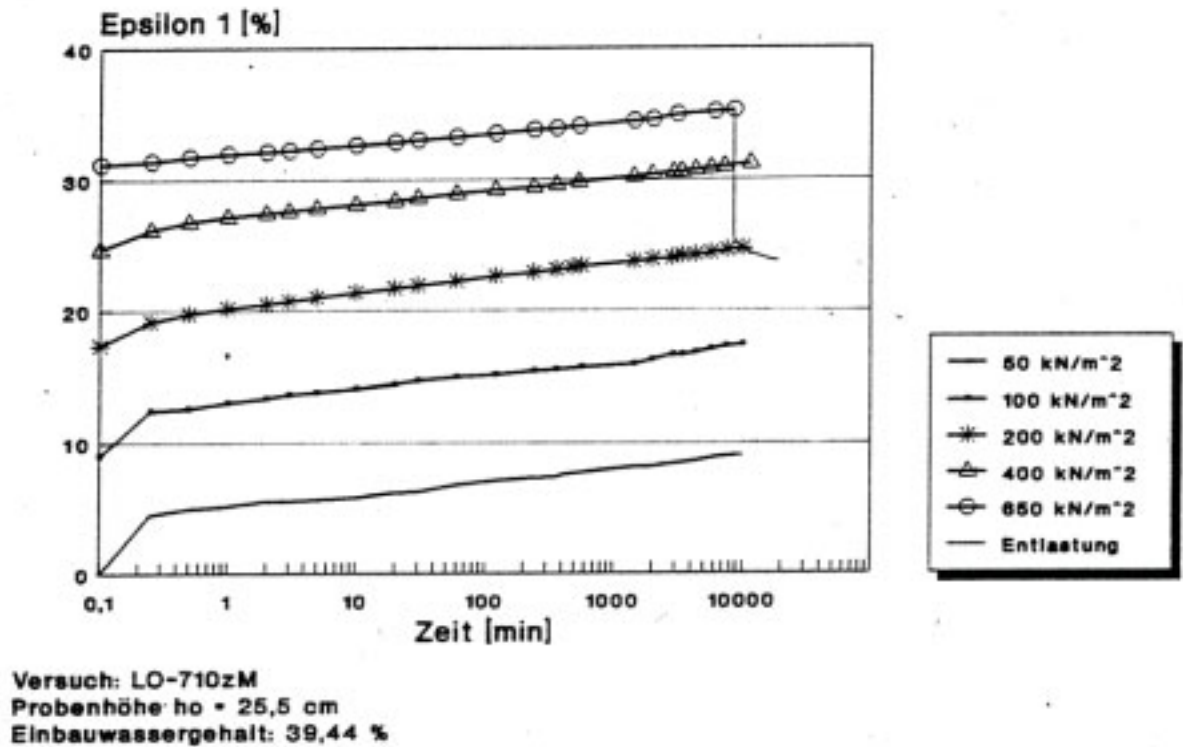


Abb. 2.2-7: Zeit-Setzungsverlauf eines Großödometerversuches [aus JESSBERGER und KOCKEL (1993)]

Epsilon 1 entspricht der vertikalen Verformung

Der Steifemodul sowie die Kompressionsparameter für die Kurzzeit- und Langzeitsetzung werden bei dem Verfahren nach KÖNIG und KOCKEL (1998) aus Laborversuchen und Feldmessungen abgeschätzt. Mit diesen Werten kann eine erste Setzungsabschätzung erfolgen. Diese wird mit wiederkehrenden In-Situ-Messungen abgeglichen, und es werden neue Prognosen erstellt (Abb. 2.2-8). Die Genauigkeit der Setzungsprognose soll mit jeder weiteren In-Situ-Messung steigen. Die wiederkehrenden In-Situ-Messungen und die neuen Setzungsberechnungen bedeuten jedoch einen sehr großen Aufwand, da bei dem von JESSBERGER und KOCKEL (1993) vorgeschlagenen Verfahren keine Setzungsberechnung anhand der im Labor ermittelten Kennwerte möglich ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den Versuchen im Labor die abfallspezifischen Eigenschaften nicht hinreichend beachtet werden.

Der Ist-Zustand des Abfalls in der Deponie kann dadurch nicht ausreichend bewertet werden. So könnte es z. B. durch Veränderungen der Randbedingungen und den damit verbundenen bio-chemischen Prozessen zu einem völlig anderen Setzungsverhalten kommen, als es sich aus den letzten In-Situ-Messungen prognostizieren ließ. Bei dieser Methode sind weiterhin

die Fehler zu beachten, die durch eine Nichtberücksichtigung der Setzungen des Untergrundes hervorgerufen werden, sofern diese nicht durch Messungen gesondert bestimmt werden.

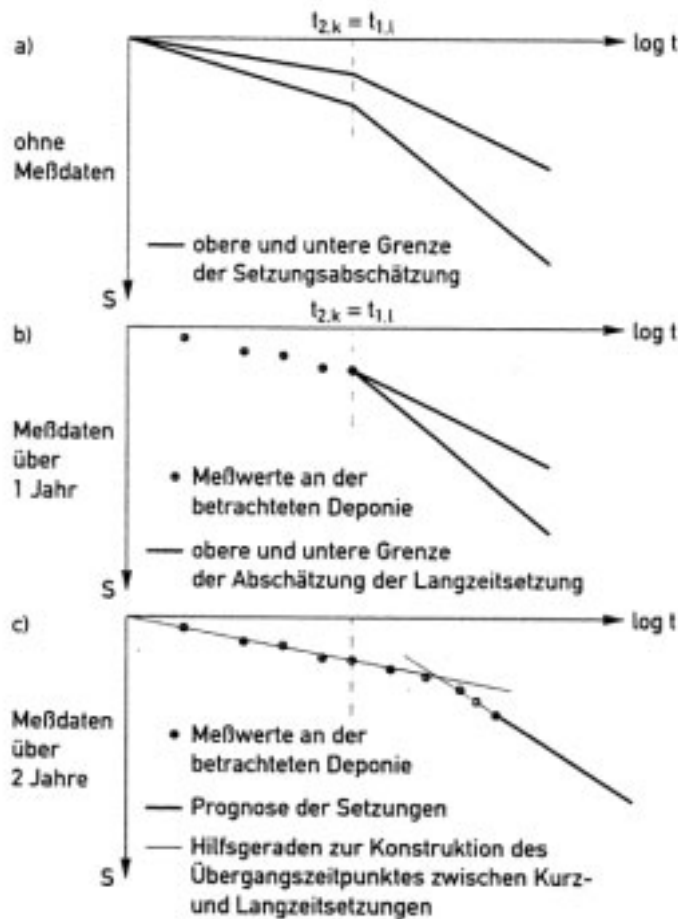


Abb. 2.2-8: Setzungsabschätzung mit Meßwerten aus Laborversuchen (a) und Setzungsprognose mit fortschreitender In-Situ-Beobachtungsdauer (b und c) [aus GDA-Empfehlungen (1997)]

SOLER et al. (1995) entwickelten ein Modell zur Setzungsprognose, das auf vier Setzungsanteilen basiert:

1. Konsolidation, wassergesättigt (2 Phasen)
2. Sekundärsetzung
3. Konsolidation, ungesättigt (3 Phasen)
4. Biologischer Abbau organischer Substanz

Die ersten drei Anteile lassen sich auf die auch von anderen Autoren verwendeten bodenmechanischen Ansätze zurückführen. In diesem Modell wird im Vergleich zu anderen Modellen zusätzlich die Konsolidation in einer ungesättigten Umgebung berücksichtigt. Der

biologische Abbau wird durch Rückrechnungen aus In-Situ-Gasmessungen bestimmt. Um eine Setzungsprognose zu erstellen wird dabei wie folgt vorgegangen:

1. Charakterisierung des Abfalls durch Sortierung
2. Bestimmung des austretenden Gasvolumens auf der zu untersuchenden Deponie mit einem Gas-Vakuum-Test
3. Bestimmung der biologisch abbaubaren Masse auf der Deponie anhand von chemischen Analysen an Bohrproben
4. Herstellung eines Probenmaterials aus Boden und Biomasse. Mit diesem Material soll der Abfall in den Laborversuchen modelliert werden.
5. Durchführung der Laboruntersuchungen mit den Boden-Biomasse-Proben zur Bestimmung der notwendigen Parameter in einem eigens entwickelten Laborversuchsgerät (Abb. 2.2-9)
6. Ermittlung einer Ausgleichsfunktion für alle Messwerte
7. Setzungsprognose mit den besten Ausgleichsfunktionen für die Messwerte

Setzungsprognosen mit dem Verfahren nach SOLER et al. (1995) wurden bisher nicht veröffentlicht. Ob dieses aufwendige Verfahren zu aussagefähigen Setzungsprognosen führt, darf jedoch bezweifelt werden, da die Modellierung des Abfalls durch ein Boden-Biomasse-Gemenge die Setzungsanteile durch leicht verformbare Bestandteile, wie z. B. Kunststoffe, sowie den Krieeffekt vollständig bzw. nahezu vollständig vernachlässigt. Zudem können mit dem Boden-Biomasse-Gemenge die Struktureffekte des Abfalls (z. B. Zugfestigkeit, Kraftumleitung, Wasserverfügbarkeit, Hohlraumbildung) nicht abgebildet werden.

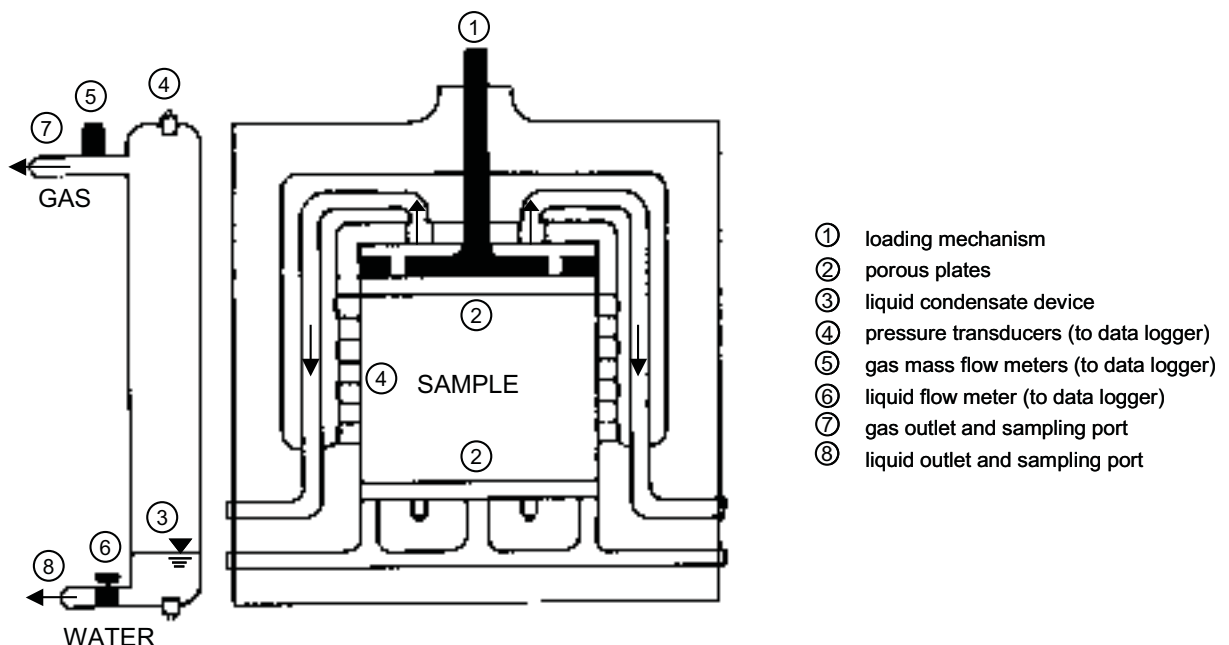


Abb. 2.2-9: Kompressionsapparatur nach SOLER (1995)

BEAVEN und POWRIE (1995) konstruierten ein Großödometer mit einem Durchmesser von 2 m und einer Höhe von 3 m. Die eingebaute Probenhöhe beträgt 2,5 m. Die Auflast kann zwischen 25 und 600 kN/m² stufenlos variiert werden. In diesem Ödometer wurden Versuche mit Siedlungsabfall und zerkleinertem Siedlungsabfall < 150 mm durchgeführt und ausführlich publiziert. Es wurden Steifemoduli zwischen 1,6 und 2,4 MN/m² für eine Auflast von 322 bis 600 kN/m² (mittlere Spannung $\sigma_m=461$ kN/m²) ermittelt. Diese Steifemoduli erscheinen im Vergleich zu den Steifemoduli, welche von COLLINS und RAMKE (1986) ermittelt wurde bzw. mit der Formel in der GDA-EMPFEHLUNG E 2-24 berechnet werden können, sehr gering. Dies ist maßgeblich auf drei Gründe zurückzuführen:

1. Die Einbaudichten waren sehr gering (Trockendichten zwischen 0,19 und 0,44 t/m³)
2. Die Belastungsdauer betrug nur 2 bis 7 Tage bei einer Probenhöhe von 2,5 m (Zum Vergleich: COLLINS und RAMKE (1986): 70 bis 100 Tage bei einer Probenhöhe von 0,8 m sowie KÖNIG und KOCKEL (1998): 7 bis 10 Tage bei einer Probenhöhe von 0,2 m)
3. Die Wandreibung wurde bei der Ermittlung der Steifemoduli vernachlässigt. Mit den eingebauten Druckmesszellen stellten BEAVEN und POWRIE (1995) jedoch fest, dass nur ca. 50 bis 80 % der aufgetragenen Auflast noch im unteren Probenanteil messtechnisch erfasst wurden. Daher sind die oben angegebenen Steifemoduli nicht auf eine mittlere Spannung σ_m von 461 kN/m² sondern auf eine mittlere Spannung σ_m von 231 bis 369 kN/m² zu beziehen. Damit verringern sich die angegebenen Steifemoduli sowie der Spannungsbereich deutlich.

Der Steifemodul bei den Versuchen mit nahezu wassergesättigten Proben (Feldkapazität, Wassergehalt 141% TS) war bei den zerkleinerten Abfällen mit 2,4 MN/m² deutlich größer als bei den teilgesättigten Proben (Wassergehalt 40% TS) mit 1,6 MN/m². Weiterhin besaßen die gesättigten, zerkleinerten Abfallproben einen größeren Steifemodul als die gesättigten, unzerkleinerten Abfallproben.

Aufgrund der geringen Einbaudichten, der kurzen Belastungsdauer und der niedrigen Probenzahl lassen sich jedoch aus diesen Versuchen nur sehr bedingt Schlüsse auf das Setzungsverhalten von geordnet betriebenen Deponien in Deutschland ziehen. Ein Zeit-Setzungsverlauf der Versuche ist leider nicht publiziert worden.

Weiterhin stellten POWRIE et al. (1999) bei Forschungsarbeiten fest, dass sich die Partikeldichte (Materialdichte) während der Konsolidation erhöht. Eine Anwendung bodenmechanischer Ansätze, die von der Unverformbarkeit des Einzelkornes ausgehen, ist daher nicht möglich. Daher folgern POWRIE et al. (1999), dass noch weitere Forschungen vor Allem zu folgenden Punkten notwendig sind:

- Berechnung der effektiven Spannungen
- Verformungsverhalten (Volumenänderungsverhalten)
- Zwei-Poren-Strömungsmodell (Zwei-Phasen-Strömung)
- Abschätzung der sekundären Setzungen

Im Gegensatz zu den oben betrachteten Ansätzen schlagen EDIL et al. (1990) ein Prognoseansatz mit einer geschlossenen Formel für alle Setzungsanteile vor. Dieser Ansatz orientiert sich an dem rheologischen Modell von GIBSON und LOW (1961), mit welchem die Setzungen von Torf prognostiziert werden können.

Die vorgeschlagene Zeit-Setzungsformel ergibt sich daher als Exponentialfunktion zu:

Gleichung 2.2-4

$$S(t) = H * \Delta\sigma * (a + b * (1 - e^{-\frac{\lambda}{b} * t}))$$

S: Setzungen

a: Kompressionsparameter für die Sofortsetzung

λ/b : Anteil der Sekundärsetzung

H: Anfangshöhe

$\Delta\sigma$: Auflast (Konsolidationsspannung)

b: Kompressionsparameter für die Primärsetzung

t: Zeit seit Belastungsbeginn

Auch bei diesem Modell ist es jedoch notwendig, In-Situ-Messungen durchzuführen, um die unbekannt Parameter a, b und λ zu bestimmen.

RAO et al. (1997) führten Vergleiche zwischen Ödometerversuchen (Durchmesser ca. 60 cm, Höhe ca. 18 cm), Setzungsversuchen in Boxen (ca. 3 x 3m Grundfläche und ca. 1,5 m Höhe) und In-Situ-Messungen unter einer Probelastung durch. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass verschiedene vorhandene Theorien zur Setzungsprognose in Kombination mit den in den Ödometern oder in den Setzungsboxen ermittelten Parametern zu keinen brauchbaren Prognosen führen (Abb. 2.2-10). Die Ödometerversuche wurden dabei ca. 4 Tage je Laststufe betrieben, die Setzungsboxen ca. 1100 Tage und die Probelastung auf der Deponie ca. 350 Tage. Bei den Proben in den Laborversuchen (Ödometer und Setzungsbox) handelt es sich um gestörte Proben, die nach der Entnahme auf der Deponie erneut in den Versuchsgeräten verdichtet wurden. Die mit den in den Laborversuchen ermittelten Werten berechneten

Setzungen und die In-Situ gemessenen Zeit-Setzungen sind daher aufgrund der unterschiedlichen Belastungsdauer und der verschiedenen Vorbelastungen der Proben nicht direkt miteinander vergleichbar.

Als zentrales Ergebnis ihrer Forschungen stellen RAO et al. (1997) fest, dass es weniger entscheidend ist, welche Modelle zur Setzungsprognose verwendet oder entwickelt werden. Vielmehr ist es erforderlich, den Abfall bzw. seine setzungsspezifischen Eigenschaften korrekt zu charakterisieren. Dabei ist bisher unbekannt, wie eine solche setzungsspezifische Abfallcharakterisierung aussehen könnte.

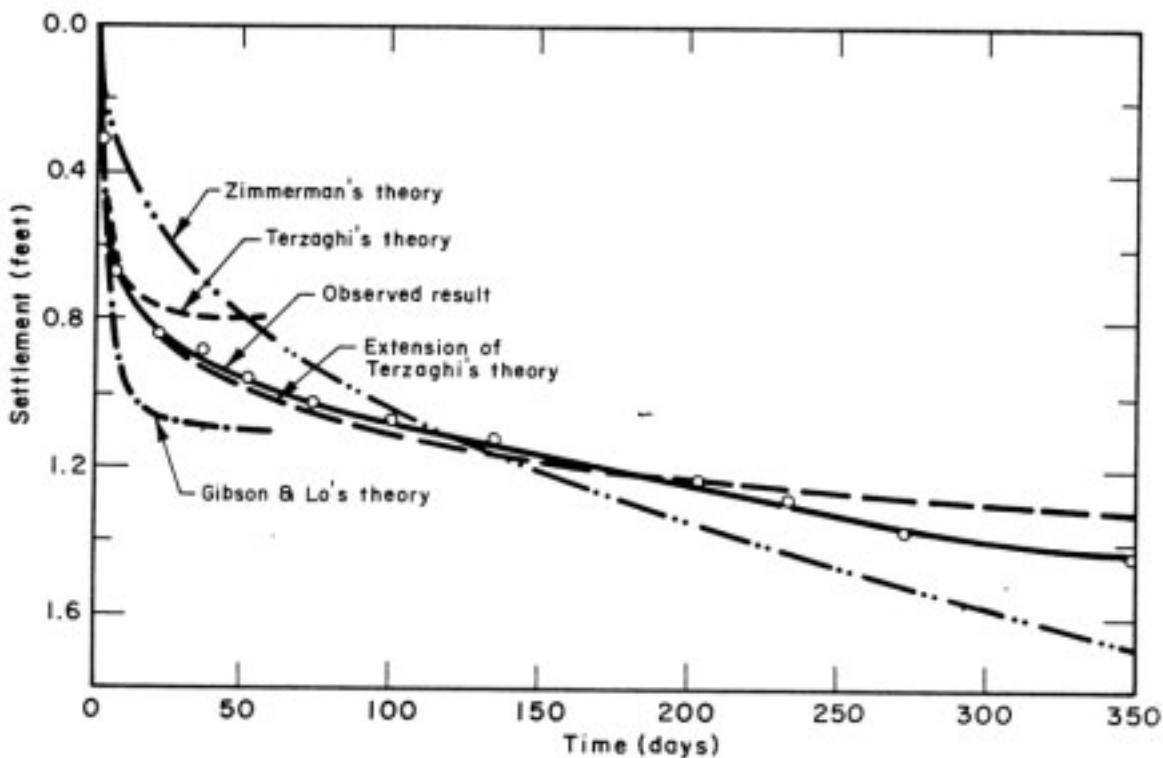


Abb. 2.2-10: Setzungsprognose basierend auf Parametern aus Laborversuchen und Anwendung verschiedener Setzungstheorien und Vergleich mit den In-Situ-Messungen unter einer Probelastung [aus Rao et al. (1997)]

Ähnlich äußern sich GRISOLIA et al. (1995), die feststellen, dass die signifikanten Unterschiede zwischen Abfall und Boden in Bezug auf die Zusammensetzung, Rheologie und Stabilität der festen Bestandteile es praktisch unmöglich machen, geotechnische Theorien und Modelle auf den Abfall anzuwenden.

2.2.3. Zusammenfassung des Wissensstandes zum Setzungsverhalten von Abfallkörpern

Die physikalischen Eigenschaften von Abfallkörpern unterscheiden sich in wesentlichen Punkten, z. B. der Steifigkeit der Einzelbestandteile, von Bodenkörpern. Trotz oder gerade wegen der Problematik, die physikalischen Eigenschaften des Mehrkomponentenstoffes Abfall zu beschreiben, werden bei allen bisher vorhandenen Setzungsuntersuchungen und -prognosen an Abfallkörpern folgende Annahmen getroffen:

- Zur Beschreibung des Abfalls wird eine „verschmierte Betrachtung“ gewählt, wobei die Eigenschaften des Abfalls phänomenologisch betrachtet werden.
- Die in der Bodenmechanik oder anderen Grundlagenfachgebieten vorhandenen Ansätze werden auf den Abfall übertragen, obwohl, wie oben dargestellt, dies - wenn überhaupt - nur sehr eingeschränkt möglich ist.
- Langjährige In-Situ-Messungen an der zu betrachtenden Deponie bilden die Grundlage von Setzungsprognosen. Dies bedeutet, dass eine Voraussage der Setzungen z. B. bei einer Änderung der Abfallzusammensetzung während des Deponiebetriebes oder der Einführung der mechanisch-biologischen Vorbehandlung nicht möglich ist.

Es erscheint daher zwingend erforderlich, den Abfall in Bezug auf sein Setzungsverhalten und den Einfluss der Einzelbestandteile besser zu klassifizieren, um zukünftig eine Setzungsprognose ohne langjährige In-Situ-Messungen zu ermöglichen. Nur so ist es möglich, auf veränderte Abfallzusammensetzungen, z. B. im Zuge neuer Verordnungen oder geänderter Verbrauchergewohnheiten, zu reagieren und differenzierte Setzungsberechnungen ohne langjährige In-Situ-Messungen auch an Altdeponien durchzuführen.

In dieser Arbeit soll daher der Einfluss der physikalischen Vorgänge, welche durch die einzelnen Stoffgruppen des Abfalls mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften bedingt sind, auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern bei behinderter Seitendehnung untersucht werden (s. Kap. 3.1).

Anschließend soll geprüft werden, ob diese Setzungsvorgänge einen solch großen Einfluss auf das Setzungsverhalten besitzen, dass sich die Setzungen nicht mit der Konsolidationstheorie erklären lassen oder ob die Konsolidationstheorie trotzdem für das Setzungsverhalten von Abfallkörpern angewendet werden kann.

Zudem soll der Einfluss der Probenabmessungen sowie der Stückgröße des zu untersuchenden Abfalls auf das Setzungsverhalten betrachtet werden.

3. Versuche

3.1. Modellvorstellung und Arbeitsprogramm

3.1.1. Modellvorstellung

Die Modellvorstellungen zum Setzungsverhalten von Bodenkörpern wurden in Kapitel 2.1 und die Unterschiede der Zusammensetzung von Abfall- und Bodenkörpern in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Die Unterschiede in der Zusammensetzung führen zu einem im Vergleich zu Boden veränderten Setzungsverhalten. Das veränderte Setzungsverhalten resultiert aus Setzungs Vorgängen, die zusätzlich zu der in der Bodenmechanik aufgrund der Verringerung des luft- und wassergefüllten Porenvolumens betrachteten Kornumlagerung erfolgen.

Die Modellvorstellungen zu den zusätzlichen Setzungs Vorgängen bei Abfallkörpern sind:

- Verformung von Bestandteilen unter Veränderung der Materialdichte
 - Nicht-volumenkonstante Verformung unter Kompression des verschlossenen Luftporenvolumens
 - Nicht-volumenkonstante Verformung unter Öffnung des verschlossenen Luftporenvolumens
- Unterschiedliche Verformbarkeit von Materialien gleichen Steifemoduls aber anderer Stückform
- Umlagerung von Spannungen aufgrund von Stückform und mechanischer Eigenschaften der Stücke
- Abbau der organischen Substanz

Die Modellvorstellungen werden im Folgenden erläutert:

- Verformung von Bestandteilen (Stücken) unter Veränderung der Materialdichte:

Unter der Materialdichte wird die Dichte eines Feststoffes ohne den offenen Porenanteil verstanden. Der bodenmechanische Vergleichsparameter ist die Korndichte. Die Verwendung des Begriffes Materialdichte ist im Falle des Abfalls jedoch exakter, da maßgebliche Anteile des Abfalls keine Kornform aufweisen.

Fester Siedlungsabfall enthält Bestandteile, die Lufteinschlüsse besitzen, wie z. B. Spraydosen. Lufteinschlüsse, mit geringerem Einzelvolumen, sind ebenfalls z. B. im Holz und in organischen Bestandteilen vorhanden. Unter Auflast kann es bei einer verformbaren Hülle des Lufteinschlusses zu einer Verformung des Stückes unter Verringerung des Luftporenvolumens kommen (Abb. 3.1-1). Da die Auflast zu einer Druckerhöhung des Lufteinschlusses führt, kann die Volumenverringerung des Stückes, unter Voraussetzung eines idealen Gases,

nach dem Boyle-Mariot'schen Gesetz ($p_0 \cdot V_0 = p_1 \cdot V_1$) berechnet werden, sofern das Ausgangsvolumen V_0 bekannt ist. Bei größerem Druck ($p_1 > p_0$) verringert sich das Volumen des Stückes. Da die Masse jedoch konstant bleibt, wird die messbare Materialdichte erhöht.

Wird aufgrund der Auflast die Festigkeit der Hülle erreicht, so wird der Lufteinschluss von außen zugänglich (Abb. 3.1-1). Die Materialdichte erhöht sich weiter, da die Masse des Stückes nur noch auf das Volumen der Festsubstanz bezogen wird.

Im Falle einer nicht verformbaren Hülle entfällt die Volumenreduktion des Lufteinschlusses. Es kommt bei einer Überschreitung der Festigkeit der Hülle zu einem Bruch des Stückes („Kornbruch“) und damit sprunghaft zu einer Freisetzung des Lufteinschlusses (Abb. 3.1-1, II).

Durch das mechanische Versagen der Hülle entsteht ein zusätzlicher messbarer Luftporenanteil, der einen Einfluss auf die Setzung des Abfallkörpers ausübt, da der Porenanteil und die Porenstruktur des Gemenges sowie die Materialdichte des Feststoffes verändert werden.

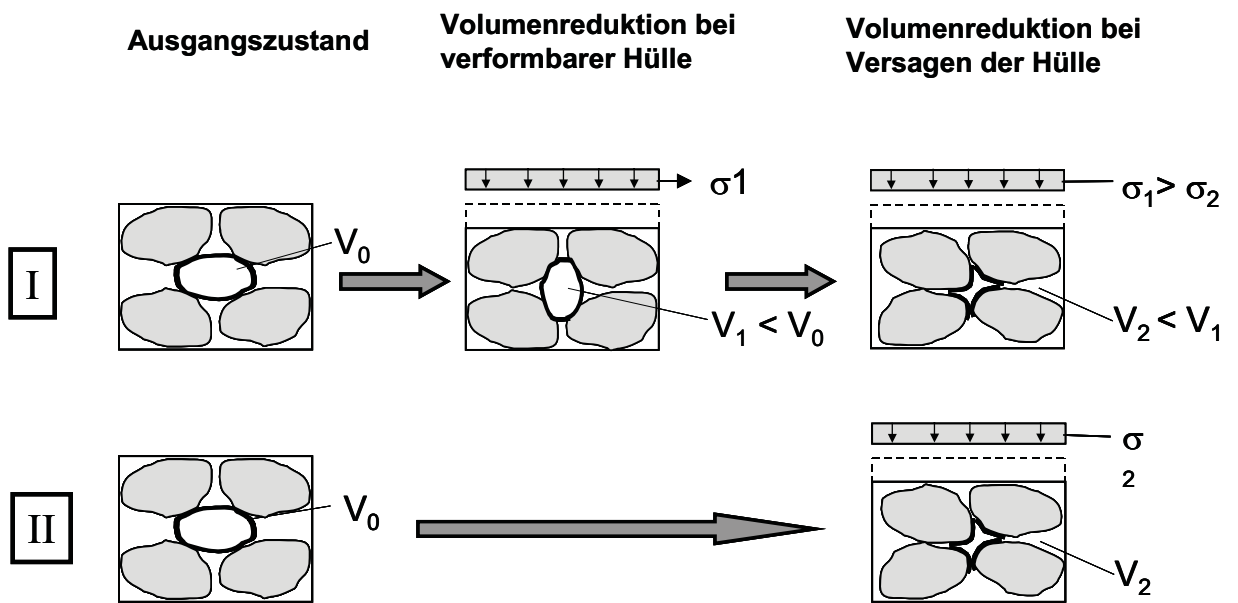


Abb. 3.1-1: Modellvorstellung des aus der nicht-volumenkonstanter Verformung resultierenden Setzungsanteils
I: bei verformbarer Hülle, **II:** bei nicht verformbarer Hülle;
 V_i : Volumen des Hohlkörpers zum Zeitpunkt i

- Unterschiedliche Verformbarkeit von Materialien gleichen Steifemoduls

Einige Bestandteile des Abfalls weisen im Gegensatz zu Bodenkörnern unter Auflast signifikante Eigenverformungen auf. Die Auswirkung der Verformbarkeit der Stücke auf das Setzungsverhalten des Gesamtkörpers ist dabei unter anderem von der Stückform abhängig. Quader- oder kornförmige Bestandteile können zur Bildung eines Stützgerüsts und einem damit verbundenen relativ großen Porenanteil beitragen (Abb. 3.1-2, I), wie dies von rolligen Bodenmaterialien bekannt ist. Flächige oder faserige Bestandteile werden aufgrund ihrer geringen Dicke wesentlich anders verformt. Sie können sich bei der Verformung des Gesamtkörpers an die Bestandteile mit geringerer Eigenverformung anpassen (Abb. 3.1-2, II). Es bildet sich ein geringeres Porenvolumen aus, was gleichbedeutend ist mit größeren Setzungen, als bei quader- oder kornförmigen Bestandteilen.

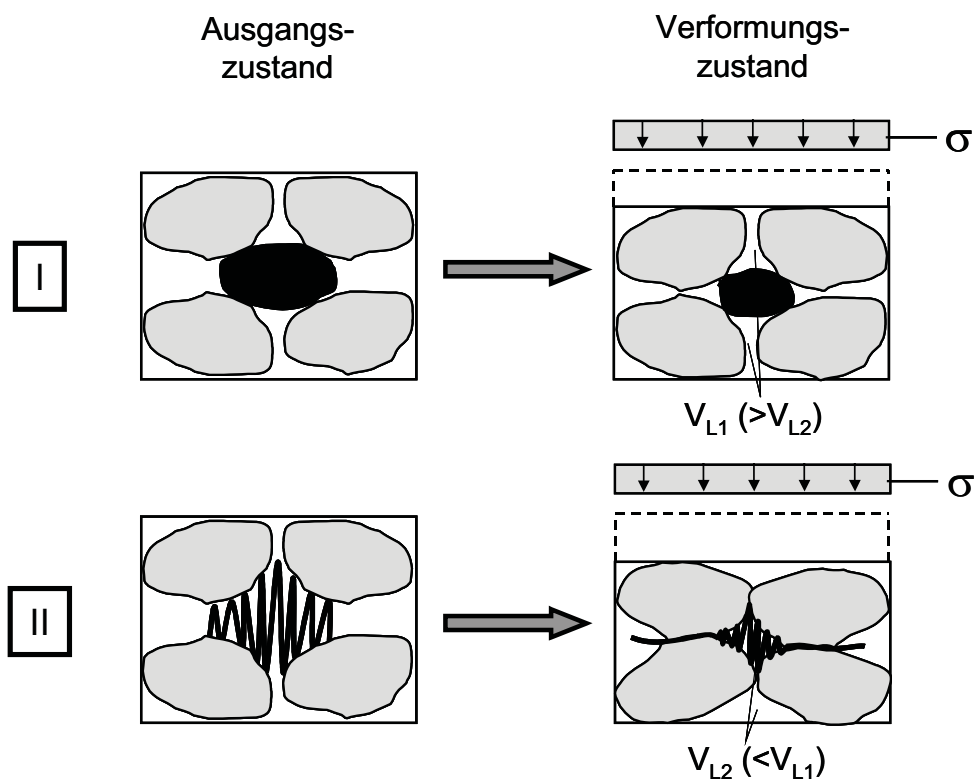


Abb. 3.1-2: Auswirkungen der Stückform verformbarer Bestandteile auf das Setzungsverhalten
 I: Quaderförmig/kornförmig, II: Faser-/folienförmig; V_{Li} : Porenvolumen beim Zustand des Stückes i (= I oder II)

- Umlagerung von Spannungen

Aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten sowie der zum Teil folienartigen oder faserigen Form der Einzelbestandteile kann es im Abfallkörper zu Spannungsumlagerungen kommen.

Bei quader- und kornförmigen Bestandteilen unterschiedlicher Steifigkeiten kommt es zu einer Umlagerung von Spannungen aufgrund von Gewölbeeffecten, wie z. B. aus dem Mauerwerksbau bei Fensteröffnungen oder in Silos bekannt.

Bei faser- oder folienförmigen Bestandteilen kann es auch zu Hohlräumen im Feststoffgerüst durch Spannungsumlagerung infolge von Zugspannungen kommen (Abb. 3.1-3). Durch die Umlagerung der Spannungen kann es zu deutlich unterschiedlichen Spannungsverhältnissen innerhalb des Abfallkörpers kommen, wodurch das Setzungsverhalten direkt beeinflusst wird.

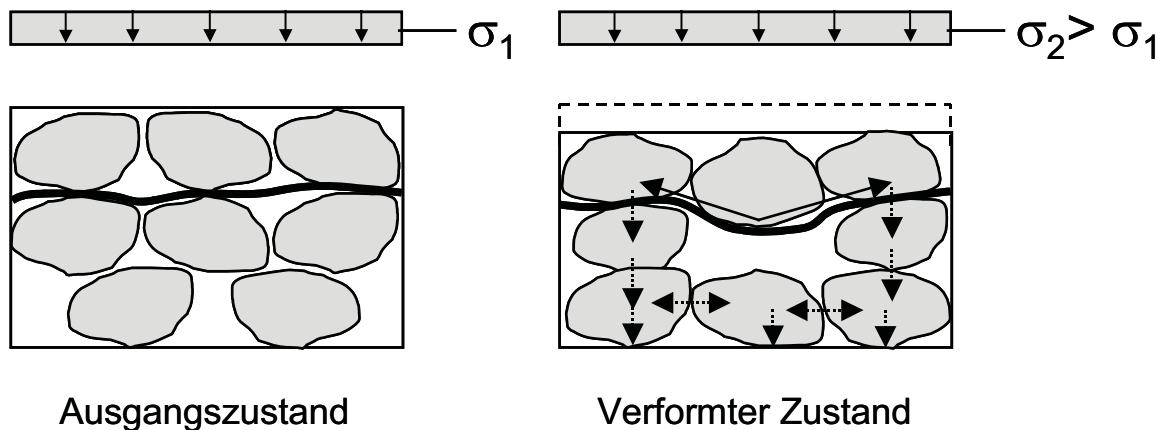


Abb. 3.1-3: Modellvorstellung der durch faser- oder folienförmige Bestandteile hervorgerufenen Spannungsumlagerung

- Abbau der organischen Substanz

Die im Abfall enthaltene organische Substanz kann biochemisch in Gas und Wasser umgewandelt werden (Abb. 3.1-4). Die gasförmigen und flüssigen Produkte und ihre Zusammensetzung sowie die Abbaugeschwindigkeit hängen dabei von den in der Probe vorhandenen Randbedingungen ab.

Durch den biochemischen Abbau von Festsubstanz wird ein neuer Porenraum geschaffen. Dieser Porenraum kann mit Gas oder Wasser gefüllt sein. Dadurch kann es zu einer Umlagerung der verbliebenen Festsubstanz kommen. Weiterhin kann durch das gebildete Gas oder Wasser ein zusätzlicher Druck im Abfallkörper entstehen. So kann es zu einer Verringerung des Scherwiderstandes sowie zu einer Auflockerung des Gefüges kommen. Das Entweichen des Fluids führt zu einer weiteren Verringerung des Porenvolumens und damit zu weiteren

Setzungen des Abfallkörpers. Die Geschwindigkeit des Entweichens ist dabei von den Randbedingungen im Abfallkörper z. B. von dem Porenvolumen und der Porenstruktur oder der Temperatur abhängig. Sie kann sehr klein sein, so dass sich das Zeit-Setzungsverhalten nur schwer prognostizieren lässt.

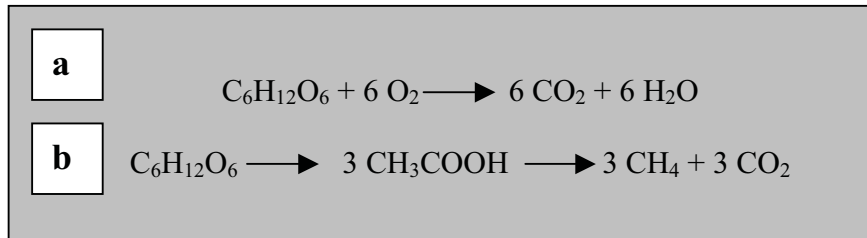


Abb. 3.1-4: Chemische Reaktionsgleichung des mikrobiellen Abbaus von Glucose unter aeroben (a) und anaeroben (b) Bedingungen

- Wechselwirkungen zwischen den Setzungsanteilen

Bei der Setzung von Abfallkörpern können, neben den aus der Bodenmechanik bekannten Setzungsanteilen, zusätzlich die oben beschriebenen Setzungsvorgänge auftreten. Dabei kann es zwischen den einzelnen Setzungsanteilen zu Interaktionen kommen. So kann es z. B. durch den biochemischen Abbau von Festsubstanz zur Bildung eines Hohlraumes kommen, wodurch Zugspannungen in einer über dem Hohlraum liegenden Folie erzeugt werden und es zu einer Umlagerung der Lasten aus diesem Bereich in einen anderen Bereich kommt. Dort kann es aufgrund der erhöhten Spannungen zum Bruch oder zu Umlagerungen einzelner Bestandteile kommen.

3.1.2. Ziel der Untersuchung

Das Gesamtsetzungsverhalten von Abfallkörpern ergibt sich aus einer Kombination aller in Kapitel 3.1.1 genannten Setzungsanteile und des Struktureffektes. Die einzelnen Setzungsvorgänge besitzen dabei einen unterschiedlich großen Einfluss auf das Gesamtsetzungsverhalten.

In dieser Arbeit wurde daher, basierend auf den Modellvorstellungen aus Kapitel 3.1.1, anhand von Laborversuchen überprüft, ob der Zeit-Setzungsverlauf von Abfallkörpern mit der Konsolidationstheorie hinreichend genau abgebildet werden kann bzw. ob der Einfluss der „nicht-bodenähnlichen“ Setzungsanteile zu einem - gegenüber der Konsolidationstheorie - deutlich veränderten Zeit-Setzungsverhalten führt.

Weiterhin wurde in Laborversuchen der Einfluss

- der nicht-volumenkonstanten Verformung fester Bestandteile unter Veränderung der Materialdichte und
- der unterschiedlichen Verformbarkeit von Materialien gleichen Steifemoduls

auf das Setzungsverhalten untersucht und charakteristische Stoffgruppen, in denen diese Setzungsanteile maßgeblich auftreten, ermittelt.

Die biologische Umsetzung der organischen Substanz wurde nicht betrachtet, da dieses ein sehr langwieriger Prozess ist, der stark von den Randbedingungen im Abfallkörper, wie z. B. der Sauerstoff- oder Wasserversorgung, abhängig ist. Diese Einflüsse lassen sich in Ödometerversuchen nicht modellieren.

FRIEDRICH und FRICKE (1998) beschreiben einen Ansatz zur Berechnung der maximalen Setzung, die aus dem Abbau organischer Substanz resultieren kann. Dabei wird jedoch der Einfluss der Struktur des Gemenges vernachlässigt, so dass die Gesamtsetzungen deutlich kleiner als die berechneten Setzungen sein können. Der Zeit-Setzungsverlauf kann mit diesem Ansatz nicht ermittelt werden.

Der Struktureffekt, wie er z. B. bei der Umlagerung von Spannungen aufgrund der Stückform auftritt, ist bei allen Versuchen sowie In-Situ durch die Zusammensetzung des Abfalls immer vorhanden. Es sollten in dieser Arbeit jedoch die grundlegenden Setzungsprozesse in Anlehnung an die Modellvorstellungen aus Kapitel 3.1.1 separat untersucht werden, bevor die Verbindung aller Setzungsprozesse durch die Struktur des Abfalls betrachtet wird. Der Einfluss der Struktur wurde in dieser Arbeit daher nicht explizit untersucht, sondern möglichst gering gehalten. Er wird bei der Auswertung der Versuche deshalb phänomenologisch betrachtet.

Aufgrund der von der Kornform abweichenden Stückform der Abfallbestandteile und der gegenüber Böden deutlich größeren Stückgröße können die in der DIN 18135 (Entwurf) festgelegten Größenverhältnisse zwischen maximalem Korndurchmesser und Versuchsgeräteabmessung sowie die Verhältnisse des Versuchsgerätedurchmessers zur -höhe nicht auf die Untersuchung von Abfällen in Laborversuchen übertragen werden. Es sollten daher erste Versuche zum Einfluss des Größenverhältnisses von maximaler Stückgröße und Versuchsgeräteabmessung für Ödometerversuche mit Abfällen durchgeführt werden.

3.1.3. *Arbeitsprogramm und Materialauswahl*

Aus den oben genannten Aufgabenstellungen ergeben sich die Anforderungen an das zu untersuchende Material. Da der Struktureinfluss möglichst gering gehalten werden sollte, war es erforderlich, ein Material mit geringer Stückgröße zu verwenden. Weiterhin musste der Anteil an biologisch abbaubarer organischer Substanz möglichst klein sein, um auch diesen Einfluss während der Versuchsdurchführung und während der Probenlagerung weitestgehend auszuschalten. Dieses Ausgangsmaterial, das für alle weiteren Versuche als Basismaterial diente, sollte in seinen physikalischen Eigenschaften möglichst genau zu beschreiben sein. Es wird im Folgenden als Grundmaterial bezeichnet.

Als Grundmaterial wird in solchen Fällen meist ein Modellmaterial eingesetzt, welches die Eigenschaften, in diesem Fall die physikalischen Eigenschaften, des zu untersuchenden Materials hinreichend genau wiedergibt. Im Fall von Abfall ist dies jedoch nicht möglich, da neben den in Kapitel 2.2 genannten verschiedenen physikalischen Eigenschaften, wie z. B. Steifemodul oder Stückform, noch weitere Faktoren, wie z. B. verschiedene Rauigkeiten der Oberfläche innerhalb einer Stoffgruppe sowie Stückgröße und -form und räumliche Verteilung der einzelnen Eigenschaften, hinzukommen. Es ergibt sich damit eine so große Zahl von Kombinationen und Unbekannten, dass die Verwendung eines Modellmaterials nicht sinnvoll ist.

Deshalb ist als Grundmaterial ein mechanisch-biologisch vorbehandelter Siedlungsabfall verwendet worden, dessen Struktureigenschaften nur verschmiert (phänomenologisch) betrachtet werden.

Der Einsatz von mechanisch-biologisch behandeltem Material als Grundmaterial ist sinnvoll, da dieses Material trotz der biologischen Behandlung und der Ausschleusung eines Teiles einiger Stoffgruppen, alle auch im Frischabfall befindlichen Stoffgruppen enthält. Es können daher die wesentlichen mechanischen Eigenschaften, die bei Frischabfall auftreten, auch durch mechanisch-biologisch behandelten Abfall abgebildet werden. Einzelne Effekte können beim Frischabfall zu Beginn der Deponierung größer sein. Mit fortschreitendem biologischen Abbau der organischen Substanz wird das Material einem mechanisch-biologisch behandelten Abfall immer ähnlicher. Weiterhin erfüllt der mechanisch-biologisch behandelte Siedlungsabfall im Gegensatz zu frischem Siedlungsabfall die Forderung nach geringer Veränderung der organischen Substanz während des Versuches und der Lagerung, da der organische Anteil deutlich reduziert wurde (FRICKE und MÜLLER (1999)) und maßgeblich aus biologisch schwer abbaubaren Komponenten z. B. Lignin besteht (FRIEDRICH und FRICKE (1998)).

Da der Struktureffekt möglichst gering gehalten werden sollte und das Grundmaterial weiterhin in drei verschiedenen Ödometertypen unterschiedlicher Größe eingesetzt werden sollte (Abb. 3.1-6), dessen kleinstes Ödometer einen Probendurchmesser von 100 mm und eine Probenhöhe von 20 mm besitzt (Kap. 3.3), wurde das Material R als Grundmaterial ausgewählt.

Bei diesem Material handelt es sich um einen Siedlungsabfall, der dem Landkreis Brandenburg entstammt. Er wurde vor der biologischen Behandlung in einer Kugelmühle zerkleinert und anschließend mit einem 5 mm-Sieb abgeseibt. Der Siebüberlauf, der hauptsächlich aus größeren Inertanteilen und Kunststoffen besteht, wurde ausgeschleust. Der Siebdurchgang ist sieben Wochen in Tunnelreaktoren mit Zwangsbelüftung aerob biologisch behandelt worden.

Dem Grundmaterial wurden gezielt Stoffe zugesetzt (Abb. 3.1-5) zur

- Überprüfung, ob die Setzungen von Abfallkörpern mit der Konsolidationstheorie ausreichend genau beschrieben werden können, zur
- Bestimmung des Einflusses der nicht-volumenkonstanten Verformung und zur
- Bestimmung des Einflusses der unterschiedlichen Verformbarkeit einzelner Bestandteile bei gleichem Steifemodul

Die zugesetzten Stoffe wurden so gewählt, dass sie die mechanischen Eigenschaften des Gemenges gemäß des jeweiligen Untersuchungszieles verändern. Diese Stoffe werden als Zusätze bezeichnet und wurden durch Rühren mit dem Grundmaterial gleichmäßig vermengt.

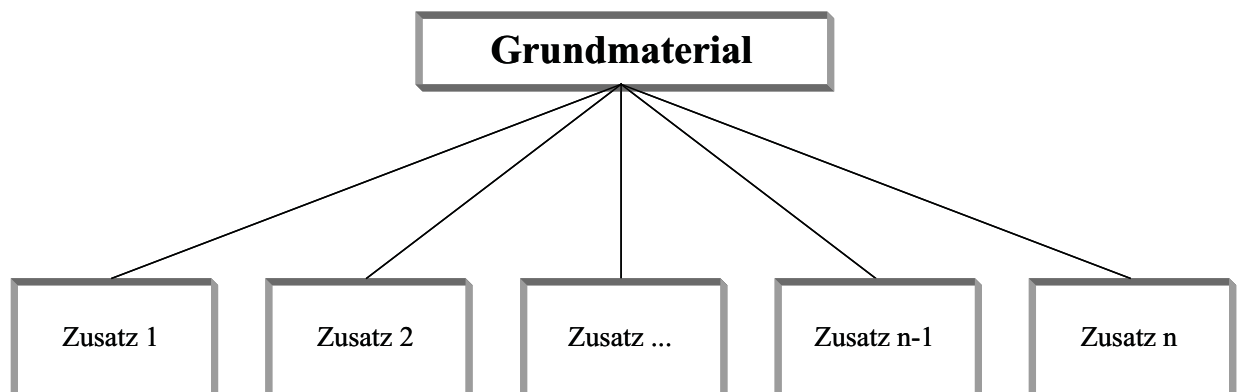


Abb. 3.1-5: Schematische Versuchskonzeption zur Bestimmung des Einflusses einzelner Setzungsprozesse auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern

Die Anforderungen an die Zusätze ergeben sich durch die Aufgabenstellung und durch die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Bestandteile von Abfallkörpern. Die physikalischen Reaktionen des Gemenges resultieren aus den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Einzelstoffe sowie deren Zusammenwirken, z. B. Kraftübertragung durch Reibungs- oder Zugkräfte. Die Größe des Massen- oder Volumenanteils jeder einzelnen Komponente besitzt dabei ebenso einen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Gemenges wie die Stückgröße oder -form. Siedlungsabfälle werden daher bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften gemäß GDA-EMPFEHLUNGEN 1-7 (1997) in folgende Stoffgruppen unterteilt:

- Großteile
- Papier und Pappe
- Kunststoffe, weich
- Kunststoffe, hart
- Metalle
- Mineralien
- Holz
- Organik
- Schlamm
- Sortierrest
 - Korngröße 40 – 120 mm
 - Korngröße 8 – 40 mm
 - Korngröße < 8 mm

Die nicht den Großteilen oder der Schlammfraktion zugeordneten Bestandteile werden in einem zweiten Sortierschritt nach ihrer Form klassifiziert. Dabei wird zwischen den vier Formen DIM 0, 1, 2 und 3 unterschieden (s. a. Abschnitt 2.2.1.4).

Großteile und Schlamm werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

Großteile (z. B. Matratzen) eignen sich aufgrund ihrer Größe nicht für die Untersuchungen im Labor. Weiterhin setzen sie sich aus stofflichen Anteilen zusammen, die mechanisch getrennt in den Einzelfractionen untersucht werden (für Matratzen z. B. Textilien und Metalle sowie ein Füllmaterial, das entweder den weichen Kunststoffen oder der Papierfraktion zugeordnet wird).

Schlamm besteht zu einem maßgeblichen Anteil aus Wasser, das nach dem Aufplatzen der Organismen austritt. Da für diese Fraktion hinreichend Untersuchungen zum mechanischen Verhalten und zum Entwässerungsverhalten vorliegen (z. B. MÜLLER (1996), KEUSCH (1991) und MÖLLER (1985)), wird sie hier nicht untersucht. Das Setzungsverhalten von Schlämmen ist maßgeblich durch die Konsolidation geprägt, da die Schlämme auch nach der Stabilisierung noch einen hohen Wasseranteil aufweisen.

Metalle werden ebenfalls nicht gesondert betrachtet, da sich ihr Setzungsverhalten wegen des hohen Steifemoduls unwesentlich von dem der mineralischen Fraktion unterscheidet. Der Setzungseinfluss der Metallfraktion kann daher in Laborversuchen durch den rolligen Anteil der mineralischen Fraktion abgebildet werden.

Gleiches gilt für die harten Kunststoffe, welche sich von den Inertmaterialien hauptsächlich durch den unter Auflast evtl. auftretenden Bruch von flächigen oder faserigen Stücken (Kornbruch der DIM 1 und DIM 2) unterscheiden. Für Bestandteile der DIM 0 und DIM 3 (Korn und Kasten) tritt kein maßgeblicher Kornbruch auf. Es handelt sich daher um einen Struktureffekt, der in dieser Arbeit nicht explizit untersucht werden soll. Daher kann hier auch das setzungsrelevante Verhalten von hartem Kunststoff durch die mineralische Fraktion abgebildet werden.

Bei der mineralischen Fraktion muss bezüglich des Setzungsverhaltens zwischen rolligen und bindigen Materialien unterschieden werden. In dieser Arbeit werden deshalb sowohl ein Quarzsand als auch ein Mahlton eingesetzt. Im Folgenden wird die Fraktion mit einem sehr hohen Steifemodul (Boden, harte Kunststoffe und Metalle) als Inertfraktion oder Inertanteil bezeichnet.

Papier und Pappe liegen bei Siedlungsabfällen, abgesehen von dicken Büchern, die sich in Laborversuchen kaum sinnvoll verwenden lassen, in der Regel in der Dimension 2 (DIM 2) vor. Bei mechanisch-biologisch behandeltem Abfall ist der Anteil an Papier und Pappe in der Regel in der Fraktion < 40 mm zu finden, da das Papier und die Pappe bei der mechanischen Behandlung in kleine Stücke zerteilt und während der biologischen Behandlung nur wenig abgebaut werden (Die Halbwertszeit von cellulosehaltigem Material in Abfallkörpern beträgt z. B. nach EI-FADEL et al. (1996) zwischen 6,3 und 95 Jahren). Abgesehen von der Möglichkeit Wasser aufzunehmen sowie der gegenüber weichen Kunststoffen geringeren Festigkeit sind die grundsätzlichen Verformungsmechanismen denen des weichen Kunststoffes der Dimension 2 (DIM 2) gleich. Um die Vielzahl der Versuchsvarianten zu begrenzen kann die Stoffgruppe von Papier und Pappe daher durch flächige weiche Kunststoffe abge-

bildet werden, ohne dass dabei wesentliche Auswirkungen der Abfallzusammensetzung auf das Setzungsverhalten unberücksichtigt bleiben.

Aus den Überlegungen zum mechanischen Verhalten der einzelnen Stoffgruppen und den Modellvorstellungen sowie den Untersuchungszielen dieser Arbeit ergeben sich daher folgende zu untersuchende Stoffgruppen gemäß GDA-EMPFEHLUNG E 1-7 als Zusätze zum Grundmaterial:

- Inertstoffe
- Weiche Kunststoffe
- Organik und
- Holz

Der Zusatz von Inertstoffen dient dabei der labortechnischen Überprüfung, ob das Setzungsverhalten von Abfallkörpern allein mit der Konsolidationstheorie ausreichend beschrieben werden kann. Weiterhin wurde dadurch der Einfluss von Bestandteilen körniger Form und hohem Steifemodul auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern untersucht.

Mit dem Zusatz von weichen Kunststoffen soll erstens der Einfluss von Bestandteilen geringer Steifigkeit und zweitens der Einfluss der unterschiedlichen Verformbarkeit von Materialien gleichen Steifemoduls aber unterschiedlicher Form untersucht werden. Es werden deshalb als Zusätze sowohl quaderförmige als auch folienförmige weiche Kunststoffe eingesetzt.

Zur Bestimmung des Einflusses der nicht-volumenkonstanten Verformung von festen Bestandteilen werden sowohl Holz- als auch Organikzusätze verwendet.

Der Einsatz großvolumiger Bestandteile, wie z. B. Spraydosen, ist nicht sinnvoll, da diese Bestandteile ein gegenüber dem eingesetzten Grundmaterial zu großes Volumen besitzen und deshalb einen zu großen Struktureffekt ausüben. Dieser Effekt sollte bei den Untersuchungen in dieser Arbeit weitestgehend ausgeschlossen werden.

Der Einsatz von frischer Organik ermöglicht es zudem, den Einfluss durch das Auspressens von Wasser, welches im Abfall gebunden ist, zu bestimmen. Weiterhin wird dadurch ein erster Ansatz zur Übertragbarkeit der mit dem mechanisch-biologisch behandelten Abfall ermittelten Ergebnissen auf organikhaltige frische und deponierte Siedlungsabfälle erhalten.

Die Auswahl der eingesetzten Zusatzstoffe sowie die notwendigen biologischen bzw. chemischen und die erforderlichen physikalischen Kenngrößen sind in Kapitel 3.2 beschrie-

ben. In Kapitel 3.4 sind die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zusammengestellt.

Da in dieser Arbeit erste grundlegende Untersuchungen zu den physikalischen Ursachen des Setzungsverhaltens von Abfallkörpern durchgeführt werden sollten, wurde jeweils nur der Zusatzstoff, bei dem eine Vergrößerung des nachzuweisenden Effekts (Modellvorstellungen, Kap. 3.1) gegenüber dem Grundmaterial zu erwarten war, zugegeben. Eine Kombination mehrerer Zusätze, d. h. eine Überlagerung der einzelnen Effekte, wurde nicht untersucht.

Nach der Betrachtung grundsätzlicher Setzungseigenschaften von Abfallkörpern wurde abschließend der Einfluss des Verhältnisses von Stückgröße des Abfalls zu Geräteabmessungen bzw. der Einfluss unterschiedlicher Verhältnisse der Geräteabmessungen untersucht (Abb. 3.1-6). Diese Versuche wurden mit dem Grundmaterial R und unterschiedlichen Probenabmessungen durchgeführt.

Die geringe Maximalstückgröße des Grundmaterials R erlaubte jedoch bei den Ödometern \varnothing 23 cm und 60 cm nur größere Verhältnisse zwischen Probendurchmesser bzw. -höhe und maximaler Stückgröße als in der DIN 18135 (Entwurf) für Böden vorgeschrieben. Da die Maximalstückgrößen von Abfällen in der Regel jedoch wesentlich größer als 8 mm sind und sich daher eher geringere Verhältnisse ergeben als in der DIN 18135 (Entwurf) beschrieben, wurde zusätzlich ein weiterer mechanisch-biologisch behandelte Abfall mit einer größeren Maximalstückgröße in den Versuchen eingesetzt. Bei diesem Material „NW“ handelt es sich um Abfall aus dem Landkreis Neuwied, der in einer dreiwöchigen zwangsbelüfteten aeroben Behandlung mit häufigem Umsetzen und einer neunwöchigen dynamischen Tafelmieten-Nachrotte mit 8 bis 10-tägigem Umsetzrhythmus biologisch behandelt wurde. Das Material wurde vor der Intensivrotte grob zerkleinert und durch den häufigen Umsetzvorgang während der Intensivrotte weiter zerkleinert. Vor dem Aufsetzen der Tafelmieten-Nachrotte wurde das Material mit einem 40 mm-Sieb gesiebt. Das Material < 40 mm ist anschließend in dieser Arbeit verwendet worden.

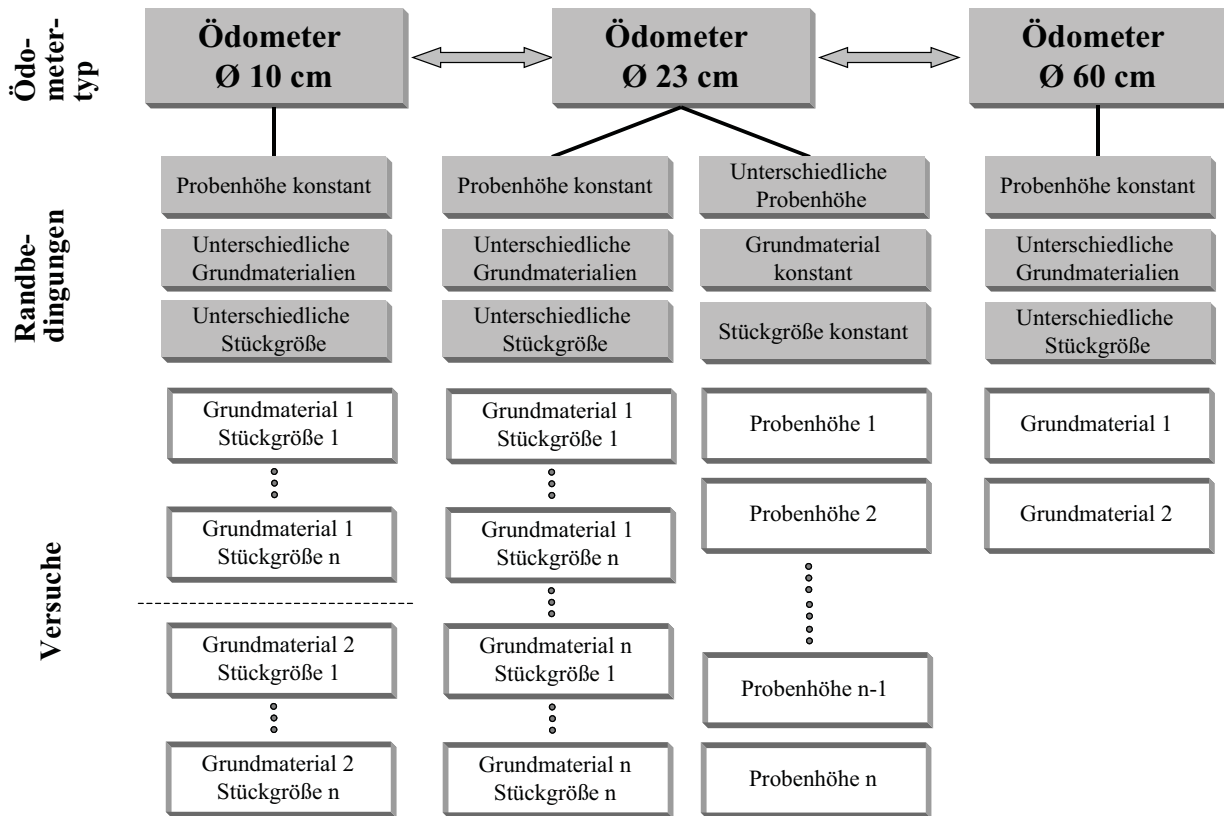


Abb. 3.1-6: Schematische Versuchskonzeption zur Bestimmung des Einflusses der Größenverhältnisse zwischen Abfallstückgröße und Geräteabmessung bzw. der Größenverhältnisse der Geräteabmessungen

3.2. Beschreibung der Versuchsmaterialien

3.2.1. *Allgemeines*

Für die Grundmaterialien R und NW werden in diesem Kapitel physikalische Kenngrößen sowie die Ergebnisse der durchgeführten chemischen Analysen und der Versuche zur Bestimmung der biologische Stabilität dargestellt. Für die Zusätze sind die entscheidenden physikalischen Kennwerte beschrieben.

Bei der späteren Vermengung von Grundmaterial und Zusatzstoff wurden die für das jeweils entstehende Material angesetzten Größen so weit wie möglich rechnerisch bestimmt, z. B. die Materialdichte. Für weitere Kennwerte, die nicht durch die rechnerische Überlagerung bestimmt werden können, wie z. B. die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, wurden weitere Versuche durchgeführt. Diese Versuche bzw. Kennwerte werden in späteren Abschnitten beschrieben.

3.2.2. *Chemische Analysen und biologische Stabilität der Grundmaterialien*

Zur Ermittlung des organischen Anteils wurden der Sauerstoffbedarf innerhalb von vier Tagen unter aeroben Bedingungen (AT_4) und die Gasbildung unter anaeroben Bedingungen innerhalb von 21 Tagen (GB_{21}) gemäß der ABFALLABLAGERUNGSVERORDNUNG (2001) und dem Vorschlag des BMBF-Forschungsverbundes „Mechanisch-biologische Abfallbehandlung von zu deponierenden Abfällen“ (BOCKREIS et al. (2000)) bestimmt. Weiterhin wurden der Glühverlust (GV) und der gesamte organische Kohlenstoffanteil (TOC) ermittelt.

Die Werte für die Grundmaterialien R und NW sind in Tab. 3.2-1 zusammengestellt.

Tab. 3.2-1: Beschreibung der Grundmaterialien – biochemischer Zustand

| Material | Dauer** | AT ₄ | GB ₂₁ | TOC | GV |
|----------|-----------|------------------------------|------------------|-------|-------|
| | | [mg/g] O ₂ /TS | [l/kg] | [%] | [%] |
| R | 1 Woche | 3,4* | 6,2* | 10,0* | 24,7* |
| | 44 Wochen | n. b. | n. b. | 9,0 | 23,0 |
| | 52 Wochen | n. b. | n. b. | 8,5 | 23,0 |
| NW | 1 Woche | 1,6 | 19,2 | 8,4 | 28,3 |
| | 30 Wochen | n. b. | n. b. | 9,4 | 28,1 |
| | 38 Wochen | n. b. | n. b. | 7,5 | 24,0 |

*: Daten wurden freundlicherweise von Herrn HÖRING (2000) zur Verfügung gestellt.

** : Dauer nach Ende der biologischen Behandlung (=Lagerdauer)

Die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der biologischen Stabilität sowie des TOC bestätigen die These, dass sich das Grundmaterial während der Probenlagerung durch die biologische Umsetzung der organischen Substanz nur geringfügig verändert. Der Einfluss der Probenlagerung auf die Versuchsergebnisse ist daher gering, was sich auch in den Ergebnissen der Versuche (s. Kap. 4.2) widerspiegelt.

3.2.3. *Physikalische Kenngrößen*

3.2.3.1. Bestimmungsmethoden

Zur Klassifizierung der untersuchten Materialien wurden, soweit erforderlich, folgende Kennwerte bestimmt:

- Stückgrößenverteilung
- Stückform
- Materialdichte
- Proctordichte
- Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit
- Steifemodul

Die meisten Kennwerte konnten in Anlehnung an oder direkt nach DIN-Verfahren bestimmt werden, da die verwendeten Grundmaterialien und Zusätze eine maximale Stückgröße von < 40 mm aufweisen.

Die Bestimmungen der Stückform wurde gemäß GDA-Empfehlung E 1-7 durchgeführt.

Die Materialdichtebestimmung erfolgte in Anlehnung an die Korndichtebestimmung für Böden, die in der DIN 18124 (9/89) geregelt wird. Abweichend von der Norm wurde statt des Kapillarpyknometers mit einem Volumen von 100 cm³ ein Erlenmeierkolben mit einem Gesamtvolumen von ca. 600 cm³ verwendet. Die verwendeten Erlenmeierkolben besaßen, wie das Kapillarpyknometer, Glasstopfen und Schliff. Das Volumen der eingesetzten Erlenmeierkolben wurde für jeden Kolben vor den Versuchen bestimmt. Die Verwendung der Erlenmeierkolben wurde gewählt, um das Material unzerkleinert untersuchen zu können.

Die Stückgrößenverteilung wurde nach DIN 18123 (4/83) ermittelt.

Der Proctorversuch wurde nach DIN 18127 (5/87) in einem Proctortopf mit einem Durchmesser von 25 cm durchgeführt. Da in dieser Arbeit nur Material mit einer Maximalstückgröße von 40 mm eingesetzt wurde, konnten gemäß DIN 18127 (5/87) drei Lagen je 7 cm Dicke eingebaut werden, ohne dass die Verdichtung durch große harte Bestandteile behindert und damit die Einbaudichte verringert wurde („Steinphänomen“ nach STEUBE (1996)).

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde in Anlehnung an DIN 18130 (11/89) mit fallender Wassersäule bestimmt. Der Beiwert der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit wurde wegen der Stückgröße von bis zu 40 mm jedoch mit einem Probendurchmesser von 25 cm bestimmt, da es bei geringeren Durchmessern zu Sperrschichten kommen kann.

3.2.3.2. Grundmaterialien

In diesem Abschnitt werden die Kennwerte dargestellt, die für die Grundmaterialien NW und R ermittelt wurden.

Das Grundmaterial R weist trotz der Absiebung des mechanisch behandelten Abfalls mit einem 5mm-Sieb noch einen beträchtlicher Anteil an Stücken > 5 mm und sogar > 8 mm auf. Die Siebung erfolgte vor der biologischen Behandlung mit einer großtechnischen Siebanlage bei „natürlichem“ Wassergehalt, d. h. bei dem Wassergehalt, mit dem der Abfall angeliefert wurde. Die Stücke > 5 bzw. 8 mm setzen sich vor Allem aus aneinander haftenden Teilchen (Konglomeraten, Klumpen) und Bestandteilen mit einer oder zwei langen Seiten (z. B. Stöcken) zusammen. Die Verklumpungen haben sich vermutlich erst nach der Siebung auf der Abfallbehandlungsanlage, z. B. beim Transport oder Be- und Entladen, gebildet. Größere feste Bestandteile können bei der Siebung großer Massen hochkant durch das Sieb hindurchfallen. Bei der Sortieranalyse im Labor werden diese Bestandteile hingegen optisch entdeckt und manuell der größeren Stückgröße zugeordnet, so dass sich der Anteil der größeren Stücke

erhöht und der Anteil der kleineren hingegen verringert. Die Maximalstückgröße des Grundmaterials R ist geringer als 16 mm (Abb. 3.2-1). Eine Untersuchung bezüglich der absoluten Maximalstückgröße des Materials R erfolgte aufgrund der in Anlehnung an DIN 18123 und DIN ISO 3310 verwendeten Siebkaskade nicht.

Eine Schlämmanalyse des Feinmaterials wurde ebenfalls nicht durchgeführt, da die Materialdichte der Einzelbestandteile variiert und die Form nicht in jedem Falle rund ist. Eine Schlämmanalyse würde somit zu nicht interpretierbaren Ergebnissen führen.

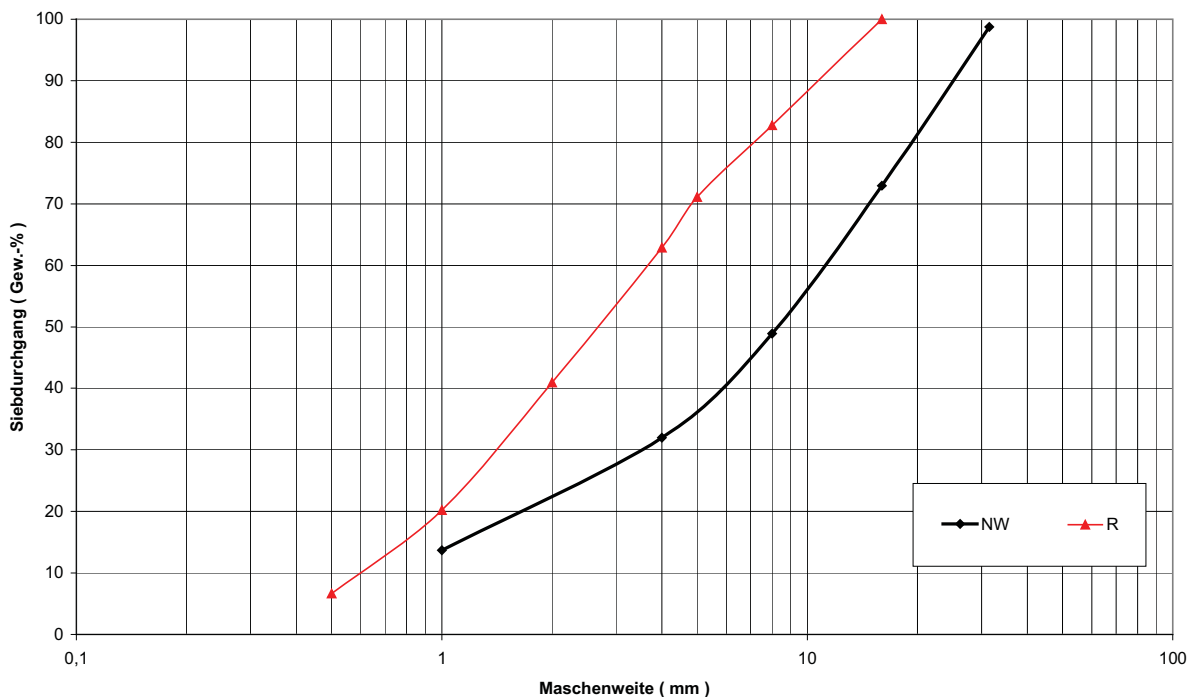


Abb. 3.2-1: Stückgrößenverteilung für die Grundmaterialien NW und R

Auf die Bestimmung der Stückform (DIM 0 bis 3) des Grundmaterials R, mit dem die Versuche zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Bestandteile auf das Setzungsverhalten durchgeführt wurden, wurde verzichtet, da die maximale Stückgröße 8 mm beträgt. Das Grundmaterial R weist gemäß GDA-Empfehlung E 1-7 daher komplett eine Stückform DIM 0 auf, obwohl optisch eine deutlich faserige Struktur erkennbar ist. Da sich die Fasern zu kleinen Klumpen zusammengefügt hatten, war eine Sortierung nicht möglich.

Das Grundmaterial NW weist einen großen Massenanteil an DIM 0 auf (Abb. 3.2-2), da gemäß GDA-EMPFEHLUNG auch die Fraktion < 8 mm als DIM 0 betrachtet wird, obwohl natürlich auch hier kleinflächige und kurzfasrige Bestandteile enthalten sind. Die zweite maßgebliche Dimension ist DIM 2 (Abb. 3.2-2), also die flächigen Bestandteile.

Das Grundmaterial NW weist daher eine vom Boden deutlich unterschiedliche Stückformverteilung auf, die zu veränderten mechanischen Eigenschaften führt.

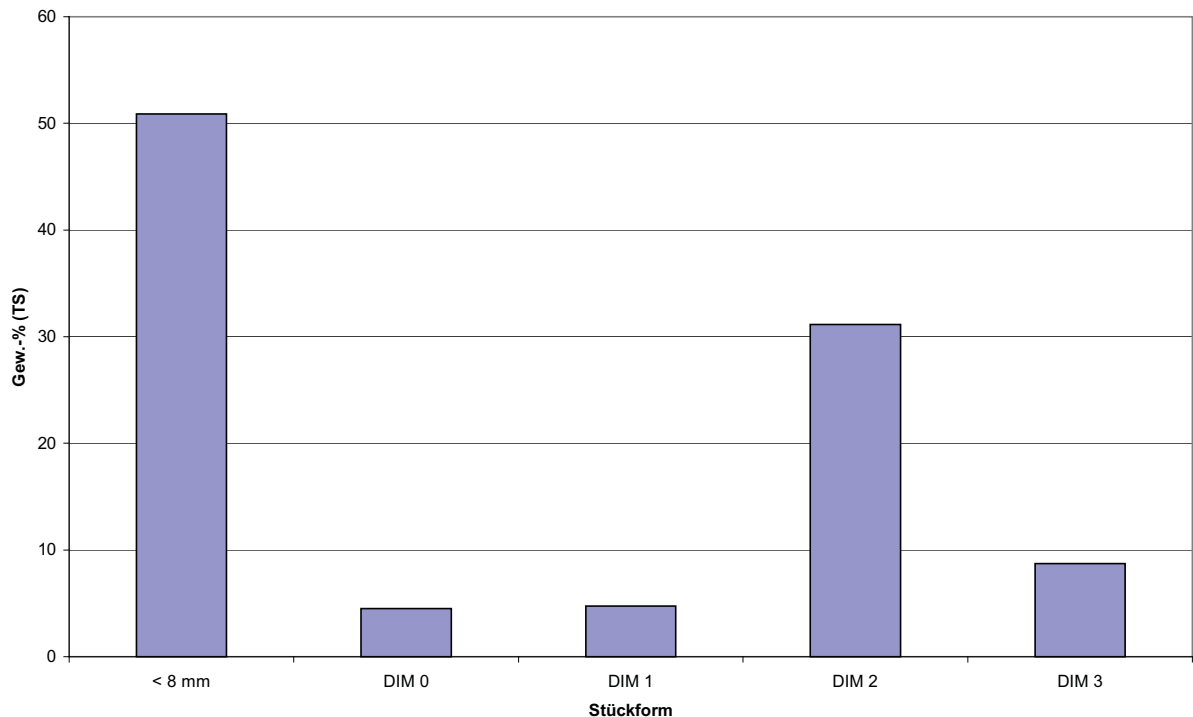


Abb. 3.2-2: Dimensionsverteilung des Grundmaterials NW

Der Proctorkennwert bietet einen Anhaltspunkt um die Verdichtbarkeit verschiedener Abfälle miteinander vergleichen zu können, obwohl die Übertragbarkeit der ermittelten Kennwerte auf In-Situ-Konditionen nicht möglich ist und der physikalische Hintergrund der Verdichtung von Abfällen im Proctorversuch nicht bekannt ist. Einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse von Proctorversuchen an Abfällen dürfte dabei sowohl die unterschiedliche und von Böden verschiedene Querdehnung des Abfalls unter Auflast sein, so dass die horizontalen Kräfte auf die Wand deutlich größer sind als bei Böden (s. a. Kap. 3.3.4.1), als auch die nicht-volumenkonstante Verformung fester Bestandteile ausüben (s. a. Kap. 3.1.1 und 4.1).

Die Form der Proctorkurve des Materials R entspricht dem aus der Bodenmechanik bekannten Verlauf mit einem ausgeprägten Maximum und zwei linear abfallenden Ästen. Das Grundmaterial NW weist hingegen einen relativ großen Wassergehaltsbereich auf, in dem hohe Dichten erreicht werden. Diese Form der Proctorkurven wurde für Abfälle größerer Stückgrößen häufiger beobachtet (STEUBE (1996), MÜNNICH (2000)). Die maximale Trocken-dichte wird bei einem Wassergehalt von ca. 30 Gew.-% (FS) erreicht. Der Kurvenverlauf

steigt bis zu diesem Punkt etwas flacher an, fällt danach ebenfalls flacher ab bis etwa bei 37 % ein steiler Abfall der Kurve zu verzeichnen ist.

Die Einzelwerte weichen weiter von der Proctorkurve ab als dies bei dem feinstückigeren und homogeneren Material R der Fall ist. Die Proctordichte sowie der zugehörige Wassergehalt bzw. Wassergehaltsbereich liegen im Bereich der in der Literatur beschriebenen Werte (GNUSCHKE (2000)).

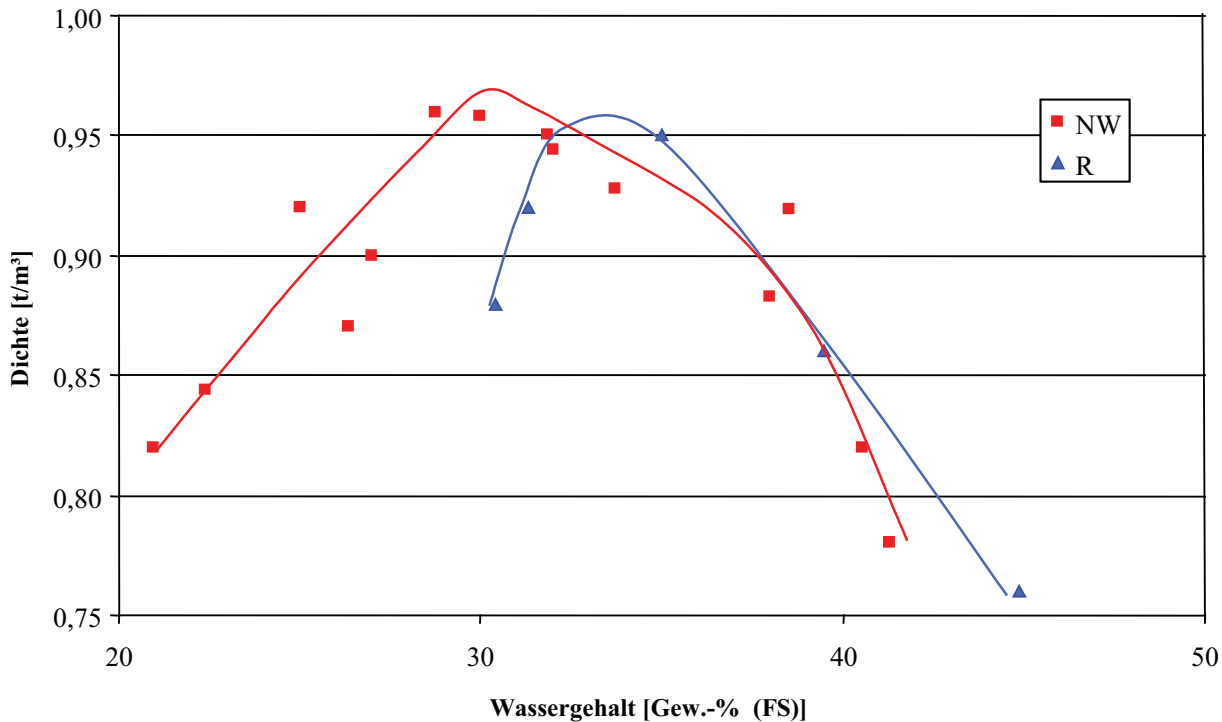


Abb. 3.2-3: Proctorkurven für die Grundmaterialien NW und R

Der Beiwert der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit befindet sich für die mit Proctordichte eingebauten Grundmaterialien mit $2,53 \cdot 10^{-8}$ m/s für das Grundmaterial R und $1,1 \cdot 10^{-7}$ m/s für das Grundmaterial NW im Bereich der für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle gemessenen Werte (z. B. GNUSCHKE (2000), MÜNNICH (1999), OBERMANN (1999)).

Tab. 3.2-2: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, Proctorkennwerte und Materialdichte für die Grundmaterialien NW und R

| Material | Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit | Proctordichte | Proctor-Wassergehalt | Materialdichte |
|----------|---------------------------------------|---------------|----------------------|----------------|
| | [m/s] | [t/m³] | [Gew.-% (FS)] | [t/m³] |
| R | $2,53E^{-8}$ | 0,96 | 33,4 | 2,08 |
| NW | $1,10E^{-7}$ | ca. 0,97 | 28 bis 32 | 1,80 |

Die Materialdichte entspricht ebenfalls den in der Literatur angegebenen Werten (z. B. DACH (1998), TURK (1998), MAAK (2001)).

Die angegebenen Werte von DACH (1998) wurden mit einem modifizierten Kapillarpyknometerverfahren nach DIN 18124 ermittelt. Dabei wurde der Abfall vorher bei 105°C getrocknet und auf < 1 mm gemahlen.

Die Versuche von TURK (1998) und MAAK (2001) wurden mit dem modifizierten Luftpyknometer nach SPILLMANN (1988) durchgeführt. MAAK (2001) führt weiterhin eine Abschätzung der Materialdichte anhand der mittleren Materialdichten der Einzelbestandteile multipliziert mit deren durchschnittlichem Anteil an der Abfallzusammensetzung der von ihm untersuchten mechanisch-biologisch behandelten Abfälle durch. Er ermittelt so eine theoretische Materialdichte von ca. 1,8 t/m³.

Bei den in dieser Arbeit verwendeten Materialien R und NW sind jedoch die groben Bestandteile, in der Regel Bestandteile mit geringer Materialdichte, herausgesiebt. Die Materialdichte der verwendeten Materialien dürfte daher über den von MAAK (2001) abgeschätzten Werten liegen.

Weiterhin stellt MAAK (2001) die Verwendbarkeit des Luftpyknometers zur Bestimmung der Materialdichte aufgrund der zum Teil sehr hohen ermittelten Materialdichten (bis zu 2,65 t/m³ bei TURK (1998)) in Frage.

Bei der Bestimmung der Materialdichte der Materialien R und NW mit dem Luftpyknometer nach Loebell (KRETZMAR (1984)) wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Abhängigkeit der ermittelten Materialdichten von der Einbaudichte und dem Wassergehalt festgestellt (Abb. 3.2-4).

Das Material NW wurde dabei vor der Bestimmung der Materialdichte auf eine maximale Stückgröße von 4 mm gemahlen, damit es in die Bestimmungsgefäße eingefüllt und ggf. verdichtet werden konnte. Das Material R wurde ohne weitere Zerkleinerung verwendet. Bei der Bestimmung der Materialdichte im Luftpyknometer nach Loebell wurden mehrere Versuche mit jedem Grundmaterial durchgeführt, wobei die Einbaudichte in den zylindrischen Probengefäßen variiert wurde. Der Wassergehalt, z. B. 33 Gew.-% (FS), wurde konstant gehalten. Diese Versuche wurden für verschiedene Wassergehalte wiederholt.

Die Abhängigkeit der Versuchsergebnisse von den Einbaurandbedingungen (Abb. 3.2-4) weist darauf hin, dass das Luftpyknometerverfahren nach Loebell für den untersuchten Abfall nicht ungeprüft einsetzbar ist. Die physikalischen Hintergründe der Abhängigkeit von Ergebnis und Einbaurandbedingungen konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht ausführlich untersucht werden. Der Einsatz des Luftpyknometers für die Bestimmung der Materialdichte

von Siedlungsabfällen bzw. die erforderlichen Versuchsrandbedingungen sollten jedoch vor der Verwendung grundlegend geprüft werden. Solange diese Prüfung nicht erfolgt ist, erscheint es sinnvoll, die Materialdichte für Siedlungsabfälle ausschließlich mit dem Kapillarpyknometer zu bestimmen.

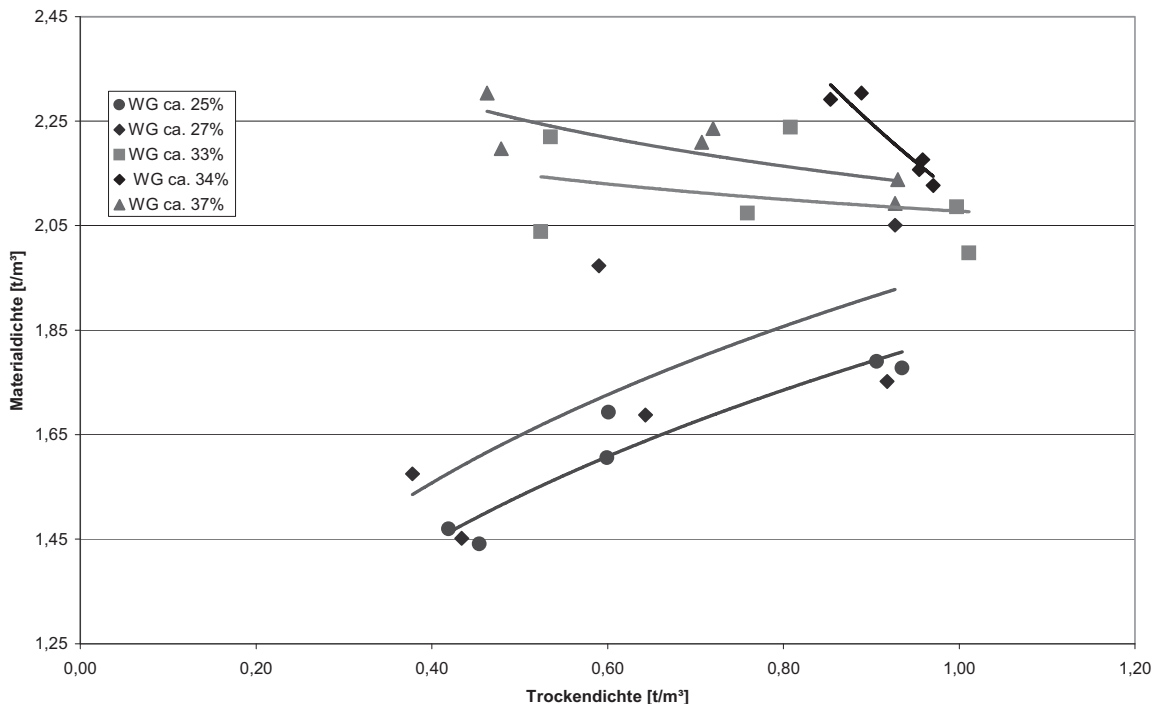


Abb. 3.2-4: Beziehung zwischen Materialdichte und Wassergehalt bzw. Einbaudichte bei der Verwendung des Luftpyknometers nach Loebell und Untersuchung des Grundmaterials R. Die dargestellten Kurven stellen lediglich Trendkurven dar und dienen der besseren Orientierung.

3.2.3.3. Zusätze

Die als Zusatzstoff notwendigen Stoffgruppen wurden bereits in Kapitel 3.1.2 beschrieben. Sofern möglich wurden dabei industriell hergestellte oder konfektionierte Materialien verwendet, denn dadurch kann gerade bei den mineralischen Zusätzen eine größere Homogenität der mechanischen Eigenschaften gewährleistet werden.

Es wurden folgende Materialien verwendet (in den Klammern befindet sich die im Folgenden verwendete Kurzbezeichnung):

- Inertstoffe:
 - Bindig (T):
Mahlton Secursol 3301 der Firma Stephan-Schmidt-Gruppe, Dornburg
 - Rollig (S):
Kristallquarzsand Dorsilit 8 der Firma Dorfner GmbH, Hirschau

- Weiche Kunststoffe:
 - Quaderförmig (G):
Gummigranulat Type W 3070 (Reifenschredder 2,5 – 7,0 mm), Mülsener Recycling- und Handelsgesellschaft mbH, Mülsen St. Jacob
 - Folienförmig (P):
PE-LD-Folienschredder der Firma Marten M Kunststoffrecycling, Braunschweig, Maximalstückgröße 10 mm
- Organik (O):
 - Apfelstücke in Quaderform (DIM 0) mit einer maximalen Kantenlänge von 8 mm und Kartoffelschnitzel in DIM 1-Form gemäß GDA EMPFEHLUNG E 1-7 (eine lange Seite und zwei kurzen Seiten). Die Länge der kurzen Seiten betrug zwei bis fünf Millimeter, die Länge der langen Seite bis zu 40 mm.
- Holz (H):
 - Bei 65° getrocknete Frischholzschnitzel mit einer Maximalstückgröße von 8 mm, DIM 0, 1 und 2-Formen

Die für das Setzungsverhalten relevanten physikalischen Kennwerte der Zusätze sind:

- Steifemodul des Einzelstückes,
- Steifemodul des Gemenges mehrerer Einzelstücke der gleichen Stoffgruppe bzw. des gleichen Zusatzstoffes und
- die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit

Auf die Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Einzelstoffe wurde verzichtet, da sie bei der Vermengung mit anderen Stoffen, z. B. den Grundmaterialien, für das Gemenge nicht durch die mathematische Überlagerung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten der Einzelstoffe berechnen werden kann.

Der Steifemodul der Einzelstücke wurde, soweit möglich, der Literatur entnommen oder - falls notwendig - in den Ödometern \varnothing 10 cm ermittelt. Die Proben wurden dafür vor dem Einbau in die Ödometer so konfektioniert, dass ein Einzelstück das Ödometer vollständig ausfüllte.

Der Steifemodul des Gemenges mehrerer Einzelstücke des gleichen Zusatzstoffes wurde ebenfalls in den Ödometern \varnothing 10 cm bestimmt.

Die Steifemoduli der Einzelstoffe sowie der Gemenge sind in Tab. 3.2-3 dargestellt. Bei den angegebenen Steifemoduli muss beachtet werden, dass der Zeit-Setzungsverlauf, der zu den Steifemoduli als Endwert nach 24 Stunden Versuchsdauer je Laststufe führt, deutlich unterschiedlich ist. Beispielsweise ergibt sich der Steifemodul im Falle von „T“ durch Sofort-, Primär- und Sekundärsetzung; bei „S“ hingegen fehlt der Anteil aus Primärsetzung ebenso wie bei „G“.

Tab. 3.2-3: Steifemoduli der Einzelstücke und des Stück-Poren-Gemenges der Zusatzstoffe

| Zusatz | Auflast | Steifemodul Stück | Steifemodul Gemenge | Bemerkung |
|--------|----------------------|------------------------|----------------------|---|
| | [KN/m ²] | [KN/m ²] | [KN/m ²] | |
| T | 0 - 200 | n. b. ** | 4761 | Steifemodul bei $\rho_D=1,55 \text{ t/m}^3$ und $WG=22,1 \%$ (FS); Bei geringeren Einbaudichten ergeben sich deutlich geringere Steifemoduli, z. B. $\rho_D=1,37 \text{ t/m}^3$: $E_s = 4051 / 4519 / 6967 \text{ KN/m}^2$ |
| | 200 - 400 | n. b. ** | 10499 | |
| | 400 - 800 | n. b. ** | 15961 | |
| S | 0 - 200 | n. b. ** | 36964 | |
| | 200 - 400 | n. b. ** | 95758 | |
| | 400 - 800 | n. b. ** | 183004 | |
| G | 0 - 200 | 4868 | n. b. * | Einbauungenauigkeiten (zwei Scheiben); Steifemodul ca. 10700 KN/m ² (lineare Interpolation) |
| | 200 - 400 | 32497 | n. b. * | |
| | 400 - 800 | 64396 | n. b. * | |
| P | 0 - 200 | 100000 bis 450000 **** | n. b. * | |
| | 200 - 400 | | n. b. * | |
| | 400 - 800 | | n. b. * | |
| O | 0 - 200 | n. b. * | n. b. * | |
| | 200 - 400 | n. b. * | n. b. * | |
| | 400 - 800 | n. b. * | n. b. * | |
| H | 0 - 200 | > 500000 *** | 1152 | |
| | 200 - 400 | > 500000 *** | 2224 | |
| | 400 - 800 | > 500000 *** | 3268 | |

*: Versuche waren nicht durchführbar, da sich das Material beim Einbau in die Ödometer nicht ausreichend verdichten ließ und daher die Setzungen so groß waren, dass die Lastplatte auf dem Ring auflag.

** : Nahezu unverformbar, Steifemodul im hohen MN/m²-Bereich.

***: Kompressibilität nach KOLLMANN (1982): $0,6 \text{ bis } 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{kg}$ bei allseitiger Belastung; Daraus folgt je nach Holzart ein Steifemodul zwischen 588000 und 1666667 KN/m² (Bis zur Bruchgrenze)

****: Abhängig von der Auflast und der chemischen Zusammensetzung des Polyethylens. Angaben von EPPERS (2001) und EISMANN (2001)

3.3. Versuchsgeräte

Das Setzungsverhalten von Böden wird im Labor mit Kompressionsgeräten (Ödometern) nach DIN 18135 (Entwurf) bestimmt. Da diese Geräte nur für kleine Probenvolumina und Korngrößen bestimmt sind, müssen für die Untersuchung des Setzungsverhaltens von Siedlungsabfällen, die wesentlich größere Stückgrößen aufweisen, größere Kompressionsgeräte konstruiert werden. Die großen Kompressionsgeräte werden in dieser Arbeit ebenfalls als Ödometer bezeichnet, um eine gleichmäßige Nomenklatur zu erhalten.

Es werden zwei größere Ödometertypen verwendet, die ebenso wie das verwendete Standardödometer nach DIN 18135 (Entwurf) in diesem Abschnitt beschrieben werden.

Weiterhin werden einige übergreifende Betrachtungen zum Versuchsaufbau der Ödometer vorgenommen.

3.3.1. Standardödometer

Das Standardödometer wird im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt, um die Verwendbarkeit bei aufbereiteten Abfällen zu prüfen. Die Ergebnisse aus den Versuchen in den Standardödometern sollen ebenfalls verwendet werden, um Informationen über den Einfluss der Größenverhältnisse zwischen Abfallstück- und Geräteabmessungen auf die Versuchsergebnisse zu erhalten.

Der Aufbau der Standardödometer (Abb. 3.3-1) ist in DIN 18135 (Entwurf) festgelegt. Er wird daher hier nur kurz vorgestellt und nicht weiter diskutiert.

Ein Standardödometer besteht, von unten beginnend, aus einer Bodenplatte, in die ein Filterstein eingelassen ist. Oberhalb dieses Filtersteins wird die zu untersuchende Probe in einen Stahlring eingebaut. Auf die Probe wird dann der obere Filterstein und die Lastplatte gelegt. Die Auflast wird bei dem in dieser Arbeit eingesetzten Gerät über ein Hebelsystem (in Abb. 3.3-1 nicht dargestellt), welches manuell mit Gewichten belastet wird, über die in Abb. 3.3-1 dargestellte Brücke auf die Lastplatte aufgebracht.

Es wird zwischen Ödometern mit feststehendem und schwebendem Ring unterschieden. Bei den Ödometern mit feststehendem Ring ist der Ring auf der Bodenplatte aufgestellt und nur die obere Lastplatte (mit Filterstein) kann in den Ring eindringen (Abb. 3.3-1). Bei den Ödometern mit schwebendem Ring hingegen können sowohl die obere als auch die untere Lastplatte in den Ring eindringen. Der Ring wird dabei durch Schubkräfte an der Probe in vertikaler Richtung festgehalten.

In den Versuchen zu dieser Arbeit wurden Ödometer mit feststehendem Ring verwendet. Die maximale Stauchung der Probe betrug dabei 0,7 cm, d. h. 35 % der Ausgangshöhe. Die Setzungen werden über einen Wegstreckenzähler mit einer Skaleneinteilung von 0,01 mm bestimmt. Die Probendurchmesser betragen bei den am Leichtweiß-Institut vorhandenen Ödometern in zwei Ödometern 10 cm und in einem Ödometer 7 cm. Vereinfachend werden die Versuche in der Regel im Folgenden als Ödometerversuch \varnothing 10 cm bezeichnet. Die Probenhöhe betrug bei den Ödometern \varnothing 10 cm jeweils ca. 20 mm und 14 mm bei dem Ödometer \varnothing 7 cm.

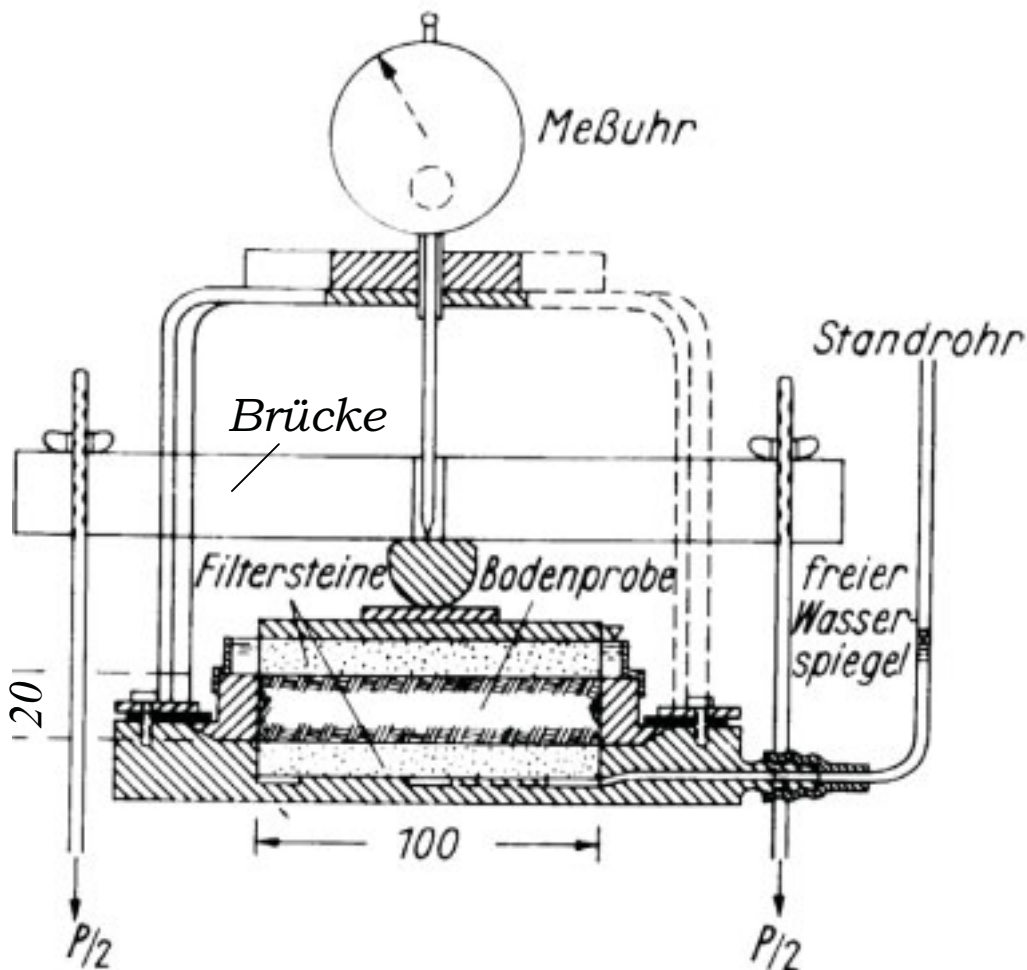


Abb. 3.3-1: Standardödömeter nach DIN 18135 (Entwurf), \varnothing 10 cm [aus SMOLTZCYK (1990)]
(Alle Maße in [mm])

3.3.2. Ödometer \varnothing 60 cm

Die Ödometer \varnothing 60 cm wurden 1983 zur Untersuchung des Setzungsverhaltens mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle am Leichtweiß-Institut gebaut. Das Grundprinzip ist bei COLLINS und RAMKE (1986) ausführlich beschrieben. Für diese Arbeit wurde lediglich die Lasteinleitungsvorrichtung und die Messeinrichtung für die Setzungen verändert (Abb. 3.3-2). Das Ödometer besteht aus einem schwebenden Ring, in den die Abfallprobe eingebaut wird. Die Wandreibung, die aufgrund des von der DIN 18135 (Entwurf) abweichenden Größenverhältnisses zwischen Durchmesser und Höhe der Probe, technisch reduziert werden muss, wurde durch zwei geschmierte Teflonfolien auf ein sehr geringen Anteil der Auflast begrenzt (Abschnitt 3.3.4.1). Oberhalb und unterhalb der Abfallprobe wird eine je 5 cm dicke

Dränschicht zur beidseitigen Entwässerung angeordnet. Die Dränschicht wird durch ein Vlies von der Abfallprobe getrennt, so dass keine Bestandteile der Abfallprobe in die Dränschicht eindringen können. Die maximale Höhe der einzubauenden Abfallprobe beträgt 50 cm.

Die untere Lastplatte stützt sich gegen die unteren Traversen ab, in die obere Lastplatte wird die Auflast per Hydraulikzylinder eingeleitet. Beide Lastplatten können bis zur Halterung bzw. bis zum Anschlag für die Stechpegel in den schwebenden Ring eindringen. Es kann eine maximale vertikale Stauchung von 20 cm, d. h. 40 % der größt möglichen Ausgangshöhe, erreicht werden. Der Hydraulikzylinder stützt sich gegen einen Querträger ab und dieser wiederum gegen die oberen Traversen. Die oberen und unteren Traversen sind über Gewindestangen gegeneinander verspannt. Die Setzungen werden mit drei außen angeordneten Präzisionsstechpegeln (Abschnitt 3.3.4.3) bestimmt. Die in die Abfallprobe eingeleitete Last kann über die an dem Manometer der Hydraulikpumpe (Abb. 3.3-3) abgelesene Drücke errechnet werden. Durch die zwischen Hydraulikpumpe und -zylinder angeordneten Absperrhähne lässt sich jedes Ödometer separat benutzen. Das unten austretende Wasser wird in drei Speicherbehältern aufgenommen und entsorgt.

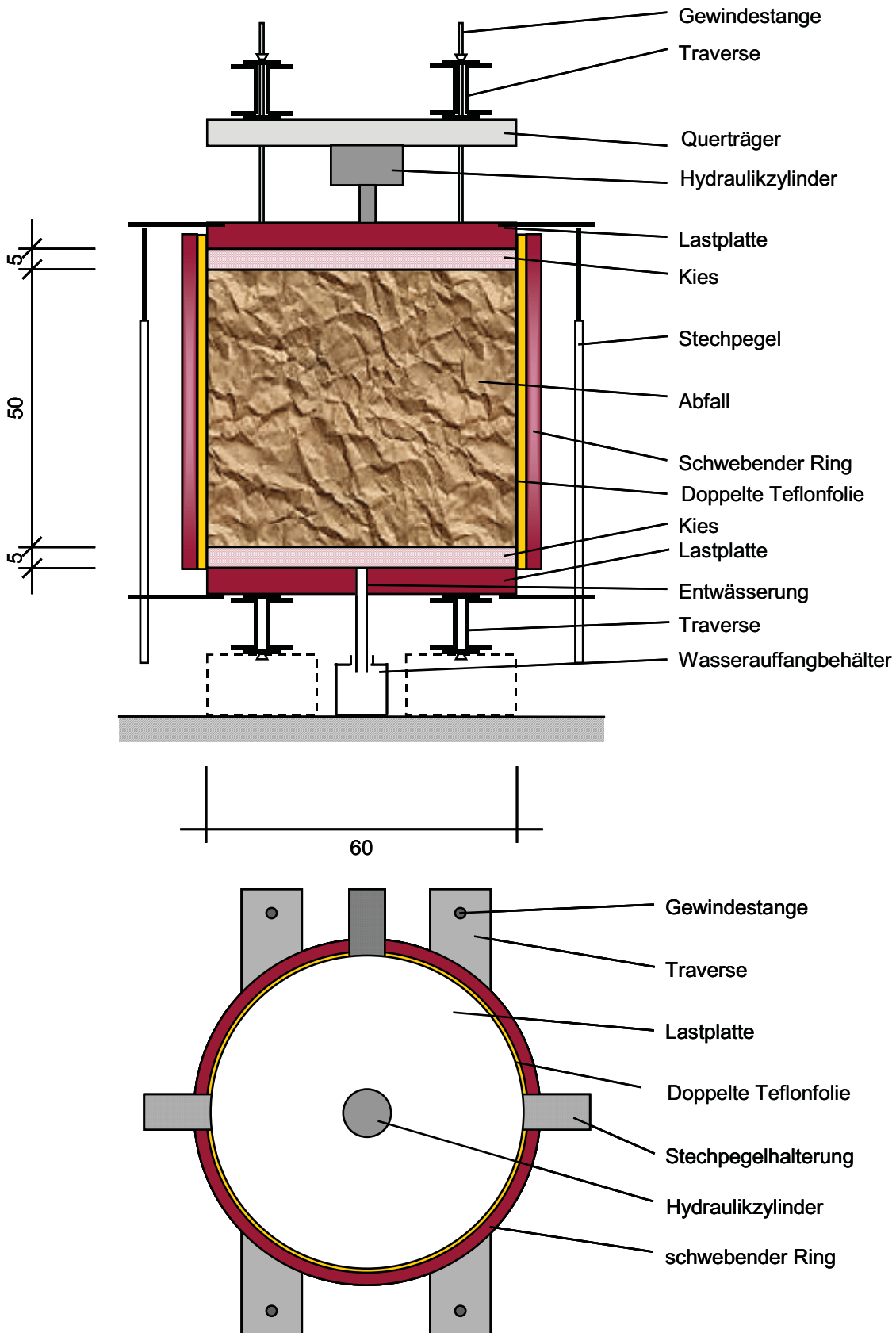


Abb. 3.3-2: Quer- und Vertikalschnitt durch ein Ödometer \varnothing 60 cm
(Alle Maße in [cm])

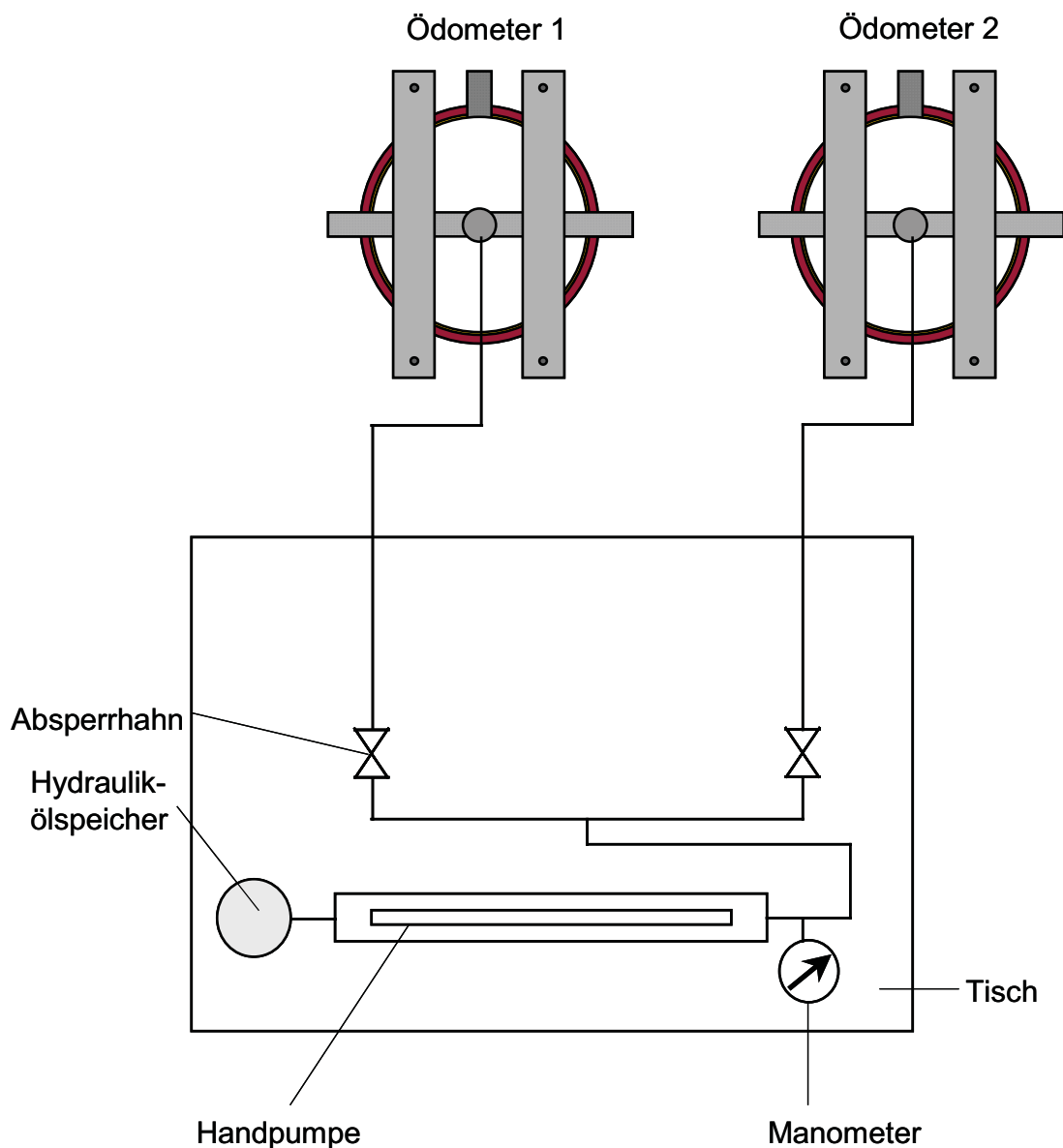


Abb. 3.3-3: Anordnung der Ödometer \varnothing 60 cm inklusive Hydraulikeinrichtung

3.3.3. Ödometer \varnothing 23 cm

Es wurden Ödometer mit einem Durchmesser von 23 cm konstruiert, da die Versuchsdurchführung in den Ödometern \varnothing 60 cm sehr aufwendig und langwierig ist. Weiterhin sollte geprüft werden, ob Versuche in kleineren Ödometern als \varnothing 60 cm zu gleichen Ergebnissen führen wie die Versuche in den Ödometern \varnothing 60 cm oder ob sich ein Maßstabsfaktor bestimmen lässt. Bei der Konstruktion der Ödometer \varnothing 60 cm im Jahre 1983 wurde außerdem noch davon ausgegangen, dass der mechanisch-biologische wie auch der Frischabfall mit der

Originalstückgröße deponiert wird. In dieser Arbeit soll der Struktureffekt jedoch weitestgehend ausgeschlossen werden (Kapitel 3.1), so dass der Einsatz der Ödometer \varnothing 60 cm nicht erforderlich scheint und daher der Einsatz eines Ödometers mit geringerer Geräteabmessung geprüft werden muss.

Weiterhin ist nach dem heutigen Wissensstand davon auszugehen, dass in Zukunft die Maximalstückgröße von zu deponierenden Abfällen in Deutschland begrenzt sein wird. Die Ablagerung von Frischabfällen ist ab 2005 in Deutschland gänzlich verboten. Durch die Begrenzung der Maximalstückgröße auf in der Regel 60 mm oder weniger (ABFALL-ABLAGERUNGSVERORDNUNG (2001)) kann für die zukünftig in Deutschland zu deponierenden Abfälle auf die Untersuchung des Setzungsverhaltens in sehr großen Ödometern (\varnothing 60 cm und größer) voraussichtlich verzichtet werden.

Das Funktionsprinzip der Ödometer \varnothing 23 cm ist ähnlich den Ödometern \varnothing 60 cm, lediglich der Ödometerring ist, wie auch bei den Versuchen in den Standardödometern, feststehend. Die Last wird ebenfalls über einen Hydraulikzylinder auf die Lastplatte aufgebracht (Abb. 3.3-4). Es befindet sich jedoch zwischen der Hydraulikpumpe und jedem Hydraulikzylinder ein Druckspeicher (Abb. 3.3-6), so dass Setzungen nur zu einem sehr geringen Druckabfall führen. Ein häufiges Nachregeln des Druckes wie bei den Ödometern \varnothing 60 cm entfällt daher (s. Abschnitt 3.1.4.2). Die anfängliche Einbauhöhe des Abfalls in den Versuchen zu dieser Arbeit betrug 12 cm, wobei eine maximale Einbauhöhe von 21 cm möglich ist. Eine minimale Probenhöhe ist nicht vorgegeben, so dass die Probenhöhe zwischen 1 und 21 cm variiert werden kann. Das Verhältnis von Probendurchmesser zu -höhe beträgt bei 12 cm Einbauhöhe ca. 2:1. Deshalb wurde, wie bei den Ödometern \varnothing 60 cm, zur Reduzierung der Wandreibung ebenfalls eine geschmierte doppelte Teflonfolie zwischen dem Ödometerring und der Abfallprobe angeordnet (Abb. 3.3-5 und Abschnitt 3.3.4.1). Die Abfallprobe kann beidseitig in die Dränschicht entwässern, wobei wiederum das nach unten austretende Wasser aufgefangen werden kann.

Die Setzungen des Abfalls werden an drei Punkten mit einer Präzisionstiefenlehre ermittelt. Die maximale vertikale Stauchung beträgt 12 cm, d.h. 100% der Ausgangshöhe. Die Bestimmung der Auflast wird für jedes Ödometer separat aus der Umrechnung der an den Manometern für die Hydraulikzylinder (Abb. 3.3-6) abgelesenen Drücke berechnet.

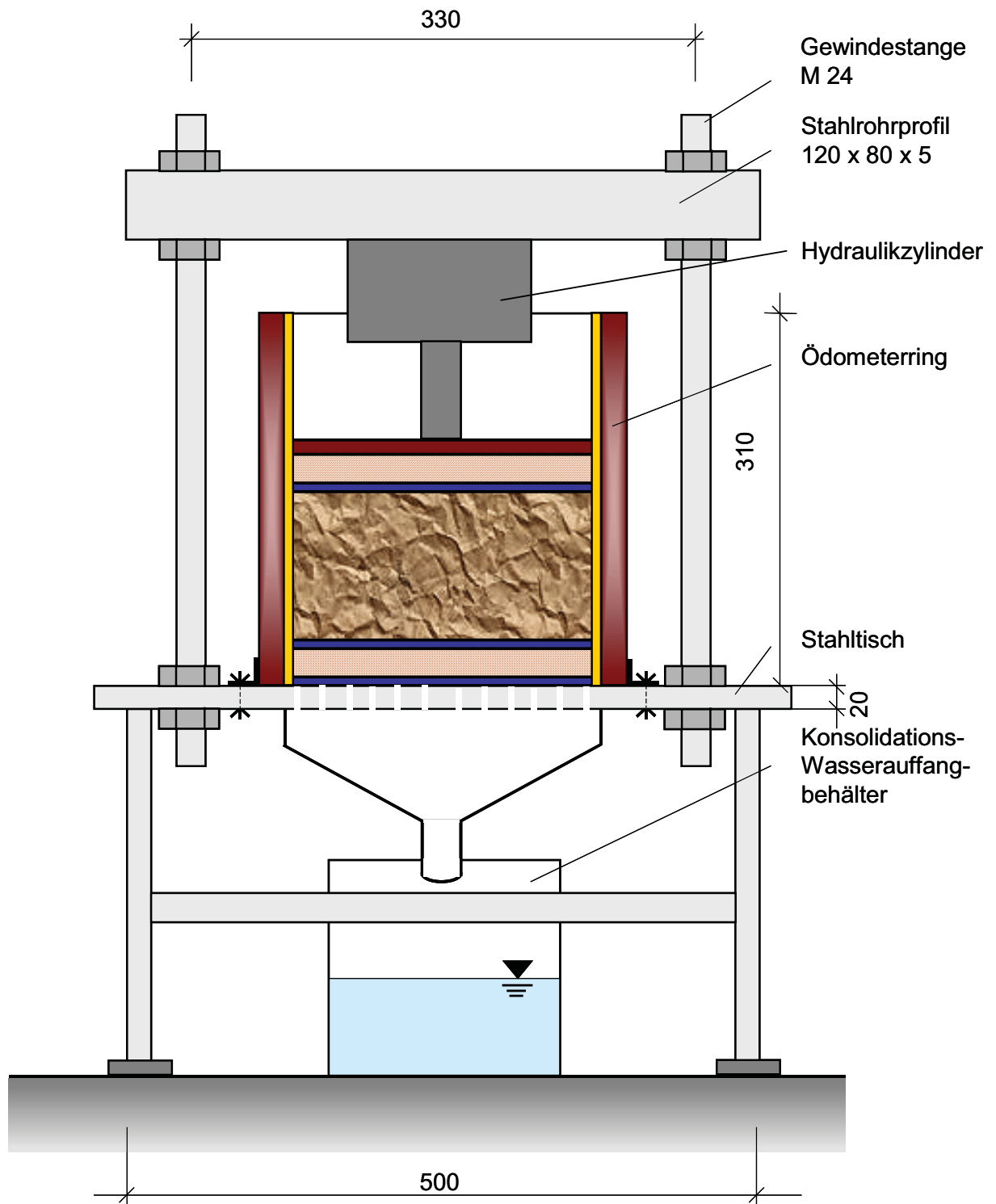


Abb. 3.3-4: Schnitt durch einen Ödometerversuchsstand \varnothing 23 cm
(Alle Maße in [mm])

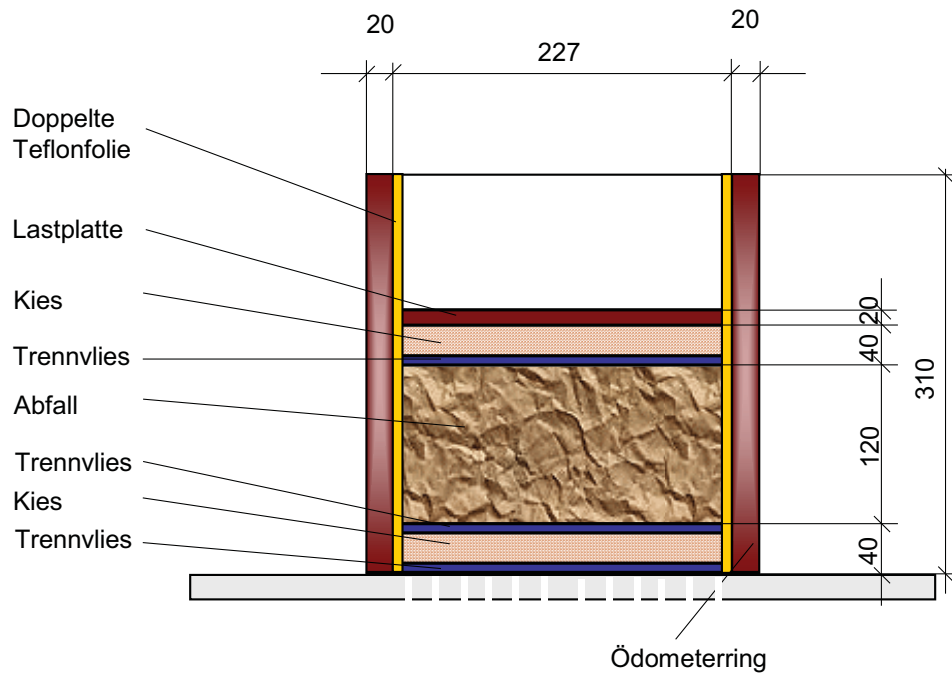


Abb. 3.3-5: Schnitt durch einen Ödometerring \varnothing 23 cm mit Abfallprobe
(Alle Maße in [mm])

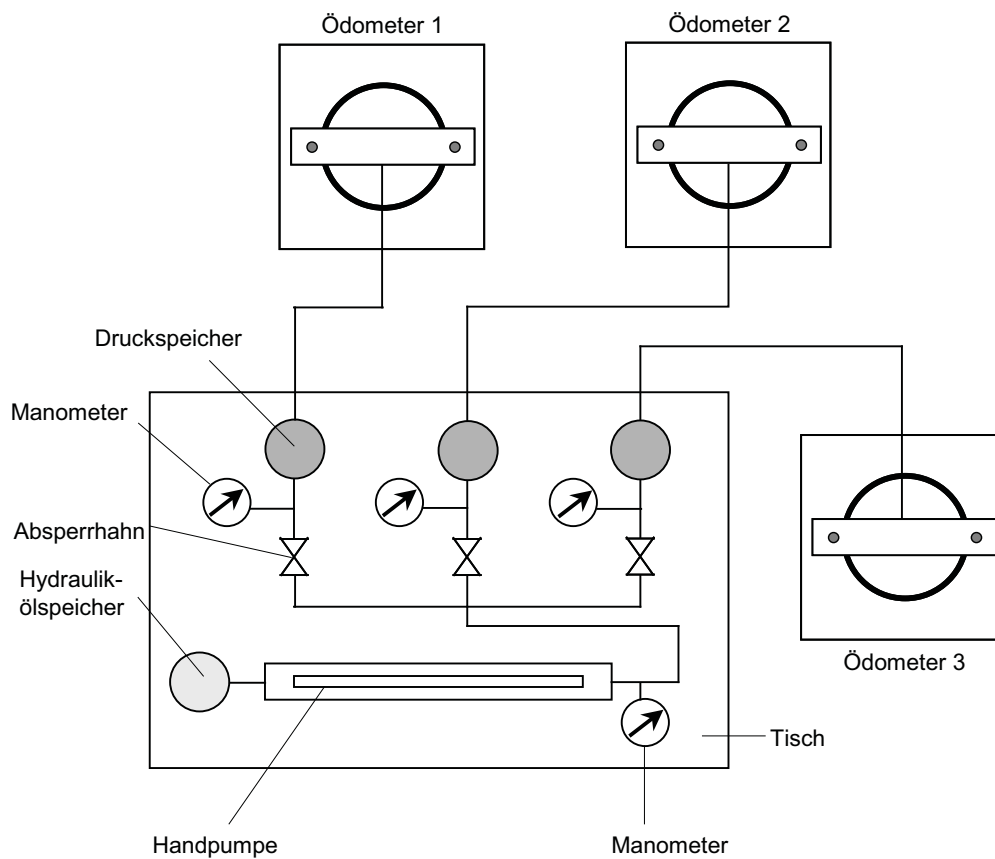


Abb. 3.3-6: Anordnung der Ödometer \varnothing 23 cm und Hydraulikeinrichtung

3.3.4. *Übergreifende Betrachtungen bei den Versuchsgeräten*

3.3.4.1. **Wandreibung**

Die Kompressionsversuchsgeräte bestanden in ihrer ursprünglichen Form (Ödometer nach Terzaghi oder KD-Gerät nach Cassagrande) aus einem Ring mit einem Durchmesser von 7 oder 10 cm, in dem eine 2 cm dicke Bodenprobe durch einen Druckstempel belastet wurde. Je nach Labor wurden jedoch Kompressionsgeräte mit unterschiedlichen Höhen und Durchmessern verwendet. Die Unterschiede in den Ringabmessungen bedingen eine Veränderung im Verhältnis zwischen Lasteinleitungsfläche und Mantelfläche der Probe. Dies ist für den Versuch jedoch von entscheidender Bedeutung, da an der Mantelkontaktfläche zwischen Material und Ring Wandreibung entsteht. Die Größe der Wandreibung ist dabei abhängig vom Winkel der inneren Reibung der Bodenprobe, von der Rauigkeit und der Adhäsionswirkung des Ringmaterials sowie der aufgebrachten vertikalen Spannung.

Eingehende Untersuchungen von MUHS und KANY (1954) haben ergeben, dass nur bei verhältnismäßig dünnen Bodenproben und einem großen Verhältnis von Durchmesser zu Probenhöhe die Wandreibung vernachlässigt werden kann. Im Entwurf der DIN 4016 (1958) sind erstmals einheitliche Geräteabmessungen festgeschrieben. Die Standardringgröße soll demnach einen Durchmesser von 100 mm und eine Probenhöhe von 20 mm besitzen. Bei dem Einsatz von Geräten mit anderen Probendurchmessern oder -höhen sollte das Verhältnis von 5:1 für Durchmesser zu Höhe eingehalten werden.

Seit Juni 1999 wird der Ödometerversuch in Deutschland durch die DIN 18135 (Entwurf) geregelt. Hier wird ein Mindestdurchmesser des Ringes von 50 mm und ein Standarddurchmesser von 70 mm festgeschrieben. Die Ringhöhe muss mindestens 14 mm betragen. Das Verhältnis von Probendurchmesser zu Probenhöhe darf bei feststehendem Ring den Wert 3 und bei schwebendem Ring den Wert 2,5 nicht unterschreiten.

Sollte die Einhaltung des Größenverhältnisses von 1:5 für Durchmesser zu Höhe, wie sie im Entwurf der DIN 4016 (1958) vorgesehen war, nicht möglich sein, so kann die Wandreibung anhand der Versuche von MUHS und KANY (1954) für Böden abgeschätzt werden (SCHULTZE, MUHS (1967)). Die Ergebnisse sind in Abb. 3.3-7 zusammengefasst. Der Faktor $\mu \cdot \lambda_0$ umfasst dabei das Produkt aus Reibungskoeffizient und Ruhedruckziffer. Ist es weiterhin erforderlich, stark abweichende Probenabmessungen zu verwenden, so ist die Wandreibung zu bestimmen und von der aufgebrachten Last abzuziehen (SCHULTZE und MUHS (1967)).

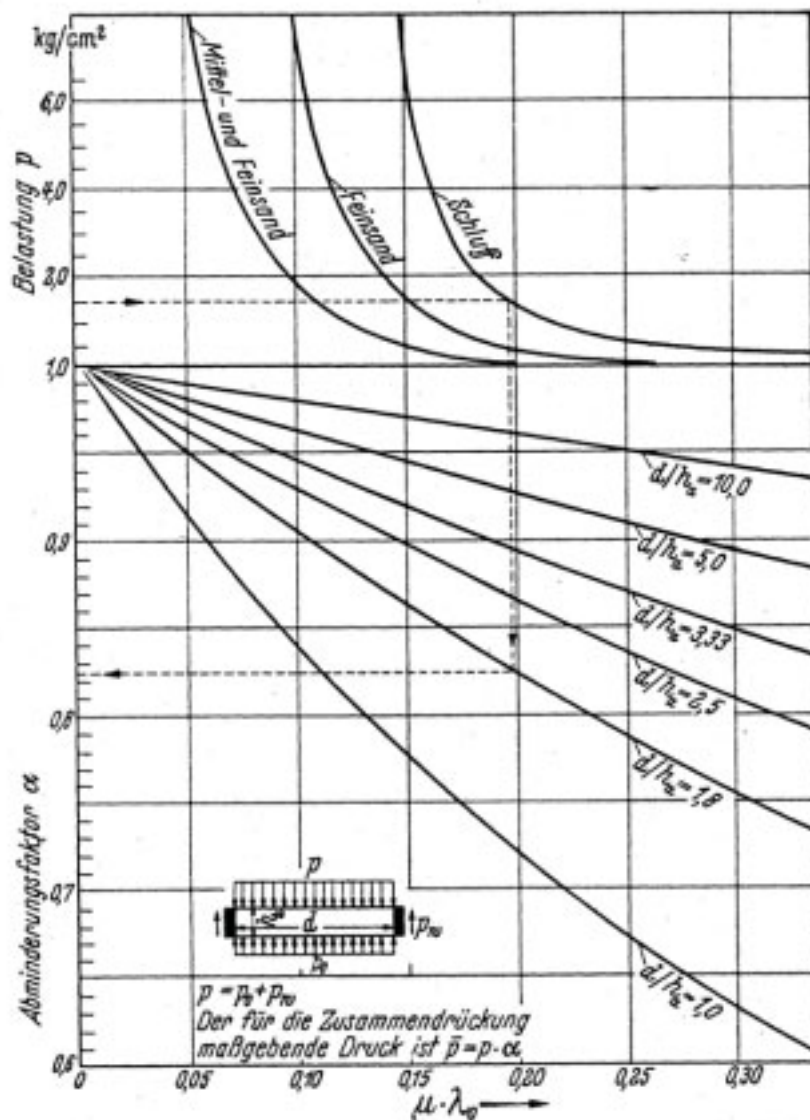


Abb. 3.3-7: : Ermittlung des Wandreibunganteils in Abhängigkeit vom Verhältnis d/h , vom Produkt $\mu \cdot \lambda_0$ und von der Belastung für drei verschiedene Bodenarten [aus SCHULTZE, MUHS (1958)]

Der Faktor $\mu \cdot \lambda_0$ umfasst dabei das Produkt aus Reibungskoeffizient und Ruhedruckziffer.
Anmerkung: 1 kg/cm² entspricht 100 kN/m²

In dieser Arbeit wurden Versuche mit Ödometern mit drei verschiedenen Ringabmessungen durchgeführt. Weiterhin wird auf die von COLLINS und RAMKE (1986) verwendeten Ödometer \varnothing 120 cm eingegangen, da diese Ödometer zur Berechnung des Wandreibungseinflusses der Ödometer \varnothing 60 cm benötigt werden.

Die Probenabmessungen sowie die Verhältnisse von Durchmesser zu Höhe sind in Tab. 3.3-1 zusammengestellt. Da bei den Ödometern \varnothing 23, 60 und 120 cm sowohl die Absolutgrößen als auch das Verhältnis von Durchmesser zu Probenhöhe von denen der DIN 18135 (Entwurf) abweichen, musste die Wandreibung bestimmt werden.

Tab. 3.3-1: Verhältnis von Durchmesser zu Probenhöhe für verschiedene Ödometer

| Name | Durchmesser D [cm] | Probenhöhe H [cm] | Verhältnis D/H |
|-------------------|--------------------|-------------------|----------------|
| \varnothing 10 | 10 | 2 | 5 |
| \varnothing 23 | 22,7 | 3 bis 18 | 1,26 bis 7,57 |
| \varnothing 60 | 60 | ca. 50 | ca. 1,2 |
| \varnothing 120 | 120 | ca. 80 | ca. 1,5 |

Die Bestimmung der Wandreibung erfolgte in separaten Versuchen. Dazu wurden die Ringe mit Material befüllt, die Auflast aufgebracht und anschließend die Zugkraft gemessen, die zum Anheben des Ringes erforderlich war. Die Versuche wurden für die Ödometer \varnothing 23 cm in Anlehnung an die Versuche von COLLINS und RAMKE (1986) durchgeführt. Die Versuchsanordnung ist in Abb. 3.3-8 dargestellt. Es wurde dabei sowohl ein Ödometer mit geschmierter doppelter Teflonfolie (Ödo 1) als auch ein Ödometer ohne Maßnahmen zur Reduzierung der Wandreibung (Ödo 3) untersucht.

Zuerst wurden die Ödometertische, die als haltende Masse dienen, mit Stahlträgern beschwert. Das Gewicht der Träger zuzüglich des Ödometertisches betrug 650 kg, so dass eine maximale Kraft zur Überwindung der Wandreibung zuzüglich Anhebung des Eigengewichtes des Ödometerringes und der Zugseile von 6,5 kN aufgebracht werden konnte.

Die Ödometer wurden zuerst mit Quarzsand (Dorsilit 7/8) oder Abfall (Grundmaterial NW) gefüllt. Anschließend wurde die Auflast aufgebracht. Danach wurde der Ring mit einer Geschwindigkeit von 1,3 m/min angehoben. Die notwendige Zugkraft zur Anhebung des Ringes wurde an der Zugwaage abgelesen. Die Ergebnisse sind in Tab. 3.3-2 zusammengestellt.

Nach den ersten Versuchen mit Quarzsand wurde ein Vorversuch mit Abfall (NW < 40 mm) durchgeführt. Dieser Vorversuch wurde nach einem Ödometerversuch mit drei Laststufen durchgeführt. Da diese Probe bereits mit der maximalen Auflast belastet war, wurde zuerst ein Versuch mit der maximalen Auflast von 990 kN/m² durchgeführt. Anschließend wurde die Probe entlastet und die Versuche zur Bestimmung der Wandreibung wurden mit Auflasten

von 245 kN/m^2 bis 990 kN/m^2 nochmals wiederholt. Für die folgenden Versuche wurden die Ödometer erneut mit Abfall befüllt und nach einer halbstündigen Konsolidationszeit die Versuche zur Bestimmung der Wandreibung durchgeführt. Die Auflasten betragen wie in den Ödometerversuchen 245 kN/m^2 , 490 kN/m^2 und 990 kN/m^2 . Die Ergebnisse sind ebenfalls in Tab. 3.3-2 dargestellt.

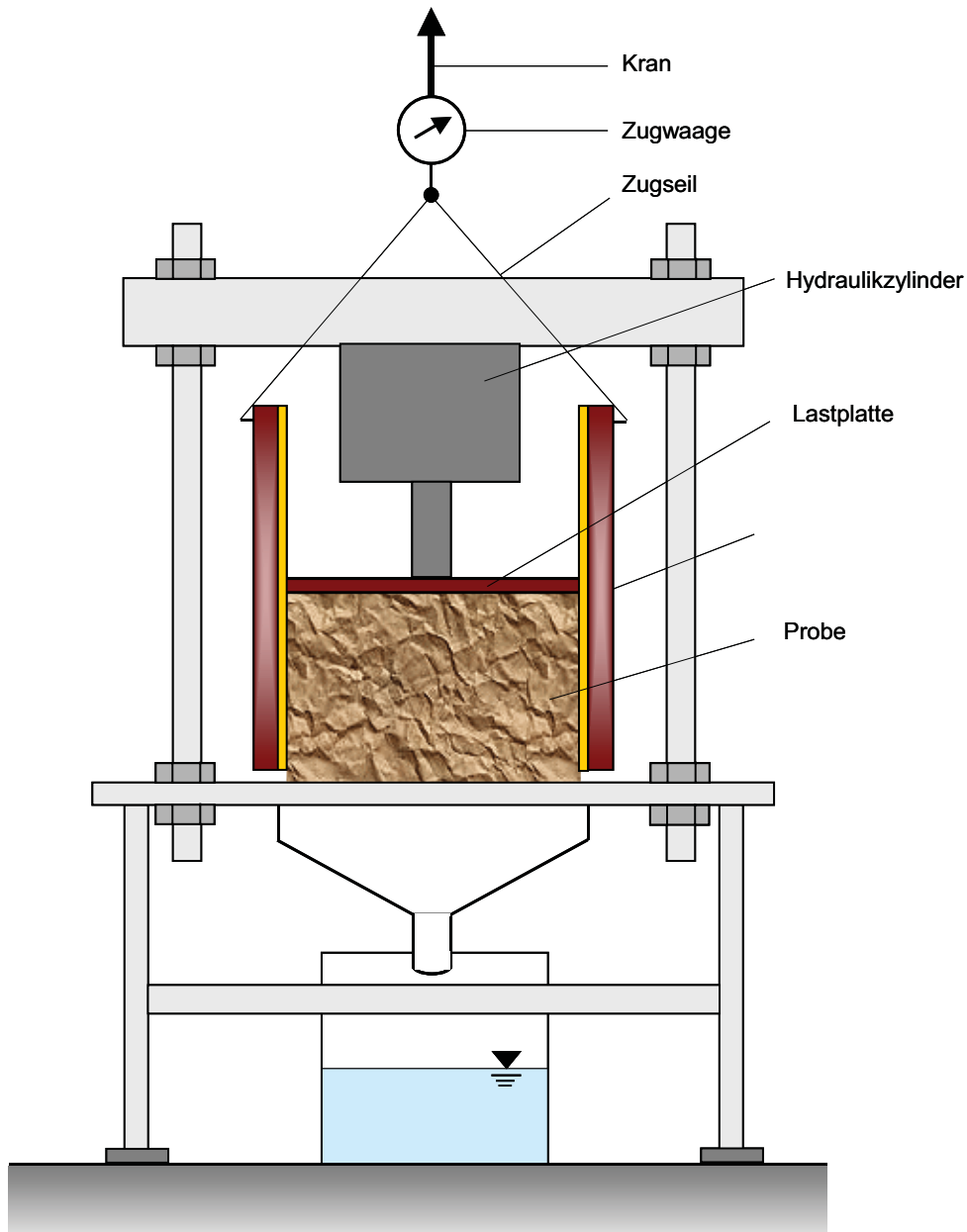


Abb. 3.3-8: Skizze des Versuchsstandes zur Bestimmung der Wandreibung der Ödometer $\varnothing 23$

Tab. 3.3-2: Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Wandreibung der Ödometer Ø 23
Ödo 1 ist mit einer geschmierten doppelten Teflonfolie ausgekleidet, Ödo 3 besitzt keine
Maßnahmen zur Reduzierung der Wandreibung

| Material | Ödometer- bezeichnung | Notwendige Zugkraft [kN] bei einer Auflast von | | | | Bemerkung |
|-----------|--------------------------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| | | 3. Laststufe | 1. Laststufe | 2. Laststufe | 3. Laststufe | |
| | | 990 kN/m ² | 245 kN/m ² | 450 kN/m ² | 990 kN/m ² | |
| Quarzsand | Ödo 1 | --- | 0,7 | 0,9 | 1,2 | |
| Quarzsand | Ödo 3 | --- | > 6,0 | --- | --- | |
| Abfall | Ödo 1 | 4,0 | 1,4 | 1,7 | 2,7 | Vorversuch |
| Abfall | Ödo 1 | --- | --- | 2,2 | 4,0 | |
| Abfall | Ödo 1 | --- | 1,3 | 2,2 | 3,8 | |
| Abfall | Ödo 3 | > 6,0 | > 6,0 | --- | --- | Vorversuch |

---: nicht durchgeführt

Die Wandreibung war - sowohl bei den Versuchen mit Sand als auch mit Abfall - bei Verwendung des Ödometers 3, das keine Maßnahmen zur Reduzierung der Wandreibung besaß, so hoch, dass der gesamte Versuchsstand mitsamt der Stahlträger angehoben wurde. Die maximal messbare Zugkraft betrug dabei 6,5 kN. Bereinigt um die notwendige Kraft, die aus dem Eigengewicht des Ringes und der Zugseile resultiert (0,5 kN), betrug die Kraft zur Überwindung der Wandreibung mehr als 6,0 kN.

Dieses Ergebnis wird durch die theoretische Berechnung bestätigt. Berechnet man die notwendige Kraft zur Überwindung der Wandreibung bei einer Auflast von 245 kN/m² für den Quarzsand unter Ansatz der Erdruhedrucktheorie, so ergibt sich die notwendige Kraft zu:

Gleichung 3.3-1

$$P = \sigma \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot A_{\text{Wand}} \cdot \mu = \sigma \cdot (1 - \sin \varphi) \cdot A_{\text{Wand}} \cdot \tan(2/3 \varphi) = 245 \cdot (1 - \sin 35^\circ) \cdot 0,1747 \cdot \tan(2/3 \cdot 35^\circ) = 7,85 \text{ KN}$$

Mit: A_{Wand} : Wandfläche

μ : Wandreibungskoeffizient

Die Berechnung wurde unter der vereinfachten Erddrucktheorie mit einem Erdruhedruck von $k_0 = 1 - \sin \varphi'$ und einem Reibungswinkel φ von 35° (Sand, rund, dicht gelagert nach RODATZ (1992)) durchgeführt. Der Wandreibungskoeffizient μ wurde gemäß DIN 1055 T2 als $\tan(2/3 \varphi)$ angesetzt. Es wurde die Reibung zwischen Boden und Stahl betrachtet.

Wird als erster Ansatz für den Abfall ebenfalls die Erdruhedrucktheorie angewendet, ergibt sich unter Vernachlässigung der Kohäsion die gleiche notwendige Kraft, da der Scherwinkel von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen, wie sie hier verwendet wurden, wie beim Quarzsand ca. 35° beträgt (ZIEHMANN (1999), NEFF und GARTUNG (2000)).

Bei den Versuchen im Ödometer 1, d. h. mit der Reduzierung der Wandreibung durch die geschmierte doppelte Teflonfolie, ergibt sich der ermittelte Reibungsbeiwert μ aus der Division der gemessenen Zugkraft und der horizontal auf die Wandfläche wirkenden Kraft. Er beträgt zwischen 1,7 und 3,8% (Tab. 3.3-3). Die ermittelten Reibungsbeiwerte sind dabei den von COLLINS und RAMKE (1986) ermittelten ähnlich (Tab. 3.3-3), was bei der Verwendung des gleichen Schmiermittels auch zu erwarten war. Die Unterschiede ergeben sich durch einen unterschiedlichen Einfluss der Materialentspannung in dem freiwerdenden unteren Spalt, wenn der Ödometerring angehoben wird, da das Verhältnis von Probenhöhe zu Spalthöhe verschieden ist. Weiterhin haben mögliche Veränderungen des Schmiermittels oder der Teflonfolie, die vom Hersteller infolge technischer Veränderungen oder umweltrelevanter Gründe vorgenommen worden sind, einen Einfluss auf den Reibungsbeiwert. Der Reibungsbeiwert wird durch den Einsatz der geschmierten doppelten Teflonfolie für die Reibung zwischen Sand (mit einem Reibungswinkel von 30°) und Stahl deutlich reduziert von ca. 36 % ($\mu=0,36$) (DIN 1055 T2) auf 1,7 bis 3,8 %.

Tab. 3.3-3: Reibungsbeiwert μ für die Ödometer mit Reduzierung der Wandreibung durch eine geschmierte doppelte Teflonfolie

| Ödometer | Auflast | | |
|--|---|--------------------------------|---------------------------------|
| | 245 kN/m ² | 490 kN/m ² | 980 kN/m ² |
| Ödometer Ø 23 | 3,8 % | 2,5 % | 1,7 % |
| Ödometer Ø 120 (nach COLLINS und RAMKE (1986)) | 2,1 % (Interpolation zwischen 200 und 300 kN/m ²) | 1,5 % (500 kN/m ²) | 1,3 % (1000 kN/m ²) |

Die notwendigen Zugkräfte zur Überwindung der Wandreibung waren bei den Versuchen mit Abfall im Ödometer 1 (mit geschmierter doppelter Teflonfolie) wesentlich größer als bei den Versuchen mit Quarzsand (Tab. 3.3-2), obwohl der Reibungswinkel des Abfalls ähnlich groß ist, wie der des Quarzsandes. Bei Ansatz der vereinfachten aktiven Erdruhedrucktheorie ergeben sich unter Verwendung der Gleichung 3.3-1 und den in Tab. 3.3-3 genannten Wandreibungsbeiwerten μ die in Tab. 3.3-4 zusammengefassten Wandreibungskräfte. Die im

Versuch gemessenen Wandreibungskräfte (Tab. 3.3-2) sind um den Faktor 2 bis 3 größer als die mit der aktiven Erdrucktheorie berechneten Wandreibungskräfte (Tab. 3.3-4).

Der Ansatz des Erdruhedruckes mit $k_0 = 1 - \sin \varphi'$ ist daher offensichtlich nicht auf den Abfall übertragbar.

Tab. 3.3-4: Unter Ansatz des aktiven Erddruckes berechnete Wandreibungskräfte und der Quotient der gemessenen zu den berechneten Wandreibungskräften im Ödometer Ø 23 mit doppelter geschmierter Teflonfolie

| Auflast | Berechnete Wandreibungskraft [KN] | Gemessene Wandreibungskraft / Berechnete Wandreibungskraft [-] |
|-----------------------|-----------------------------------|--|
| 245 kN/m ² | 0,694 | 2,0 |
| 490 kN/m ² | 0,913 | 2,4 |
| 980 kN/m ² | 1,254 | 3,1 |

Dies ist zum Einen dadurch bedingt, dass der Abfall nicht kohäsionslos ist, was eine Voraussetzung bei der Anwendung der vereinfachten Formel ist (GUDEHUS (1990)). Zum Anderen ist dies darauf zurückzuführen, dass sich die bodenmechanischen Theorien nicht direkt auf den Abfall übertragen lassen. So entspricht die ungünstigste Bruchfläche für Abfall nicht der Mohr-Coulomb'schen Bruchtheorie, die die Grundlage der Berechnung des Erddruckes bildet. Die ungünstigste Bruchfläche tritt bei Abfall unter einem flacheren Winkel als $(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2})$ auf (KÖLSCH (1996), KOCKEL (1995)).

Auf die Bestimmung der Wandreibung bei den Ödometern Ø 10 kann gemäß DIN 18135 (Entwurf) verzichtet werden, da die Wandreibung bei dem vorgeschriebenen Verhältnis zwischen Durchmesser und Höhe einen untergeordneten Einfluss ausübt. Diese Aussage bezieht sich jedoch auf die Verwendung von Boden als Untersuchungsmaterial und der damit einhergehenden Ausbildung des Erdruhedruckes während der Versuchsdurchführung. Wie in den Versuchen zur Bestimmung der Wandreibung in den Ödometern Ø 23 cm gezeigt wurde, sind die horizontal auf die Wandfläche wirkenden Spannungen bei Abfall wesentlich größer als die unter Verwendung der Erdruhedrucktheorie errechneten Spannungen.

Werden für die Betrachtung der Wandreibung bei Abfallproben in den Ödometern Ø 10 cm die in den Ödometern Ø 23 cm ermittelten Verhältnisse zwischen tatsächlicher und berechneter aktiver Wandreibungskraft gemäß Tab. 3.3-4 angesetzt, so errechnet sich ein Verhältnis von Wandreibungskraft zu Auflast von 29,4 %, 35,3 % und 45,6 % für die erste, zweite und

dritte Laststufe (200, 400 und 800 kN/m²). Der Reibungsbeiwert μ wurde nach DIN 1055 T2 näherungsweise für die Reibung zwischen Stahl und Boden mit einem Reibungswinkel von 35° zu 0,431 angenommen. Dies bedeutet, dass ein Drittel bis die Hälfte der aufgetragenen Last über die Wand abgetragen wird.

Aufgrund der geringen Probenhöhe sowie des anderen Verhältnisses zwischen Probenhöhe und -durchmesser ist es jedoch möglich, dass sich in den Ödometern \varnothing 10 cm andere Verformungsverhältnisse als in den Ödometern \varnothing 23 cm ausbilden. Es kommt dann zu anderen horizontalen Spannungen, die auf die Wandfläche wirken. Die in den verwendeten Ödometern \varnothing 10 cm tatsächlich wirkenden Wandreibungskräfte können im Laborversuch leider nicht ermittelt werden, da es sich um Ödometer mit feststehendem Ring handelt. Der Ring bildet dabei eine Einheit mit der Bodenplatte und den Filtersteinen.

Die theoretische Betrachtung zeigt jedoch deutlich, dass auch bei den Ödometern \varnothing 10 cm ein erheblicher Anteil der Auflast über die Wand abgetragen werden kann, wenn Abfälle untersucht werden.

Bei den Ödometern \varnothing 120 konnten die bei COLLINS und RAMKE (1986) ermittelten Werte verwendet werden, da dort ausführliche Untersuchungen zum Wandreibungseinfluss durchgeführt worden sind. Damals konnte der Scherwinkel von Abfällen noch nicht gesichert bestimmt werden, so dass zur Bestimmung der Wandreibung die mit geschmierter doppelter Teflonfolie ausgekleideten Ringe mit Sand befüllt wurden. Der Reibungswinkel des Sandes betrug 30°. Anschließend wurde die Probe belastet und der Ring mit geringer Geschwindigkeit angehoben. Die erhaltenen Ergebnisse wurden auf Abfall umgerechnet, wobei für den Abfall ein Scherwinkel von 25° und eine Kohäsion von 1,67 kN/m² angesetzt worden ist. Die errechneten Ergebnisse zeigen, dass die Wandreibung für Auflasten > 200 kN/m² weniger als 3% der Auflast beträgt (Abb. 3.3-9).

Die bei COLLINS und RAMKE (1986) mit Sand ermittelten Anteile der Wandreibungskraft an der aufgetragenen vertikalen Kraft sind hier auf Abfall umgerechnet worden (Tab. 3.3-5). Dazu sind die Verhältnisfaktoren zwischen den mit Sand und Abfall ermittelten Wandreibungskräften (Tab. 3.3-4) verwendet worden, die bei den Versuchen mit den Ödometern \varnothing 23 ermittelt wurden.

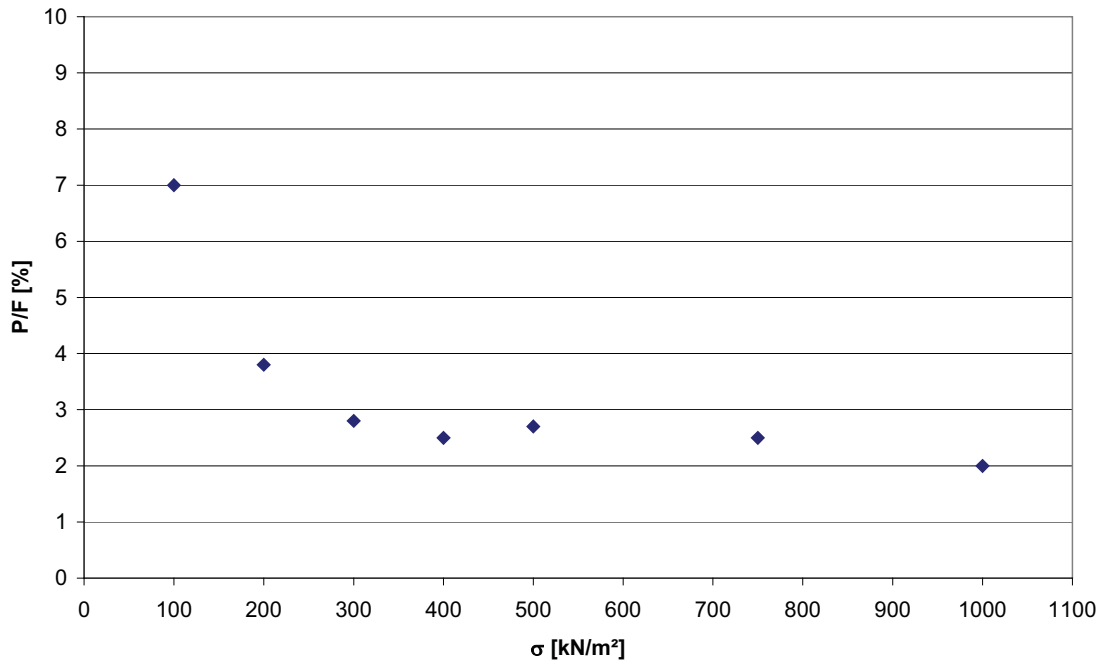


Abb. 3.3-9: Wandreibung der Ödometer \varnothing 120 cm mit doppelter geschmierter Teflonfolie in Abhängigkeit von der Auflast [Modifiziert nach COLLINS und RAMKE (1986)].
P: Wandreibungskraft, F: Vertikale Kraft; σ : Vertikale Spannung

Die Werte der Ödometer \varnothing 60 wurden aus einer linearen Interpolation über das Verhältnis Mantelfläche zu Lasteinleitungsfläche aus den Ergebnissen der Versuche und Berechnungen mit den Ödometern \varnothing 23 und \varnothing 120 bestimmt.

Die Anteile der Wandreibungskraft an der vertikal eingeleiteten Kraft sind in Tab. 3.3-5 zusammengestellt. Die Verminderung der Wandreibung durch geschmierte doppelte Teflonfolien ist für die Ödometer \varnothing 23, 60 und 120 cm berücksichtigt. Die Anteile der Wandreibungskraft sind jeweils angegeben für eine aufgebrauchte vertikale Spannung von 250, 500 und 1000 kN/m². Bei der Berechnung der Werte für die Ödometer \varnothing 23 wurden die Vorversuche nicht berücksichtigt.

Bei den Ödometern \varnothing 10 ist in Tab. 3.3-5 gemäß DIN 18135 (Entwurf) keine Abminderung der vertikalen Auflast um den Anteil, der aus der Wandreibung resultiert, angegeben, obwohl dies bei der Untersuchung von Abfällen erforderlich ist (s. o.).

Tab. 3.3-5: Anteil der Wandreibungskraft an der vertikal eingeleiteten Kraft sowie die resultierenden in der Abfallprobe wirkenden Spannungen für eingeleitete Spannungen von 250, 500 und 1000 kN/m²

| σ [kN/m ²] | Anteil der Wandreibung [%] | | | | Resultierende Spannung in der Abfallprobe [kN/m ²] | | | | $\sigma_{v,eff}$ [kN/m ²] |
|----------------------------------|----------------------------|-------------|-------------|--------------|---|-------------|-------------|--------------|--|
| | Ödo Ø 10 | Ödo Ø 23 | Ödo Ø 60 | Ödo Ø 120 | Ödo Ø 10 | Ödo Ø 23 | Ödo Ø 60 | Ödo Ø 120 | |
| 250 | 0* | 13,6 | 10,8 | 9,5 | 250* | 216 | 223 | 226 | 222 |
| 500 | 0* | 11,1 | 10,4 | 9,6 | 500* | 445 | 448 | 452 | 448 |
| 1000 | 0* | 9,8 | 9,4 | 9,1 | 1000* | 902 | 906 | 910 | 906 |

Der Einfluß der Wandreibung ist gemäß DIN 18135 nicht anzusetzen. Bei der Untersuchung von Abfällen kann die Wandreibung jedoch einen deutlichen Einfluss besitzen. Dieser Einfluss ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

$\sigma_{v,eff}$: In der Probe wirkende vertikale Spannung

Der Einfluss der Wandreibung auf die effektiv in der Abfallprobe wirkende Spannung ist bei den Ödometern Ø 23, 60 und 120 etwa ähnlich groß. Für diese Ödometer kann daher in der Abfallprobe mit einer gemittelten effektiven Spannung ($\sigma_{v,eff}$) gerechnet werden (Tab. 3.3-5).

3.3.4.2. Auflasteinheit

Die Auflasteinheit der drei Ödometertypen (Ø 10, 23 und 60 cm) unterscheidet sich in wesentlichen Punkten. Bei den Ödometern Ø 10 cm wird die Last über ein Hebelsystem auf die zu untersuchende Probe aufgebracht. Die Gewichte von bis zu 125 kg für die Laststufe 800 kN/m² werden manuell auf das Hebelsystem aufgelegt. Das Auflegen dauert ca. 15 Sekunden. Da die Last nicht spontan aufgebracht werden kann, besteht bei den Ablesungen der Setzungen bei kurzen Zeitintervallen, z. B. 4 und 8 Sekunden, eine große relative Ungenauigkeit. Es wurden daher - auch in Anlehnung an die Versuche in den Ödometern Ø 23 cm - nur die Ablesungen nach Zeitintervallen von vier Minuten oder länger für die Auswertung verwendet.

Die Auflast bleibt über den gesamten Untersuchungszeitraum einer Laststufe, unabhängig von den Setzungen, konstant. Es werden drei Laststufen mit einer jeweiligen Verdoppelung der Auflast durchgeführt. Die maximale Auflast beträgt 800 kN/m².

Bei den Ödometern Ø 23 cm wird die Auflast über Hydraulikzylinder aufgebracht. Für die Lastaufbringung werden, vor allem bei der ersten Laststufe (245 kN/m²), ca. zwei Minuten benötigt. Dies bedingt, dass die Ablesung der kleinen Zeitintervalle, wie z. B. 15 Sekunden, nicht sinnvoll ist. Daher wurde die erste Ablesung der Setzungen vier Minuten nach Erreichen

der gewünschten Auflast durchgeführt. Ausschlaggebend für den gewählten ersten Ablesezeitpunkt ist weiterhin die Messung an drei Punkten mit der Präzisionstiefenlehre, die einen Zeitbedarf von ca. einer Minute erfordert.

Die Last kann bei den Ödometern \varnothing 23 cm wegen der Druckspeicher über den gesamten Zeitraum einer Laststufe annähernd konstant gehalten werden. Lediglich während der ersten 15 Minuten der größten Laststufe (1000 kN/m^2) ist ein leichter Abfall der Auflast um ca. 1,5% zu verzeichnen. Nach 15 Minuten wird die Auflast in der größten Laststufe daher nachgeregelt.

Die kleinst mögliche Auflast wird durch den Vorspanndruck der Druckspeicher definiert. Es ist ein Vorspanndruck im Hydrauliksystem von 30 bar notwendig, um in den Ödometern eine maximale Auflast von ca. 1000 kN/m^2 ohne Druckabfall während der Laststufe zu erreichen. Um in einem Drei-Stufen-Versuch die maximale Auflast von 1000 kN/m^2 zu erreichen, wurde als kleinster Hydraulikdruck 35 bar gewählt. Dies entspricht einer Auflast der Ödometerprobe von 245 kN/m^2 . Durch die jeweilige Verdoppelung der Auflast ergeben sich die drei Laststufen mit den Auflasten 245, 490 und 980 kN/m^2 . Die Zahlen wurden in den folgenden Kapiteln auf 250, 500 und 1000 kN/m^2 gerundet. Die Berechnung erfolgte jedoch mit den exakten Werten.

Bei den Ödometern \varnothing 60 cm wird die Auflast wie bei den Ödometern \varnothing 23 cm über Hydraulikzylinder aufgebracht. Da die Lastaufbringung ebenfalls etwa zwei Minuten beansprucht und drei Messpegel abgelesen werden müssen, wurde bei den Ödometern \varnothing 60 cm ebenfalls mit der Ablesung der Setzungen nach vier Minuten begonnen.

Die maximale Auflast ergibt sich aus der Spezifikation der Hydraulikzylinder zu 600 kN/m^2 . Daraus resultieren drei Laststufen mit den Auflasten von 150, 300 und 600 kN/m^2 .

Da in dem Hydrauliksystem keine Druckspeicher angeordnet sind, fällt die Auflast aufgrund der Setzungen des Abfalls immer wieder ab. Zu Beginn einer jeden Laststufe wird daher die Auflast häufig nachgeregelt. Zu späteren Zeiten einer Laststufe erfolgt die Nachregelung der Auflast in 24 Stunden Intervallen. Die Auflast fällt in dieser Zeit um ca. 5% ab.

3.3.4.3. Messgenauigkeit der vertikalen Verformung

In der DIN 18135 (Entwurf) wird für die Messung der Setzungen ein Wegmessgerät (Messuhr) mit einer Skaleneinteilung von mindestens 0,001 mm bzw. bei Ziffernanzeige einen Digitalabstand von höchstens 0,002 mm gefordert. Die geforderten Messgenauigkeiten gelten für eine Probenhöhe von 20 mm. Daraus ergibt sich eine geforderte relative Genauigkeit von 0,005 bzw. 0,01%.

Die am Leichtweiß-Institut vorhandenen Ödometer \varnothing 10 cm (Baujahr ca. 1955) sind mit Wegmessgeräten mit einer Skaleneinteilung von 0,01 mm ausgestattet. Damit kann eine auf die Ausgangsprobenhöhe bezogene Genauigkeit von 0,05% abgelesen werden (Tab. 3.3-6). Sie entspricht dem damaligen Stand des Wissens und der Technik. Dieselbe Ablesegenauigkeit wird selbst 1989 noch in der Ö-Norm B4420 gefordert. Die von der DIN 18135 (Entwurf) neuerdings geforderte Genauigkeit der analogen Wegmessgeräte von 0,001 mm kann nicht erreicht werden, wobei unklar ist, ob diese Anforderung auch nach dem Einspruchsverfahren noch in der DIN 18135 (dann im Weißdruck) enthalten sein wird.

Für die Bestimmung der Setzungen im Ödometer \varnothing 23 cm wird eine Präzisionstiefenlehre verwendet. Die Messgenauigkeit der Tiefenlehre beträgt 0,05 mm. Sie ist damit absolut fünfmal größer als bei den Ödometern \varnothing 10 cm. Die auf die Ausgangshöhe der Probe bezogene Genauigkeit ist jedoch mit 0,04% sogar etwas besser als bei den Ödometern \varnothing 10 cm (Tab. 3.3-6), wobei auch hier die Vorgaben der DIN 18135 (Entwurf) nicht erreicht werden.

In den Ödometern \varnothing 60 cm wird die Setzung mit Präzisionsstechpegeln bestimmt, die eine Ablesegenauigkeit von 0,01 m besitzen. Trotz der geringsten absoluten Genauigkeit des Instrumentes bieten die Messungen, bezogen auf die Ausgangshöhe der Probe, mit 0,02 % die beste Genauigkeit (Tab. 3.3-6).

Tab. 3.3-6: Absolute und auf die Probenhöhe bezogene Messgenauigkeiten in den Ödometern \varnothing 10, 23 und 60 cm sowie nach DIN 18135 (Entwurf) und der Ö-Norm B 4420

| Ödometer | Absolute Genauigkeit | Probenhöhe | Auf die Probenhöhe bezogene Genauigkeit |
|---------------------|----------------------|------------|---|
| | [mm] | [mm] | [%] |
| \varnothing 10 cm | 0,01 | 20 | 0,050 |
| \varnothing 23 cm | 0,05 | 120 | 0,042 |
| \varnothing 60 cm | 0,10 | 600 | 0,017 |
| DIN 18135, analog | 0,001 | 20 | 0,005 |
| DIN 18135, digital | 0,002 | 20 | 0,01 |
| Ö-Norm B4420 | 0,01 | 20 | 0,05 |

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die verwendeten Messgeräte nicht die in der DIN 18135 (Entwurf) festgelegten Absolutgenauigkeiten erfüllen, jedoch die in der Ö-Norm B4420 (1989) sowie in den Lehrbüchern geforderte bzw. empfohlene Genauigkeitsanforderung einhalten. Die Messgenauigkeit aller in dieser Arbeit verwendeten Geräte ist ausreichend.

3.4. Durchgeführte Versuche

In den Kapiteln 3.1 und 3.2 wurde der gedankliche Lösungsansatz zur Bestimmung des Setzungsverhaltens von Abfallkörpern und die eingesetzten Materialien sowie in Kapitel 3.3 die Versuchsgeräte beschrieben. Gemäß den daraus resultierenden Aufgabenstellungen wurden Versuche durchgeführt zu:

- der Erklärbarkeit des Setzungsverhaltens von Abfallkörpern unter der ausschließlichen Anwendung der Konsolidationstheorie,
- dem Einfluss der nicht-volumenkonstanten Verformung der Einzelstücke auf das Setzungsverhalten,
- dem Einfluss der Stückform bei gleichem Steifemodul der Stücke auf das Setzungsverhalten und
- dem Einfluss unterschiedlicher Verhältnisse zwischen der maximalen Stückgröße des Abfalls und den Abmessungen der Versuchsgeräte bzw. der Versuchsgeräteabmessungen untereinander.

In Kapitel 3.1.3 sind die Versuchsansätze bereits schematisch dargestellt. In diesem Kapitel werden alle durchgeführten Versuche grafisch und tabellarisch zusammengestellt und mit den Versuchsbezeichnungen versehen.

Die durchgeführten Versuche zu den ersten drei Aufgabenstellungen sind in Abb. 3.4-1 und Tab. 3.4-1 zusammengestellt.

Generell wurden 20 Gew.-% des jeweiligen Zusatzstoffes bezogen auf die Gesamttrockenmasse mit dem Grundmaterial vermengt. Bei Zusätzen mit einer gegenüber dem Grundmaterial geringeren Materialdichte, wie z. B. folienförmige Kunststoffe, würde eine Zugabe von 20 Gew.-% zu einer volumetrischen Überbewertung dieser Stoffgruppe führen. In diesem Falle wurde eine sensorische Prüfung der verträglichen Volumenanteile durchgeführt. Dabei erwiesen sich ca. 5 Gew.-% Zusatzstoff als sinnvolle Größenordnung.

Für die Versuche zur Überprüfung der These, dass das Setzungsverhalten von Abfallkörpern nicht unter ausschließlicher Verwendung der Konsolidationstheorie erklärt werden kann, wurden zusätzlich Versuche mit einer Masse des Zusatzstoffes von 40 Gew.-% der Gesamtmasse durchgeführt.

Erste Erkenntnisse zum Einfluss der Abfallzusammensetzung auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern werden aus der Betrachtung aller durchgeführten Versuche erhalten werden (Abb. 3.4-1).

Die Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Größenverhältnisse zwischen Abfallstück- und Geräteabmessungen sind in Abb. 3.4-2 und Tab. 3.4-2 dargestellt.

Tab. 3.4-1: Zusammenstellung der durchgeführten Versuche zur Bestimmung des Einflusses der ausschließlichen Anwendbarkeit der Konsolidationstheorie, der Abfallzusammensetzung, der nicht-volumenkonstanten Verformung und der Stückform auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern

| Zusatzstoff | Versuchsnummer | Massenanteil des Zusatzstoffes |
|------------------------------|----------------|--------------------------------|
| | | [Gew.-% TS] |
| Ohne | V5_1 | - |
| | V5_2 | - |
| | V6_1 | - |
| | V6_2 | - |
| | V12_3 | - |
| | V27_1 | - |
| | V27_2 | - |
| | V27_3 | - |
| Sand | V17_1 | 20 |
| | V17_2 | 20 |
| | V21_1 | 40 |
| | V21_2 | 40 |
| Ton | V18_1 | 20 |
| | V18_2 | 20 |
| | V22_1 | 40 |
| | V22_2 | 40 |
| Gummigranulat (quaderförmig) | V8_1 | 20 |
| | V8_2 | 20 |

Tab. 3.4.1 (Fortsetzung): Zusammenstellung der durchgeführten Versuche zur Bestimmung des Einflusses der ausschließlichen Anwendbarkeit der Konsolidationstheorie, der Abfallzusammensetzung, der nicht-volumenkonstanten Verformung und der Stückform auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern

| Zusatzstoff | Versuchsnummer | Massenanteil des Zusatzstoffes |
|---------------------------------------|----------------|--------------------------------|
| | | [Gew.-% TS] |
| Organik (feucht) | V26_1 | 5 |
| | V26_2 | 5 |
| Folienschredder (folienförmig) | V24_1 | 4 |
| | V24_2 | 4 |
| | V24_3 | 5 |
| Organik (trocken) | V28_1 | 5 |
| | V28_2 | 5 |
| Holz | V30_1 | 20 |
| | V30_2 | 20 |

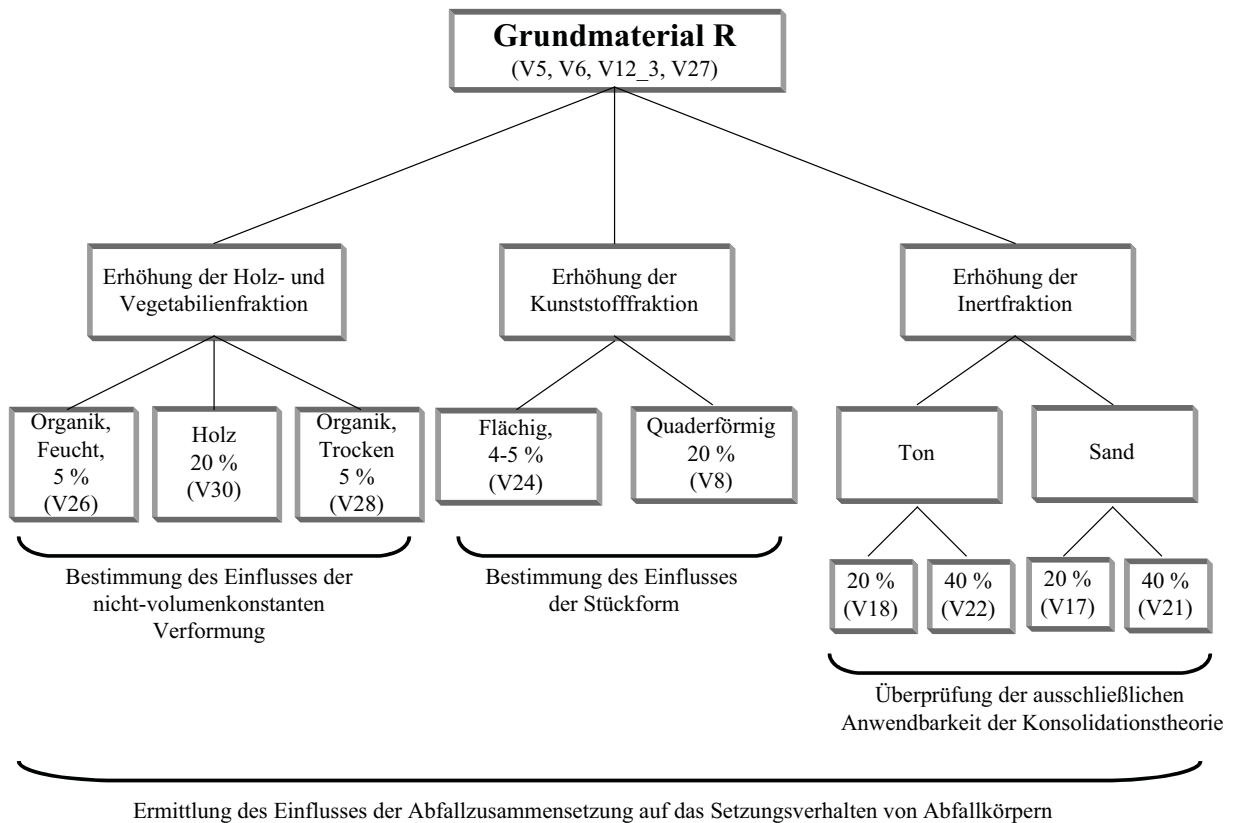


Abb. 3.4-1: Grafische Darstellung der durchgeführten Versuche zur Bestimmung des Einflusses der ausschließlichen Anwendbarkeit der Konsolidationstheorie, der Abfallzusammensetzung, der nicht-volumenkonstanten Verformung und der Stückform auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern
 Anteile der Zusätze sind in Gew.-% bezogen auf die Gesamttrockenmassen angegeben

Tab. 3.4-2: Zusammenstellung der durchgeführten Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Verhältnissgrößen zwischen Abfallstück- und Geräteabmessungen auf das Ergebnis von Ödometerversuchen

| Ödometergröße | Versuchsnummer | Material |
|---------------|----------------|----------|
| Ø in [cm] | | |
| 10 | GB1_1 | R |
| | GB1_2 | R |
| | GB1_3 | R |
| | GB 6_1 | NW_gem |
| | GB 6_2 | NW_gem |
| | GB 6_3 | NW_gem |
| | GB 14_1 | NW_ges |
| | GB 14_2 | NW_ges |
| 23 | V5_1 | R |
| | V5_2 | R |
| | V6_1 | R |
| | V6_2 | R |
| | V7_1 | NW |
| | V7_2 | NW |
| | V12_3 | R |
| | V13_3 | NW |
| | V 15_1 | NW_gem |
| | V16_1 | NW_ges |
| | V 16_2 | NW_ges |
| | V 25_1 | NW_gem |
| | V 25_2 | NW_gem |
| | V27_1 | R |
| | V27_2 | R |
| | V27_3 | R |
| | V29_1 | R |
| | V29_2 | R |
| | V29_3 | R |
| | V30_3 | R |
| V31_1 | R | |
| V31_2 | R | |
| 60 | GR1 | R |
| | GR2 | NW |

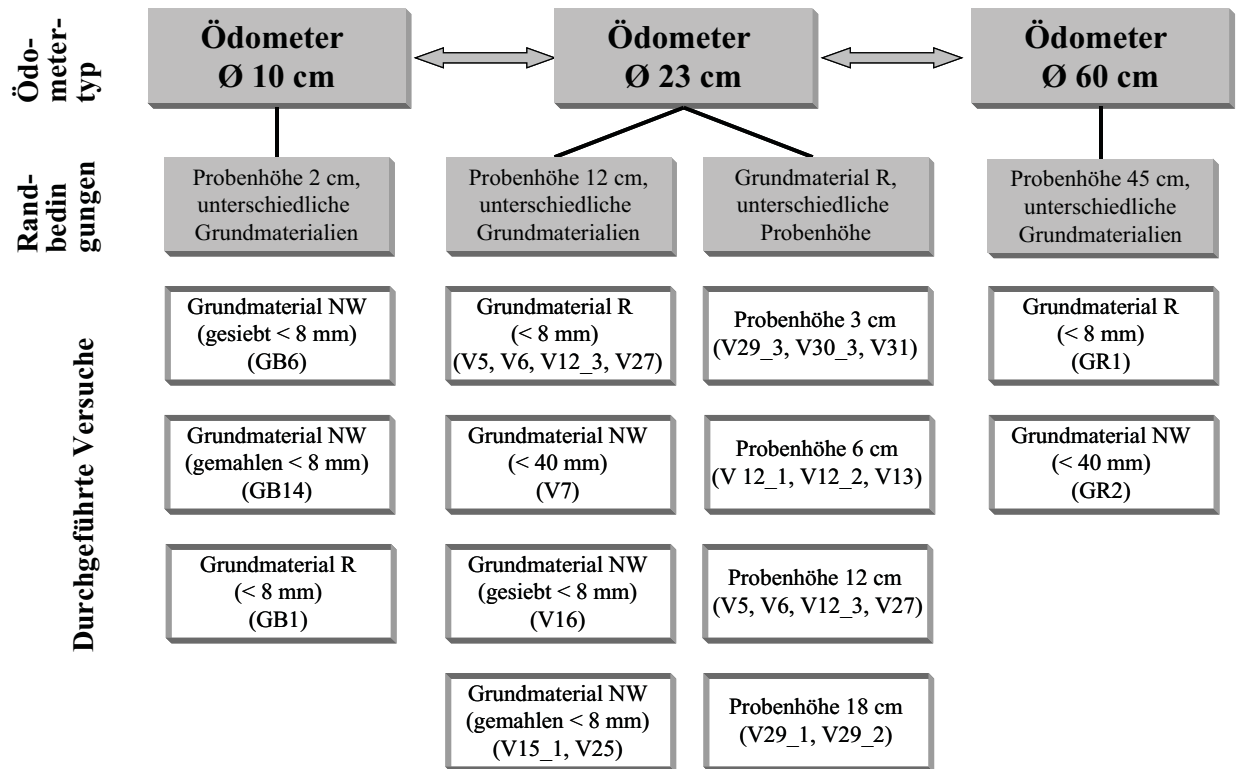


Abb. 3.4-2: Grafische Darstellung der durchgeführten Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Verhältnissgrößen zwischen Abfallstück- und Geräteabmessungen auf das Ergebnis von Ödometerversuchen

4. Ergebnisse

4.1. Nicht-volumenkonstante Verformung fester Bestandteile während des Versuches

Sind die Größen Gesamtvolumen, Feuchtmasse und Wassergehalt bekannt, lässt sich mit Hilfe der Materialdichte (Korndichte) der Luftporenanteil eines beliebigen Stoffes berechnen. Für den Abfall ist dies jedoch nicht immer möglich, da sich feste Bestandteile zum Teil während des Versuches nicht volumenkonstant verformen und ein Luftporenvolumen freisetzen können (s. Kap. 3.1.1).

Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen der Ödometerversuche dieser Arbeit wider. Wird das Luftporenvolumen nach Versuche mit den bekannten Größen Gesamtvolumen, Feuchtmasse, Wassergehalt und Materialdichte berechnet, so ergeben sich, selbst bei Annahme vollständiger Wassersättigung aller Poren, zum Teil negative Luftporenvolumina (Tab. 4.1-1).

So betrug z. B. das Gesamtvolumen der Abfallprobe des Versuches V5_2 (Versuch 5, Ödometer 2, Grundmaterial R) zu Versuche 3333,2 cm³ und das Wasservolumen, das durch Trocknung der Probe bestimmt wurde, 1593,4 cm³ (Dichte = 1 t/m³). Die Trockenmasse des Feststoffes, die sich während des Versuches nicht messbar ändert, war 4243,2 g, was bei einer im Kapillarpyknometer bestimmten Materialdichte (vor dem Ödometerversuch) von 2,08 t/m³ (Abschnitt 3.2.3.2) einem Volumen von 2040,0 cm³ entspricht. Das Gesamtvolumen von Wasser und Trockenmasse beträgt damit 3633,4 cm³. Es ist also um ca. 300 cm³ größer als das tatsächlich vorhandene Gesamtvolumen von 3333,2 cm³. Dies ist physikalisch nicht möglich.

Wird daher unterstellt, dass alle Poren mit Wasser gefüllt sind, so muss die Materialdichte des Abfalls 2,44 t/m³ betragen, damit sich rechnerisch das tatsächlich gemessene Volumen ergibt. Diese unter Ansatz vollständiger Wassersättigung berechnete Dichte ist in Tab. 4.1-1 als „fiktive Materialdichte“ bezeichnet.

Die fiktiven Materialdichten befinden sich dabei z. T. deutlich oberhalb der in den Kapillarpyknometern bestimmten Werte. Die Einzelwerte der in Kapitel 3.2.3 bestimmten Materialdichte für das Grundmaterial R besaßen eine Abweichung von weniger als 6% vom Mittelwert. Die maximal ermittelte Materialdichte betrug 2,18 t/m³. Selbst dieser Maximalwert liegt unterhalb der in den Ödometerversuchen mit dem Grundmaterial R festgestellten fiktiven Materialdichten, wobei diese sich noch auf der niedrigen Seite befinden, da die Berechnung unter der Annahme der vollständigen Wassersättigung aller Poren durchgeführt wurde.

Die Erhöhung der Materialdichte ist maßgeblich vom Anteil der nativ organischen Substanz abhängig. Bei einer Erhöhung des organischen Anteils (V26, V28) bzw. des Holzanteils (V30) tritt eine Vergrößerung des Effektes der Materialdichteerhöhung auf (Tab. 4.1-1). Mit der Verringerung des organischen Anteils ist dieser Effekt in den Messergebnissen nicht mehr erkennbar. Die Erhöhung der Materialdichte kann daher nicht für alle Materialien anhand der Versuchsergebnisse festgestellt werden (Tab. 4.1-1). Sie müsste für die organische Substanz aus theoretischen Überlegungen heraus jedoch auch in diesem Falle vorhanden sein.

Tab. 4.1-1: Luftporenvolumina und fiktive Materialdichten am Versuchende

| Versuchsnummer | Material | Ödometernummer | Luftporenvolumen am Versuchsende | Materialdichte (Pyknometer) | Fiktive Materialdichte |
|----------------|----------|----------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| [-] | [-] | [-] | [Vol.-%] | [t/m ³] | [t/m ³] |
| V5 | R | 1 | -4,8 | 2,08 | 2,26 |
| | | 2 | -9,0 | 2,08 | 2,44 |
| V6 | R | 1 | -4,8 | 2,08 | 2,26 |
| | | 2 | -7,9 | 2,08 | 2,38 |
| V8 | R+G | 1 | 0,8 | 1,85 | 1,83 |
| | | 2 | 7,6 | 1,85 | 1,64 |
| V12 | R | 1 | -4,5 | 2,08 | 2,25 |
| | | 2 | -2 | 2,08 | 2,15 |
| | | 3 | -1,8 | 2,08 | 2,14 |
| V17 | R+S | 1 | 0,3 | 2,20 | 2,26 |
| | | 2 | -4,7 | 2,20 | 2,38 |
| V18 | R+T | 1 | -3,6 | 2,20 | 2,33 |
| | | 2 | -6,3 | 2,20 | 2,44 |
| V21 | R+S | 1 | n. b.* | 2,32 | n. b.* |
| | | 2 | n. b.* | 2,32 | n. b.* |
| V22 | R+T | 1 | -0,1 | 2,31 | 2,31 |
| | | 2 | 2,8 | 2,31 | 2,20 |
| V24 | R+P | 1 | 3,3 | 2,03 | 1,92 |
| | | 2 | 1,0 | 2,03 | 2,00 |
| | | 3 | 6,9 | 2,03 | 1,84 |
| V26 | R+O | 1 | -7,4 | 1,85 | 2,15 |
| | | 2 | -2,0 | 1,85 | 1,93 |
| V28 | R+O | 1 | -5,3 | 1,85 | 2,03 |
| | | 2 | -5,9 | 1,85 | 2,05 |
| V30 | R+H | 1 | -8,2 | 1,39 | 1,60 |
| | | 2 | -8,4 | 1,39 | 1,60 |

*: Der Wassergehalt vorher wurde nicht bestimmt, so dass die Trockenmasse und damit der Luftporenanteil und die fiktive Materialdichte nicht errechnet werden kann.

Um einen besseren Einblick in das Verhalten der Materialdichte unter Auflast zu erhalten wurde ein Ödometerversuch durchgeführt, in dem die Erhöhung der Materialdichte ermittelt werden sollte (V 27). Dazu wurde das Grundmaterial R parallel in drei Ödometer eingebaut. Vor dem Einbau wurde nochmals speziell die Materialdichte des Grundmaterials R, das in diesem Versuch verwendet wurde, in fünf Versuchen mit dem Kapillarpyknometer bestimmt. Die ermittelte Materialdichte für das Material, das in dem Versuch V27 untersucht wurde, beträgt $2,05 \text{ t/m}^3$ bei einer Spannweite der Einzelversuche von $1,90$ bis $2,17 \text{ t/m}^2$ (Abb. 4.1-1). Damit wurde die für die vorhergehenden Versuche bestimmte Materialdichte von $2,08 \text{ t/m}^3$ mit einer Spannweite von $1,87 \text{ t/m}^3$ bis $2,18 \text{ t/m}^3$ bestätigt.

Nach jeder Laststufe wurde jeweils das Material aus einem der drei parallel betriebenen Ödometer ausgebaut und die Materialdichte bestimmt. In Abb. 4.1-1 ist der Mittelwert der Materialdichte sowie die Spannweite der Einzelwerte der fünf Einzeluntersuchungen, die im Kapillarpyknometer bestimmt worden sind, dargestellt. Weiterhin wurde die Materialdichte des in die Ödometer eingebauten Materials nach der Verdichtung, d. h. vor Versuchsbeginn ermittelt. Dazu wurde das Material in ein Ödometer eingebaut und anschließend wieder ausgebaut, um die Materialdichte mit dem Kapillarpyknometer zu bestimmen.

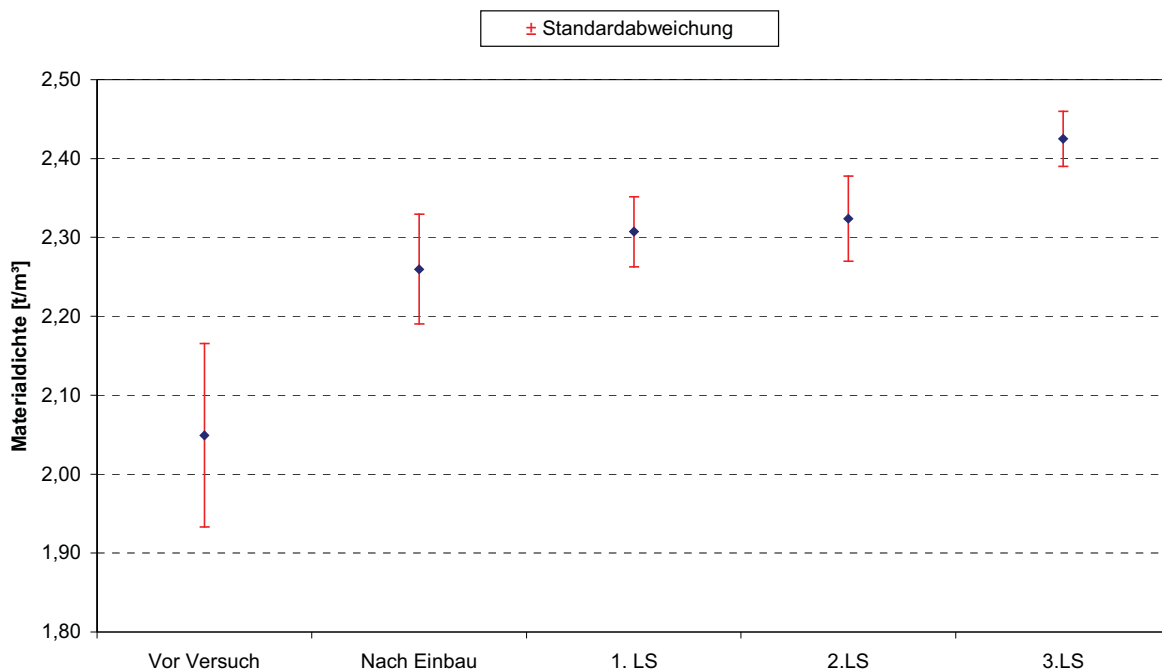


Abb. 4.1-1: Materialdichte des Grundmaterials R vor dem Versuch sowie nach der 1., 2. und 3. Laststufe (250, 500 und 1000 kN/m²) im Versuch V27

Deutlich erkennbar ist dabei die Erhöhung der Materialdichte bereits während der Verdichtung beim Einbau. Während der ersten Laststufe (250 kN/m^2) erhöht sich die Materialdichte weiter von $2,26 \text{ t/m}^3$ auf $2,31 \text{ t/m}^3$, während sie in der zweiten Laststufe (500 kN/m^2) mit $2,32 \text{ t/m}^3$ nahezu unverändert bleibt. Eine deutliche Erhöhung der Materialdichte ist wiederum in der dritten Laststufe (1000 kN/m^2) festzustellen. Dabei erhöht sich die Materialdichte auf $2,43 \text{ t/m}^3$. Die Spannweite der Einzelergebnisse schwankt dabei in einem engen Bereich zwischen $2,39$ und $2,47 \text{ t/m}^3$.

Werden Versuchsdaten aus der Literatur nachgerechnet, so werden dabei ähnlich hohe Materialdichten bestimmt. Bei der Berechnung der Materialdichten aus den Versuchsdaten der Scher- und Zugversuchen von COLLINS et al. (1997) ergeben sich für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle Materialdichten von bis zu $2,32 \text{ t/m}^3$. Dabei wurde wiederum davon ausgegangen, dass alle Poren mit Wasser gesättigt sind, so dass die Materialdichten bei evtl. vorhandenen Luftporen noch größer sein können.

Es ist dabei zu beachten, dass diese Versuche mit einer deutlich geringeren Dichte als der Proctordichte in die Versuchsgeräte eingebaut worden sind und die maximalen Auflasten nur ca. 250 bis 300 kN/m^2 betragen, was etwa der ersten Laststufe in den Ödometerversuchen entspricht. Die rechnerisch ermittelte Materialdichte bei den Scher- und Zugversuchen entspricht demnach etwa den in den Ödometerversuchen beobachteten Materialdichten bei gleicher Auflast.

COLLINS und RAMKE (1986) setzten in den Großödometerversuchen zur Berechnung des Luftporenanteils Materialdichten von $2,5 \text{ t/m}^3$ an. Auf den Ursprung dieser Annahme gibt es keinen Hinweis. Wird jedoch davon ausgegangen, dass die Poren der Probe zu Versuchende vollständig mit Wasser gefüllt sind, werden in der Nachrechnung aus den Versuchsdaten Materialdichten von $2,14 \text{ t/m}^3$ bis zu $2,27 \text{ t/m}^3$ ermittelt.

Der bei COLLINS und RAMKE (1986) untersuchte Abfall entstammte der mechanisch-biologischen Behandlung des Landkreises Schwäbisch-Hall. Die Maximalstückgröße des Abfalls in den Ödometern betrug 120 mm . Aufgrund der Materialzusammensetzung, sowie der verglichen mit heutigen Standards zu erwartenden relativ geringen biologischen Stabilisierung, die unter anderem auf die gemeinsame Sammlung von Rest- und Biomüll sowie auf die noch im Probetrieb befindliche mechanisch-biologische Behandlungsanlage zurückzuführen ist, sind Materialdichten von ca. $1,8 \text{ t/m}^3$ anzunehmen (DACH (1998)). Dies bedeutet, dass es auch in den von COLLINS und RAMKE (1986) durchgeführten Ödometerversuchen zu einer deutlichen Erhöhung der Materialdichte gekommen ist. Aufgrund des vermutlich relativ hohen organischen Anteils sind die bei COLLINS und RAMKE (1986) erreichten

Materialdichten kleiner als bei den in dieser Arbeit verwendeten Abfällen. Es ist jedoch bei COLLINS und RAMKE (1986) eine absolut und relativ größere Erhöhung der Materialdichte von bis zu $0,47 \text{ t/m}^3$ während der Versuche festzustellen, was ebenfalls auf den vermutlich erhöhten organischen Anteil zurückzuführen ist.

Die Nachrechnungen früher durchgeführter Versuche mit Siedlungsabfällen zeigen, dass die Materialdichteerhöhung auch in diesen Versuchen vorhanden gewesen ist, aber bisher nicht beachtet bzw. untersucht worden ist. Die aus den Versuchsdaten berechneten Materialdichten, die bei Annahme voller Sättigung aller Poren mit Wasser bestimmt wurden, entsprechen in ihrer Größenordnung der in den Versuchen dieser Arbeit ermittelten Materialdichten. Eine Abhängigkeit der nicht-volumenkonstanten Verformung von der organischen Substanz ist auch bei dem Vergleich der Versuche von COLLINS und RAMKE (1986) mit den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen festzustellen.

Anhand der Nachrechnung des Versuches V 27 im Ödometer 3, das bis zur dritten Laststufe betrieben wurde und dessen Abfall daher mit $2,43 \text{ t/m}^3$ die höchste Materialdichte aufweist, soll exemplarisch dargestellt werden, in welchem Umfang die Materialdichte während der Ödometerversuche durch die auflastbedingte Veränderung der Zellstruktur (nicht-volumenkonstante Verformung) der nativ organischen Substanz beeinflusst wird.

Dazu muss zuerst der Anteil an nativ organischer Substanz bestimmt werden. Der in Laborversuchen ermittelte Parameter zur Beschreibung der organischen Substanz ist der TOC, der den Anteil des organischen Kohlenstoffs an der Gesamtmasse beschreibt. Er setzt sich aus zwei Teilen zusammen, dem nativ organischen und dem künstlichen, d. h. biologisch praktisch nicht bzw. in nur geologischen Zeiträumen abbaubaren organischen Kohlenstoff, der sich z. B. in Kunststoffen befindet. Der als TOC bestimmte Anteil an organischem Kohlenstoff an der Gesamtmasse des Abfalls beträgt für das Grundmaterial R 8,5 bis 10,0 Gew.-% (Kap 3.2.1).

Um den biologisch praktisch nicht abbaubaren Anteil abzuschätzen, wurden Versuche durchgeführt, in denen jeweils ca. 50 g des Grundmaterials R in einem Erlenmeierkolben mit 250 ml Wasser vermengt wurden. Anschließend wurde die Probe für eine Stunde im Ultraschallbad bewegt. Der oben schwimmende Anteil, d. h. das Material mit einer Dichte $< 1,0 \text{ t/m}^3$, wurde abgesiebt. Die Kunststoffanteile wurden abgetrennt. In den durchgeführten Versuchen ergab sich ein durchschnittlicher Kunststoffanteil von 1,0 Gew.-% mit einer Spannweite zwischen 0,8 und 1,5 Gew.-%.

Obwohl auch einige Hartkunststoffe an der Oberfläche schwammen, ist davon auszugehen, dass ein weiterer Teil der Hartkunststoffe noch am Boden des Erlenmeierkolbens vorhanden

ist, da die Dichte der Hartkunststoffe in vielen Fällen (z. B. PE-HD) größer als $1,0 \text{ t/m}^3$ ist. Um einen Aufschluss über den Anteil des Hartkunststoffes zu erhalten, wurden die Sortieranalysen anderer mechanisch-biologisch behandelter Abfälle, die bei COLLINS et al. (1997) veröffentlicht sind, herangezogen und ausgewertet. Diese Analysen geben einen Aufschluss über das Massenverhältnis von weichen zu harten Kunststoffen bei mechanisch-biologisch behandelten Abfällen. Das Verhältnis zwischen Weich- und Hartkunststoffen lag bei den von COLLINS et al. (1997) untersuchten mechanisch-biologisch behandelten Abfällen im Mittel bei 2,88 (Tab. 4.1-2). Wird dieses Verhältnis angesetzt, so ergibt sich für das Grundmaterial R ein zusätzlicher Hartkunststoffanteil mit einer Dichte $> 1,0 \text{ t/m}^3$ von 0,35 Gew.-%

Tab. 4.1-2: Verhältnis des Gewichtsanteiles von Weich- zu Hartkunststoffen der von COLLINS et al. (1997) untersuchten mechanisch-biologisch behandelten Abfälle

| Material | Freiburg | Rotte 18 | Freiburg <40mm | Freiburg 2 | Wilhelmshaven | Mittelwert |
|--------------------------|----------|----------|-------------------|------------|---------------|------------|
| Verhältnis weich/hart | 1,6 | 1,6 | 3,3 | 5,7 | 2,2 | 2,88 |

Bei der TOC-Bestimmung wird jedoch nur der Kohlenstoffanteil ermittelt. Um den durch die Kunststoffe bedingten Massenanteil im TOC zu errechnen, muss daher der Anteil an Kunststoffen (Hart- und Weichkunststoffen) von 1,35 Gew.- um die Masse der anderen Atome im Kunststoff reduziert werden. Für langkettige Moleküle gilt dabei die chemische Summenformel Formel $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$. Der maßgebende Anteil ist dabei das $(\text{CH}_2)_n$, das ein Verhältnis von Masse des Kohlenstoff zu Gesamtmasse von 0,857 besitzt. Für andere organische chemische Verbindungen kann er deutlich geringer sein. Für PVC beträgt das Verhältnis nur 0,387. Für die weitere Berechnung wird daher mit einem Mittelwert des Verhältnisses von Kohlenstoffmasse zu Gesamtmasse von 0,6 weitergerechnet. Dieser Mittelwert berücksichtigt sowohl das geringere Kohlenstoff-Rest-Verhältnis einiger Kunststoffe, wie z. B. PVC, als auch die geringeren Verhältnisse der „Enden“ der langkettigen Moleküle, die z. B. aus Estergruppen bestehen können. Der Anteil des biologisch praktisch nicht abbaubaren Kunststoffes am Gesamt-TOC beträgt damit ca. 0,8 Gew.-%. Wenn der Kunststoff vollständig aus langkettigen Molekülen besteht, ergibt sich ein TOC des nicht biologisch abbaubaren Kunststoffes von 1,1 Gew.-%, bei Annahme von PVC als Kunststofffraktion hingegen 0,52 Gew.-%. Es berechnet sich daher, bei Ansatz des Mittelwertes, ein nativer Kohlenstoffanteil des Grundmaterials R von 7,7 bis 9,2 Gew.-%.

Die in das Ödometer 3 (V 27) eingebaute Gesamtmasse betrug 7294 g bei einem Wassergehalt von 37,5 Gew.-% (FS). Die Trockenmasse betrug damit 4559 g, woraus sich ein nativ organischer Kohlenstoffanteil von 351,0 bis 419,4 g errechnet.

Die biologisch abbaubare organische Substanz wird in dieser Betrachtung vereinfachend durch Holz idealisiert, da es sich bei den nach der mechanisch-biologischen Behandlung im Abfall verbleibenden Organikbestandteilen um biologisch schwer abbaubare Stoffe handelt und weitreichende Forschungsergebnisse über das physikalische Verhalten von Holz vorliegen.

Der Aufbau des Holzes soll hier anhand der etwas einfacheren, da entwicklungsgeschichtlich älteren, Struktur der Nadelhölzer kurz dargestellt werden (Abb. 4.1-2). Die Tracheiden nehmen bei allen Nadelhölzern rund 90 bis 95% der Gesamtstruktur ein (GROSSER (1977)). Sie sind durch Tüpfel miteinander verbunden. Je nach Holzart gibt es unterschiedliche Tüpfelformen (einfache, behöftete und einseitig behöftete Tüpfel). Prinzipiell befindet sich im zentralen Bereich des Tüpfels eine Membran, durch die der Stoff- und Wasseraustausch erfolgt. Trocknen die Zellen aus, wie dies im Kernbereich von Bäumen sowie bei der Ofentrocknung der Fall ist, verschließen sich bei vielen Hölzern die Tüpfel vollständig, bei anderen bedingt. Die verschlossenen Zellen sind dann für Wasser nicht mehr unmittelbar zugänglich.

Wegen dieser Holzstruktur kommt es bei der Materialdichtebestimmung im Kapillarpyknometer nur in geringem Maße zu einer Füllung innenliegender Poren. Die Materialdichte des Holzes (=Reindichte nach KOLLMANN (1982)) wird daher im Kapillarpyknometer in einer Größenordnung bestimmt, die in etwa der Rohdichte (=Dichte des Feststoffes einschließlich aller Poren) entspricht.

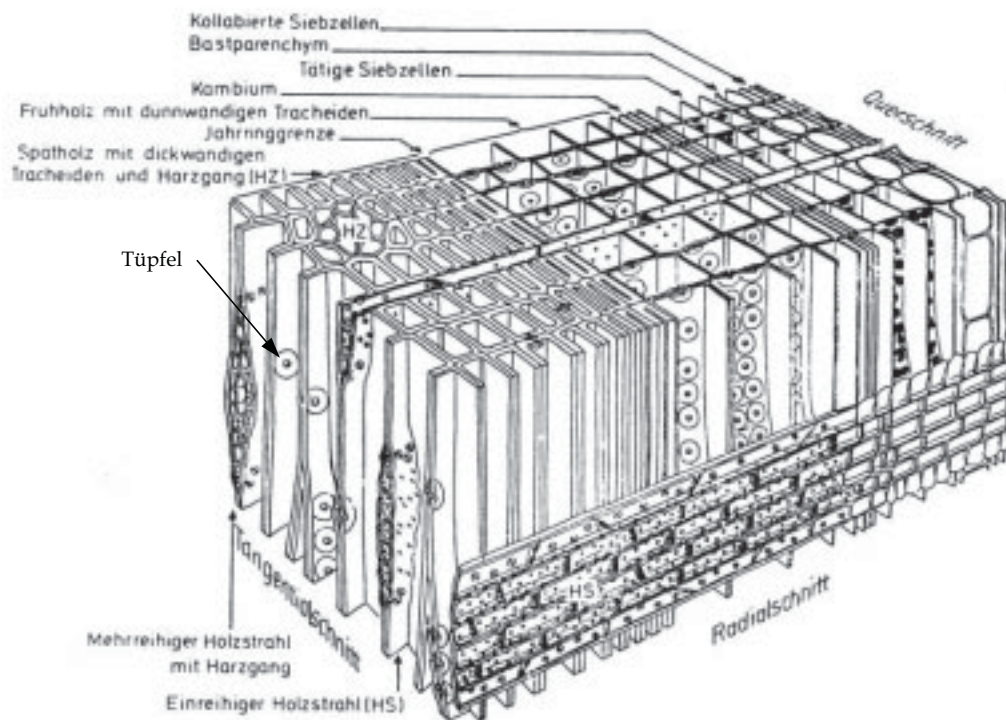


Abb. 4.1-2: Räumliche Darstellung von Holz und Bast eines Nadelbaumes (Lärche) [Aus GROSSER (1997)]

Die Rohdichte schwankt für Holz zwischen $0,1$ und $1,4 \text{ t/m}^3$ (KOLLMANN (1982)). Bei einheimischer Hölzern beträgt die Rohdichte zwischen $0,3$ und $0,9 \text{ t/m}^3$. Sie ist sowohl von Holzart zu Holzart als auch innerhalb des Stammquerschnitts verschieden (Abb. 4.1-3). In dieser Betrachtung wird daher von dem Mittelwert $0,6 \text{ t/m}^3$ ausgegangen. Die exakte Bestimmung der Materialdichte des Holzes erfolgt über das Heliumverdrängungsverfahren, bei dem Helium mit sehr hohen Drücken in das Holz eingepresst wird. Für die beiden maßgeblichen Feststoffanteile des Holzes, die Holzcellulose und das Lignin, beträgt die Materialdichte $1,58 \text{ t/m}^3$ für die Holzcellulose und ca. $1,40 \text{ t/m}^3$ für das Lignin. Die Materialdichte des Holzes ist daher abhängig von dem Verhältnis von Cellulose und Lignin. Der Hauptbestandteil im Holz ist dabei Cellulose. Nach KOLLMANN (1982) kann deshalb für alle Holzarten hinreichend genau mit einer Materialdichte von $1,50 \text{ t/m}^3$ gerechnet werden.

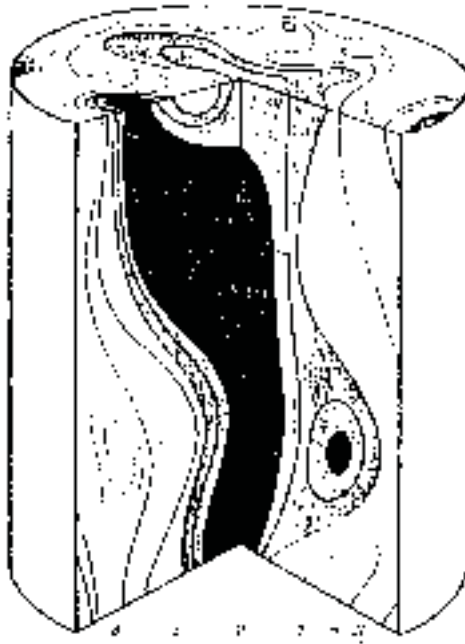


Abb. 4.1-3: Strang- und nesterförmige Verteilung der Rohdichte in einem Rotbuchenstammabschnitt [aus KOLLMANN (1982)]
 ($\rho_{\max} = 0,79 \text{ t/m}^3$; $\rho_{\min} = 0,51 \text{ t/m}^3$; je höher die Rohdichte desto dunkler der Ton)

Der Massenanteil der nativ organischen Substanz im Abfall errechnet sich wiederum aus dem TOC-Gehalt dividiert durch den Kohlenstoffanteil des Gesamtmoleküls. Cellulose, der Hauptbestandteil des Holzes, ist ein Polysaccharid (Abb. 4.1-4) und entsteht durch die saure Hydrolyse von Glucose. Die Summenformel ergibt sich zu $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$. Der Anteil des Kohlenstoffs an einem Glucosering der Cellulose beträgt dabei 44%.

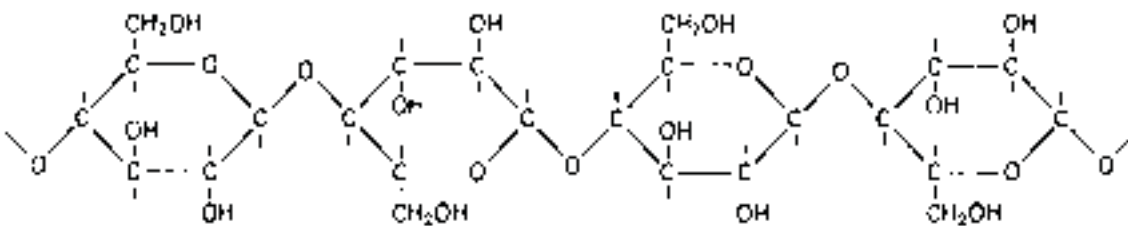


Abb. 4.1-4: Struktur eines Cellulosemoleküls

Die Masse des organischen Kohlenstoffs des Grundmaterials R beträgt 351,0 bis 419,4 g (s. o.). Da Holz zu ca. 44 % aus Kohlenstoff besteht, ergibt sich ein Massenanteil des Holzes (der nativ organischen Substanz) von 797,7 bis 953,2 g. Die nativ organische Substanz würde damit vor dem Versuchsbeginn bzw. dem Einbau des Abfalls in das Ödometer ein Volumen von 1330 bis 1589 cm^3 (Dichte = $0,6 \text{ t/m}^3$) einnehmen.

Während der Versuchsdurchführung im Ödometer wird die Zellstruktur zerstört und die mit Luft gefüllten Poren werden zugänglich. Bei vollständiger Zerstörung der Zellstruktur wird die Materialdichte des Stoffes, bei Holz $1,50 \text{ t/m}^3$, erreicht. Das Volumen der nativ organischen Substanz verringert sich bei konstanter Masse von $797,7$ bis $953,2 \text{ g}$ dadurch auf $531,8$ bis $635,5 \text{ cm}^3$.

Durch die vollständige Zerstörung der Holzstruktur kann damit ein zusätzliches Volumen von 695 cm^3 ($= \min. V_{\text{vorher}} - \max. V_{\text{nachher}}$) bis 1057 cm^3 ($= \max. V_{\text{nachher}} - \min. V_{\text{nachher}}$) freigesetzt werden, dass mit anderen Stoffen (z. B. Feststoff oder Wasser) gefüllt werden kann.

Im Falle des Ödometers 3 (V 27) betrug das gesamte Feststoffvolumen zu Versuchsbeginn $2190,7 \text{ cm}^3$ bei einer Materialdichte von $2,08 \text{ t/m}^3$. Zu Versuche hat sich die Materialdichte auf $2,43 \text{ t/m}^3$ erhöht. Damit ergibt sich ein benötigtes Feststoffvolumen von $1876,0 \text{ cm}^3$. Die Differenz des Feststoffvolumens im Versuch V27_3, das durch die nicht-volumenkonstante Verformung von festen Bestandteilen - mit einer Erhöhung der Materialdichte - hervorgerufen wurde, liegt mit $314,7 \text{ cm}^3$ deutlich unterhalb des durch die Zerstörung der Holzstruktur theoretisch freisetzbaren Volumens von 695 bis 1057 cm^3 .

Die theoretische Überlegung zur nicht-volumenkonstanten Verformung der nativ organischen Substanz zeigt, dass durch die Volumenverringerng innerhalb dieser Stoffgruppe ein solch großes Luftporenvolumen freigesetzt wird, dass die im Kapillarpyknometer bestimmbare Materialdichte des Abfalls auf über $2,4 \text{ t/m}^3$ anwachsen kann.

Bei der theoretischen Betrachtung wäre noch eine weitere Erhöhung der Materialdichte möglich. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass bei der oben angestellten Betrachtung des freisetzbaren Porenpotenzials die Berechnung mit der Idealisierung der nativ organischen Substanz durch Holz erfolgte und die für die Porenvolumina bzw. die Roh- und Reindichte des Holzes sowie die chemische Zusammensetzung der Kunststoffe eingesetzten Werte Näherungswerte darstellen, da genaue Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich waren. Es wurde jedoch gezeigt, dass die in den Versuchen festgestellte Erhöhung der Materialdichte durch die Erschließung von verschlossenen Luftporen innerhalb der nativ organischen Substanz erklärt und die Größenordnung der im Kapillarpyknometer ermittelten Materialdichten von ca. $2,4 \text{ t/m}^3$ so erreicht werden kann.

Eine weitere Steigerung der Materialdichte auf deutlich über $2,5 \text{ t/m}^3$ scheint hingegen nicht möglich zu sein, da die Materialdichte von Siedlungsabfällen durch die Materialdichte der Einzelbestandteile begrenzt ist. Der Anteil an Bestandteilen mit einer Materialdichte

$> 2,5 \text{ t/m}^3$ ist im Vergleich zu den Bestandteilen mit einer Materialdichte $< 2,5 \text{ t/m}^3$ zu gering, um die Materialdichte von Siedlungsabfall weiter zu erhöhen.

Die Erhöhung der Materialdichte erfolgt in mehreren Stufen (Abb. 4.1-1). Die erste Erhöhung der Materialdichte erfolgt bei dem Einbau des Abfalls in die Ödometer. Dabei wird die Bruchspannung des Holzes durch die dynamische Verdichtungsarbeit überschritten, so dass ein Teil der verschlossenen Luftporen freigesetzt wird. Bei den geringen statischen Auflasten, wie z. B. in der 1. Laststufe, werden maßgeblich Membranstrukturen, wie sie bei Holz z. B. in Form der Tüpfel vorliegen, zerstört, wodurch weitere eingeschlossene Luftporenvolumina zugänglich werden. Die Öffnung der Tüpfel geschieht dabei zu einem großen Teil durch Porenwasser- und Porenluftdrücke, da innenliegende Tüpfel nicht durch einen Feststoffdruck geöffnet werden können, ohne dass die Struktur des Holzes zerstört wird. Dieses Prinzip wird bei der Druckimprägnierung von Holz industriell eingesetzt. Dort wird nach einer Evakuierung mit einem Unterdruck, die dem Aufbrechen der Tüpfel dient, das Schutzmittel mit Drücken von bis zu 800 kN/m^2 in die Holzstruktur eingepresst (LEIßE (1992)). Die hohen Einpressdrücke dienen dabei der nahezu vollständigen Füllung aller Luftporen mit Schutzmittel. Ein Großteil der Poren wird jedoch bereits bei kleineren Drücken bis zu 200 kN/m^2 , wie sie auch in der ersten Laststufe bei den Ödometerversuchen vorliegen, erschlossen (DINGER (2001)).

Bei weiteren Lasterhöhungen ist dann nur noch eine sehr geringe bis nahezu keine weitere Erhöhung der Materialdichte festzustellen (2. Laststufe). Erst bei Überschreitung der statischen Quetschspannung, wie z. B. in der 3. Laststufe, kommt es zu einer weiteren Zerstörung der Holzstruktur (KOLLMANN (1982)). Dadurch wird ein weiterer Teil an vorher unzugänglichen Luftporen sowie an Luftporen, die durch andere Mechanismen als der Membranstruktur verschlossen sind, zugänglich.

Die theoretischen Überlegungen und die Versuche zeigen, dass es in der nativ organischen Substanz zu einer nicht-volumenkonstanten Verformung mit der Erhöhung der Materialdichte kommt. Die Materialdichteerhöhung erfolgt in drei Schritten, beim Einbau durch die dynamische Belastung, bei geringen Lasten durch den Aufbruch von membranähnlichen Strukturen (Tüpfeln) und bei großen Lasten durch Strukturbruch. Es werden bei Versuchende Materialdichten von bis zu $2,45 \text{ t/m}^3$ für die hier untersuchten Abfälle erreicht.

4.2. Einfluss der Abfallzusammensetzung auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern

4.2.1. Allgemeines

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, dass die Abfallzusammensetzung und damit die in Kapitel 3.1 entwickelten Modellvorstellungen einen Einfluss auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern besitzen. Im Rahmen dieser Arbeit sollen diese Einflüsse hauptsächlich qualitativ aufgezeigt sowie mögliche Größenordnungen des Einflusses einzelner Stoffgruppen bzw. ihrer physikalischen Wirkungsweise beschrieben werden.

4.2.2. Versuchsergebnisse

Um den Einfluss der Abfallzusammensetzung auf das Setzungsverhalten beschreiben zu können, wurden Versuche mit dem Grundmaterial R sowie mit dem Grundmaterial R und Zusätzen durchgeführt (Kap. 3.2). Die Kombination mehrerer Zusätze in einem Versuch wurde nicht geprüft (Kap. 3.2). Bei den Ergebnissen der Versuche wurde jeweils die Veränderung des Setzungsverhaltens des Grundmaterials R mit dem jeweiligen Zusatz gegenüber dem Grundmaterial R analysiert. Abschließend wurden alle Versuche zusammen betrachtet.

Für den Zusatzstoff Kunststoff wurde zusätzlich der Einfluss der Stückform auf die Versuchsergebnisse durch die Zugabe von quaderförmigem und folienförmigem Kunststoff untersucht.

- Grundmaterial R

Der Zeit-Setzungsverlauf des Grundmaterials R ist geprägt durch eine große Sofortsetzung sowie durch den auch über 24 bzw. 48 Stunden hinaus nach unten gekrümmten Kurvenverlauf (Abb. 4.2-1). Die Zeit-Setzungsverläufe der Parallelproben des in Abb. 4.2-1 dargestellten Versuches V5 sowie aller anderen Versuche mit dem Grundmaterial R weisen eine hohe Übereinstimmung auf. Die in der ersten Laststufe auftretenden unterschiedlichen Sofortsetzungen sind auf die inhomogene Materialzusammensetzung des Abfalls sowie auf die ungleichmäßige Vorbelastung zurückzuführen (s. a. Abschnitt. 4.4.2.2). Die gute Übereinstimmung der Zeit-Setzungsverläufe spiegelt sich auch in den Steifemoduli nach 24 Stunden wider (Tab. 4.2-1).

Die gute Übereinstimmung der Versuche mit dem Grundmaterial R, die zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb von 1½ Jahren durchgeführt worden sind, beweist, dass die Annahme des geringen Einflusses des biologischen Abbaus der organischen Substanz auf das Setzungsverhalten bei dem Grundmaterial R korrekt ist. Der nur geringe biologische Abbau während

der Probenlagerung wurde bereits in Kapitel 3.2 anhand der chemischen Analysen nachgewiesen. Dass der Einfluss des biologischen Abbaus und seiner Randerscheinungen, wie z. B. Versprödung der Kunststoffe, während der Probenlagerung auf die Ergebnisse in den Ödometerversuchen gering ist, musste jedoch in den Versuchen nachgewiesen werden.

Die mit dem Grundmaterial ermittelten Steifemoduli sind im Vergleich zu Böden relativ gering. Ähnlich geringe Steifemoduli werden z. B. bei tonarmem Klei und weichem oder steifem Ton gefunden (EAU (1980)).

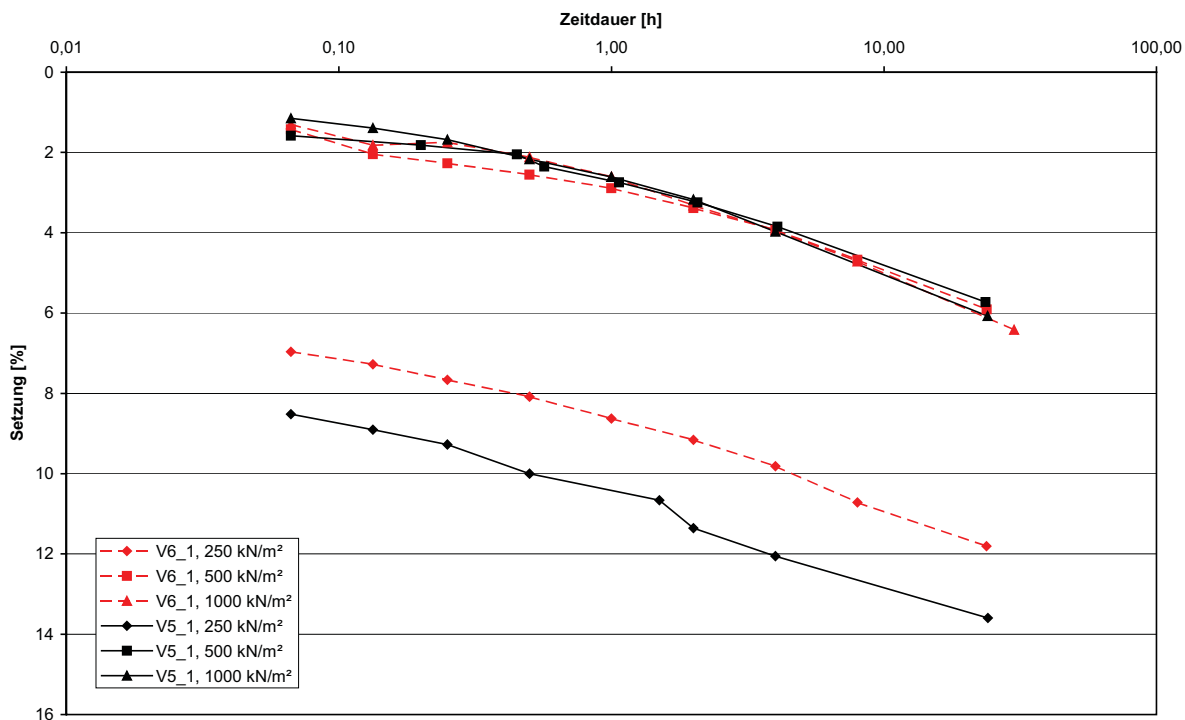


Abb. 4.2-1: Zeit-Setzungsverlauf der Versuche V5_1 und V5_2 mit dem Grundmaterial R
Die Setzungen sind jeweils auf die Anfangshöhe zu Beginn der jeweiligen Laststufe bezogen.

Tab. 4.2-1: Steifemoduli der Versuche V5, V6 und V12 nach 24 Stunden Belastungsdauer je Laststufe

| Versuchsnummer | Steifemodul [kN/m ²] | | |
|---------------------------|--|--|---|
| | 1. Laststufe [250 kN/m ²] | 2. Laststufe [500 kN/M ²] | 3. Laststufe [1000 kN/m ²] |
| V5_1 | 1574 | 3982 | 7524 |
| V5_2 | 1475 | 4372 | 7138 |
| V6_1 | 1828 | 3858 | 7188 |
| V6_2 | 1538 | 4018 | 6768 |
| V12_3 | 1967 | 4247 | 7053 |
| Mittelwert | 1676 | 4095 | 7143 |
| Variationskoeffizient [-] | 0,126 | 0,051 | 0,038 |

- Erhöhung der Inertfraktion

Die Zugabe von Inertanteilen führt zu einer Verringerung der Setzungen und damit zu einem höheren Steifemodul. Ausgeprägt ist dies bei der Zugabe von Sand (V17 und V21) festzustellen. Je größer der zugegebene Inertanteil ist, desto höher wird der Steifemodul (Tab. 4.2-2). Die Verringerung der Setzung resultiert, wie aus der Bodenmechanik bekannt, aus dem sehr hohen Steifemodul des Einzelkornes (nahezu unverformbar, s. Kap. 2.2.1) und der Möglichkeit des rolligen Zusatzstoffes Stützgerüste auszubilden. Damit entsteht eine Gewölbewirkung, bei der die eingeleitete Kraft über die steifen Bodenkörner abgetragen wird. Die weniger steifen Bestandteile erhalten dadurch nur eine geringere Last, auf die sie mit verminderter Verformung reagieren.

Im Falle der Zugabe von Ton (V18 und V22) ist die Möglichkeit der Stützgerüstbildung nur sehr eingeschränkt möglich. Hier wird der Steifemodul maßgeblich durch den höheren Anteil an steifen Bestandteilen gegenüber dem Grundmaterial R erhöht. Daher ist die Erhöhung des Steifemoduls nicht so ausgeprägt wie bei der Zugabe von Sand.

Bei der Zugabe von 40% Ton (V22) kommt es, im Unterschied zu allen anderen Versuchen, erst in der zweiten Laststufe zu großen Sofortsetzungen, was dazu führt, dass der Steifemodul der ersten Laststufe sehr hoch und der zweiten Laststufe hingegen deutlich vermindert ist.

Da Ton bei geringen Einbaudichten und hohen Auflasten einen ähnlichen Steifemodul wie das Grundmaterial R besitzt (Kap. 3.2), unterscheidet sich der Steifemodul bei der Zugabe von Ton und weiterer Erhöhung der Auflast zunehmend geringer von dem Steifemodul des Grundmaterials R (Tab. 4.2-2).

Tab. 4.2-2: Steifemoduli der Versuche mit Inertzusätzen sowie zum Vergleich des Grundmaterials R

| Zusatzstoff | Versuchsnummer | Massenanteil des Zusatzstoffes [Gew.-% TS] | Steifemodul [kN/m ²] | | |
|---------------|----------------|---|--|--|---|
| | | | 1. Laststufe [250 kN/m ²] | 2. Laststufe [500 kN/m ²] | 3. Laststufe [1000 kN/m ²] |
| Keiner | Mittelwert | --- | 1676 | 4095 | 7143 |
| Sand | V17_1 | 20 | 1857 | 4988 | 8440 |
| | V17_2 | 20 | 1539 | 5561 | 7064 |
| | V21_1 | 40 | 4047 | 6531 | 9057 |
| | V21_2 | 40 | 2789 | 5663 | 7164 |
| Ton | V18_1 | 20 | 1863 | 4531 | 7559 |
| | V18_2 | 20 | 1516 | 5005 | 7142 |
| | V22_1 | 40 | 4023* | 4002* | 6643 |
| | V22_2 | 40 | 3728* | 4767* | 6777 |

*: Die hohe Sofortsetzung erfolgte in der zweiten Laststufe, statt wie bei allen anderen Versuchen in der ersten Laststufe.

- Erhöhung der Organikfraktion

Die Zugabe von biologisch leicht- oder schwerabbaubaren nativ organischen Bestandteilen (V26, V28 und V30) führt zu einer deutlichen Verringerung des Steifemoduls gegenüber dem Grundmaterial R. Hierfür ist maßgeblich die nicht-volumenkonstante Verformung der organischen Substanz verantwortlich (Kap. 3.1.1 und Kap. 4.1).

Bei der Zugabe von feuchter Organik (V26) kommt es durch das Auspressen des Wassers dazu, dass der Steifemodul geringer ist als bei Zugabe trockener Organik.

Tab. 4.2-3: Steifemoduli der Versuche mit Organik- und Holzzusätzen sowie zum Vergleich des Grundmaterials R

| Zusatzstoff | Versuchsnummer | Massenanteil des Zusatzstoffes [Gew.-% TS] | Steifemodul [kN/m ²] | | |
|--------------------------|----------------|---|--|--|---|
| | | | 1. Laststufe [250 kN/m ²] | 2. Laststufe [500 kN/m ²] | 3. Laststufe [1000 kN/m ²] |
| Keiner | Mittelwert | --- | 1676 | 4095 | 7143 |
| Organik (feucht) | V26_1 | 5 | 1492 | 2239 | 4031 |
| | V26_2 | 5 | 1612 | 2469 | 4267 |
| Organik (trocken) | V28_1 | 5 | 1242 | 2974 | 5642 |
| | V28_2 | 5 | 1120 | 3229 | 5387 |
| Holzschredder | V30_1 | 20 | 1359 | 2504 | 4649 |
| | V30_1 | 20 | 1556 | 3225 | 4771 |

- Erhöhung der Kunststofffraktion

Bei der Zugabe von quaderförmigem Kunststoff (Gummi) ist der Steifemodul in den ersten beiden Laststufen gegenüber dem Steifemodul des Grundmaterials R nahezu unverändert (Tab. 4.2-4). Dabei beeinflussen sich die Effekte des Zufügens eines Materials mit hohem Steifemodul (setzungsvermindernd) und dem größeren Luftporenvolumen bei Versuchsbeginn (setzungserhöhend) gegenläufig. Durch das relativ große Luftporenvolumen kann der Zusatzstoff bei der Erhöhung der Auflast in den vorhandenen mit Luft gefüllten Porenraum eindringen und die Luft verdrängen. Die elastischen Eigenschaften des Zusatzstoffes Gummi begünstigen diesen Prozess, da sich das Gummi bei hohen Spitzendrücken verformen kann.

In der dritten Laststufe sind die meisten größeren Luftporen bereits mit Feststoff oder Wasser gefüllt. Der auf die Gummiteilchen wirkende Druck reicht anscheinend nicht mehr aus, um das Gummi soweit zu verformen, dass es in die kleineren Luftporen eindringen kann. Es bildet sich dann aufgrund des relativ hohen Steifemoduls des Gummis (Kap. 3.2) ein Gewöl-

beeffekt aus, wie er auch bei der Zugabe von Sand zu beobachten ist, was zu einem gegenüber dem Grundmaterial R erhöhten Steifemodul führt (Tab. 4.2-4).

Bei der Zugabe von Plastikfolien (folienförmigen Kunststoffen, V24) sind die Steifemoduli bei geringen Auflasten, wie bei der Zugabe von quaderförmigen Kunststoffen, denen des Grundmaterials R ähnlich. Die in der ersten Laststufe zu beobachtende größere Sofortsetzung des Grundmaterials mit folienförmigem Kunststoff gegenüber dem Zusatz von quaderförmigem Kunststoff kann auf die unterschiedlichen Materialeigenschaften zurückzuführen sein. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass sich der Einfluss der nicht gleichmäßigen Vorbelastung bemerkbar macht (Abschnitt 4.4.2.2).

Bei größeren Auflasten kann hingegen kein Stützgerüst ausgebildet werden. Daher weisen die Versuche mit folienförmigem Kunststoff als Zusatzstoff bei größeren Auflasten, trotz des wesentlich höheren Steifemoduls des PE-LD gegenüber dem Gummi (Kap. 3.2), einen kleineren Steifemodul auf als bei dem Zusatz von Gummi (Tab. 4.2-4 und Abb. 4.2-2). Der Steifemodul ist bei der Zugabe von folienförmigem Kunststoff sogar geringer als der des Grundmaterials R (Tab. 4.2-4). Der geringere Steifemodul ist durch die, gegenüber quaderförmigem Kunststoff sowie gegenüber Boden, andere Stückform bedingt. Er resultiert aus der Möglichkeit der folienförmigen Bestandteile, aufgrund der geringeren Dicke leichter verformt zu werden und sich damit den Verformungen des Gesamtsystems besser anzupassen (Kap. 3.1.1).

Tab. 4.2-4: Steifemoduli der Versuche mit weichen Kunststoffen sowie zum Vergleich des Grundmaterials R

| Zusatzstoff | Versuchsnummer | Massenanteil des Zusatzstoffes [Gew.-% TS] | Steifemodul [kN/m ²] | | |
|----------------------------------|----------------|---|--|--|---|
| | | | 1. Laststufe [250 kN/m ²] | 2. Laststufe [500 kN/m ²] | 3. Laststufe [1000 kN/m ²] |
| Keiner | Mittelwert | --- | 1676 | 4095 | 7143 |
| Quaderförmiger Kunststoff | V8_1 | 20 | 1432 | 3772 | 8407 |
| | V8_2 | 20 | 1795 | 3967 | 7388 |
| Folienförmiger Kunststoff | V24_1 | 4 | 1387 | 3939 | 7324 |
| | V24_2 | 4 | 1487 | 3048 | 6100 |
| | V24_3 | 5 | 1313 | 4308 | 6097 |

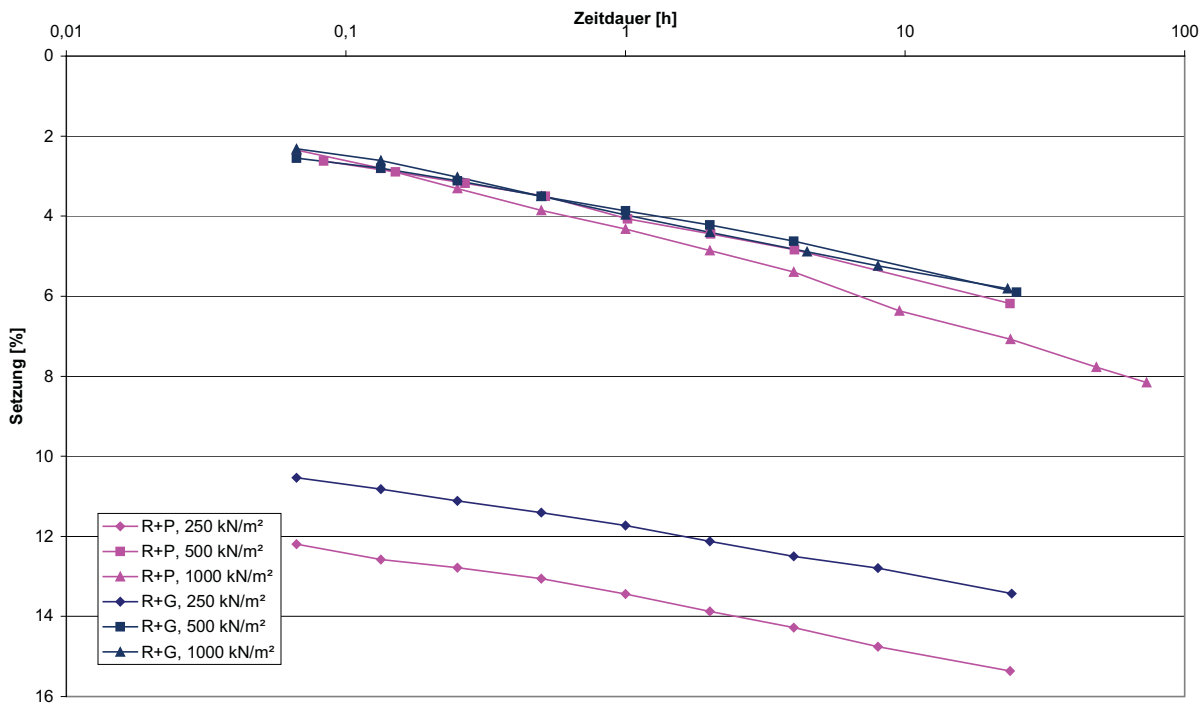


Abb. 4.2-2: Zeit-Setzungsverläufe der Versuche mit den quaderförmigen (R+G) und folienförmigen (R+P) Zusätzen
Die Setzungen sind jeweils auf die Anfangshöhe zu Beginn der jeweiligen Laststufe bezogen.

- Vergleich aller Versuchsergebnisse mit Erhöhung einzelner Stoffgruppen

Bei einem Vergleich aller Versuche mit dem Grundmaterial R und dem Grundmaterial R mit Zusätzen kann festgestellt werden, dass der Steifemodul eine deutliche Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Abfalls besitzt. Dabei wird der relative Unterschied der Steifemoduli mit steigender Auflast geringer. So verringert sich der Variationskoeffizient aller Versuche mit dem Grundmaterial R und dem Grundmaterial R mit Zusätzen von der ersten Laststufe von 0,427 zur zweiten Laststufe auf 0,249 bis zur dritten Laststufe auf 0,192. Wegen des höheren Mittelwertes in der dritten Laststufe ergibt sich jedoch eine deutliche Vergrößerung der Standardabweichung des Steifemoduls von 911 kN/m² auf 1136 kN/m² bzw. 1370 kN/m² von der ersten auf die zweite bzw. dritte Laststufe. Die Spannweite des Steifemoduls geht bei der dritten Laststufe von 4031 kN/m² bis 9057 kN/m². Der Mittelwert beträgt 6670 kN/m². Aus diesem Grund kann nicht, wie die - bezogen auf die Materialinhomogenität - geringen Variationskoeffizienten der zweiten und dritten Laststufe suggerieren, von einer „Gleichheit“ der Setzungseigenschaften der in dieser Arbeit untersuchten Abfälle ausgegangen werden. Diese Ergebnisse widersprechen den in der GDA-Empfehlung E 2-24 zugrundeliegenden Annahmen, dass sich der Steifemodul für alle Abfälle nach einer festen Formel, die keinen Bezug zu der Abfallzusammensetzung besitzt, berechnen lässt.

Der Widerspruch ist auf die unterschiedlichen Randbedingungen in den Versuchen zurückzuführen. Bei den Versuchen, die zu der GDA-Empfehlung E 2-24 geführt haben, wurden hauptsächlich Abfälle aus Bohrungen, d. h. bereits abgelagerte Abfälle mit einem reduzierten organischen Anteil und einer schon teilweise stattgefundenen Materialdichteerhöhung, untersucht (DGGT (1999)). Weiterhin wurden die Abfälle mit einer relativ geringen Trockendichte von ca. $0,7 \text{ t/m}^3$ in die Ödometer eingebaut und nur mit einer maximalen Spannung von 650 kN/m^2 belastet (DGGT (1999)). Diese Randbedingungen führen dazu, dass ein relativ großes Luftporenvolumen zu Versuchsbeginn vorhanden ist, dessen Verringerung während des Setzungsprozesses andere Einflussgrößen überdecken kann. Zudem hat ein Teil der Materialdichteerhöhung bereits während des Einbaus und der Ablagerung auf der Deponie stattgefunden. Aufgrund der gegenüber den Versuchen dieser Arbeit geringeren maximalen Auflast konnte der zweite Schritt der nicht-volumenkonstanten Verformung (Strukturbruch, Kap. 4.1), der bei hohen Auflasten erfolgt, nicht beobachtet werden.

Die Ähnlichkeit der Steifemoduli scheint auch bei den in dieser Arbeit untersuchten unterschiedlichen Abfallzusammensetzungen (Grundmaterial und Zusätze) für geringe Auflasten ($< 500 \text{ kN/m}^2$) zu gelten. Die Ausnahme bildet hierbei ein erhöhter Anteil an Organik, durch den der Steifemodul deutlich reduziert wird. Bei hohen Auflasten variieren die Steifemoduli hingegen deutlich abhängig von der Abfallzusammensetzung.

Für alle Abfälle, die noch keine nicht-volumenkonstante Verformung der Einzelstücke erfahren haben, sowie bei hohen Deponien mit daraus resultierenden großen Auflasten ist es daher, basierend auf den hier dargestellten Ergebnissen, erforderlich, die Kennwerte für eine Setzungsprognose von Deponien in Einzelfalluntersuchungen zu ermitteln und nicht über die in der GDA-Empfehlung E 2-24 angegebene Formel abzuschätzen.

4.3. Versuchstechnischer Nachweis der nicht-ausschließlichen Anwendbarkeit der Konsolidationstheorie zur Erklärung des Setzungsverhaltens von Abfallkörpern

In den Kapiteln 2.1 und 2.2 wurden bereits theoretische Überlegungen angestellt, warum das Setzungsverhalten von Abfallkörpern nicht ausschließlich mit der Konsolidationstheorie erklärt werden kann. In den Kapiteln 4.1 und 4.2 wurden einige Effekte, die bei der Setzung von Abfallkörpern, jedoch nicht bei Böden, auftreten, nachgewiesen. In diesem Kapitel soll anhand von Ödometerversuchen gezeigt werden, dass das Setzungsverhalten von Abfallkörpern nicht unter alleiniger Verwendung der Konsolidationstheorie beschrieben werden kann. Dazu wurden Druck-Setzungsversuche in den Ödometern $\varnothing 23 \text{ cm}$ durchgeführt. Dem

Grundmaterial wurden bei den Versuchen jeweils 20 % sowie 40 % Sand oder Ton zugegeben.

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Grundmaterials wurde durch die Zugabe von Ton verringert und durch die Zugabe von Sand erhöht (Tab. 4.3-1).

Sie befindet sich für das Grundmaterial und die Gemenge in einem Bereich, in dem sich auch die gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten von bindigen Böden, deren Setzungsverhalten normalerweise in Ödometern untersucht wird, befinden. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit von Schluff beträgt überwiegend 10^{-7} bis 10^{-9} m/s mit einer Spannweite bis 10^{-5} m/s und für Ton überwiegend 10^{-8} bis $< 10^{-10}$ m/s (SCHULZE/MUHS (1967)). Bei der Zugabe von 40 Gew.-% Sand befindet sich der Wert der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit im Bereich rolliger Böden (Tab. 4.3-1).

Tab. 4.3-1: Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Materialien R, R+S (20% und 40%) und R+T (20% und 40%)

| Material | R | R+S (20%) | R+S (40%) | R+T (20%) | R+T (40%) |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| k [m/s] | $2,5 \cdot 10^{-8}$ | $6,8 \cdot 10^{-7}$ | $2,6 \cdot 10^{-4}$ | $4,9 \cdot 10^{-9}$ | $< 10^{-9}$ * |

*: wurde nicht bestimmt, da geringere hydraulische Leitfähigkeiten als $1 \cdot 10^{-9}$ m/s nur mit großen Unsicherheiten bestimmt werden können. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit dürfte jedoch geringer als bei R+T (20%) sein.

Das zeitliche Setzungsverhalten der einzelnen Materialien müsste sich bei Anwendung der Konsolidationstheorie deutlich unterscheiden. In Abb. 4.3-1 ist exemplarisch der Zeit-Setzungsverlauf für die Zugabe von 20% Sand und 20% Ton dargestellt. Der Zeitsetzungsverlauf ist dabei ähnlich. Die weitere Erhöhung des Tonanteils, wodurch die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit weiter reduziert werden dürfte, führt ebenfalls zu keinem signifikant unterschiedlichen Zeit-Setzungsverlauf (siehe Anlage V 22). Ein deutlicher Einfluss der unterschiedlichen hydraulischen Leitfähigkeiten ist nicht vorhanden.

Die dargestellten Kurvenverläufe weisen weiterhin in der semi-logarithmischen Darstellung nicht den typischen S-förmigen Verlauf der Zeit-Setzungskurven auf, der bei der Verwendung der Konsolidationstheorie zu erwarten ist.

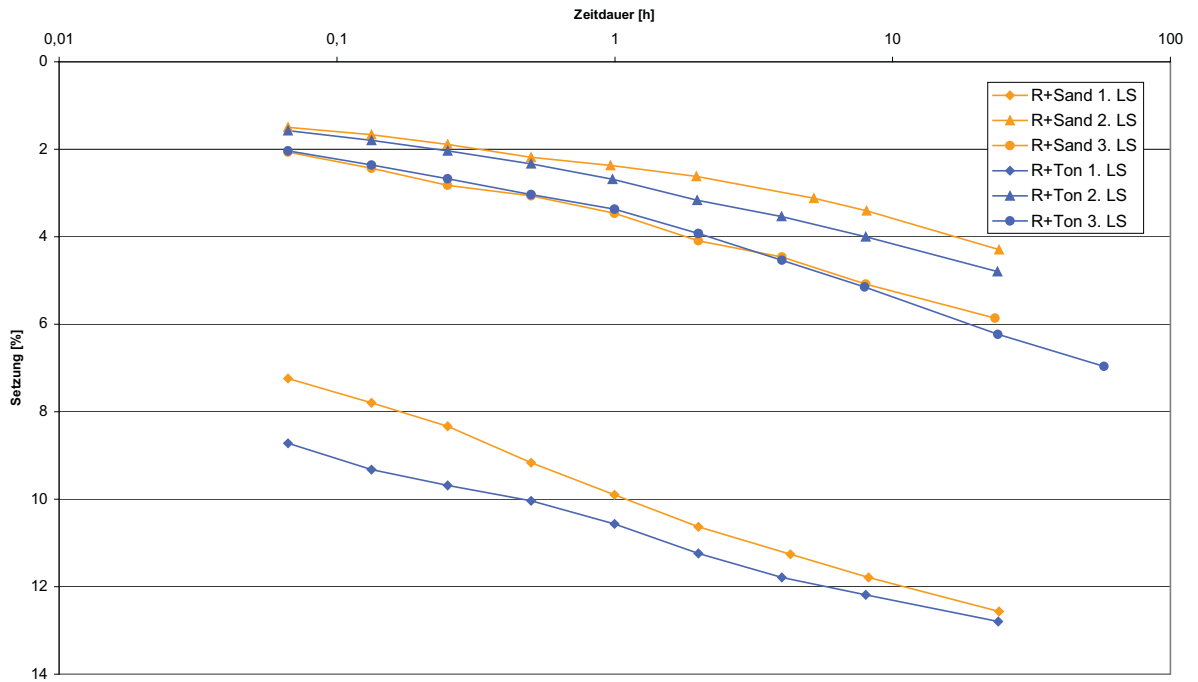


Abb. 4.3-1: Zeit-Setzungsverlauf in den Ödometern \varnothing 23 cm, Materialien: R+S (V17) und R+T (V18), 1. LS: 250 kN/m²; 2. LS: 500 kN/m²; 3. LS: 1000 kN/m². Die Setzungen sind jeweils auf die Anfangshöhe zu Beginn der jeweiligen Laststufe bezogen

Zudem ist das Setzungsvolumen der Abfallkörper größer als das beim Einbau der Probe in die Ödometer vorhandene Luft- und Wasservolumen. Ein maßgeblicher Effekt bei der Setzung von Abfallkörpern ist dabei die nicht-volumenkonstante Verformung der Einzelstücke (Kap. 4.1). Das durch die nicht-volumenkonstante Verformung von Einzelstücken freigesetzte Luftporenvolumen nimmt an dem Setzungsprozess teil, so dass sich das Setzungsverhalten unter anderem aus einer Kombination von Freisetzung verschlossenen Luftporenvolumens, der Konsolidation sowie der Verringerung des Luftporenvolumens ergibt. In welchem Maße das freigesetzte Luftporenvolumen, z. B. aufgrund der zum Teil hydrophoben Eigenschaften einiger Abfallbestandteile, vollständig mit Wasser gefüllt oder ausgepresst wird, kann an dieser Stelle nicht abschließend bestimmt werden. Es lässt sich dennoch feststellen, dass bei den meisten Versuchen auch bei Versuchsende noch ein Luftporenvolumen vorhanden ist (Kap. 4.1), sofern für die Berechnung die Materialdichten eingesetzt werden, die sich zu Versuchsbeginn für die Materialien bei der Bestimmung im Kapillarpiknometer ergeben (z. B. 2,43 t/m³ für das Grundmaterial R). Während des Setzungsverlaufes tritt eine ungleichmäßige Freisetzung von verschlossenen Luftporen auf, die dazu führt, dass zum Zeitpunkt der Freisetzung wasserungesättigte Verhältnisse im Abfallkörper vorliegen. Ob während des

Setzungsverlaufes überhaupt wassergesättigte Verhältnisse auftreten, kann anhand der Versuchsergebnisse nicht bestimmt werden.

Bei dem Gemenge des Grundmaterials R mit einem 40-prozentigen Sand-Zusatz dürfte wegen der hohen hydraulischen Leitfähigkeit keine Konsolidation gemäß der Theorie von Terzaghi, d. h. kein zeitabhängiger Setzungsverlauf, auftreten. Die Zeit-Setzungskurve (Abb. 4.3-2) weist jedoch auch für dieses Material einen ausgeprägten zeitabhängigen Setzungsverlauf auf. Dabei ist zu beachten, dass der Anteil an „bodenähnlichen Komponenten“ sehr hoch ist. Das Grundmaterial R besitzt einen Siliziumdioxid-Anteil von ca. 40 Gew.-%. Durch die Zugabe des Sandes erhöht sich dieser Anteil auf ca. 64 Gew.-%. Der Anteil des „nicht-bodenähnlichen“ Abfalls beträgt daher nur noch ca. 36 Gew.-%. Die in der Bodenmatrix eingelagerten Elemente, wie z. B. Metalle, werden dabei nicht berücksichtigt, so dass der „Bodenanteil“ noch etwas größer ist. Dies bedeutet, dass selbst geringe Anteile nicht-bodenähnlicher Komponenten im Abfall zu - gegenüber den üblicherweise in der Bodenmechanik verwendeten Ansätzen zur Erklärung des Setzungsverhaltens - deutlichen Veränderungen führen.

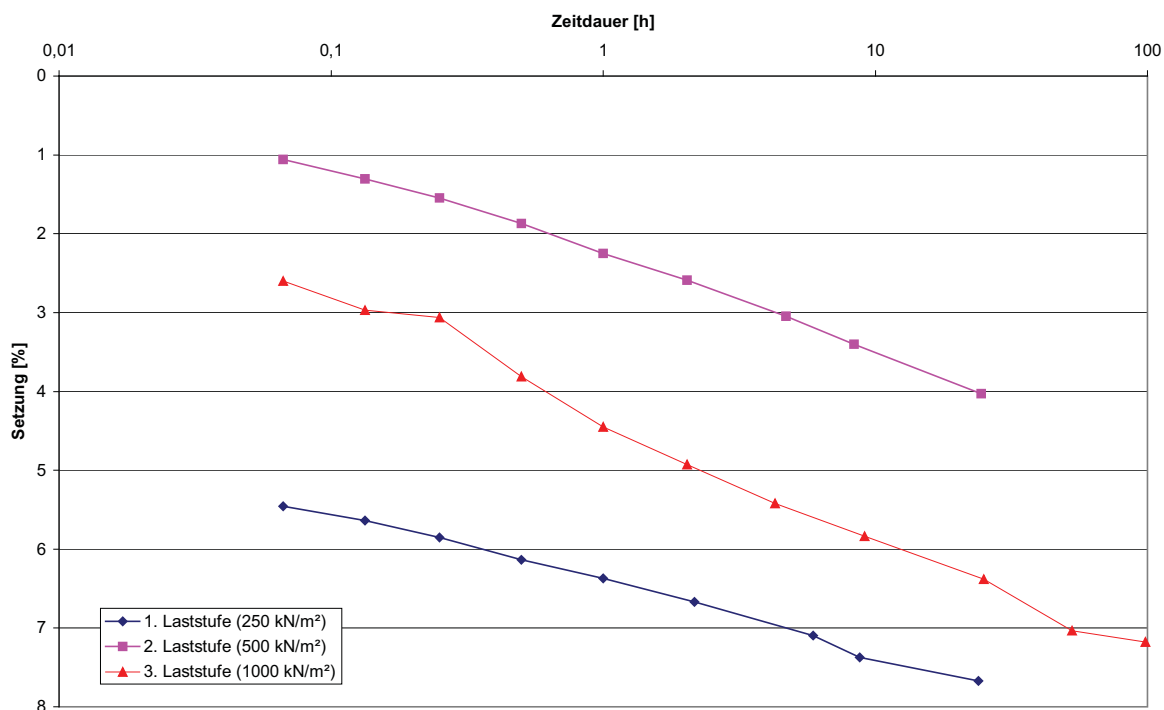


Abb. 4.3-2: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V21_2 (R+S (40 %)) im Ödometern Ø 23 cm, Die Setzungen sind jeweils auf die Anfangshöhe zu Beginn der jeweiligen Laststufe bezogen

Die Gesamtsetzung eines Abfallkörpers ergibt sich daher nicht ausschließlich durch die Porenraumverringerung infolge von Kornumlagerung und die Konsolidation sondern wird weiterhin maßgeblich durch die nicht-volumenkonstante Verformung der festen Bestandteile, die mit einer Materialdichteerhöhung und einer Freisetzung verschlossenen Luftporenvolumens einhergeht, sowie weiterer Effekte, die im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht wurden, bestimmt. Die nicht-bodenähnlichen Effekte sind so groß, dass sich das Setzungsverhalten von Abfallkörpern nicht mit der Konsolidationstheorie beschreiben lässt.

4.4. Einfluss der Größenverhältnisse zwischen maximaler Stückgröße und Geräteabmessung auf die Ergebnisse im Ödometerversuch

4.4.1. Allgemeines

Die für die Untersuchung des Setzungsverhaltens von Böden einzusetzenden Geräte sind in der DIN 18135 (Entwurf) in ihrer Funktionsweise und ihren Abmessungen bzw. Größenverhältnissen beschrieben. Für die Untersuchung von Abfällen ist hingegen bisher unklar, welchen Einfluss die unterschiedlichen Probenabmessungen und Größenverhältnisse auf die Ergebnisse besitzen. Die Probenabmessung ergibt sich dabei aus dem Durchmesser des verwendeten Ödometers, der für jeden Ödomertyp (hier: \varnothing 10, 23 und 60 cm) konstant ist, und der Höhe der eingebauten Probe, die in den Ödometern \varnothing 23 cm und 60 cm variiert werden kann.

Die in der Bodenmechanik angewendeten Größenverhältnisse können dabei aufgrund der in Kap. 2.2 erläuterten Eigenschaften von Siedlungsabfällen, wie z. B. der Form der Stücke und deren Verformbarkeit, nicht auf den Abfall übertragen werden.

In dieser Arbeit wurden erstmals Versuche durchgeführt, um den Einfluss der Größenverhältnisse zwischen der maximalen Stückgröße des Abfalls und den Probenabmessungen auf die Versuchsergebnisse zu ermitteln.

Diese Versuche wurden in vier voneinander getrennte Versuchsreihen eingeteilt (Kap. 3.4, Abb. 3.4-2). Die Randbedingungen der Versuchsreihen waren dabei wie folgt:

1. Versuchsreihe:
 - Konstant: Probendurchmesser und Maximalstückgröße (Ödometer \varnothing 23 cm, Grundmaterial R)
 - Variabel: Probenhöhe
2. Versuchsreihe:
 - Konstant: Probendurchmesser und Probenhöhe (Ödometer \varnothing 23 cm, Probenhöhe 12 cm)
 - Variabel: Maximalstückgröße (Grundmaterial R und NW)

-
3. Versuchsreihe:
Konstant: Probendurchmesser und Probenhöhe (Ödometer \varnothing 10 cm, Probenhöhe 2 cm)
Variabel: Grundmaterial (R, NW_ges und NW_gem)
4. Versuchsreihe:
Konstant: Probendurchmesser und Probenhöhe (Ödometer \varnothing 60 cm, Probenhöhe 50 cm)
Variabel: Maximalstückgröße (Grundmaterial R und NW)

Die Ergebnisse werden im Folgenden anhand der Einteilung in die Versuchsreihen diskutiert. Bei der Wahl der Versuchsgeräte bzw. der geeigneten Probenabmessungen ist es entscheidend, dass die Versuchsergebnisse reproduzierbar sind und eine Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf In-Situ-Bedingungen möglich ist. Daher wird zuerst für jede Probenabmessung die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse geprüft und anschließend werden die Absolutwerte der Versuchsergebnisse bei verschiedenen Probenabmessungen einander gegenübergestellt. Abschließend werden die Ergebnisse zusammenfassend betrachtet.

4.4.2. Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

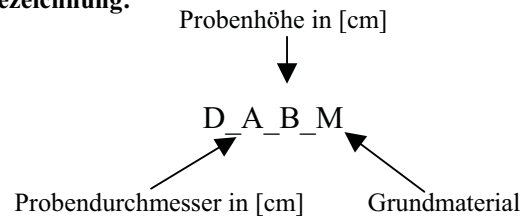
4.4.2.1. Allgemeines

Jede Untersuchung wurde mit mindestens mit einer Doppelbestimmung durchgeführt. Aufgrund der Aufgabenstellungen war es für einige Materialien bzw. Größenverhältnisse erforderlich, mehrere Parallelen zu untersuchen. So wurde z. B. das Grundmaterial R im Ödometer \varnothing 23 cm mit einer Probenhöhe von 12 cm in acht Versuchen untersucht, da diese Versuche ebenfalls für die Ermittlung der nicht-volumenkonstanten Verformung (Kap. 4.1) sowie zur Bestimmung des Einflusses des biologischen Abbaus während der Probenlagerung erforderlich waren.

Für jede Laststufe wurde die auf die Ausgangshöhe zu Beginn der Laststufe bezogene Setzung nach 24 Stunden und der Zeit-Setzungsverlauf verglichen. Zur Gegenüberstellung der einzelnen Versuchsergebnisse wurden übliche statistische Verfahren angewendet. In Tab. 4.4-1 sind der Variationskoeffizient, d. h. die auf den Mittelwert bezogene Standardabweichung, und der relative Variationskoeffizient, d. h. der auf den maximal möglichen Variationskoeffizienten bezogene Variationskoeffizient dargestellt. Anhand dieser statistischen Parameter lässt sich beurteilen, wie groß die Streuung der Messwerte und damit die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse ist.

Tab. 4.4-1: Variationskoeffizient und relativer Variationskoeffizient für jede Probenabmessung und jedes Grundmaterial

Bezeichnung:



| | Laststufe | Vertikale Spannung | Variationskoeffizient | relativer V.-koeffizient | Verhältnisse | | |
|------------------------|-----------|--------------------|-----------------------|--------------------------|--------------|----------------------|-------|
| | | | | | [-] | [kN/m ²] | [-] |
| D_23 H18_R | 1. LS | 250 | 0,0286 | 2,02 | 1,28 | 28,75 | 22,50 |
| | 2. LS | 500 | 0,0674 | 4,76 | | | |
| | 3. LS | 1000 | 0,0036 | 0,25 | | | |
| D_23 H12_R | 1. LS | 250 | 0,1258 | 4,45 | 1,92 | 28,75 | 15,00 |
| | 2. LS | 500 | 0,0448 | 1,69 | | | |
| | 3. LS | 1000 | 0,0346 | 1,41 | | | |
| D_23 H6_R | 1. LS | 250 | 0,0925 | 6,54 | 3,83 | 28,75 | 7,50 |
| | 2. LS | 500 | 0,0511 | 3,61 | | | |
| | 3. LS | 1000 | 0,0627 | 4,43 | | | |
| D_23 H3_R | 1. LS | 250 | 0,0769 | 4,44 | 7,67 | 28,75 | 3,75 |
| | 2. LS | 500 | 0,1808 | 10,44 | | | |
| | 3. LS | 1000 | 0,0781 | 4,51 | | | |
| D_10_R | 1. LS | 200 | 0,0373 | 2,16 | 5,00 | 2,50 | 2,50 |
| | 2. LS | 400 | 0,0084 | 0,48 | | | |
| | 3. LS | 800 | 0,0178 | 1,03 | | | |
| D_23 H12_NW | 1. LS | 250 | 0,1830 | 10,57 | 1,92 | 5,75 | 3,00 |
| | 2. LS | 500 | 0,1600 | 9,24 | | | |
| | 3. LS | 1000 | 0,1644 | 9,49 | | | |
| D_23 H6_NW | 1. LS | 250 | 0,0526 | 3,72 | 3,83 | 5,75 | 1,50 |
| | 2. LS | 500 | 0,1146 | 8,10 | | | |
| | 3. LS | 1000 | 0,0752 | 5,32 | | | |
| D_23 H12_NW_gem | 1. LS | 250 | 0,1497 | 8,64 | 1,92 | 28,75 | 15,00 |
| | 2. LS | 500 | 0,0310 | 1,79 | | | |
| | 3. LS | 1000 | 0,0419 | 2,42 | | | |

Tab. 4.4.1 (Fortsetzung): Variationskoeffizient und relativer Variationskoeffizient für jede Probenabmessung und jedes Grundmaterial

| | Laststufe | Vertikale Spannung | Variationskoeffizient | relativer V.-koeffizient | Verhältnisse | | |
|-----------------|-----------|--------------------|-----------------------|--------------------------|--------------|----------------------|------------------|
| | | | | | [-] | [kN/m ²] | [-] |
| D_23 H12_NW_ges | 1. LS | 250 | 0,0038 | 0,27 | 1,92 | 28,75 | 15,00 |
| | 2. LS | 500 | 0,0011 | 0,08 | | | |
| | 3. LS | 1000 | 0,0289 | 2,04 | | | |
| D_10_NW_gem* | 1. LS | 200 | 0,1599 | 11,31 | 5,00 | 2,50 | 2,50 |
| | 2. LS | 400 | 0,1333 | 6,66 | | | |
| | 3. LS | 800 | 0,0962 | 4,81 | | | |
| D_10_NW_ges | 1. LS | 200 | 0,0018 | 0,13 | 5,00 | 5,0 bzw. 2,5 | 5 bzw. 2,5 |
| | 2. LS | 400 | 0,0129 | 0,91 | | | |
| | 3. LS | 800 | 0,0228 | 1,61 | | | |
| D_120 S** | 3. LS | 1000 | 0,1350 | 9,56 | 1,50 | 10,00 | 6,67 |

D: Durchmesser der Probe im Ödometer

H: Höhe der Probe im Ödometer

D_s: Maximaler Durchmesser eines Bestandteiles (Stückgröße)

4.4.2.2. Versuchsreihe 1 und 2

Bei fast allen durchgeführten Versuchen in den Ödometern \varnothing 23 cm wies die Setzung nach der ersten Laststufe (250 kN/m²) größere Abweichungen vom Mittelwert auf als bei den höheren Laststufen (500 und 1000 kN/m²) (Tab. 4.4-1). Dabei unterscheiden sich, wie in Abb. 4.4-1 exemplarisch für den Versuch V29 dargestellt, in den meisten Fällen maßgeblich die „Sofortsetzungen“. In einigen wenigen Fällen unterscheiden sich zusätzlich noch die Zeit-Setzungsverläufe der „Primärsetzung“ in den Parallelversuchen.

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der ersten Laststufe wird durch zwei verschiedene Faktoren beeinflusst. Der erste Faktor ist bedingt durch das eingesetzte Material und die Einbaufehler. Die Inhomogenität des Materials Abfall ist - aufgrund der Zusammensetzung aus vielen verschiedenen Stoffgruppen und Stückformen - größer als bei bindigen Böden. Es kann deshalb z. B. aufgrund von (lokalen) Wassergehaltsschwankungen und Änderungen des mechanischen Verhaltens bzw. der Zusammensetzung, zu größeren Abweichungen kommen als dies bei Ödometerversuchen mit bindigen Böden erwartet wird. Der zweite Teil des unterschiedlichen Setzungsverlaufes in der ersten Laststufe ist gerätetechnischer Herkunft. Aufgrund der Konstruktion der Belastungseinrichtung mit zwischengeschalteten Druckspeichern, die notwendig sind, um die Auflast während der Dauer einer Laststufe konstant zu halten (s. Abschnitt 3.3.4.2), kann keine definierte Vorbelastung aufgebracht werden. Es kann

deshalb in den Teilversuchen zu unterschiedlichen Vorbelastungen und damit verbundenen Setzungen kommen. Diese wirken sich dann auf das Setzungsverhalten während der ersten Laststufe aus.

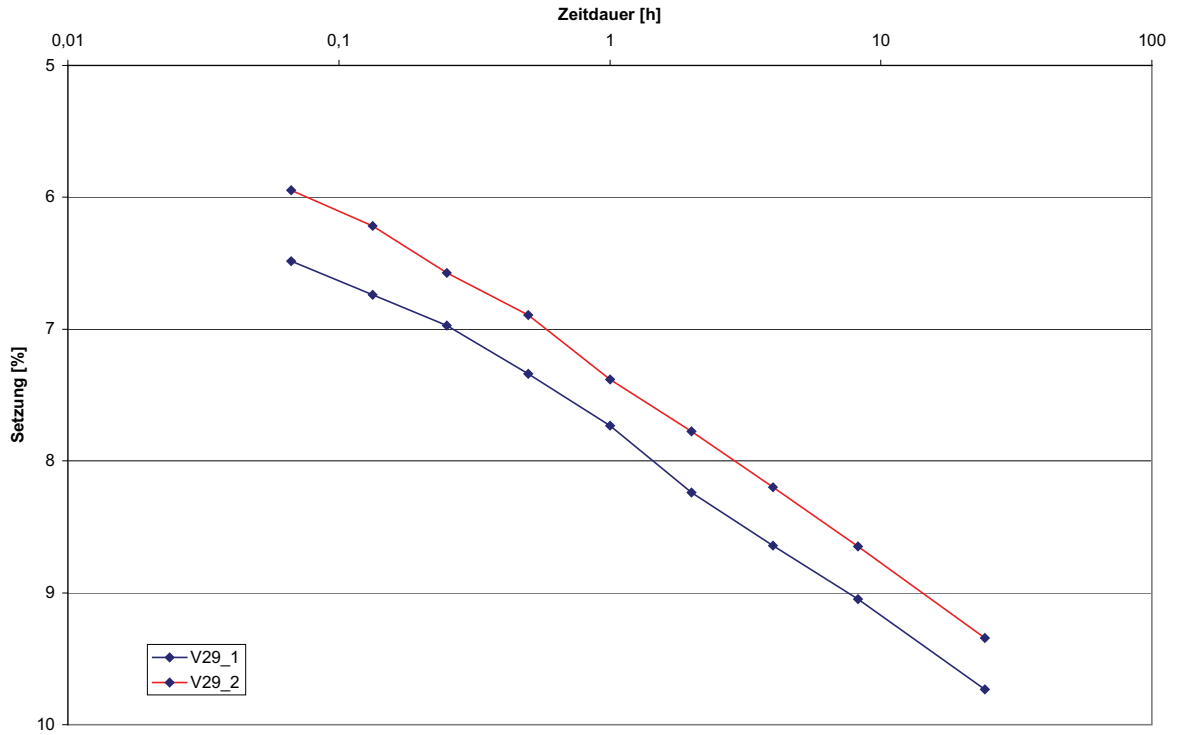


Abb. 4.4-1: Zeit-Setzungsverlauf der ersten Laststufe der Parallelversuche V29_1 und V29_2 (H = 18 cm); Die Setzungen sind jeweils auf die Anfangshöhe zu Beginn der jeweiligen Laststufe bezogen

Die Steifemoduli des Grundmaterials R weisen bei der Ermittlung in den Ödometern $\varnothing 23$ cm unabhängig von der Höhe einen geringen Variationskoeffizienten und damit eine gute Reproduzierbarkeit auf. Der Variationskoeffizient ist für alle Versuche und Laststufen kleiner als 0,18 und für die zweite und dritte Laststufe in der Regel kleiner als 0,08. Bei Untersuchungen an bindigen Böden ist der Variationskoeffizient nicht grundsätzlich kleiner sondern kann sogar größere Werte annehmen (ZIEHMANN (1994)). Trotz der guten Reproduzierbarkeit ist festzustellen, dass, mit Ausnahme der 2. Laststufe mit 18 cm Probenhöhe und der 1. Laststufe mit 3 cm Probenhöhe, tendenziell die Abweichungen der Einzelergebnisse mit steigender Probenhöhe geringer werden. Die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse erhöht sich daher mit steigender Probenhöhe.

Eine gegenläufige Tendenz, d. h. eine bessere Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei Verringerung des Verhältnisses zwischen Geräteabmessung und maximaler Stückgröße, weisen die Versuche mit geringer Probenhöhe auf. Dies ist z. B. bei dem Grundmaterial NW

bei einer Probenhöhe von 6 cm gegenüber einer Probenhöhe von 12 cm sowie bei dem Grundmaterial R mit einer Probenhöhe von 3 cm gegenüber den anderen Probenhöhen zu beobachten (Tab. 4.4-1). Diese Tendenz spiegelt sich auch bei den Versuchen im Ödometer \varnothing 10 cm mit einer Probenhöhe von 2 cm, sowohl für das aufbereitete Grundmaterial NW als auch für das Grundmaterial R, wider. Die gute Reproduzierbarkeit ist dabei vermutlich auf die Ausbildung von Stützgerüsten zurückzuführen, wodurch bei geringem Größenverhältnis zwischen Probenhöhe und maximaler Stückgröße die Auflast nach einem geringen Verformungsweg über wenige feste Bestandteile direkt in die Bodenplatte des Versuchsgerätes abgeleitet werden kann (Abb. 4.4-2). Es entsteht daher eine gute Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse. Die Ergebnisse lassen sich aber nicht auf In-Situ-Verhältnisse übertragen, da solche Größenverhältnisse dort nicht vorkommen. Setzungsuntersuchungen an Abfallkörpern sollten daher mit einem Mindestverhältnis zwischen Probenhöhe und maximaler Stückgröße von 4 durchgeführt werden.

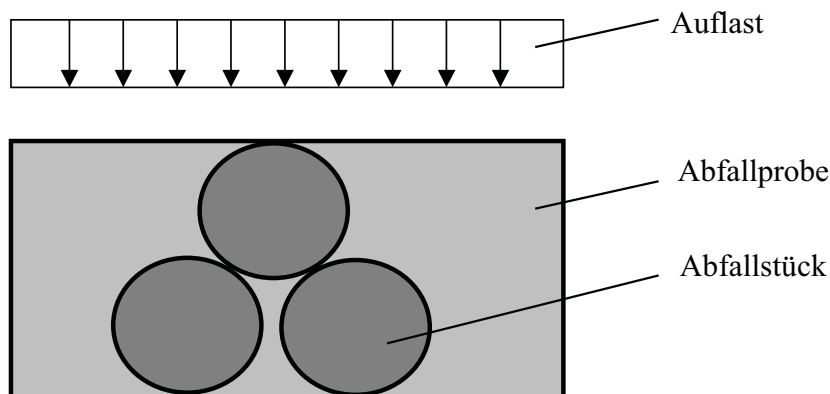


Abb. 4.4-2: Stützgerüsteffekt bei geringen Größenverhältnissen zwischen Probenhöhe und maximaler Stückgröße des Abfallstückes

Das Grundmaterial NW weist bei gleicher Probenhöhe größere Schwankungen auf als das Grundmaterial R. Die Tendenz der besseren Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse bei einem größeren Verhältnis zwischen Probenhöhe und Maximalstückgröße wird damit bestätigt. Wird das Grundmaterial NW auf die gleiche Maximalstückgröße wie das Grundmaterial R gemahlen (mehrere Durchgänge in einer Hammermühle) oder gesiebt, so verringert sich die Streuung der Einzelwerte auf ähnliche Werte wie bei dem Grundmaterial R.

Die Tendenz der besseren Reproduzierbarkeit von Parallelversuchen mit größerem Verhältnis von Probenhöhe zu Maximalstückgröße zeigt sich auch bei Versuchen an einem anderen

mechanisch-biologisch behandelten Abfall, der außerhalb dieser Arbeit untersucht worden ist (MÜNNICH und ZIEHMANN (2000)). Das Material wurde nach einer zweistufigen aeroben biologischen Behandlung auf eine Maximalstückgröße von 30 mm gesiebt. Das Größenverhältnis zwischen Probenhöhe und Maximalstückgröße (H/D_s) beträgt 4. In diesem Falle ergaben sich in den Versuchen in den Ödometern \varnothing 23 cm bei einer Probenhöhe von 12 cm geringere Streuungen als bei dem Grundmaterial NW mit einem Größenverhältnis von 3 und größere Streuungen als bei den Versuchen mit den Grundmaterialien R und NW < 8 mm, die ein Größenverhältnis von 15 aufweisen.

4.4.2.3. Versuchsreihe 3

In den Ödometern \varnothing 10 cm mit einer Probenhöhe von 20 mm wurde das Grundmaterial NW mit einer Maximalstückgröße von 40 mm nicht untersucht, da sich die großen Bestandteile nicht in das Ödometer einbauen lassen. Es wurden hier nur die gemahlene Materialien mit einer Maximalstückgröße von 8 mm und die gesiebten Proben mit einer Maximalstückgröße von 4 und 8 mm sowie das Grundmaterial R betrachtet.

Die Ergebnisse der Versuchsansätze mit dem Grundmaterial R sowie mit dem gesiebten Grundmaterial NW erwiesen sich dabei als gut reproduzierbar (Tab. 4.4-1). Die Abweichungen waren geringer als bei den Versuchen in den Ödometern \varnothing 23 cm, wobei dies wiederum durch das geringe Verhältnis zwischen Probenhöhe und maximaler Stückgröße bedingt ist und somit die Übertragbarkeit auf In-Situ-Verhältnisse nicht gegeben ist (Abschnitt 4.4.2.2). Für das gesiebte Material < 4 mm lassen sich die Ergebnisse sogar in einem Ödometer \varnothing 7 cm mit einer Probenhöhe von 1,4 cm reproduzieren, da hier ähnliche Größenverhältnisse zwischen Probenhöhe und Maximalstückgröße vorliegen wie im Ödometer \varnothing 10 cm bei einer Maximalstückgröße von 8 mm. Für das gemahlene Grundmaterial NW waren die Abweichungen hingegen deutlich größer. Dabei ist zu beachten, dass in der ersten Laststufe des Versuches D_10_NW_gem ein falscher Bezugswert in die Auswertung übertragen wurde, so dass diese Laststufe nicht betrachtet werden darf.

4.4.2.4. Versuchsreihe 4

Eine Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse in den Ödometern \varnothing 60 cm ist nicht möglich, da aufgrund der großen Einbaumasse von ca. 200 kg je Ödometer und der nur beschränkten Verfügbarkeit der Grundmaterialien nur jeweils ein Versuch je Grundmaterial durchgeführt werden konnte.

Um einen Anhaltspunkt zur Bewertung der Reproduzierbarkeit von Großödometerversuchen zu erhalten, wurden die statistischen Kenngrößen für die von COLLINS und RAMKE (1986) publizierten Ergebnisse aus Parallelversuchen im Ödometer \varnothing 120 cm berechnet. Die Abweichungen sind für die untersuchten mechanisch-biologisch behandelten Abfälle in der dritten Laststufe (1000 kN/m²) deutlich größer als bei den in dieser Arbeit untersuchten Abfällen in den Ödometern \varnothing 23 cm (Tab. 4.4-1). Dies deutet darauf hin, dass die Reproduzierbarkeit ab einem bestimmten Größenverhältnis nicht signifikant weiter gesteigert werden kann.

Da der von COLLINS und RAMKE (1986) eingesetzte Abfall sich rückwirkend jedoch nur eingeschränkt beurteilen lässt, können die Unterschiede der Ergebnisse auch auf größere Materialinhomogenitäten oder einen Einfluss des biologischen Abbaus der organischen Substanz während der sehr langen Versuchsdurchführung zurückzuführen sein. Aufgrund der geringen Abweichungen in den Ödometerversuchen \varnothing 23 cm ist jedoch für das Grundmaterial R nicht zu erwarten, dass sich bei der Verwendung größerer Ödometertypen geringere Streuungen ergeben. Für das Grundmaterial NW ist dies hingegen denkbar, aber ebenfalls eher unwahrscheinlich.

4.4.3. Einfluss auf die absoluten Ergebnisse

4.4.3.1. Allgemeines

Die Einflüsse auf die absoluten Ergebnisse sollen anhand der Versuche mit dem Grundmaterial R dargestellt werden, da sich das Grundmaterial NW in den Ödometern \varnothing 10 cm nur in aufbereiteter Form einsetzen ließ. Die Tendenz, die anhand des Grundmaterials R für den Vergleich der Ergebnisse in den Ödometertypen \varnothing 23 cm und 60 cm beschrieben wird, ist ebenfalls in den Versuchen mit dem Grundmaterial NW zu beobachten.

4.4.3.2. Versuchsreihe 1

In der ersten Versuchsreihe wurde der Einfluss der Probenhöhe bei gleichbleibendem Probendurchmesser auf die Ergebnisse der Ödometerversuche untersucht.

Die Versuchsergebnisse schwanken sehr deutlich. Die auf die Ausgangshöhe der jeweiligen Laststufe bezogene Setzung der Einzelergebnisse weicht um mehr als 100 % des minimalen Wertes voneinander ab (Abb. 4.4-3). Der Variationskoeffizient beträgt ca. 25 % für die ersten beiden Laststufen und 13 % für die dritte Laststufe. Dabei sind die auf die Ausgangshöhe bei der jeweiligen Laststufe bezogenen Setzungen jeweils über der mittleren Spannung des Spannungsintervalls aufgetragen. Die unterschiedlichen Spannungen der einzelnen Laststufen

resultieren aus dem verschiedenen großen Anteil der Wandreibung, da die Wandreibung bei gleicher horizontaler Spannung linear abhängig von der Probenhöhe ist (Gleichung 4.4-1).

Gleichung 4.4-1

$$F_y = A_w \cdot \sigma_x \cdot \mu$$

F_y : Vertikale Kraft, die über die Wand abgetragen wird; A_w : Wandfläche,
 σ_x : Horizontale Spannung, μ : Wandreibungskoeffizient

Mit

Gleichung 4.4-2

$$A_w = U \cdot H$$

U: Umfang, H: Höhe

Die horizontale Spannung ergibt sich dabei multiplikativ aus der vertikalen Spannung (Auflast) und dem Erddruckbeiwert, der sich aus der Querdehnzahl bzw. dem inneren Reibungswinkel errechnen lässt.

In Anlehnung an die Bodenmechanik und die Baustoffkunde, bei denen die Querdehnzahl und damit auch der Erddruckbeiwert in der Regel als Materialkonstante angesehen wird, soll in erster Näherung dieser Ansatz auch für Abfälle gleicher Zusammensetzung angewendet werden. Für Abfälle mit größeren Maximalstückgrößen, die zu einem ausgeprägten Struktureffekt führen können (z. B. verformungsabhängige Aktivierung von Zugspannungen in den Fasern), kann davon ausgegangen werden, dass keine lineare Abhängigkeit der Wandreibung von der Probenhöhe besteht. Da das Material R jedoch nur eine Maximalstückgröße von < 16 mm aufweist, wobei der Anteil der Stücke < 8 mm bereits über 80 % beträgt, ist die Annahme der Querdehnzahl als Materialkonstante als Näherung zulässig. Die Wandreibungskraft wird daher für folgende Betrachtungen als linear abhängig von der Probenhöhe angesetzt. Als Ausgangswerte werden die in Abschnitt 3.3.4.1 beschriebenen Werte für eine Probenhöhe von 12 cm verwendet.

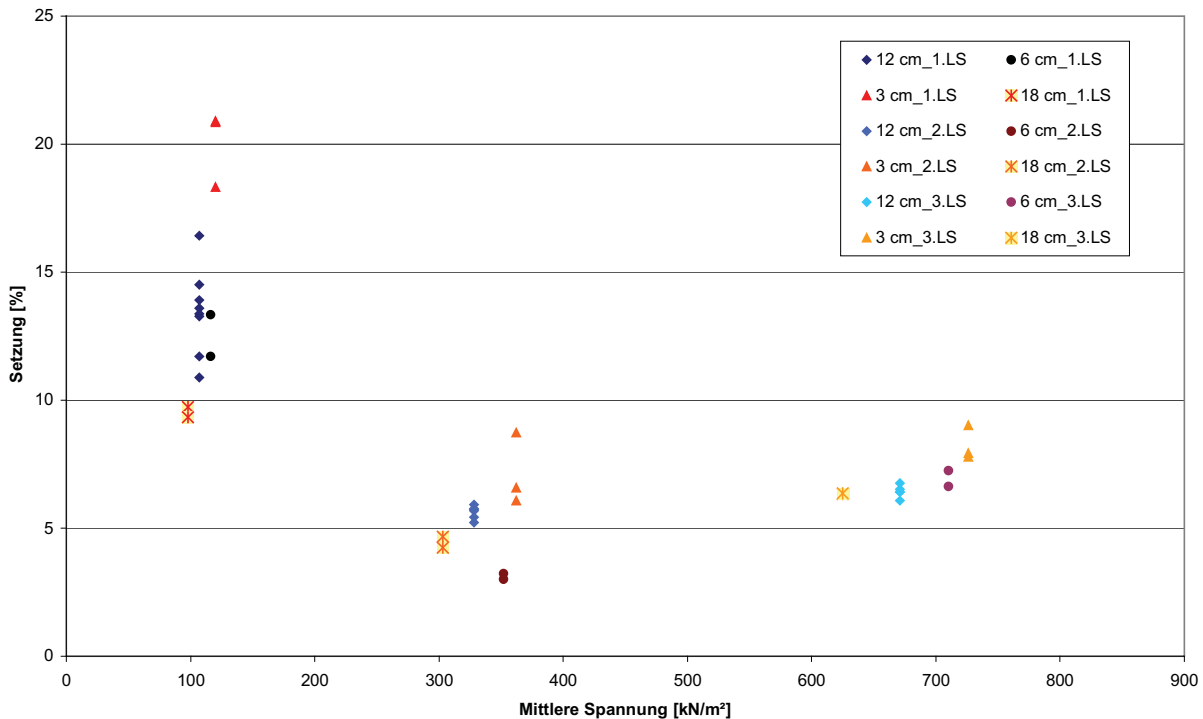


Abb. 4.4-3: Auf die Ausgangshöhe der jeweiligen Laststufen bezogene Setzung der Versuche in den Ödometern \varnothing 23 cm bei unterschiedlichen Probenhöhen als Funktion der mittleren Spannung
Die Setzungen sind jeweils auf die Anfangshöhe zu Beginn der jeweiligen Laststufe bezogen

Wird aus den bezogenen Setzungen der Steifemodul errechnet, so ergibt sich die Darstellung in Abb. 4.4-4. Die dargestellte Ausgleichsfunktion ergibt sich aus den Mittelwerten der Ergebnisse mit einer Probenhöhe von 12 cm. Die Werte der Versuche mit anderen Probenhöhen schwanken deutlich sichtbar um diese Linie, wobei tendenziell sowohl die Steifemoduli in den Versuchen mit einer Probenhöhe von 6 cm als auch von 18 cm höhere Steifemoduli und die Versuche mit einer Probenhöhe von 3 cm geringere Steifemoduli aufweisen (Abb. 4.4-4).

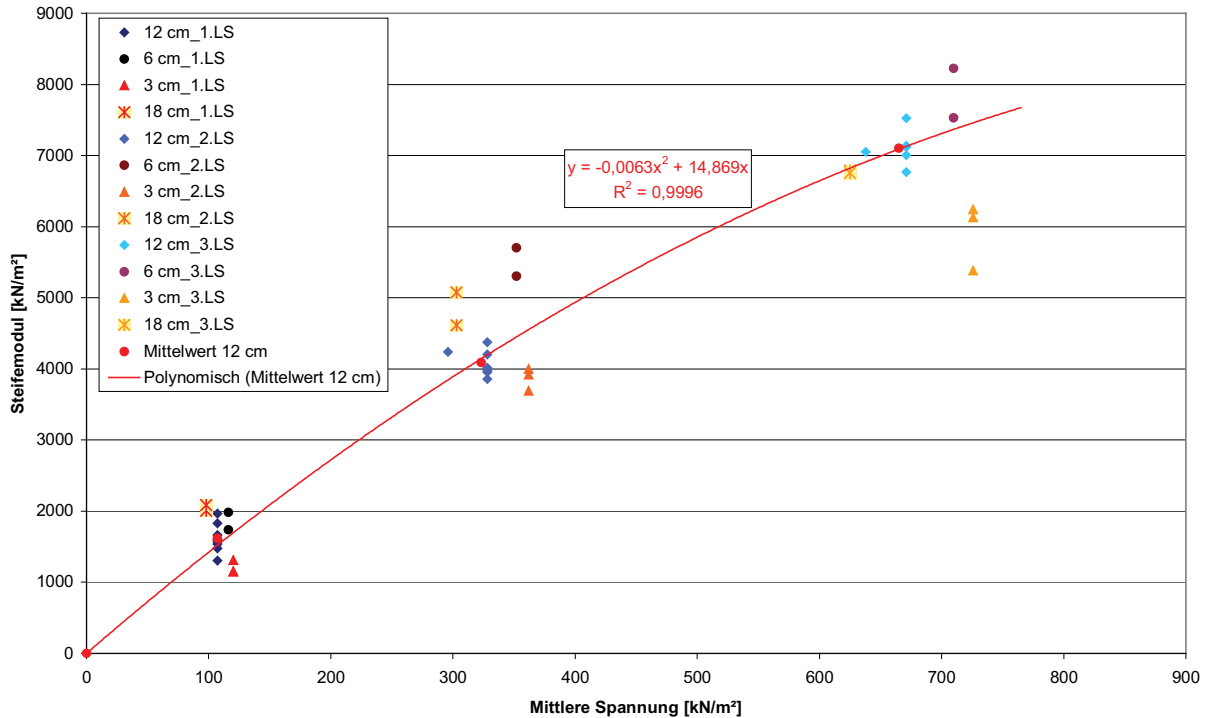


Abb. 4.4-4: Steifemodul der Versuche in den Ödometern \varnothing 23 cm bei unterschiedlichen Probenhöhen als Funktion der mittleren Spannung
Die Kurve stellt die polynomische Funktion der Mittelwerte bei einer Probenhöhe von 12 cm dar.

Dieser Effekt wird deutlicher, wenn die auf die Ausgangshöhe der jeweiligen Laststufe bezogenen Setzungen als Funktion der Probenhöhe aufgetragen werden (Abb. 4.4-5). Die bezogenen Setzungen schwanken in den ersten beiden Laststufen stark mit einer wellenähnlichen Form, die ein absolutes Maximum bei einer Probenhöhe von 3 cm und ein relatives Maximum bei einer Probenhöhe von 12 cm aufweist. Die Unterschiede der Ergebnisse zwischen den Versuchen mit 12 cm und 18 cm Probenhöhe verringern sich bereits in der zweiten Laststufe deutlich, während sich die Unterschiede zu den Ergebnissen der Versuche mit den anderen Probenhöhen erst in der dritten Laststufe deutlich verkleinern. Zwischen den Probenhöhen von 6 cm und 18 cm kann bei der dritten Laststufe von einer annähernd gleichen bezogenen Setzung ausgegangen werden, während die bezogene Setzung bei einer Probenhöhe von 3 cm weiterhin höher bleibt.

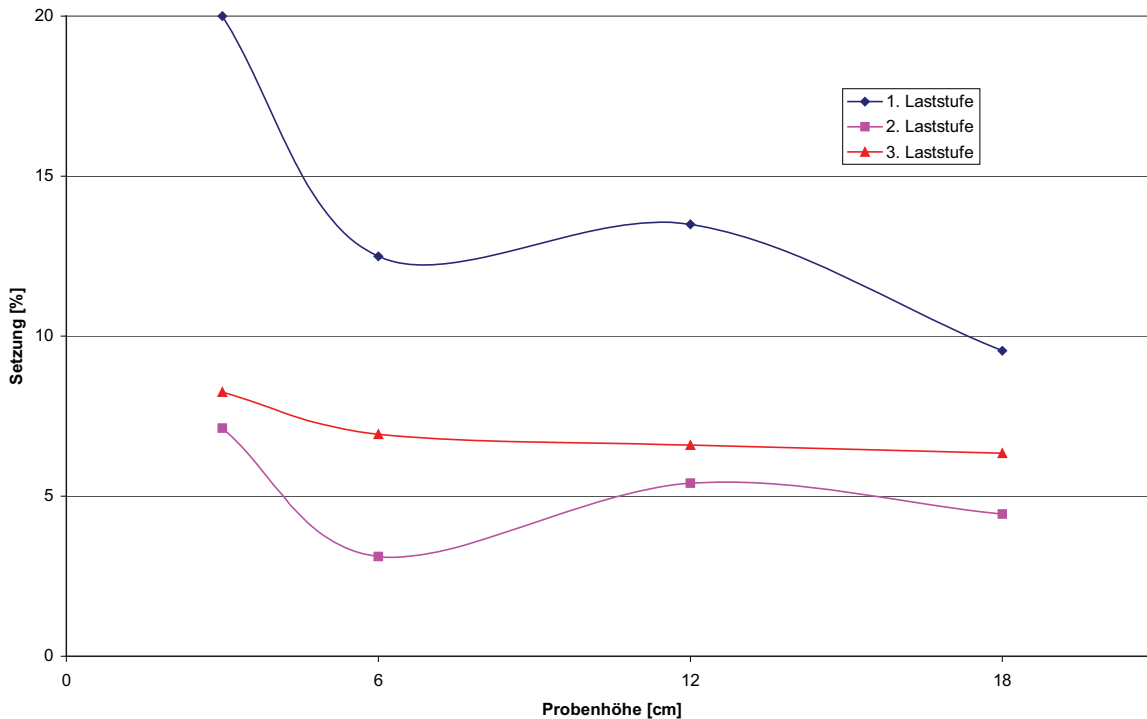


Abb. 4.4-5: Setzung der Versuche in den Ödometern \varnothing 23 cm bei unterschiedlichen Probenhöhen als Funktion der Probenhöhe bei Versuchsbeginn
Die Setzungen sind jeweils auf die Anfangshöhe zu Beginn der jeweiligen Laststufe bezogen

4.4.3.3. Versuchsreihe 1, 3 und 4

Der Vergleich der Versuchsreihen 1, 3 und 4 ermöglicht eine Abschätzung des Einflusses des Probendurchmessers auf die Ergebnisse der Ödometerversuche, da in den Versuchen das gleiche Grundmaterial und damit die gleiche Maximalstückgröße des Abfalls eingesetzt wurde. Zusätzlich zum Ödometer \varnothing 23 cm wurden die Ödometer \varnothing 10 cm und 60 cm verwendet (Abschnitt 4.4.1).

Die Versuche in den Ödometern \varnothing 10 cm führen tendenziell zu geringeren Steifemoduli als in den Ödometern \varnothing 23 cm. Lediglich die Versuche mit dem Grundmaterial R und einer Probenhöhe von 3 cm weisen im Ödometer \varnothing 23 cm ähnliche Steifemoduli auf. Bei diesem Vergleich ist jedoch zu berücksichtigen, dass erstens in den Ödometern \varnothing 10 cm geringere Auflasten aufgebracht wurden als in den Ödometern \varnothing 23 cm, d. h. die berechneten Steifemoduli beziehen sich auf einen anderen Spannungsbereich. Zweitens ist bei diesem Vergleich die Wandreibung nicht berücksichtigt worden, da sie in den verwendeten Ödometern \varnothing 10 cm aufgrund der Konstruktion nicht versuchstechnisch ermittelt werden konnte (Abschnitt 3.3.4.1). Zwar kann die Wandreibung gemäß DIN 18135 (Entwurf) für die Untersuchung von Boden vernachlässigt werden, für Abfall hingegen kann sie einen erheblichen

Einfluss ausüben, wie in Abschnitt 3.3.4.1 gezeigt wurde. Die mittlere Spannung in der Probe bzw. der Spannungsbereich kann in den Ödometern \varnothing 10 cm aufgrund der Wandreibung um bis zu ca. 50 % der aufgebrachten Spannung reduziert sein (Abschnitt 3.3.4.1). Dies führt dazu, dass die Versuche im Ödometer mit einer großen Unsicherheit bezüglich ihrer Interpretation belegt sind. Da das Größenverhältnis von Probenhöhe zu maximaler Stückgröße, wie in Abschnitt 4.4.2.2 gezeigt, größer als 4 sein sollte, sind Untersuchungen nur an Abfällen mit einer maximalen Stückgröße von < 5 mm im Ödometer \varnothing 10 cm sinnvoll. Die Maximalstückgröße von Siedlungsabfällen ist in der Regel jedoch deutlich größer, so dass auf die Untersuchungen im Ödometer \varnothing 10 cm verzichtet werden sollte. Werden dennoch Untersuchungen von Abfällen im Ödometer \varnothing 10 cm durchgeführt, so muss die Wandreibung konstruktiv verringert oder messtechnisch erfasst werden.

Die Versuche in den Ödometern \varnothing 60 cm weisen ebenfalls einen anderen Spannungsbereich in den drei Laststufen auf (Kap. 3.3). Deshalb können die Versuchsergebnisse nicht direkt miteinander verglichen werden. Es wurde daher für die Versuche im Ödometer \varnothing 23 cm für jedes Material eine Funktion für die Abhängigkeit des Steifemoduls von der Auflast berechnet. Als zusätzlicher Messwert wurde dabei der Nullpunkt berücksichtigt, da der Steifemodul bei unendlich kleinen Auflasten infinitesimal klein wird (Gültigkeit des Hook'schen Gesetzes). Die beste Übereinstimmung der Funktion mit den Messwerten ergab sich bei der Wahl eines Polynoms zweiter Ordnung. Alle Funktionen weisen einen asymptotischen nach unten offenen Kurvenverlauf (bis zum Wendepunkt der Funktion) auf (Abb. 4.4-6). Mit den ermittelten Funktionen wurden die Steifemoduli für die in den Versuchen verwendeten Auflasten berechnet. Als zusätzlicher, theoretischer Messpunkt wurde dabei wiederum der Nullpunkt eingesetzt. Es ergaben sich daher die Auflaststufen 0, 150, 250, 300, 500 und 600 kN/m². Die maximale Auflast von 1000 kN/m² wurde nur zur Ermittlung der Steifemodul-Auflast-Funktion im Ödometer \varnothing 23 cm berücksichtigt, da sie für die Ödometer \varnothing 60 cm weit im Extrapolationsbereich liegt.

Für die Ergebnisse der Versuche in den Ödometern \varnothing 60 cm ließ sich nur für die Setzungen am Versuchende eine ebenfalls polynomische Funktion finden, die den Nullpunkt als Zwangspunkt berücksichtigt und gleichzeitig den Kurvenverlauf ausreichend genau an die Messwerte anpasst. In Abb. 4.4-6 wurden daher für die Setzungen nach 24 Stunden und 380 Stunden die um den Anteil der Wandreibung korrigierten Werte des Steifemoduls eingetragen. Die Zeitspanne von 380 h im Ödometer \varnothing 60 cm entspricht der mit der Probenhöhe quadratisch ansteigenden Zeitspanne zum Erreichen des gleichen Setzungsanteils

wie im Ödometer \varnothing 23 cm, gemäß der Konsolidationstheorie. Zur besseren Übersicht wurden sie mit einer Linie verbunden.

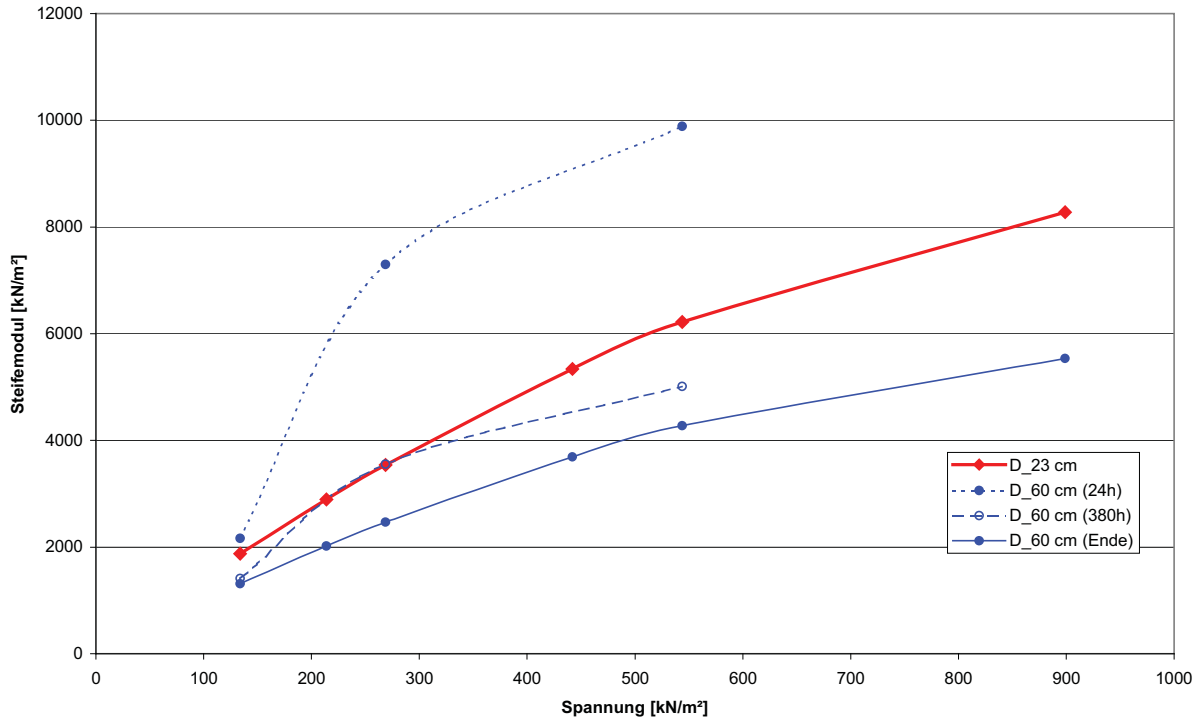


Abb. 4.4-6: Mit polynomischer Ausgleichsfunktion berechnete Steifemoduli der Versuche in den Ödometern \varnothing 23 cm und 60 cm als Funktion der Spannung

Der Steifemodul der Versuche in den Ödometern \varnothing 60 cm ist in der ersten Laststufe bereits nach 24 Stunden ähnlich klein wie in den Ödometern \varnothing 23 cm. Bei höheren Auflasten ist der Steifemodul bei den Versuchen in den Ödometern \varnothing 60 cm nach 24 Stunden wesentlich größer und zum Ende der Versuche (ca. 900 Stunden) deutlich kleiner als in den Ödometern \varnothing 23 cm.

Wird angenommen, dass alle anderen Einflüsse auf das Setzungsverhalten gegenüber dem Auspressen von Wasser (Konsolidation) zu vernachlässigen sind, so müssten gemäß der Konsolidationstheorie die Steifemoduli nach ca. 380 Stunden denen der Ödometer \varnothing 23 cm nach 24 Stunden entsprechen. Tatsächlich ist dies jedoch nur bei der zweiten Laststufe der Fall. In dieser Laststufe tritt nur eine geringe Erhöhung der Materialdichte bei dem Grundmaterial R auf (Kap. 4.1), so dass die Annahme der Konsolidation als maßgeblichem Setzungseffekt, in dieser Laststufe durchaus zulässig ist. In zukünftigen Versuchen ist zu prüfen, in welchem Maße diese Ergebnisse in den Ödometern \varnothing 60 cm reproduzierbar sind, so dass diese These belegt werden kann. In allen anderen Lastbereichen besitzen die

Erhöhung der Materialdichte und die damit verbundenen sekundären Auswirkungen auf das Setzungsverhalten einen solch großen Effekt, dass die Ergebnisse nicht unter Anwendung der Konsolidationstheorie auf In-Situ-Verhältnisse übertragen werden können.

4.4.4. Zusammenfassende Betrachtung

Die Wahl der Geräteabmessungen in Bezug zu der untersuchten Maximalstückgröße des Abfalls besitzt einen deutlichen Einfluss auf das absolute Versuchsergebnis und seine Reproduzierbarkeit.

Die Ursachen sind verschiedene sich überlagernde, z. T. gegenläufige Effekte. So führt z. B. eine größere Probenhöhe zu größeren Absolutverformungen. Dabei können sich folienförmige Bestandteile besser den schwer verformbaren Bestandteilen anpassen und es kommt zu einer größeren bezogenen Setzung. Hingegen werden durch die größere Absolutverformung Zugkräfte in den Folien geweckt, die zu einer Erhöhung des Widerstandes gegen die Verformung und somit geringeren bezogenen Setzungen führen. Abhängig von den Verhältnissen des Probenkörpers und der Stückgrößenverteilung des Abfalls überwiegt einer der beiden Effekte.

Bei dem in dieser Arbeit untersuchten Grundmaterial R wurde der Struktureffekt weitestgehend vermieden. Lediglich in den Versuche mit einem geringen Größenverhältnis zwischen Probenhöhe und Maximalstückgröße macht sich dieser Einfluss in Form von Stützgewölben wieder bemerkbar (Abschnitt 4.4.2.2). Die Ergebnisse, die bei den geringen Größenverhältnissen, wie sie z. B. im Ödometer \varnothing 10 cm oder im Ödometer \varnothing 23 cm bei einer Probenhöhe von 3 cm vorliegen, führen selbst für das Grundmaterial R nicht zu Ergebnissen, die auf größere Höhen übertragen werden können. Ödometerversuche mit einem Größenverhältnis von Probenhöhe zu maximaler Stückgröße von < 4 führen daher nicht zu auf In-Situ-Verhältnisse übertragbaren Ergebnissen. Sie sollten nicht durchgeführt werden.

Werden alle Versuche in den Ödometern \varnothing 23 cm mit unterschiedlichen Probenhöhen zusammen betrachtet, so fällt die ungerichtete Tendenz der auf die Ausgangshöhe bezogenen Setzungen auf (Abb. 4.4-5). Die bezogenen Setzungen bzw. der Steifemodul sind im Ödometer \varnothing 23 cm in der dritten Laststufe für die Probenhöhen 6, 12 und 18 cm annähernd gleich groß, was darauf hindeutet, dass die auf die Ausgangshöhe der jeweiligen Laststufe bezogenen Setzungen bei einer Probenhöhe von 3 cm überschätzt werden. Im Bereich von 6 bis 18 cm Probenhöhe tritt bei allen Laststufen ein lokales Setzungsmaximum bei 12 cm auf. Der Variationskoeffizient der Einzelversuche ist auch bei dieser Probenhöhe $< 0,1$. Es erscheint daher für das Grundmaterial R sinnvoll, die Untersuchung bei einem

Probendurchmesser von 23 cm und einer Probenhöhe von 12 cm durchzuführen, da sich hier repräsentative und reproduzierbare Ergebnisse ermitteln lassen, die sich für Bemessungen, z. B. im Falle einer späteren Nutzung des Deponiegeländes, auf der sicheren Seite befinden. Die Verhältnisse von maximaler Stückgröße zu Probendurchmesser bzw. -höhe von ca. 1:30 bzw. 1:15 und von Probenhöhe zu Durchmesser von ca. 1:2 erweisen sich daher für das Grundmaterial R als grundsätzlich geeignet.

Werden hohe Anforderungen an die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gefordert, z. B. in Zusammenhang mit einer setzungsempfindlichen Baumaßnahme, so sollten größere Verhältnisse gewählt werden, z. B. für das Grundmaterial R eine Probenhöhe von 18 cm.

Die Versuche in dem Ödometer \varnothing 60 cm weisen darauf hin, dass eine Verwendung der Konsolidationstheorie zur Extrapolation der Ergebnisse aus den Versuchen in den Ödometern \varnothing 23 cm auf In-Situ-Verhältnisse möglich ist, sofern keine nicht-volumenkonstante Verformung unter Erhöhung der Materialdichte stattfindet und das Material strukturarm ist. Die Anwendbarkeit der Konsolidationstheorie ist bei dem hier untersuchten Material in etwa im Spannungsbereich der zweiten Laststufe (250 bis 500 kN/m²) möglich. Wenn eine Erhöhung der Materialdichte während des Versuches stattfindet, führen die damit einhergehenden Änderungen bzw. Beeinflussungen der Setzungsprozesse zu einem Zeit-Setzungsverhalten, das nicht ausschließlich mit der Konsolidationstheorie erklärt werden kann. Hier ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden.

Weiterhin wird durch diese Ergebnisse die Eignung des Ödometers \varnothing 23 cm mit seinen Größenverhältnissen bezogen auf die maximale Stückgröße des Grundmaterials R bestätigt.

In welchem Maße die Ergebnisse auf Abfälle anderer Zusammensetzung, Stückgrößenverteilungen oder -formen übertragen werden können muss in zukünftigen Forschungsarbeiten untersucht werden. Einen ersten Anhaltspunkt dazu liefern die Versuche mit dem Grundmaterial NW in dem Ödometer \varnothing 23 cm und den Probenhöhen 6 cm und 12 cm, bei denen die Ergebnisse die gleiche Tendenz aufweisen wie bei dem Grundmaterial R.

Aufgrund der Stückgröße von bis zu 40 mm treten aber bei dem Grundmaterial NW bereits Struktureffekte auf, die in dieser Arbeit nicht explizit berücksichtigt wurden. Bei einem zulässigen Variationskoeffizienten der Ergebnisse von 0,15 bis 0,20 kann das Grundmaterial NW hinreichend genau mit einer Probenhöhe von 12 cm im Ödometer \varnothing 23 cm untersucht werden. Um einen ähnlichen Variationskoeffizienten wie beim Grundmaterial R zu erhalten, muss die Probenhöhe und eventuell der Probendurchmesser vergrößert werden.

4.5. Ergebniszusammenfassung und –bewertung

In dieser Arbeit wurden erstmals Versuche zur Bestimmung der physikalischen Grundlagen des Setzungsverhaltens von Abfallkörpern durchgeführt. Es wurde untersucht, ob sich das Setzungsverhalten von Abfallkörpern mit der Konsolidationstheorie beschreiben lässt. Dies wäre der Fall, wenn der Einfluss der abfallspezifischen Eigenschaften und ihre theoretischen Setzungsanteile gegenüber dem Auspressen des Wassers gering sind.

Ausgehend von der These, dass sich das Setzungsverhalten nicht mit der Konsolidationstheorie beschreiben lässt, wurde untersucht, welche anderen Größen einen entscheidenden Einfluss besitzen.

Da nur einzelne maßgebende Einflüsse der Struktur explizit untersucht werden sollten, wurden die eingesetzten Materialien so ausgewählt, dass der Struktureffekt, der auf der Form der Bestandteile (DIM) beruht, bis auf ein nicht vermeidbaren Restanteil ausgeschlossen wurde.

Weiterhin wurden erste Erkenntnisse zur Auswahl der Probenabmessungen im Ödometerversuch in Bezug zur maximalen Stückgröße des Abfalls erarbeitet.

Untersucht wurde ein mechanisch-biologisch behandelter Siedlungsabfall mit einer Maximalstückgröße von 8 mm, der aufgrund seiner Stückgröße bodenähnlich wirkt.

Es wurde theoretisch und in Versuchen nachgewiesen, dass - selbst für den in dieser Arbeit untersuchten mechanisch-biologisch behandelten Abfall mit einer Stückgröße von < 8 mm - die Beschreibung des Setzungsverhaltens von Abfallkörpern mit der Konsolidationstheorie nicht möglich ist, obwohl die gesättigte hydraulische Leitfähigkeiten im Bereich bindiger Böden liegt. Dies ist maßgeblich durch die Verformbarkeit der Einzelstücke, die sowohl volumenkonstant als auch nicht-volumenkonstant erfolgen kann, bedingt. Die nicht-volumenkonstante Verformung der Einzelstücke geht dabei mit einer Erhöhung der Materialdichte einher und kann in zwei unterschiedliche Funktionsmechanismen unterteilt werden:

- Nicht-volumenkonstante Verformung fester Bestandteile unter Verringerung (Kompression) des innenliegenden, verschlossenen Luftporenvolumens
- Nicht-volumenkonstante Verformung unter der Freisetzung des verschlossenen Luftporenvolumens.

Die Freisetzung des verschlossenen Luftporenvolumens kann durch die Öffnung von Verschlüssen der Poren, z. B. die membranähnlichen Tüpfel im Holz, oder durch die Zerstörung der Einzelbestandteile aufgrund der Überschreitung der maximal aufnehmbaren Spannung erfolgen.

Das freigesetzte Luftporenvolumen nimmt durch die Bildung neuer Fließquerschnitte und durch das Auspressen eines Anteils der Luft an dem Setzungsprozess teil. Dies führt unter anderem dazu, dass die Setzung von Abfallkörpern in der Regel in wasserungesättigten Verhältnissen stattfindet. Ausnahmen bilden hier maßgeblich lokale Bereiche, in denen ein Einstau von Wasser vorliegt.

Da selbst für Böden, deren mechanisches Verhalten seit ca. 100 Jahren intensiv untersucht wird, bisher nur wenige Erkenntnisse zum Setzungsverhalten im wasserungesättigten oder – teilgesättigtem Milieu vorliegen, und die Verhältnisse im Abfall aufgrund seiner Zusammensetzung erheblich komplexer sind als bei Böden, erschwert sich die Beschreibung des Setzungsverhaltens von Abfallkörpern zusätzlich.

Das durch die nicht-volumenkonstante Verformung freigesetzte Luftporenvolumen betrug in den Ödometerversuchen mit dem Grundmaterial R ca. 6 % des Ausgangsvolumens. Da die horizontale Verformung versuchsbedingt ausgeschlossen ist, bedeutet dies gleichzeitig eine maximale Setzung von 6 % der Ausgangshöhe. Wird diese Setzung verglichen mit einer Gesamtsetzung von Deponiekörpern von ca. 20 % der Ausgangshöhe, die in der Literatur angegeben wird bzw. gemessen wurde, sind in diesem Falle ca. 30 % der Setzungen durch die nicht-volumenkonstante Verformung der Einzelstücke bedingt. Bei Abfällen mit einem höheren biologisch abbaubaren Organikanteil als bei den in dieser Arbeit untersuchten mechanisch-biologisch behandelten Abfällen kann dieser Anteil noch größer sein.

Diese Größenordnung des Einflusses der nicht-volumenkonstanten Verformung mit einer Erhöhung der Materialdichte wurde in den Ödometerversuchen bestätigt. Bei den Versuchen mit dem Grundmaterial R betrug der auf die Gesamtsetzung nach 24 Stunden bezogene Sofortsetzungsanteil, der in diesem Falle auch einen Teil der nicht-volumenkonstanten Verformung beinhalten kann, 40 bis 45 %. Dieser Anteil ist in der ersten Laststufe mit 50 bis 60 % größer als in den höheren Laststufen. In der zweiten und dritten Laststufe beträgt er etwa 20 bis 25 %. Der Anteil aus der nicht-volumenkonstanten Verformung der Einzelbestandteile beträgt ca. 25 bis 30 %. Der Anteil aus der Konsolidationssetzung ergibt sich somit zu 25 bis 35 % und ist damit ähnlich groß wie der Anteil aus der nicht-volumenkonstanten Verformung der Einzelstücke. Die nicht-volumenkonstante Verformung fester Bestandteile muss daher zwingend bei der labortechnischen Ermittlung von Kennwerten und der Erstellung von Setzungsprognosen berücksichtigt werden.

Nicht in jeder Stoffgruppe erfolgt eine nicht-volumenkonstante Verformung fester Bestandteile und eine Erhöhung der Materialdichte. Bei den Versuchen in dieser Arbeit ist dieser Effekt maßgeblich durch die nativ organische Substanz bedingt. Es ist daher erforderlich, den

Anteil der nativ organischen Substanz im Abfall zu bestimmen, um den Setzungsanteil, der durch die Erhöhung der Materialdichte entsteht, abzuschätzen.

Bei Abfällen größerer Stückgrößen kann eine nicht-volumenkonstante Verformung größerer Bestandteile, wie z. B. Spraydosen oder anderer verschlossener Behältnisse, hinzukommen. Das freisetzbare Luftporenvolumen dieser Bestandteile muss bei der Abschätzung des Setzungsanteils aufgrund der nicht-volumenkonstanten Verformung ebenfalls berücksichtigt werden.

Das Setzungsverhalten von Abfallkörpern ist zudem von der Abfallzusammensetzung abhängig. Dies gilt nicht nur für den Anteil an nativer Organik, der die nicht-volumenkonstante Verformung bedingt, sondern auch für andere Bestandteile.

Die Erhöhung der Kunststofffraktion führt bei Auflasten bis zu 500 kN/m^2 zu keiner signifikanten Veränderung des Steifemoduls gegenüber dem Grundmaterial R. Für hohe Auflasten, in diesem Fall 1000 kN/m^2 , besitzt der Kunststoffanteil hingegen einen merklichen Einfluss auf das Setzungsverhalten. Dabei konnte die Modellvorstellung, dass sich faser- und folienförmige (DIM 1+2) Kunststoffteile besser den Verformungen der anderen Bestandteile anpassen können und damit zu größeren Setzungen führen als quaderförmige (DIM 0) Kunststoffe, bestätigt werden. Eine Erhöhung der faser- und folienförmigen Kunststoffe führt bei hohen Auflasten sogar zu einer Verringerung des Steifemoduls gegenüber dem Grundmaterial R, während eine Erhöhung des quaderförmigen Anteils zu einer deutlichen Erhöhung des Steifemoduls führt. Für hohe Deponien, bei denen in den unteren Abfallschichten große Spannungen erreicht werden, ist zur Abschätzung des Setzungsverlaufes daher die Bestimmung des Massenanteils und der Form (DIMensionen) des Kunststoffes erforderlich.

Ein erhöhter Anteil an rolligen Inertmaterialien führt zu einer signifikanten Erhöhung des Steifemoduls. Die Erhöhung des bindigen Inertanteils führt hingegen zu keiner signifikanten Veränderung des Steifemoduls gegenüber dem Grundmaterial R. Bei der Sortierung von Siedlungsabfällen ist es daher notwendig, den Inertstoffanteil nach rolligen und bindigen Materialien zu unterscheiden. Dies erfordert zusätzlich zu der Abfallanalyse nach GDA-EMPFEHLUNG E 1-7 eine Siebung des Sortierrestes ($< 8 \text{ mm}$) auf eine Stückgröße $< 0,06 \text{ mm}$ und eine Bestimmung des Inertanteils in dem gesamten Sortierrest ($< 40 \text{ mm}$). Die chemische Analyse auf Siliziumdioxid (SiO_2) liefert einen Anhaltspunkt der Größenordnung des Inertanteils und einen Kontrollwert für die Abfallanalyse.

Die dargestellten Ergebnisse sollen helfen, die grundlegenden physikalischen Vorgänge des Setzungsverhaltens von Abfallkörpern besser zu verstehen. Die einzelnen Setzungsanteile

sind durch den Struktureffekt miteinander verbunden und beeinflussen sich gegenseitig. Weiterhin übt bei der Langzeitsetzung der biologische Abbau der organische Substanz einen Einfluss auf das Setzungsverhalten aus.

Aus der Kombination der Ergebnisse dieser Arbeit mit dem Struktureffekt und dem biologischen Abbau organischer Substanz ergeben sich weitere Fragestellungen, die im Folgenden zusammengestellt sind:

- Langzeitsetzung
 - Wie können die aus dem biologischen Abbau der organischen Substanz resultierenden Setzungen (Sackungen) in Prognosen hinreichend genau berücksichtigt werden? Wie werden diese Setzungen durch die Zusammensetzung des nicht biologisch abbaubaren Anteils des Abfalls beeinflusst?
 - Wodurch sind die Langzeitsetzungen bedingt? Welchen Anteil besitzen dabei das Kriechen und die Zwei-Phasen-Konsolidation? Treten evtl. noch weitere physikalische Phänomene auf?
 - Welches Versuchsgerät muss gewählt werden und wie müssen die Versuche durchgeführt werden, um die Langzeitsetzung in Laborversuchen bestimmen zu können?
- Struktureffekt
 - Wie sind die in dieser Arbeit angestellten Überlegungen zu den einzelnen Einflüssen der Struktur miteinander verknüpft und wie lassen sich diese Effekte in Laborversuchen nachweisen?
 - Treten weitere Effekte durch die Struktur auf?
 - Mit welchen Laborgeräten können aussagefähige Ergebnisse zur Übertragung auf In-Situ-Verhältnisse erhalten werden, wenn die maximale Stückgröße nicht begrenzt ist? Lassen sich auch mit aufbereiteten Abfällen hinreichend genaue Ergebnisse erzielen?
- Einfluss des Wassers
 - Wie wird das mechanische Verhalten durch das im Abfallkörper enthaltene Wasservolumen beeinflusst (Kohäsion, scheinbare Kohäsion, Adhäsion, Porenwasserüberdruck, Gleitmittel, etc.)?
 - Ist ein bestimmter Wasserdruck erforderlich, um die membranähnlichen Strukturen bzw. Verschlüsse der eingeschlossenen Luftporen zu öffnen?
- Zwei-Phasen-Strömung
 - Gibt es einen Zeitpunkt, zu dem alle Poren wassergesättigt sind oder verbleibt ein Restanteil an Luftporen im Abfallkörper, z. B. aufgrund hydrophober Eigenschaften von Abfallbestandteilen?

- Welche Wechselwirkungen, z. B. Lösungsprozesse und Veränderung der Strömungsbedingungen, treten zwischen Gas- und Flüssigphase auf? Wie werden dadurch die Setzungseigenschaften beeinflusst?
- Sensitivitäten
 - In welchem zeitlichen und räumlichen Raster müssen die physikalischen Eigenschaften eines Deponiekörpers untersucht werden?

Für die praktische Anwendung hat es sich als erforderlich herausgestellt, mindestens drei Parallelversuche durchzuführen, um die Schwankungsbreite der Ergebnisse abschätzen zu können. Bei großer Schwankungsbreite sind mehr Versuche erforderlich.

Aufgrund der Zerstörung der festen Bestandteile bei der nicht-volumenkonstanten Verformung ist eine Mehrfachverwendung des Abfalls in Versuchen ausgeschlossen. Da ein Teil der Zerstörung der Bestandteile bereits bei der Verdichtung erfolgt, ist die Mehrfachverwendung auch bei anderen Laborversuchen, bei denen eine Verdichtungsarbeit aufgebracht wird, wie es z. B. bei Proctorversuchen oder bei der Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Fall ist, ebenfalls nicht möglich.

Weiterhin kann aus den Ergebnissen dieser Arbeit die Schlussfolgerung gezogen werden, dass Laborversuche bei dem derzeitigen Wissensstand zum Setzungsverhalten von Siedlungsabfällen Ergebnisse liefern, die sich kaum auf In-Situ-Verhältnisse übertragen lassen. Erste Interpretationsansätze zum Setzungsverhalten von Abfallkörpern in Laborversuchen sind in dieser Arbeit basierend auf physikalischen Modellen erarbeitet worden. Die grundsätzlichen Setzungsanteile wurden qualitativ und zum Teil auch quantitativ in Ödometerversuchen nachgewiesen. Die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf In-Situ-Verhältnisse wurde geprüft. Mit den erhaltenen Erkenntnissen ist es möglich, ein komplexes Last-Setzungsmodell, das auf den physikalischen Prozessen basiert, zu entwickeln. Es fehlt jedoch noch die Kenntnis zum Einfluss der Struktur. Dazu sind in dieser Arbeit Theorien zu den physikalischen Wirkungsweisen der Struktur entwickelt worden. Die Größenordnung des Einflusses der Struktur und das Zusammenwirken der einzelnen Wirkungsweisen muss zukünftig erforscht werden.

Soll lediglich das Setzungsverhalten von bestehenden Deponien abgeschätzt werden, meist mit der Maßgabe, den geeigneten Zeitpunkt zur Aufbringung der Oberflächenabdichtung zu bestimmen, scheint es bei dem zur Zeit geringen Wissensstand erforderlich, weiterhin das etablierte Verfahren gemäß GDA-Empfehlung E 2-24 anzuwenden, ohne dabei zu wissen, was im Deponiekörper geschieht. Da ein Teil der Materialdichteerhöhung bereits während der

Lagerung in der Deponie erfolgt ist, reduziert sich der Fehler, der durch die Vernachlässigung des durch die Materialdichteerhöhung freigesetzten Luftporenvolumens entsteht. Dies gilt jedoch nur, wenn die Deponierung bereits beendet ist, d. h. die Auflast konstant bleibt. Bei weiterer Erhöhung der Deponie kann es in der Deponie zu einer weiteren Erhöhung der Materialdichte, die auch durch die Zerstörung der Struktur hervorgerufen wird, und damit zu erhöhten Setzungen kommen. In diesem Falle kann die Setzungsprognose gemäß GDA-EMPFEHLUNG E 2-24 die tatsächlichen Setzungen unterschätzen. Hier sind Einzel- falluntersuchungen erforderlich.

Es sollten jedoch weiterhin auch an Altkörpern Untersuchungen durchgeführt werden, da sie zu einer größeren Datenmenge führen, die in einer Datenbank zusammengetragen werden sollte. So lassen sich statistische Verfahren zur Setzungsprognose und zur Sensitivitätsanalyse sinnvoll einsetzen. Dies verringert die Prognosefehler für Altdeponien.

Für eine spätere Nutzung von Deponiearealen z. B. als Sport- oder Naherholungsanlage oder durch Bebauung ist es hingegen erforderlich die Setzungen genauer prognostizieren und berechnen zu können. Hierzu müssen Laborversuche bereits während der Entwurfs- und Planungsphase eingesetzt werden. Dies ist jedoch nur sinnvoll, wenn die Grundlagen des Setzungsverhaltens von Abfallkörpern berücksichtigt werden. Da der Einfluss des Struktur- effektes bisher noch nicht hinreichend untersucht ist, können anhand von Laborversuchen zur Zeit nur Richtwerte ermittelt und Abschätzungen durchgeführt werden. Für strukturarmen Abfall, wie z. B. das Grundmaterial R, können auf der Grundlage der hier ermittelten Ergebnisse genauere Setzungsprognosen anhand von Laborversuchen erstellt werden.

Bei geringeren Größenverhältnissen als 1:4 zwischen maximaler Stückgröße und Probenabmessung steigt der Variationskoeffizient der Teilversuche im Ödometer \varnothing 23 cm auf bis zu 0,2 an. Dies haben die Versuche mit reduzierter Probenhöhe sowie die Versuche mit dem Grundmaterial NW (< 40 mm) und einem weiteren Material mit einer Maximalstückgröße von 30 mm (MÜNNICH und ZIEHMANN (2000)) gezeigt. Kleinere Größenverhältnisse als 1:4 sollten zudem nicht gewählt werden, da die Ergebnisse dann nicht mehr auf größere Probenhöhen und damit auf In-Situ-Verhältnisse übertragbar sind. Für die Laboruntersuchungen werden, abgeleitet aus den Versuchen mit dem Grundmaterial R (< 8 mm) in den Ödometern \varnothing 23 cm, Größenverhältnisse zwischen maximaler Stückgröße zu Probendurchmesser von 1:25 und zu Probenhöhe von 1:15 empfohlen, da hier eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erzielt wird.

Die empfohlenen Größenverhältnisse führen bei größeren Maximalstückgrößen zu sehr großen Geräteabmessungen und einem hohen Versuchsaufwand. Es ist daher in weiteren Versuchen zu prüfen, ob dieses Verhältnis für Abfälle mit größeren Bestandteilen reduziert werden kann.

Weiterhin sind die notwendigen Geräteabmessungen von den Anforderungen an die Ergebnisgenauigkeit abhängig. Wird, wie es bei bautechnischen Fragestellungen in der Bodenmechanik häufig vorkommt, nur ein Mindeststeifemodul gefordert, so ist die Streuung der Teilergebnisse von untergeordneter Bedeutung. In diesem Fall können, solange sich die Absolutergebnisse auf der sicheren Seite befinden, kleinere Größenverhältnisse gewählt werden.

Bei einer größeren Datenbasis von Ergebnissen aus Ödometerversuchen ist es zukünftig vorstellbar, Abschätzungen der Veränderung des Steifemoduls durch die veränderte Abfallzusammensetzung, die z. B. durch Verbrauchergewohnheiten, jahreszeitliche Schwankungen oder wechselnde Lieferanten hervorgerufen werden kann, anhand einer Abfallsortierung durchzuführen. Dazu ist es notwendig zu einem beliebigen Zeitpunkt die Abfallzusammensetzung zu ermitteln und den Steifemodul des Abfalls zu bestimmen. Die Ermittlung der Abfallzusammensetzung kann nach GDA-EMPFEHLUNG E 1-7 erfolgen; jedoch muss auch die Fraktion 8-40 mm nach Stoffgruppen sortiert werden, eine chemische Analyse der Fraktion < 8 mm und eine Siebung bei einer Lochweite von 0,06 mm durchgeführt werden. Zu späteren Ablagerungszeitpunkten kann aufgrund der Veränderung der Abfallzusammensetzung auf die Veränderung des Steifemoduls geschlossen werden. Dabei ist es zur Zeit wichtig, den nativ organischen Anteil und den Anteil an rolligen Inertstoffen zu bestimmen. Der Inertanteil wirkt sich bei einer Erhöhung des Massenanteils steifigkeitserhöhend und bei der Reduzierung steifigkeitsmindernd aus. Bei dem Grundmaterial R wurde der Steifemodul durch die Erhöhung des rolligen Inertanteils von ca. 40 Gew.-% auf ca. 65 Gew.-% bei geringen Auflasten um 100 % und bei weiterer Laststeigerung um bis zu 20 % gesteigert. Der Anteil an nativer Organik kann zu einer Erhöhung der Materialdichte führen und wirkt damit steifigkeitsmindernd. Dieser Effekt tritt nicht kontinuierlich sondern stufenweise in Abhängigkeit von der Spannung auf. Der Struktureffekt ist noch nicht hinreichend untersucht, so dass dieser Einfluss bei der obigen Überlegung noch unberücksichtigt bleibt.

Der Einfluss der nicht-volumenkonstanten Verformung mit der Erhöhung der Materialdichte kann für Siedlungsabfälle durch eine Kombination von Ödometer- und Kapillarpyknometerversuchen bestimmt werden. Die Materialdichte des Abfalls muss dazu, wie in Kap. 4.1 beschrieben, vor und nach dem Einbau sowie nach jeder Laststufe mit dem Kapillarpykno-

meter bestimmt werden. Dadurch können die auf der Deponie zu erwartenden Setzungen aufgrund von Materialdichteerhöhung, zugeordnet zu den jeweiligen Lastbereichen, bestimmt werden. Diese Vorgehensweise kann auch als erstes Kriterium für die Definition eines bodenähnlichen oder nicht-bodenähnlichen Verhaltens von Siedlungsabfällen herangezogen werden.

5. Zusammenfassung

Abfälle stellen bei Siedlungsabfalldeponien nicht nur eine Auflast für den Untergrund dar, sondern dienen - im Gegensatz zu den meisten anderen Bauwerken - auch als Auflager für weitere Baumaßnahmen, wie z. B. Oberflächenabdichtungen. Die Aufbringung einer Oberflächenabdichtung, die aufgrund ihrer mineralischen Komponente setzungsempfindlich reagiert, ist durch die TASI (1993) und die ABFALLABLAGERUNGSVERORDNUNG (2001) für alle noch in Betrieb befindlichen Deponien in Deutschland vorgeschrieben. Weiterhin ist eine Nachnutzung des Deponiegeländes als Freizeit- oder Naherholungsareal oder durch Siedlungsbaumaßnahmen häufig eine zwingende Notwendigkeit, da sich die urbanen Gebiete weiter ausdehnen und somit die vormals außerhalb von Ortschaften befindlichen Deponien in das Stadtgebiet inkorporiert werden. Durch die, verglichen mit Böden, großen Setzungen des Abfalls, treten jedoch oft Schäden an den Bauwerken auf. Unter dem Begriff Setzung wird hier allgemein die vertikale Verformung des Abfallkörpers verstanden. Die einzelnen zur Setzung beitragenden Anteile sind in dieser Arbeit ausführlich beschrieben und untersucht worden. Aufgrund der – oft ungleichmäßigen - Setzungen kommt es zu einem Versagen der Abdichtungen, was zu umwelt- und gesundheitsschädlichen Emissionen aus dem Deponiekörper führt. Die Berechnung der zukünftig zu erwartenden Setzungen von Abfallkörpern besitzt daher eine zentrale Bedeutung bei der Beurteilung von Deponiekörpern. In dieser Arbeit wurden daher Theorien und Modellvorstellungen entwickelt, um die physikalischen Vorgänge der Setzungen von Siedlungsabfallkörpern besser zu verstehen und die Entwicklung eines Last-Setzungs-Modells zu ermöglichen. Mit den in Kap. 3.1 dargestellten neuen Modellvorstellungen wird der Einfluss und die Wirkungsweise der einzelnen physikalischen Komponenten beschrieben. Mit Laborversuchen wurde anschließend für die maßgeblichen Stoffgruppen, die im Abfall enthalten sind, die Richtigkeit dieser Modellvorstellungen messtechnisch bewiesen.

Häufig werden zur Beurteilung des mechanischen Verhaltens von Abfallkörpern Theorien aus der Bodenmechanik übertragen. Im Falle des Setzungsverhaltens ist dies die Konsolida-

tionstheorie von Terzaghi (Anno 1928) und deren Erweiterungen. Der Grundgedanke der Theorie basiert auf dem Gedanken, dass die Setzungen nur aus dem Auspressen von Wasser aus dem Bodenkörper resultieren, da der Bodenkörper als wassergesättigt betrachtet wird und die Körner nahezu unverformbar sind.

Einen entscheidenden Anteil an dem – im Vergleich zu Böden – deutlich unterschiedlichen Setzungsverhalten von Abfällen besitzt die erstmalig nachgewiesene auflastabhängige nicht-volumenkonstante Verformung fester Bestandteile (NVV). Sie tritt u. a. in der Stoffgruppe der nativen Organik auf. Die NVV wurde in Kapitel 3.1.1 dieser Arbeit in zwei unterschiedliche Wirkmechanismen unterteilt:

- NVV unter Verringerung (Kompression) des innenliegenden, verschlossenen Luftporenvolumens und
- NVV unter der Öffnung des verschlossenen Luftporenvolumens. Dies kann erfolgen durch das Aufbrechen von Verschlüssen der Poren, z. B. die membranähnlichen Tüpfel im Holz, oder durch die Zerstörung des Einzelbestandteiles aufgrund der Überschreitung der maximal aufnehmbaren Spannung.

Die nicht-volumenkonstante Verformung unter Öffnung des verschlossenen Luftporenvolumens führt zu einer bleibenden Erhöhung der Materialdichte. In Kapitel 4.1 wurde messtechnisch ermittelt, dass der daraus resultierende Anteil - selbst bei dem hier untersuchten mechanisch-biologisch behandelten Abfall (geringer Anteil nativ organischer Substanz) - bis zu 30% der Gesamtsetzung beträgt. Der Einfluss der nicht-volumenkonstanten Verformung an der Gesamtsetzung ist damit bei den durchgeführten Versuchen ähnlich groß wie der Anteil, der aus der Konsolidation (Austritt von Wasser) resultiert. Dies beweist, dass der Setzungsverlauf von Abfallkörpern nicht ausschließlich mit der Konsolidationstheorie beschrieben werden kann. Der gegenüber der Konsolidationstheorie veränderte Setzungsverlauf wurde sowohl theoretisch (Kap. 2.2) als auch praktisch in Laborversuchen (Kap. 4.3) nachgewiesen. Bei biologisch weniger stabilisierten Abfällen sowie bei Abfällen, die größere verschlossene Behältnisse enthalten, kann der Anteil der nicht-volumenkonstanten Verformung an der Gesamtsetzung noch größer sein. Es ist aufgrund der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse zwingend erforderlich, den Anteil der nicht-volumenkonstanten Verformung bei der Setzungsprognose von Abfallkörpern zu berücksichtigen.

Der Anteil der nicht-volumenkonstanten Verformung an der Gesamtsetzung kann im Labor mit einer Kombination aus Ödometer- und Kapillarpyknometerversuchen bestimmt werden, wie dies in Kapitel 4.1 beschrieben ist. Dabei wird die Materialdichte nach jeder Laststufe im

Ödometer mit dem Kapillarpyknometer ermittelt. Aus der Veränderung der Materialdichte lässt sich ein Rückschluss auf das freigesetzte Luftporenvolumen ziehen und der Setzungsanteil der nicht-volumenkonstanten Verformung an der Gesamtverformung berechnen.

Die Versuche dieser Arbeit haben zudem gezeigt, dass die nicht-volumenkonstante Verformung fester Bestandteile im Abfall zu einem nicht-bodenähnlichen Verhalten des Abfalls führt. Die bisher übliche Vorgehensweise der Übertragung von Theorien aus der Bodenmechanik auf das mechanische Verhalten von Abfällen ist daher nicht zulässig. Dies gilt selbst für den in dieser Arbeit untersuchten mechanisch-biologisch behandelten Abfall mit einer Maximalstückgröße von 8 mm, der optisch bodenähnlich wirkt.

Weiterhin wurde nachgewiesen, dass die in der Bodenmechanik häufig übliche (und dort meist auch zulässige) Mehrfachverwendung von Materialien in Laborversuchen für die Untersuchung an Abfällen oft nicht zulässig ist. Da ein Teil der Zerstörung der Bestandteile bereits bei der Verdichtung erfolgt, ist die Mehrfachverwendung auch in anderen Versuchen, bei denen eine Verdichtungsarbeit aufgebracht wird, wie z. B. Proctorversuch oder Untersuchung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, ausgeschlossen.

Einen weiteren entscheidenden Einfluss auf das Setzungsverhalten von Abfallkörpern übt die unterschiedliche Verformbarkeit von Bestandteilen mit gleichem Steifemodul aber anderer Stückform aus (Modellvorstellung in Kap. 3.1.1), die in bodenmechanischen Theorien ebenfalls nicht berücksichtigt wird. Daher wurden erste Versuche mit der Stoffgruppe des weichen Kunststoffes durchgeführt. Diese Versuche haben gezeigt, dass dieser Einfluss bei geringen Auflasten sehr klein ist, bei großen Auflasten jedoch eine entscheidende Größenordnung besitzt (Kap. 4.2.2), die bei Setzungsprognosen berücksichtigt werden muss.

Weiterhin wurde in Kapitel 4.2 der Einfluss der anderen im Abfall enthaltenen Stoffgruppen, wie z. B. Inertmaterialien, Organik oder harter Kunststoff, auf das Setzungsverhalten untersucht und mit bereits bestehenden physikalischen Vorstellungen erklärt.

Aus den Ergebnissen der im Kapitel 4.2 beschriebenen Versuche wurden Erkenntnisse und Größenordnungen zum Einfluss der einzelnen Stoffgruppen erarbeitet. Mit diesen Ansätzen ist es zukünftig möglich, Setzungsabschätzungen durchzuführen, die nicht auf vielen, aufwendigen Ödometerversuchen sondern auf einer Kombination von Abfallanalysen und wenigen Ödometerversuchen basieren (Kap. 4.5).

Bei der Ermittlung von Kennwerten in Laborversuchen ist es grundsätzlich erforderlich, dass diese Werte auf In-Situ-Verhältnisse übertragen werden können. Weiterhin müssen die Ergebnisse, die in Versuchsgeräten mit unterschiedlichen Probenabmessungen durchgeführt

werden, vergleichbar sein. Da sich die Randbedingungen im Labor mit der Probengröße und Geräteabmessung ändern und diese sich wiederum von denen in-situ unterscheiden, ist es erforderlich, den Einfluss der Randbedingungen zu kennen. Dieser Einfluss ist auch bei Ödometerversuchen an Böden festzustellen, weshalb zwischen 1950 und 1965 zahlreiche Versuche durchgeführt wurden, die den Einfluss des Verhältnisses zwischen maximaler Partikelgröße und Probengröße im Ödometer sowie der Wandreibung auf die Versuchsergebnisse untersuchten. Um vergleichbare Ergebnisse in verschiedenen Laboratorien zu erhalten und die Übertragbarkeit auf In-Situ-Verhältnisse zu verbessern wurden die Probengrößen sowie die Verhältnisse zwischen maximaler Korngröße und Geräteabmessung vereinheitlicht (DIN 18135 (Entwurf, 1999), Ö-NORM B 4420 (1989)).

Da sich das mechanische Verhalten von Abfällen von dem des Bodens unterscheidet und die Stückgröße von Abfällen eine Untersuchung in bodenmechanischen Ödometern nicht zulässt, wurden in dieser Arbeit erste Versuche durchgeführt, um den Einfluss der Probengrößen und der Verhältnisgrößen zwischen Probengröße und Stückgröße zu bestimmen. Dazu wurde eine Gerätefamilie, bestehend aus Ödometern mit drei unterschiedlichen Versuchsbehältergrößen errichtet (Kap. 3.3). Die Wandreibung wurde bei den Großödometern durch zwei geschmierte Teflonfolien konstruktiv reduziert. Da die Wandreibung trotz der Reduzierung noch einen Einfluss auf die in der Probe wirkende Spannung besitzt, wurde für die Großödometer der Einfluss der Wandreibung ermittelt. Die Verminderung der in der Probe wirkenden Spannung betrug - trotz der konstruktiven Reduktion der Wandreibung – ca. 10% der aufbrachten Spannung.

Bei den Versuchen zur Bestimmung der Wandreibung zeigte sich weiterhin, dass die Wandreibung bei der Untersuchung von Abfall etwa um den Faktor 3 größer ist als bei der Untersuchung an Böden (Kap. 3.3.4.1). Diese Ergebnisse zeigen daher u. a., dass auch die Erddrucktheorie, welche in der Bodenmechanik die Grundlage zur Berechnung der Wandreibung bildet, nicht auf Abfälle übertragen werden kann.

Für die Untersuchungen mit den unterschiedlich großen Ödometertypen zeigte sich, dass ein Mindestverhältnis von Probenhöhe zu maximaler Stückgröße von 4 keinesfalls unterschritten werden darf, da sich die Ergebnisse sonst nicht auf andere Versuchsgerätegrößen und damit auch nicht auf In-Situ-Verhältnisse übertragen lassen (Kap. 4.4). Für das verwendete mechanisch-biologisch behandelte Grundmaterial R mit einer maximalen Stückgröße von 8 mm stellte sich heraus, dass Bemessungsergebnisse auf der „sicheren Seite“ erhalten werden, wenn ein Größenverhältnis zwischen maximaler Stückgröße und Probenhöhe von 1:15 eingehalten wird. Bei geringeren Verhältnissen können Ergebnisse auf der „unsicheren

Seite“ erhalten werden, was im Falle einer Setzungsprognose zu einer Unterschätzung der Setzungen führt. Bei größeren Verhältnissen als 1:15 liegen die Ergebnisse bei großen Auflasten in einer ähnlichen Größenordnung, wobei die Reproduzierbarkeit der Parallelversuche sich weiter verbessert. Diese Ergebnisse wurden durch weitere Untersuchungen an den Materialien NW und Pinnow bestätigt.

Als wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist festzuhalten, dass sich die Verhältnisse in Abfallkörpern nicht mit bodenmechanischen Theorien erklären lassen.

Ausgehend von den geringen Kenntnissen zum Setzungsverhalten von Abfallkörpern wurden deshalb Modellvorstellungen zu den physikalischen Grundlagen des Setzungsverhaltens entwickelt und in Laborversuchen qualitativ und quantitativ bewiesen. Der Anteil der nicht-volumenkonstanten Verformung fester Bestandteile (NVV) und der verschiedenen Verformbarkeit von Bestandteilen gleichen Steifemoduls aber unterschiedlicher Stückform besitzt eine entscheidende und messtechnisch nachweisbare Größenordnung.

Eine Mehrfachverwendung von Abfall in Laborversuchen mit Verdichtungsarbeit ist nicht möglich.

Der Einfluss der maßgeblich zum Setzungsverhalten beitragenden Stoffgruppen wurde labor-technisch nachgewiesen und mit physikalischen Vorstellungen erklärt.

Abschließend wurde der Einfluss der Probenabmessungen bzw. der Verhältnisse zwischen Probengrößen und maximaler Stückgröße auf die Versuchsergebnisse untersucht, um eine Übertragbarkeit von Laborversuchsergebnissen auf In-Situ-Verhältnisse zu ermöglichen.

6. Literatur

- ABFALLABLAGERUNGSVERORDNUNG (2001): Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen und über biologische Behandlungsanlagen, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin
- BEAVEN, R. P.; POWRIE, W. (1995): Hydrogeological and geotechnical properties of refuse using a large scale compression cell, Fifth International Landfill Symposium, Sardinia, Italy
- BIENER, E.; SASSE, T.; WEMHOFF, T.; BIESIADA, W. (1995): Stability and settlement problems in old landfill remediation, Fifth International Landfill Symposium, Sardinia, Italy
- BOCKREIS, A.; BROCKMANN, C.; JAGER, J (2000).: Testmethoden für die Bewertung der Ablagerungseignung von MBA-Abfällen, Brandenburgische Umwelt Berichte, Band 6
- BOUTWELL, G. P.; FIORE, V. A. (1995): Settlement of clay cover on saturated garbage; Geoenvironment 2000, ASCE Geotechnical Special publication No. 46, New York, USA
- CHARLES, J. A. (1993) : Building on fill : geotechnical aspects; Building research establishment, Watford, England; Construction research communication Ltd., London, England
- CICHONSKI, P.; HEINRICHS, D.; SPIELBERG, J. (1998): Abfallmenge und Abfallzusammensetzung im Rhein-Sieg-Kreis, in: Müllhandbuch Nr. 1744, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- COLLINS H.-J. (1996): Ist das Alter einer Siedlungsabfalldeponie ein Kennwert für mechanisches Verhalten?; Seminar Deponie und Altlasten, Aachen; A. A. Balkema, Rotterdam
- COLLINS, H.-J.; RAMKE, H.-G. (1986): Einfluß der Entwässerung (Setzung) auf die Nutzungsdauer von Deponien gemischter Abfälle), Endbericht zum Forschungsvorhaben 2091 – B V e 26/81 des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kunst
- DACH (1998): Zur Deponiegas- und Temperaturentwicklung in Deponien mit Siedlungsabfällen nach mechanisch-biologischer Abfallbehandlung, Schriftenreihe WAR der Technischen Universität Darmstadt, Heft 107
- DGGT (1999): Sitzung der UAG 2 (Mechanik der Abfälle) im Arbeitskreis 6.1(Geotechnik der Deponiebauwerke) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) am 17.3.1999 am Leichtweiß-Institut der Technischen Universität Braunschweig
- DIN 18123: Bestimmung der Korngrößenverteilung, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin (9/96)
- DIN 18124: Bestimmung der Korndichte, Kapillarpyknometer – Weithalspyknometer, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin (9/89)
- DIN 18127: Proctorversuch, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, (2/93)

-
- DIN 18130: Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin (11/89)
- DIN 18135 (Entwurf) (1999): Eindimensionaler Kompressionsversuch, Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DIN 4016 (Entwurf) (1958): Richtlinien für die Bestimmung der Zusammendrückbarkeit, Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DIN ISO 3310 (2/92): Analysensiebe – Anforderungen und Prüfung
- DINGER, B. (2001): Mündliche Mitteilung von Herrn Dipl.-Holzwirt B. Dinger,
- DODT, M. E.; SWEATMAN, M. B.; BERGSTROM, W. R. (1987): Field measurements of landfill surface settlements, in: Geotechnical practice for waste disposal '87, Ann Arbor, USA
- EAU (1990): Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen Häfen und Wasserstraßen, 8. Auflage, Ernst und Sohn Verlag, Berlin
- EDIL, T. K.; RANUETTE, V. J.; WUELLNER, W. W. (1990): Settlement of municipal refuse, in: Landva and Knowles: Geotechnics of waste fills – Theory and practice, ATSM, Philadelphia, USA
- EGLOFFSTEIN, T.; BURGHARDT, G.; MAINKA, A. (1996): Setzungsbetrachtungen bei Oberflächenabdichtungssystemen von Siedlungsabfalldeponien, Müll und Abfall, Heft 5
- EISMANN (2001): Mündliche Mitteilung, Borealis Deutschland, Düsseldorf
- EI-FADEL, M.; FINDIKAKIS, A. N.; LECKIE, J. (1996): Numerical modelling of generation and transport of gas and heat in landfills; Systemity analyses, waste management and research, Heft 14
- EPPERS (2001): Mündliche Mitteilung, Dow Deutschland Inc., Eschenborn
- ESCHKÖTTER, H. (1996): Der Einfluss des Faserzustandes auf die Festigkeitseigenschaften von Siedlungsabfall; Diplomarbeit am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, unveröffentlicht
- FREDLUND, D. G., NISHIMURA, T. (1999): Unconfined compression of an unsaturated silty soil subjected to high total suction: Slope Stability Engineering, Matsujama, Japan; A. A. Balkema, Rotterdam
- FRICKE, K., G. ZIEHMANN, K. MÜNNICH (2000): Auswirkungen der Abfallablagerungsverordnung, KA Wasserwirtschaft Abwasser Abfall,
- FRICKE, K., MÜLLER, W. (1999): Stabilisierung von Restmüll durch mechanisch-biologische Behandlung und Auswirkung auf die Deponierung; Endbericht zum BMBF-Verbundvorhaben Biologische Vorbehandlung von zu deponierenden Abfällen, Teilvorhaben 1480945
- FRIEDRICH, E, FRICKE, K. (1998): Gleichwertigkeitsnachweis für Ratsvorwerk-Lübben, Erich Schmidt Verlag Berlin

- GDA-EMPFEHLUNGEN (1997): Geotechnik der Deponien und Altlasten, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (Hrsg.), 3. Auflage, und Fortschreibung in ZS Bau-technik, Ernst und Sohn Verlag, Berlin
- GERTLOFF, K.-H. (1993): Setzungsanalyse und Setzungsprognose für eine Hausmüll-deponie; Zeitschrift für Vermessungswesen, Deutscher Verein für Vermessungswesen e. V., Heft 11
- GERTLOFF, K.-H. (1993b): Setzungsanalyse und Setzungsprognose für eine Hausmüll-deponie; Müll und Abfall, Heft 10/93
- GERTLOFF, K.-H. (1996): Ein Schichten-Setzungsmodell für eine Deponie; Zeitschrift für Vermessungswesen, Deutscher Verein für Vermessungswesen e. V., Heft 5
- GIBSON, R. E.; LO, K. Y. (1961): Theory of solid exhibiting secondary compression, ACTA Polytechnica Scandinavica
- GNUSCHKE, K. (2000): Veränderung der mechanischen Festigkeit, sowie der Wasser- und Gasdurchlässigkeit durch mechanisch-biologische Vorbehandlung, Studienarbeit, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig (unver-öffentlicht)
- GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; TANCREDI, G. (1995): The use of triaxial tests for the mechanical characterization of MSW, Fifth International Landfill Symposium, Sardinia, Italy
- GROSSER, D. (1997): Die Hölzer Mitteleuropas, Springer Verlag Berlin
- GUDEHUS, G. (1990): Erddruckermittlungen, in Grundbautaschenbuch, Teil 1, 4. Auflage, Ernst und Sohn Verlag, Berlin
- HÖRING, K. (2000): Schriftliche Mitteilung, Rethmann Anlagenplanung, Lünen
- JESSBERGER, H.-L, KOCKEL, R. (1991). Mechanical properties of waste materials; XV. Ciclo di Conference die Geotecnica die Torino, Italien
- JESSBERGER, H.-L.; GÜTTLER, U.; GRUNDHOFF, T.; KÖNIG, D. (1995): Sammlung und Auswertung von Feldmessungen zum Verformungsverhalten von Abfalldéponien unter Berücksichtigung der Abfalleigenschaften; Forschungsbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Az: Gü/2-1
- JESSBERGER, H.-L.; KOCKEL, R. (1993): Abschlußbericht und 1. Nachtrag zum Abschlußbericht zu den „Untersuchungen zur Standfestigkeit und Zusammendrück-barkeit von Mischabfall in Zusammenhang mit Standsicherheitsberechnungen für die Déponie Hannover, unveröffentlicht
- KEUSCH, J. (1991): Langzeitverhalten déponierter Klärschlämme auf Mono- und Misch-deponien; Tagung „Klärschlamm“, Akademie für kommunalen Umweltschutz, Bad Iburg
- KEZDI, A. (1968): Handbuch der Bodenmechanik, Band 1, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
- KOCKEL, R. (1995): Scherfestigkeit von Mischabfall im Hinblick auf die Standsicherheit von Déponien, Schriftenreihe des Instituts für Grundbau der Ruhr-Universität Bochum, Heft 24, Eigenverlag

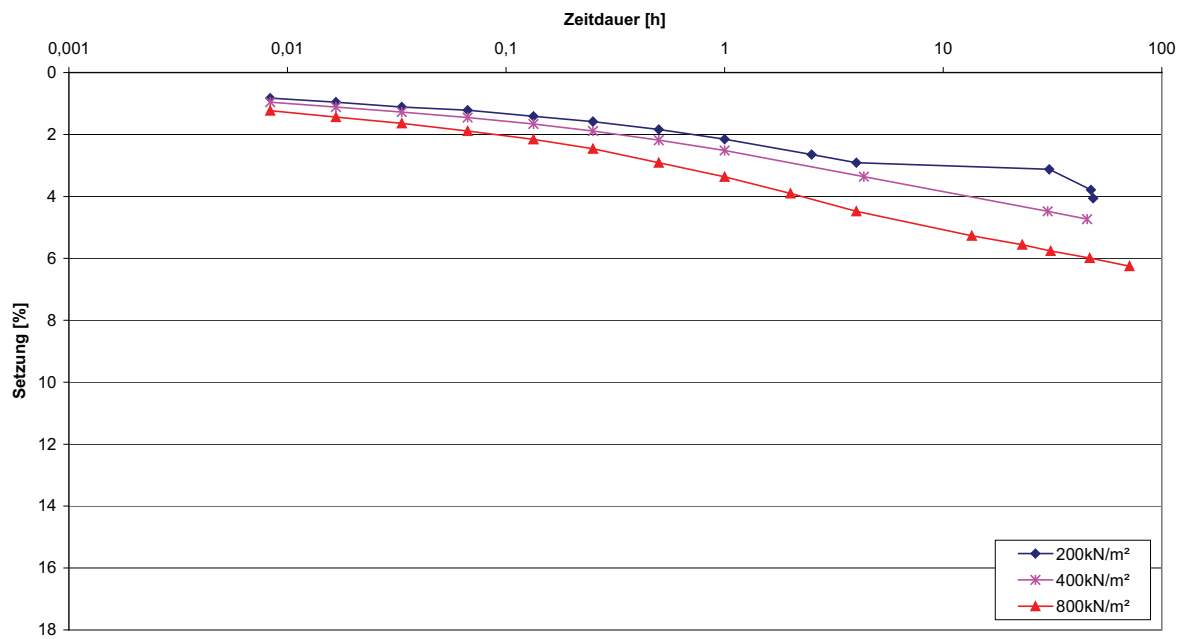
-
- KOLLMANN, F. (1982): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, 2. Auflage, Springer Verlag Berlin
- KÖLSCH, F. (1994): Ursachen von Sackungen und Setzungen im Deponiekörper und deren Auswirkungen auf Deponieoberflächen, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig: Geotechnische Probleme im Deponie- und Dichtwandbau, Eigenverlag
- KÖLSCH, F. (1996): Einfluß der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall, Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Heft 133, Eigenverlag
- KÖLSCH, F. (2000a): Standsicherheit im Abfallkörper; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig: Vertikale und horizontale Abdichtungssysteme, Eigenverlag
- KÖLSCH, F. (2000b): Standsicherheit von Hausmülldeponien nach 2005, Müll und Abfall, Heft 6, Erich Schmidt Verlag Berlin
- KÖNIG, D.; KOCKEL, R. (1998): Ein Verfahren zur Abschätzung und Prognose von Oberflächensetzungen von Deponien, Bauingenieur, Heft 3,
- KOPF, M. (1991): Eine Revision der Konsolidierungstheorie, ZS Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Heft 4/91, Bertelsmann Verlag Gütersloh
- KRETZMAR, R. (1984): Kulturtechnisch-bodenkundliches Praktikum – Ausgewählte Laboratoriumsmethoden – Eine Anleitung zum selbstständigen Arbeiten an Böden, Institut für Wasserwirtschaft und Meliorationswesen, Christian-Albrechts-Universität Kiel
- LEIßE, B. (1992): Holzschutzmittel im Einsatz, Bauverlag, Wiesbaden
- MAAK, D. (2001): Reduzierung der Infiltrationsrate in Deponien für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle – Einflüsse der Einbautechnik, Dissertation am Leichtweiß-Institut, Technische Universität Braunschweig
- MITCHEL, J. K. (1993): Foundations of soil behaviour, Second Edition, John Wiley and Sons Inc., New York
- MÖLLER, U, GAY, C. G., KASSNER, W., KÖHLHOFF, D., LOLL, U. OTTE-WITTE, R. (1985): Neudefinition der Deponierfähigkeit von Abwasserschlämmen, BMFT Forschungsbericht 02-WS, Bochum
- MUHS/KANY (1954): Einfluß von Fehlerquellen beim Kompressionsversuch, ZS Fortschritt und Forschung im Bauingenieurwesen, Heft 17
- MÜNNICH, K. (1999): Hydraulische Kenngrößen von mechanisch-biologisch behandeltem Abfall, Zentrum für Abfallforschung, Technische Universität Braunschweig, Heft 14
- MÜNNICH, K.; ZIEHMANN, G. (2000): Abschlußbericht Mechanische Untersuchungen des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls der Deponie Pinnow, Landkreis Uckermark, unveröffentlicht
- NEFF, H. K.; GARTUNG, E. (2000): GDA-Empfehlung E 2-35, ZS Bautechnik Heft 9/2000, Ernst und Sohn Verlag, Berlin

- OBERMANN (1999): Modellierung des Wasserhaushaltes von Deponien vorbehandelter Siedlungsabfälle, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt, Heft 107
- Ö-NORM B4420 (1989): Untersuchung von Bodenproben; Grundsätze für die Durchführung und Auswertung von Kompressionsversuchen; Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- POWRIE, W.; BEAVEN, R. P.; HARKNESS, R. M. (1999): Applicability of soil mechanics principles to household waste, Seventh international waste management and landfill symposium, Sardinia, Italy
- RAMKE, H.-G. (1992): Druck-Setzungs-Verhalten biologisch vorbehandelten Hausmülls, Fachseminar Standsicherheiten im Deponiebau, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Eigenverlag
- RAO, S. K.; MOULTON, L. K.; SEALS, R. K. (1977): Settlement of refuse landfills, in: Geotechnical practice for disposal of solid waste materials, Ann Arbor, USA
- RODATZ, W. (1992): Vorlesungsumdruck Grundbau, Bodenmechanik, Unterirdisches Bauen, Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Eigenverlag
- ROSTASY, F. S. (1983): Baustoffe, Verlag Kohlhammer, Stuttgart
- SCHANZ (2000): 2. Workshop zum Netzwerk Teilgesättigte Böden, Bauhaus-Universität Weimar, 20.10.2000
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHNABEL, P. (1974): Lehrbuch der Bodenkunde, 9. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- SCHULTZE, E.; MUHS H. (1967): Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten, 2. Auflage, Springer Verlag Berlin
- SMOLTCZYK, U. (1990): Grundbau-Taschenbuch T1, 4. Auflage, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin
- SOLER, N. D.; HAMIDI, A. (1995): Time-dependent settlements in landfills, in: Innovative technologies for site remediation and hazardous waste management, Pittsburgh, USA
- SPILLMANN (1988): Einflüsse verschiedener Deponietechniken einwohnergleichen Müll- und Klärschlamm Massen auf die Nutzungsdauer von Abfalldeponien, Mitteilung des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Heft 96
- STEUBE (1996): Einfluß von ausgewählten Abfallkennwerten auf das Versichtungsverhalten und die Wasserdurchlässigkeit, Studienarbeit an der Technischen Universität Braunschweig, unveröffentlicht
- TANG, W. H.; ANGULO, M.; WILLIAMS, R. S. (1994): Probabilistic observation method for settlement based design of a landfill cover, in: Vertical and horizontal deformations of foundations and embankments, Texas, USA
- TECHNISCHE ANLEITUNG SIEDLUNGSABFALL (1993), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn
- TERZAGHI, K.; JELINEK, R. (1954): Theoretische Bodenmechanik, Springer-Verlag, Berlin

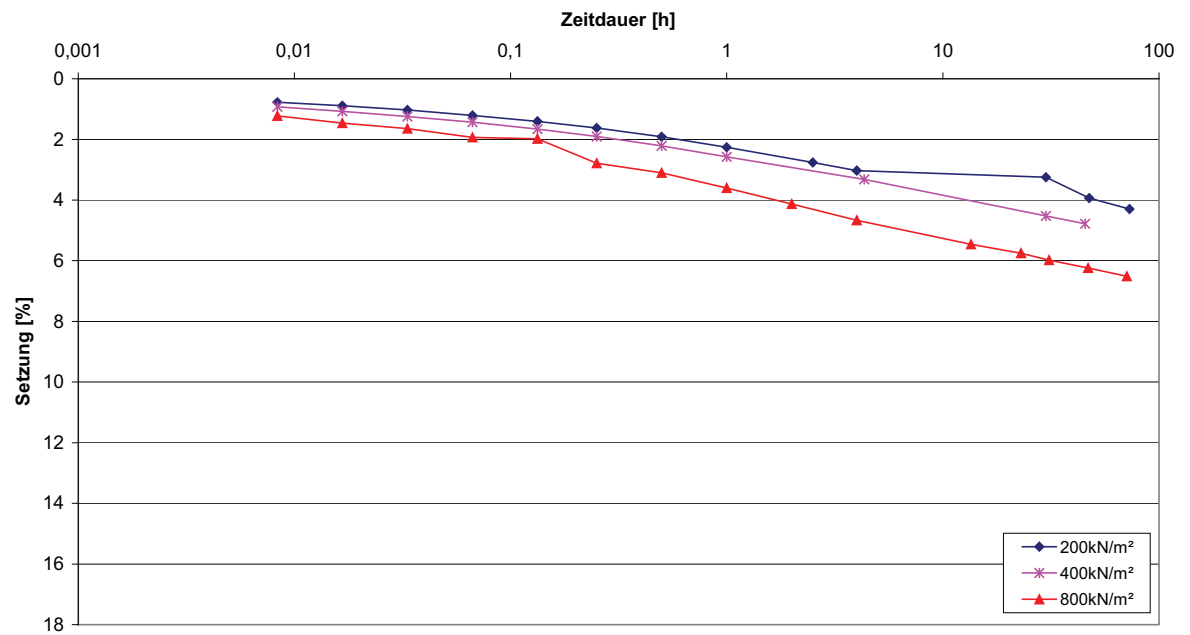
-
- THOMAS, S.; ABOURA, A. A.; GOURC, J. P.; GOTTELAND, P.; BILLARD, H.; DELINEAU, T.; GISBERT, T.; OUVRY, J. F.; VUILLEMIN, M. (1999): An In-Situ Waste Mechanical experimentation on a french landfill; Seventh International waste management and landfill symposium, Sardinia 99, Italy, CISA Environmental sanitary engineering centre
- TURK (1998): Der Einfluß der maximalen Abfallstückgröße auf den Gasaustausch bei dem Kaminzug-Verfahren, Mitteilung des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Heft 140
- VAN MEERTEN, J. J.; SELLMEIJER, J. B.; PEREBOOM, D. (1995): Prediction of landfill settlement, Fifth International Landfill Symposium, Sardinia, Italy
- WIEMER, K. (1982): Qualitative und quantitative Kriterien zur Bestimmung der Dichte von Abfällen in geordneten Deponien, Genehmigte Dissertation im Fachbereich Umwelttechnik der Technischen Universität Berlin
- YEN, B. C.; SCANLON, B. (1975): Sanitary landfill settlement rates; ZS Journal of the geotechnical engineering division, ASCE, May 1975
- ZAMINSKI, E. M.; KABIR, M. G.; HADDAD, A. (1994): Settlement evaluation for cap closure performance, in: Vertical and horizontal deformations of foundations and embankments, Texas, USA
- ZIEHMANN (1999): Bericht zum Setzungsverhalten des mechanisch-biologisch behandelten Abfalls der Deponie Meisenheim, Landkreis Bad Kreuznach, unveröffentlicht
- ZIEHMANN, G. (1994): Untersuchung der Auswirkungen von der Zugabe von Kalk auf einen Boden; Studienarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, unveröffentlicht
- ZIEHMANN, G. (1999): Veränderung des mechanischen Verhaltens durch die mechanische und biologische Vorbehandlung, Veröffentlichungen des Zentrums für Abfallforschung der Technischen Universität Braunschweig, Heft 14, Eigenverlag

Anlagen

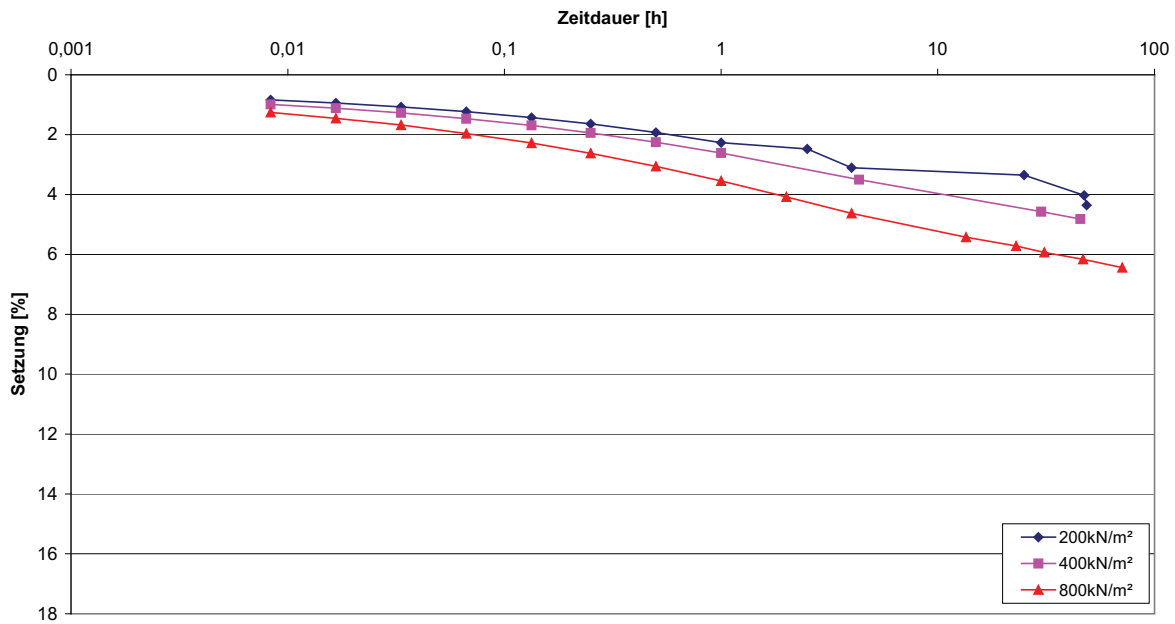
Zeit-Setzungsverläufe der Versuche in den Ödometern



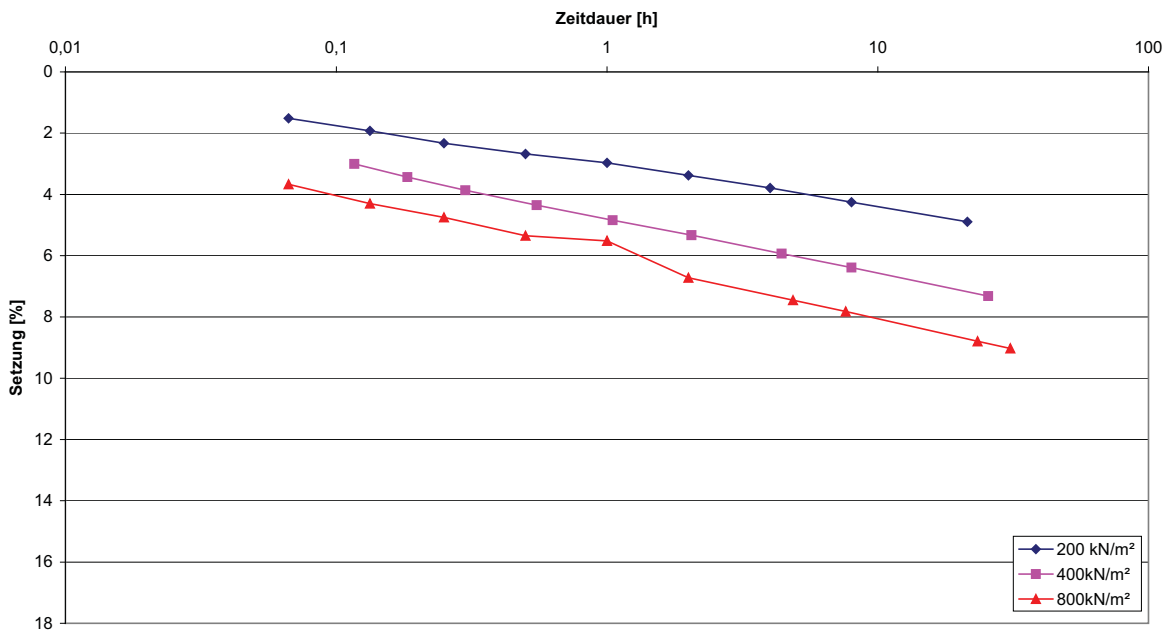
Anlage 1.1: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches GB1_1



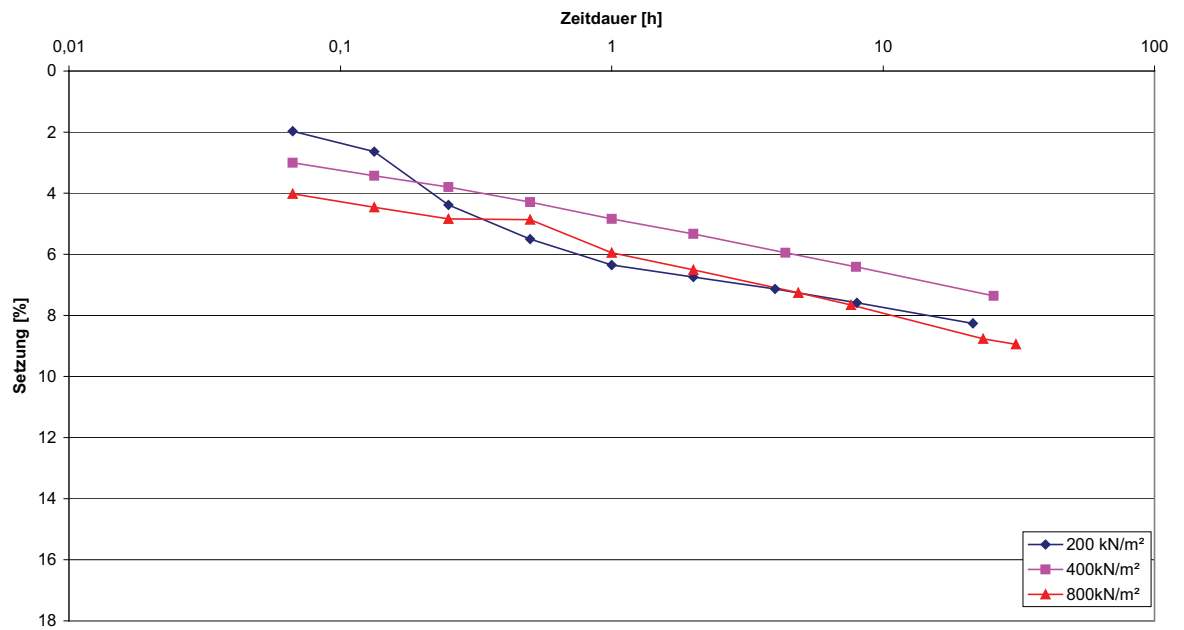
Anlage 1.2: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches GB1_2



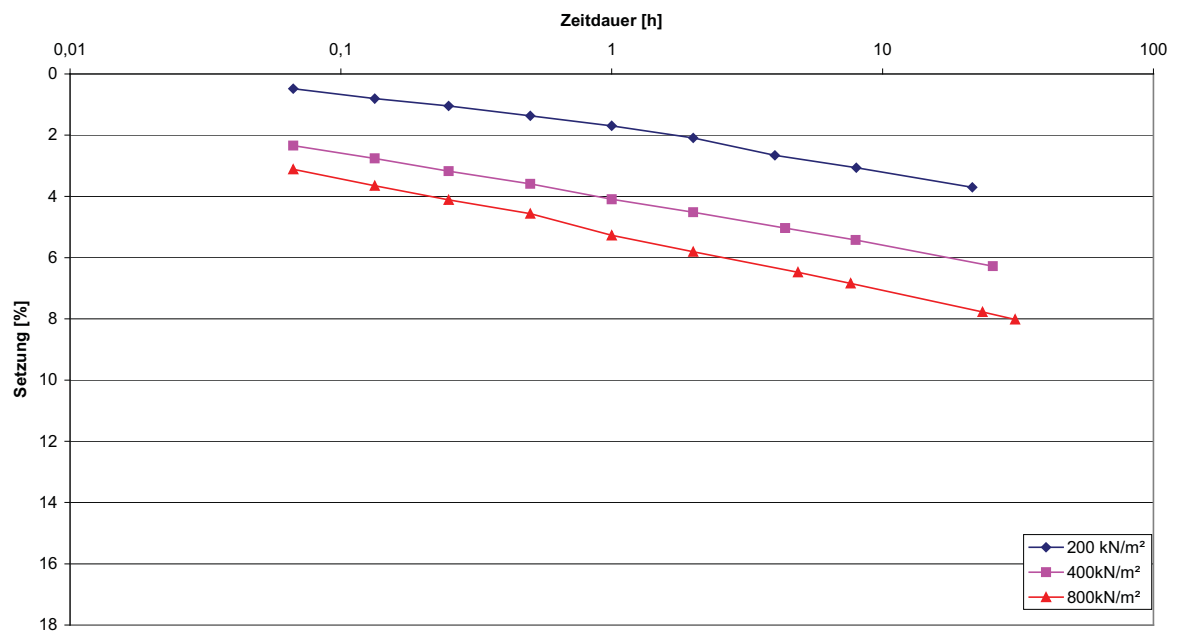
Anlage 1.3: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches GB1_3



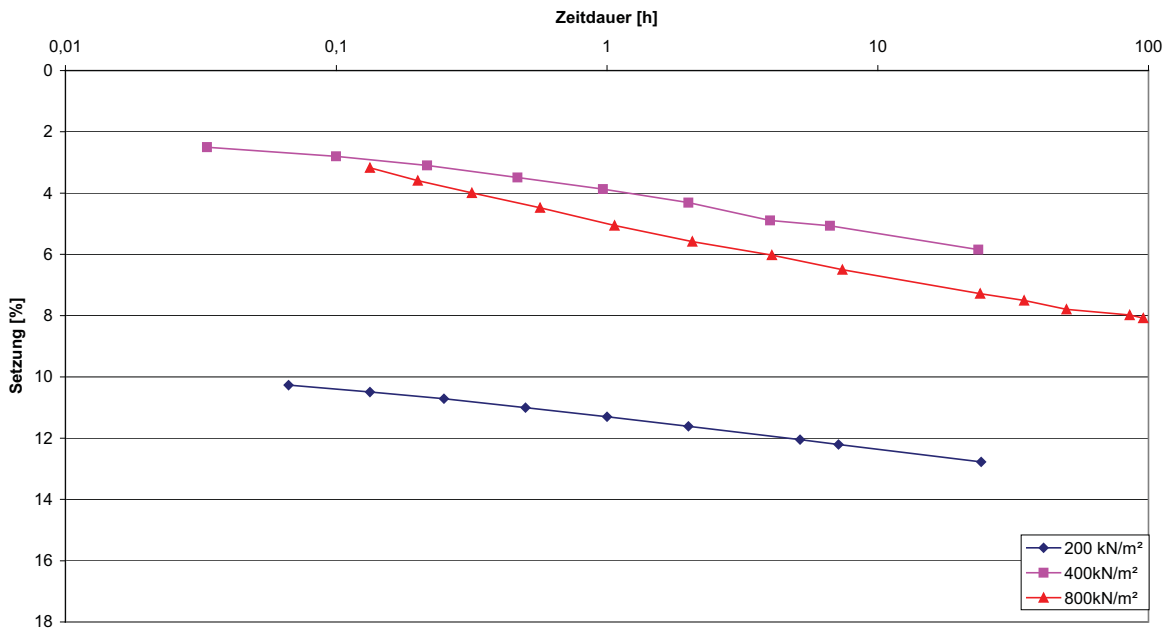
Anlage 1.4: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches GB6_1



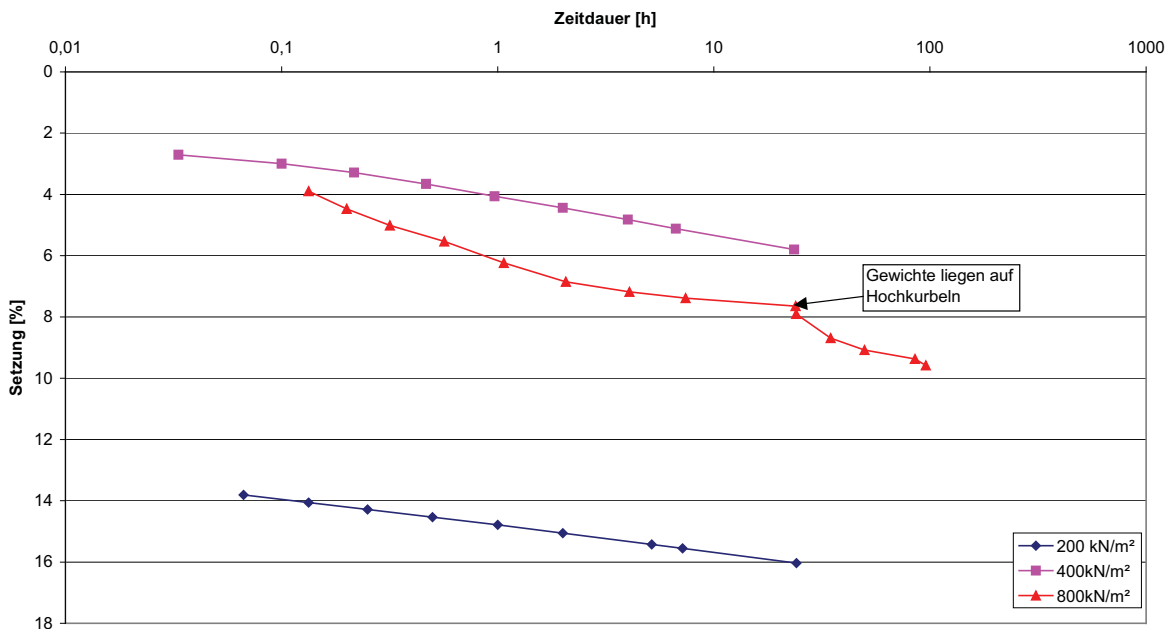
Anlage 1.5: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches GB6_2



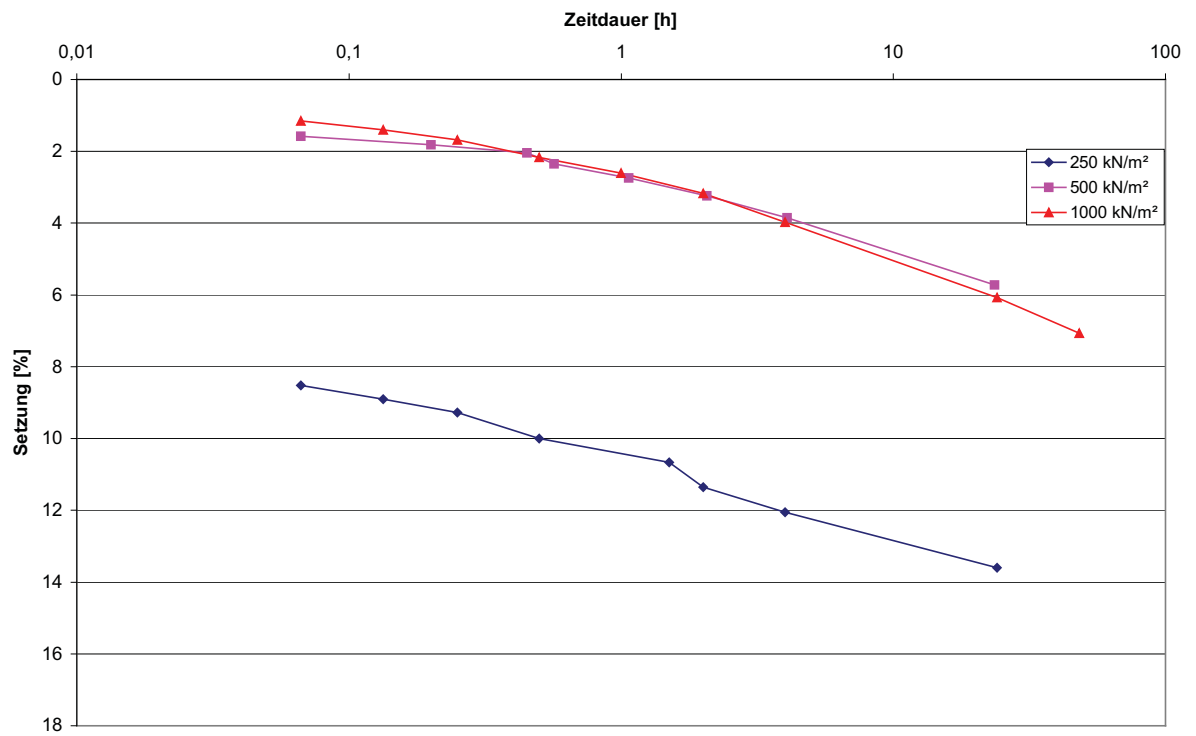
Anlage 1.6: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches GB6_3



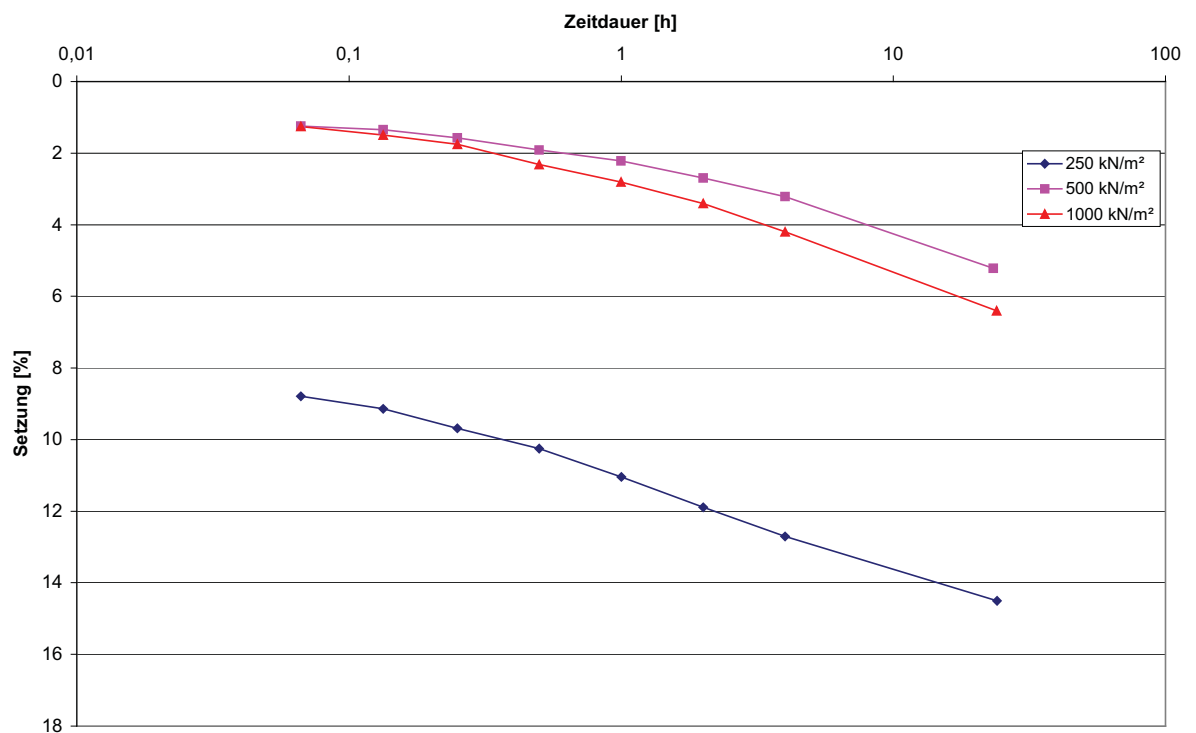
Anlage 1.7: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches GB14_1



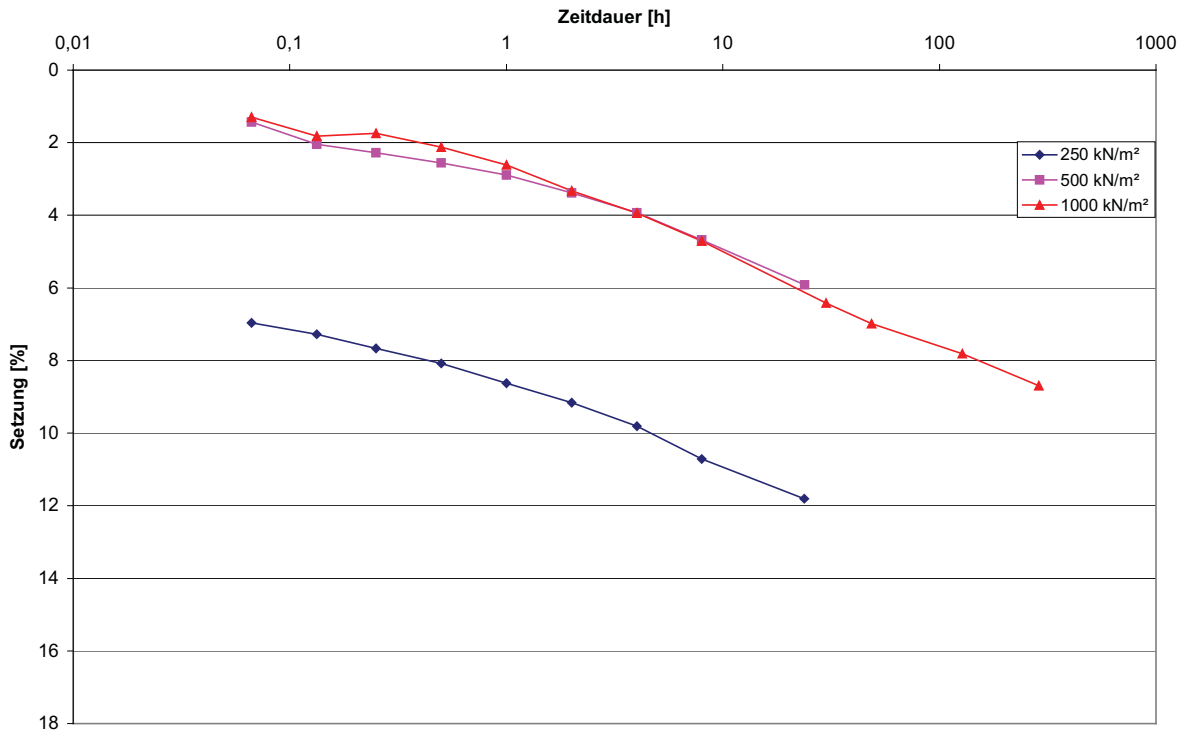
Anlage 1.8: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches GB14_2



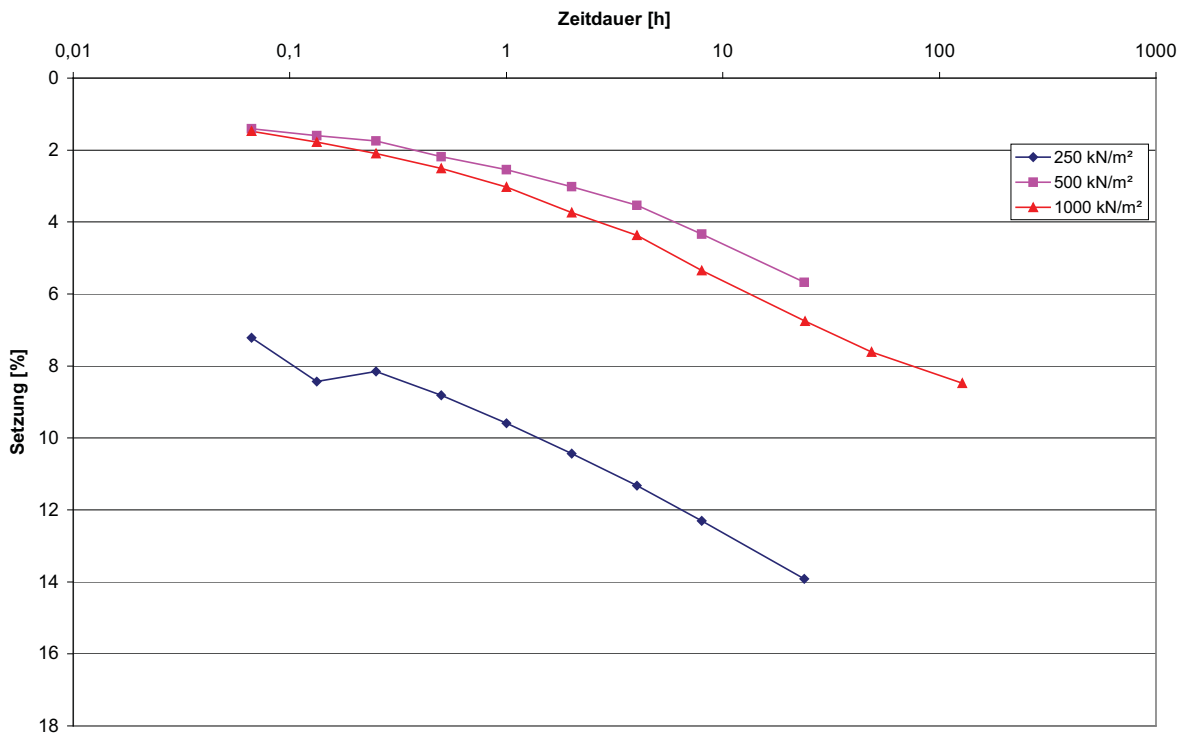
Anlage 2.1: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V5_1



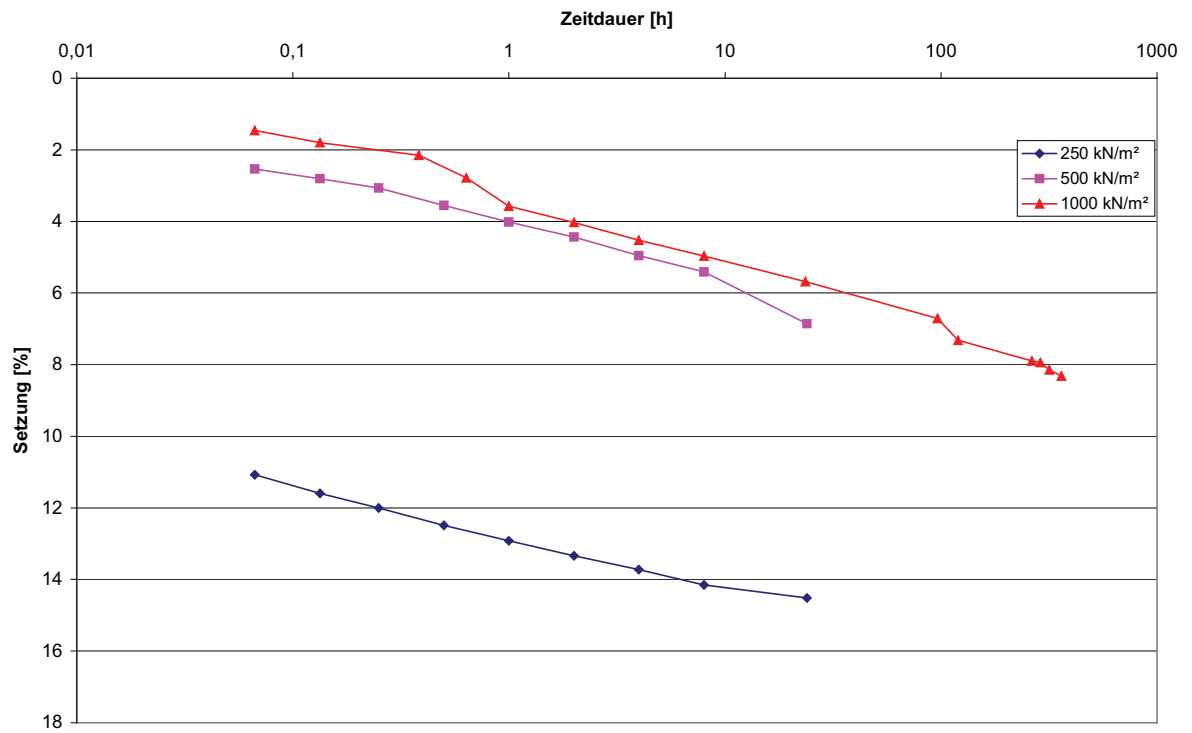
Anlage 2.2: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V5_2



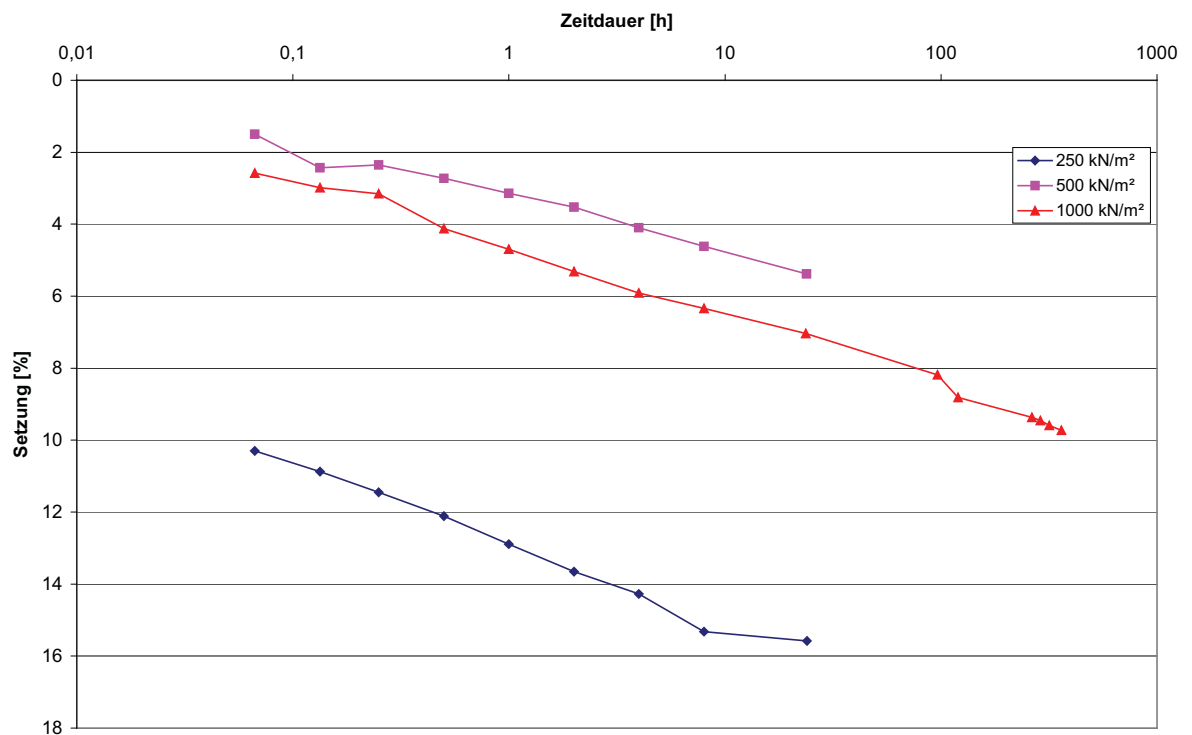
Anlage 2.3: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V6_1



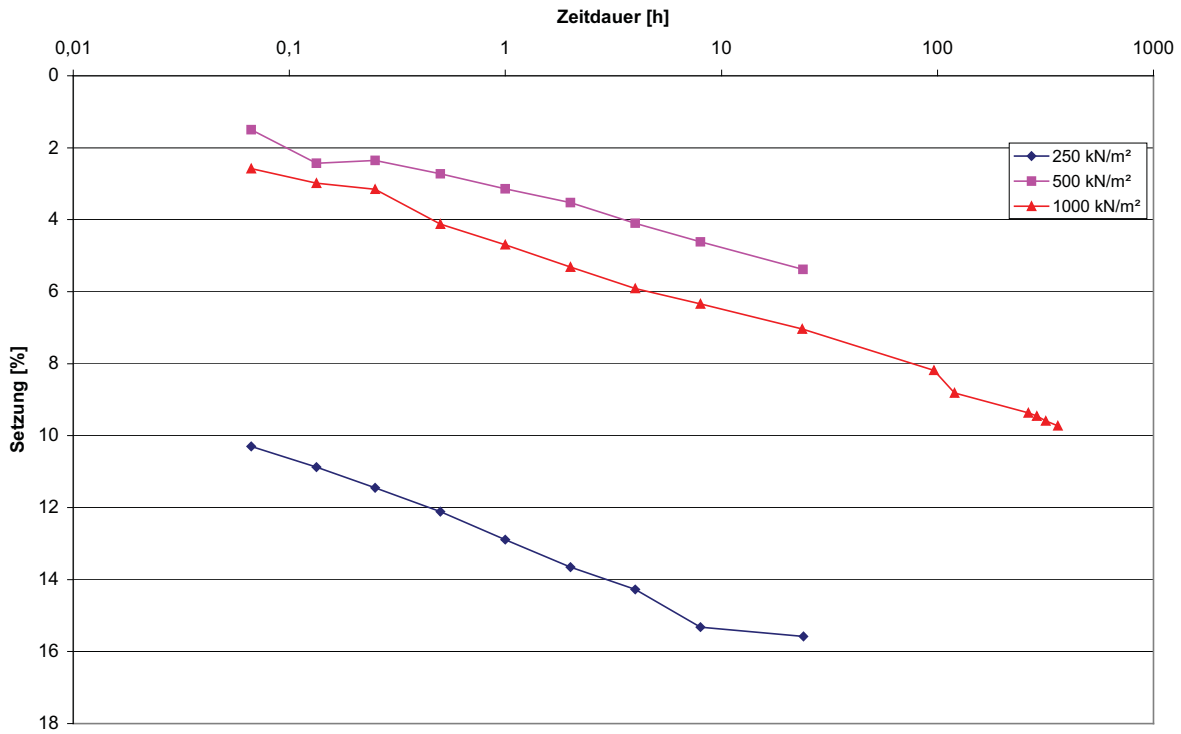
Anlage 2.4: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V6_2



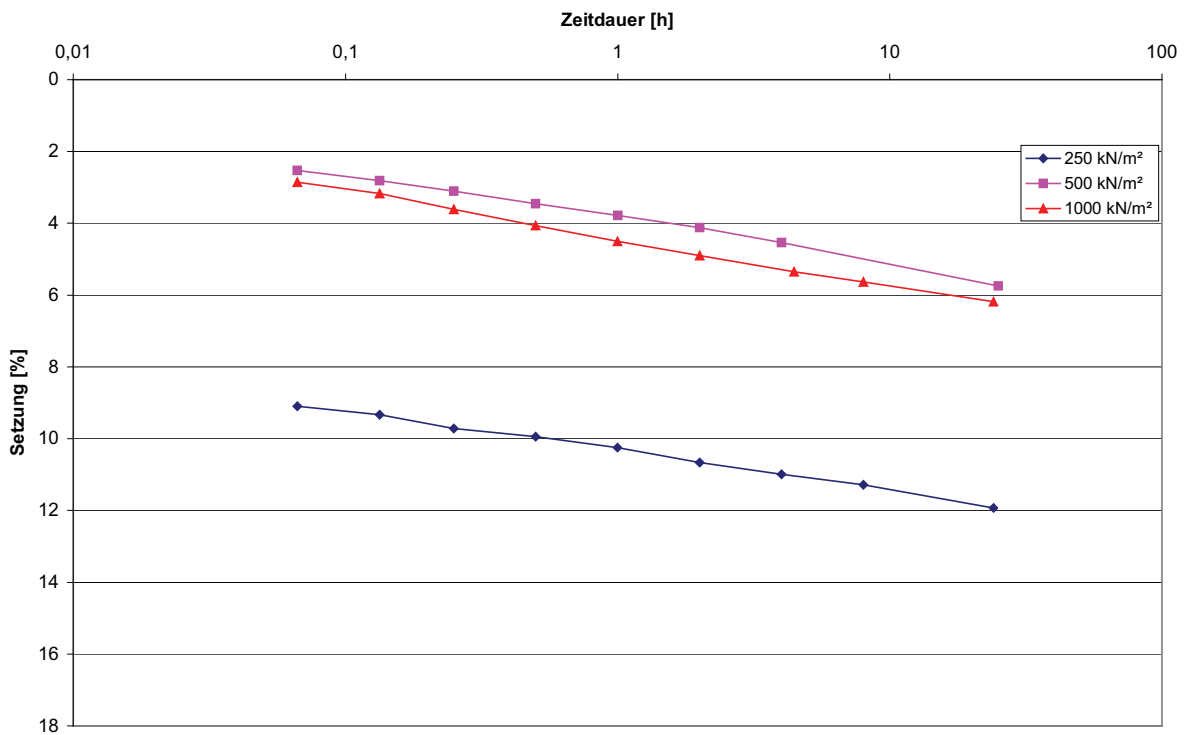
Anlage 2.5: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V7_1



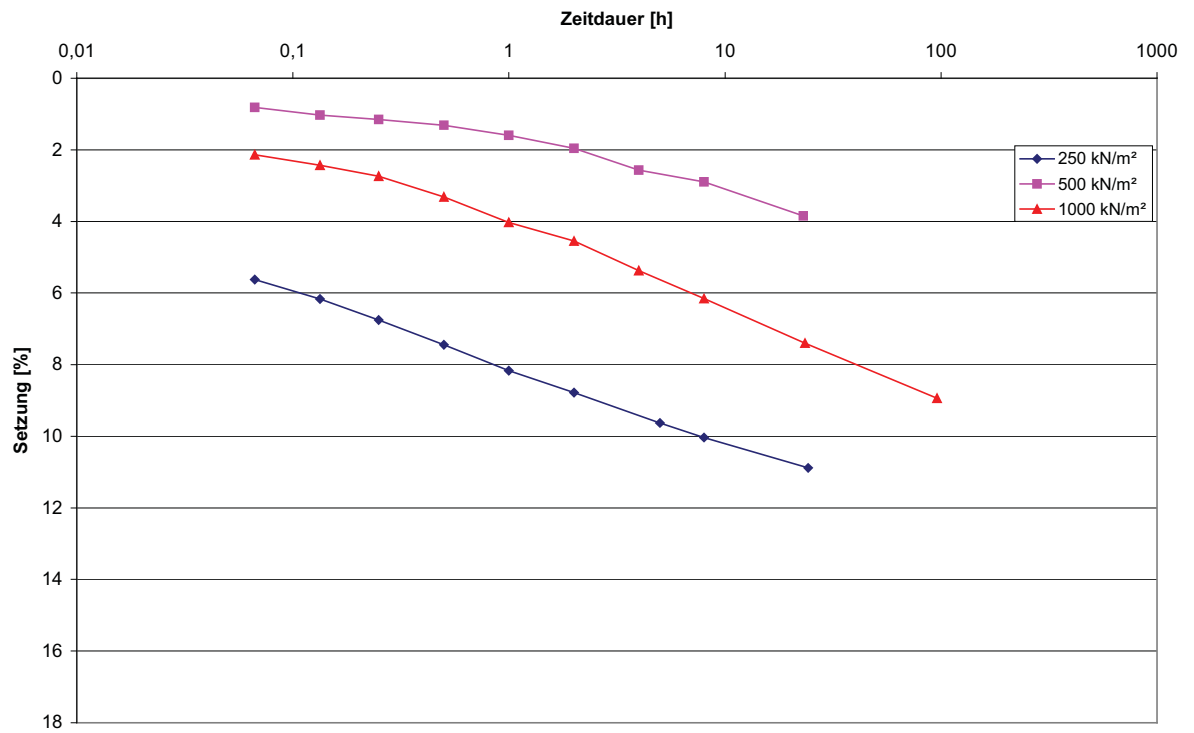
Anlage 2.6: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V7_2



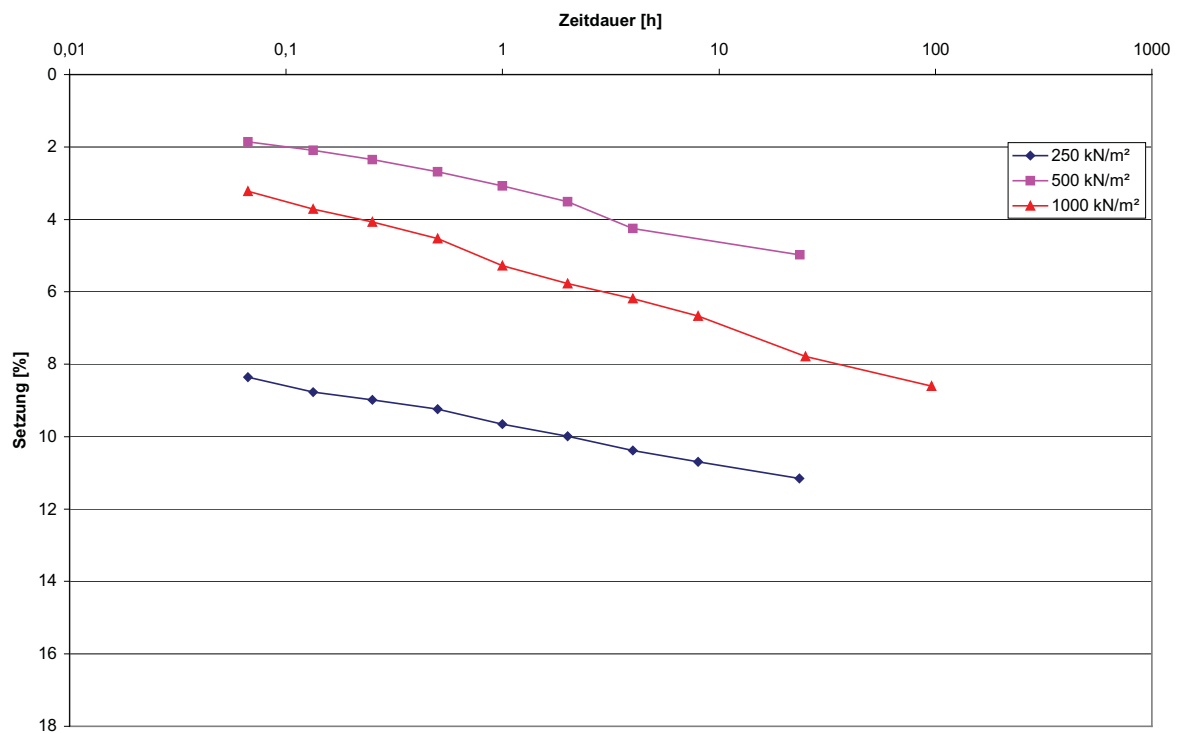
Anlage 2.7: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V8_1



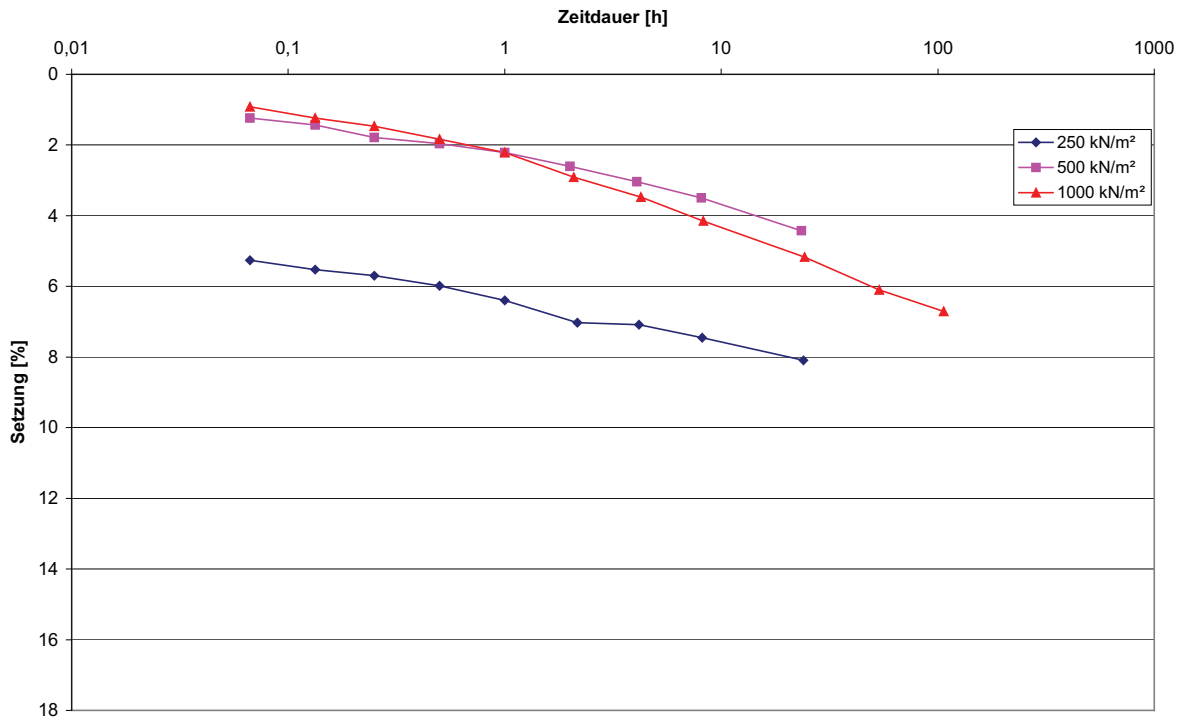
Anlage 2.8: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V8_2



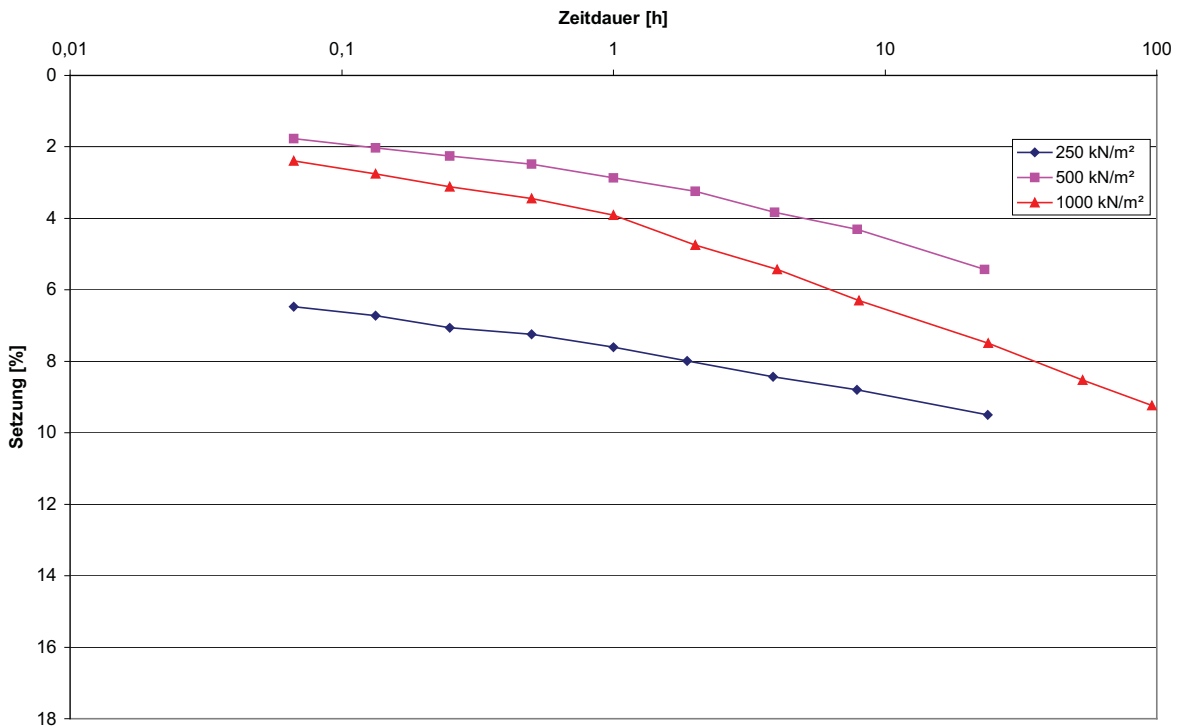
Anlage 2.9: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V12_3



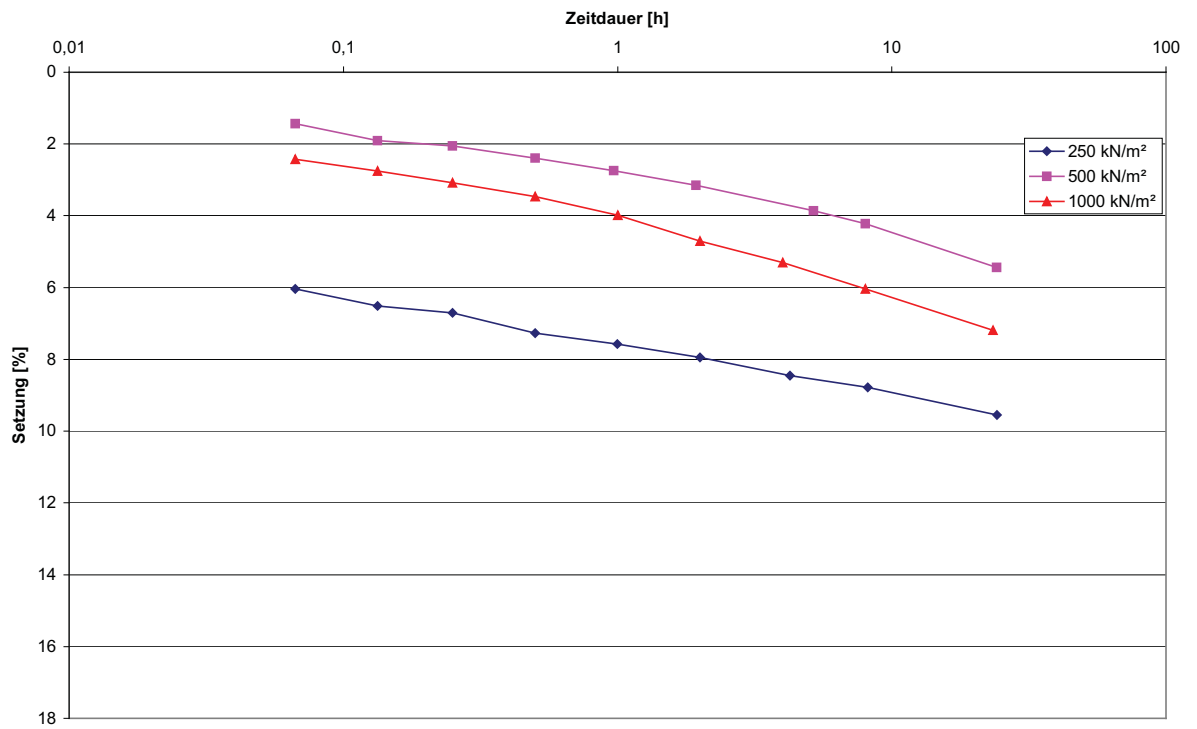
Anlage 2.10: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V13_3



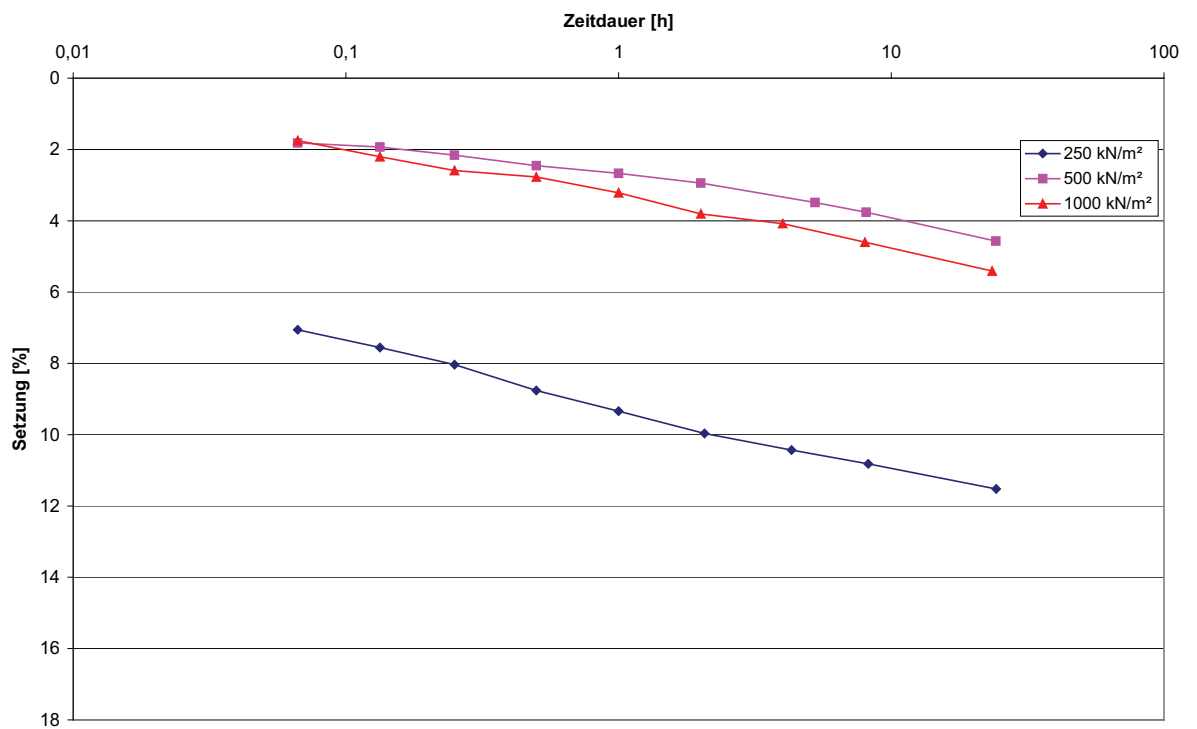
Anlage 2.11: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V15_1



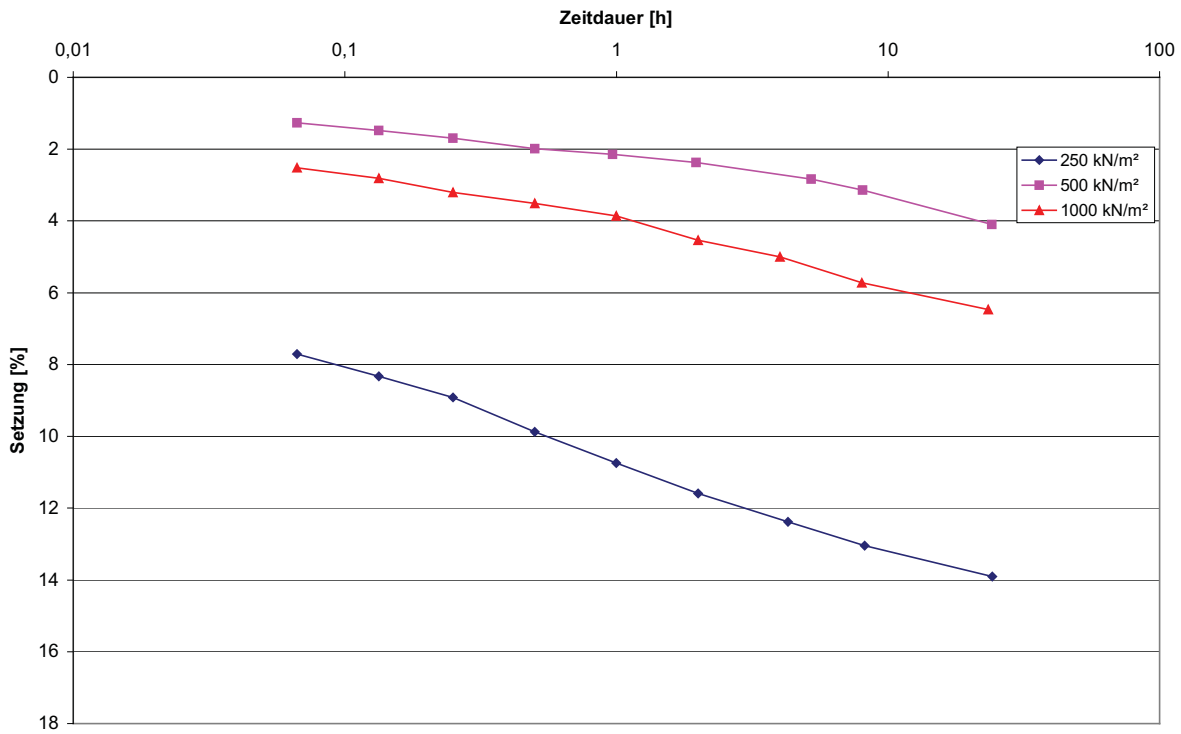
Anlage 2.12: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V16_1



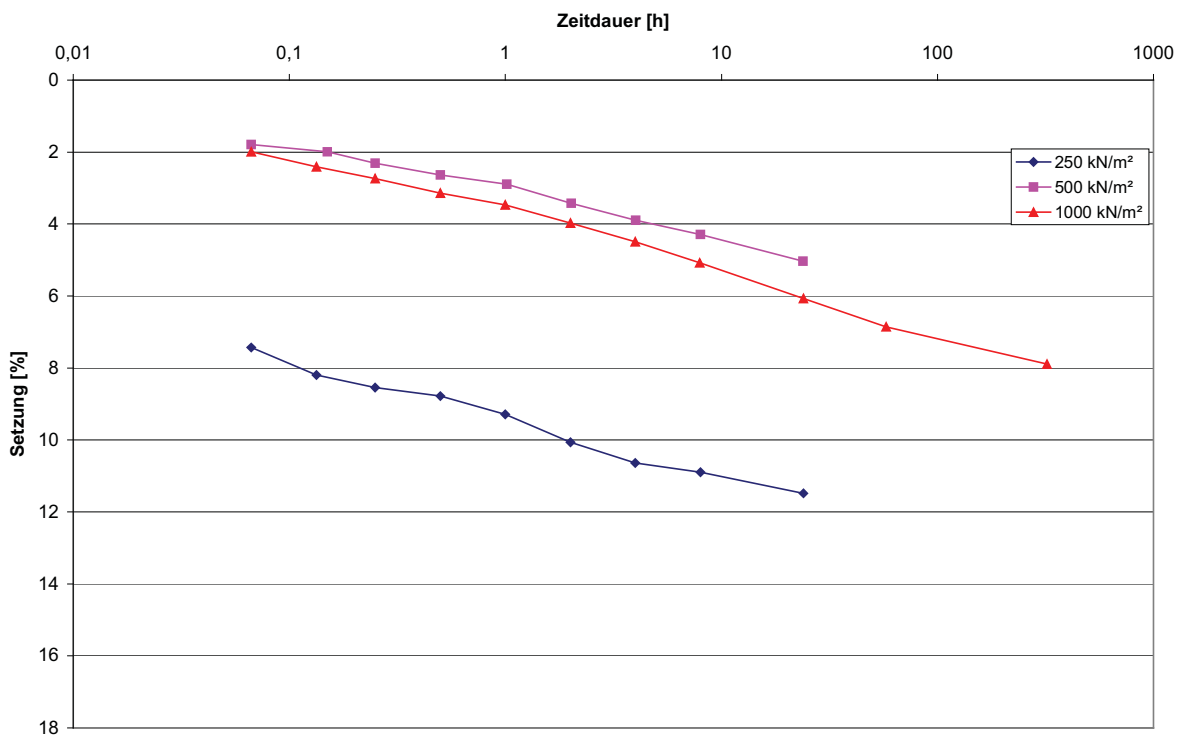
Anlage 2.13: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V16_2



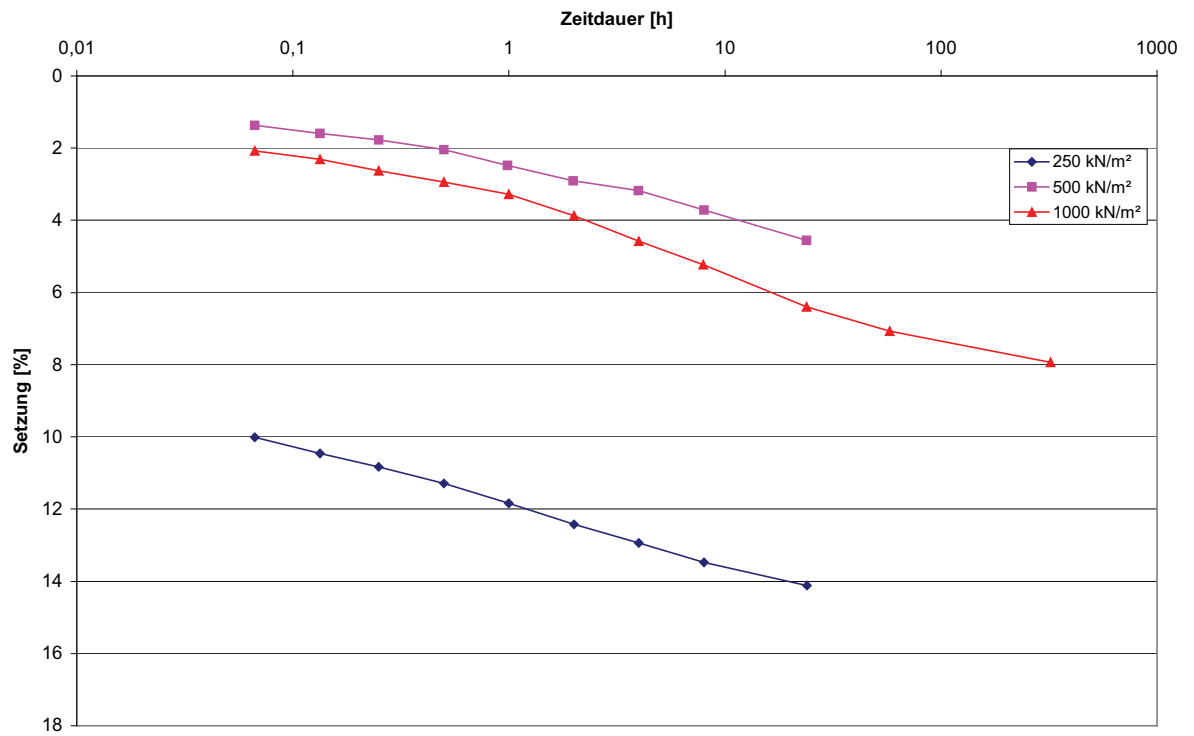
Anlage 2.14: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V17_1



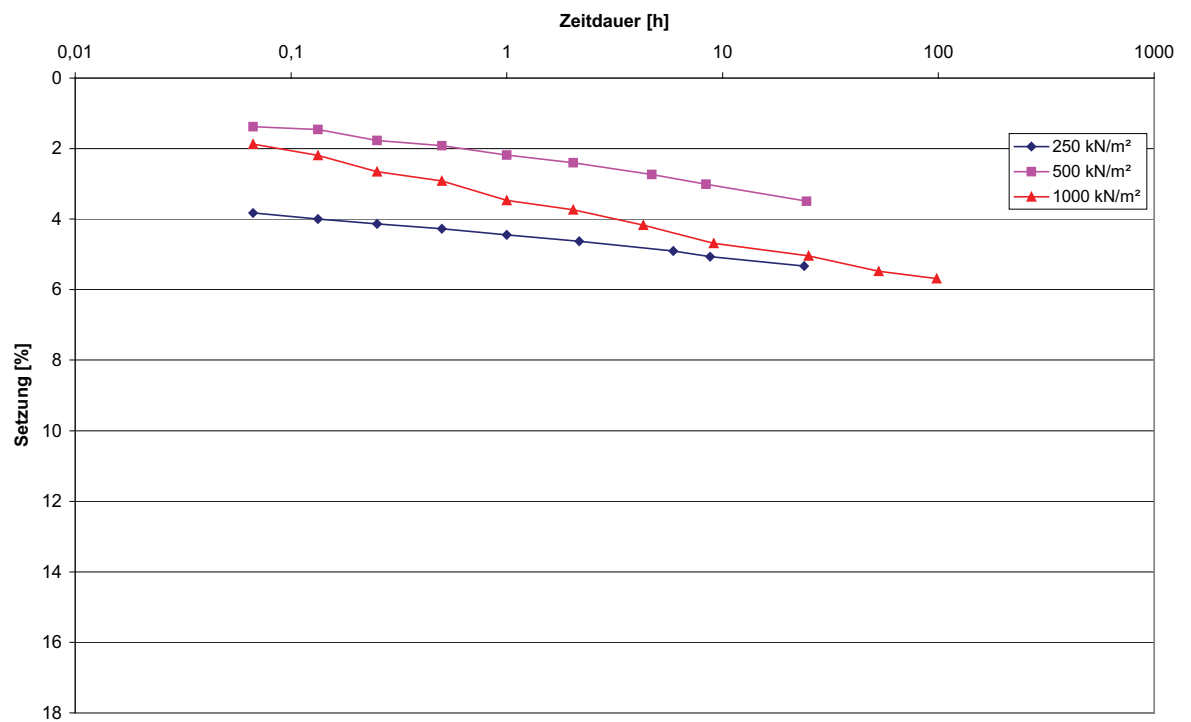
Anlage 2.15: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V17_2



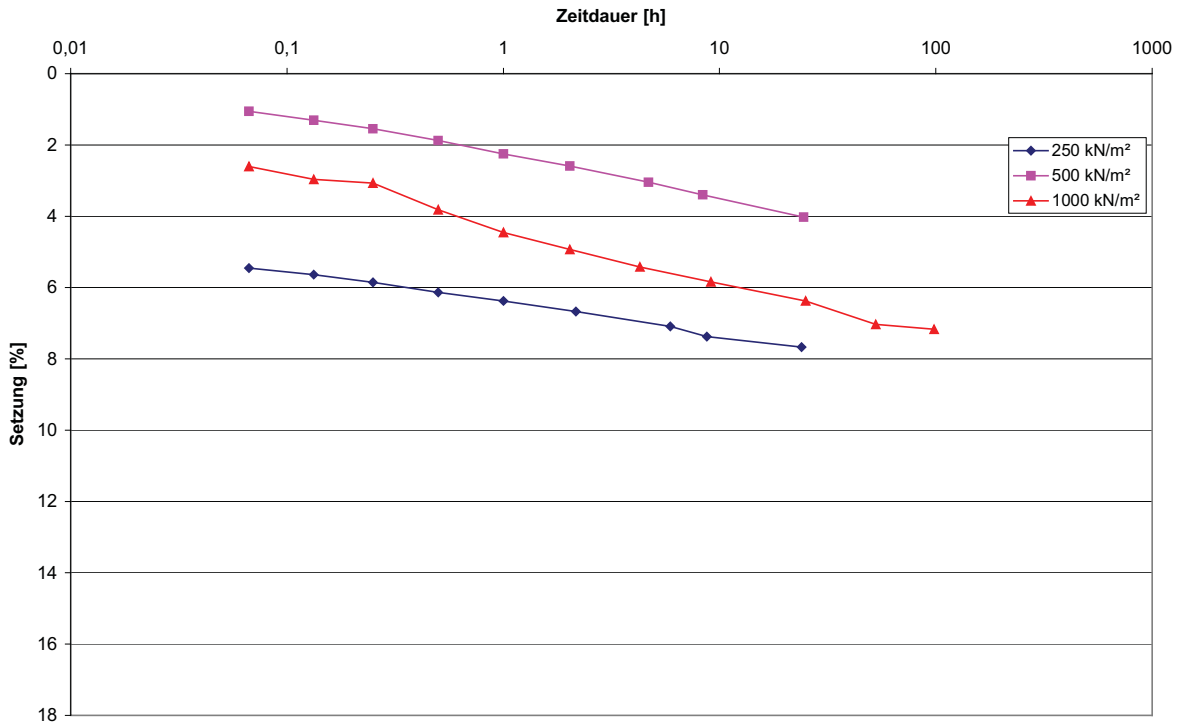
Anlage 2.16: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V18_1



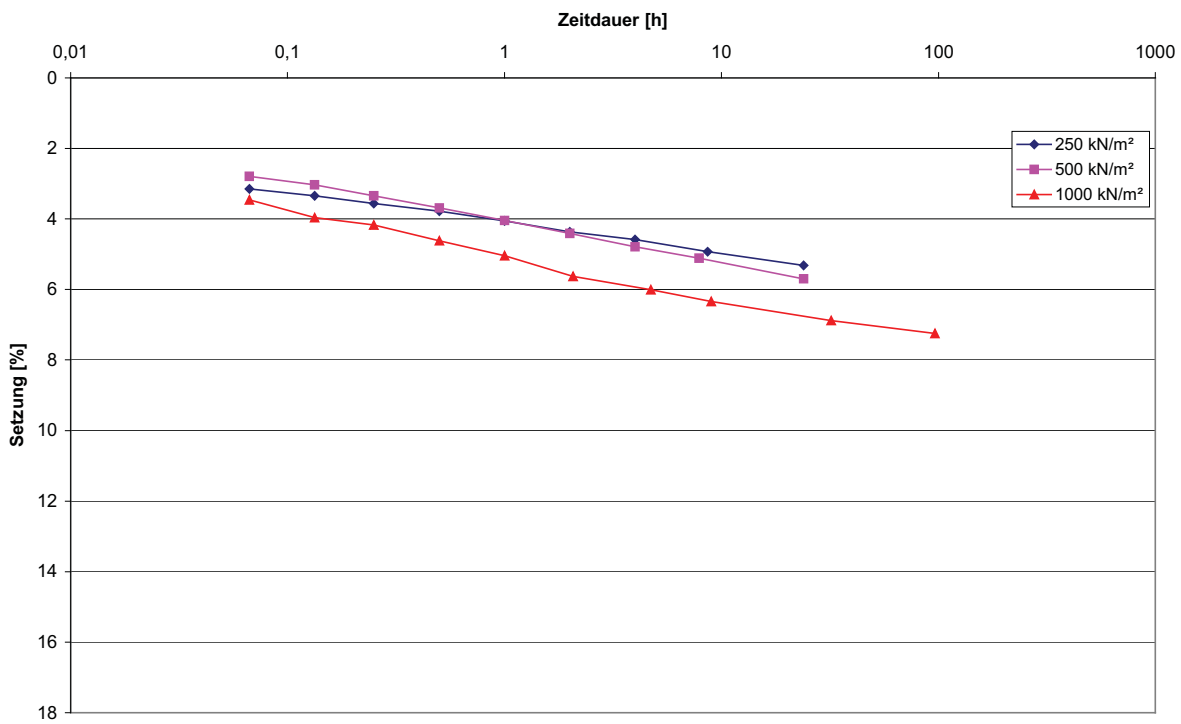
Anlage 2.17: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V18_2



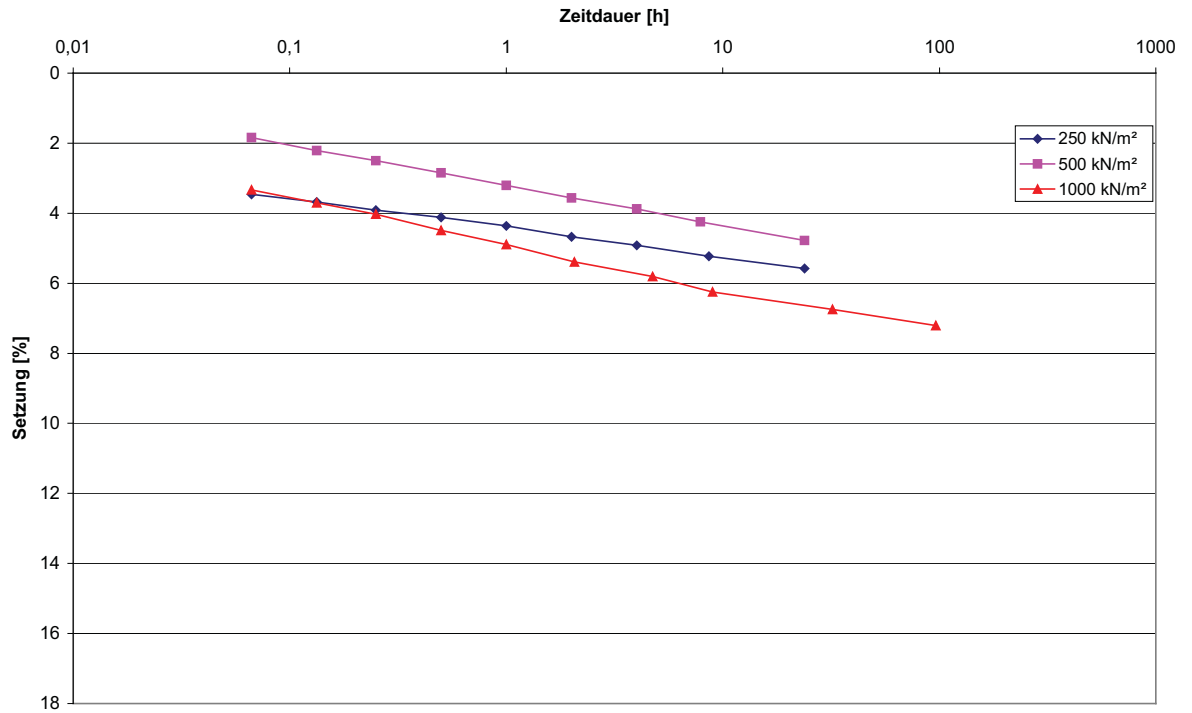
Anlage 2.18: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V21_1



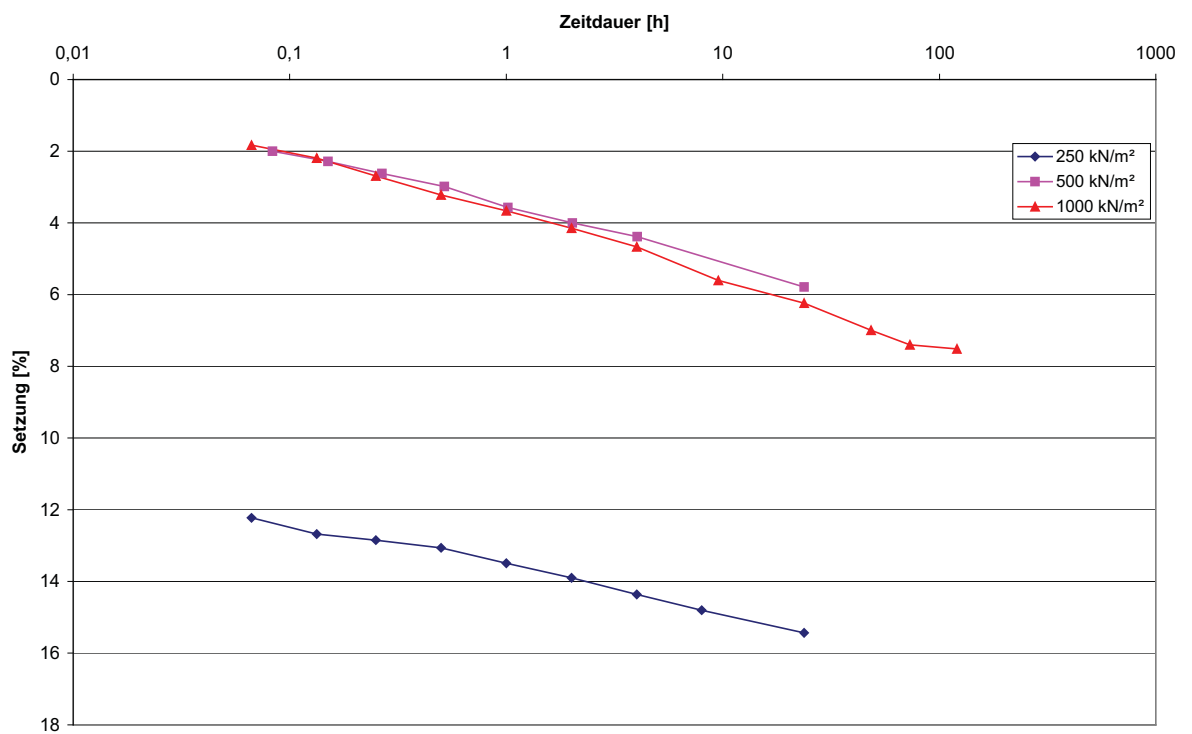
Anlage 2.19: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V21_2



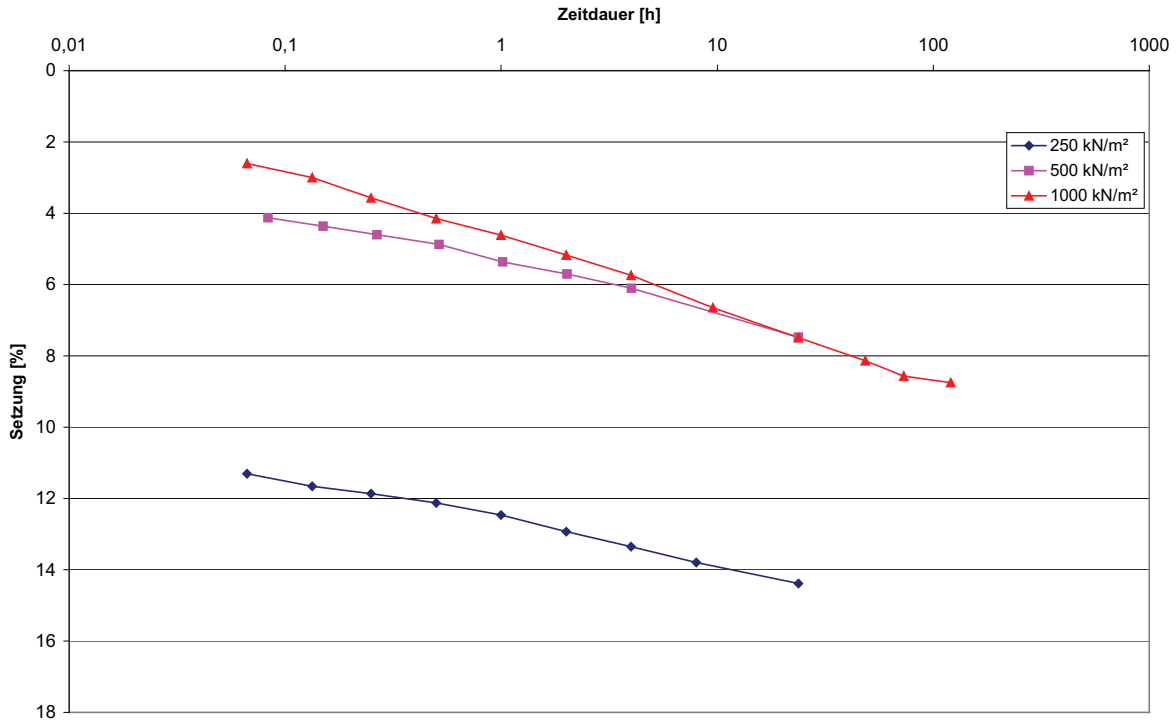
Anlage 2.20: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V22_1



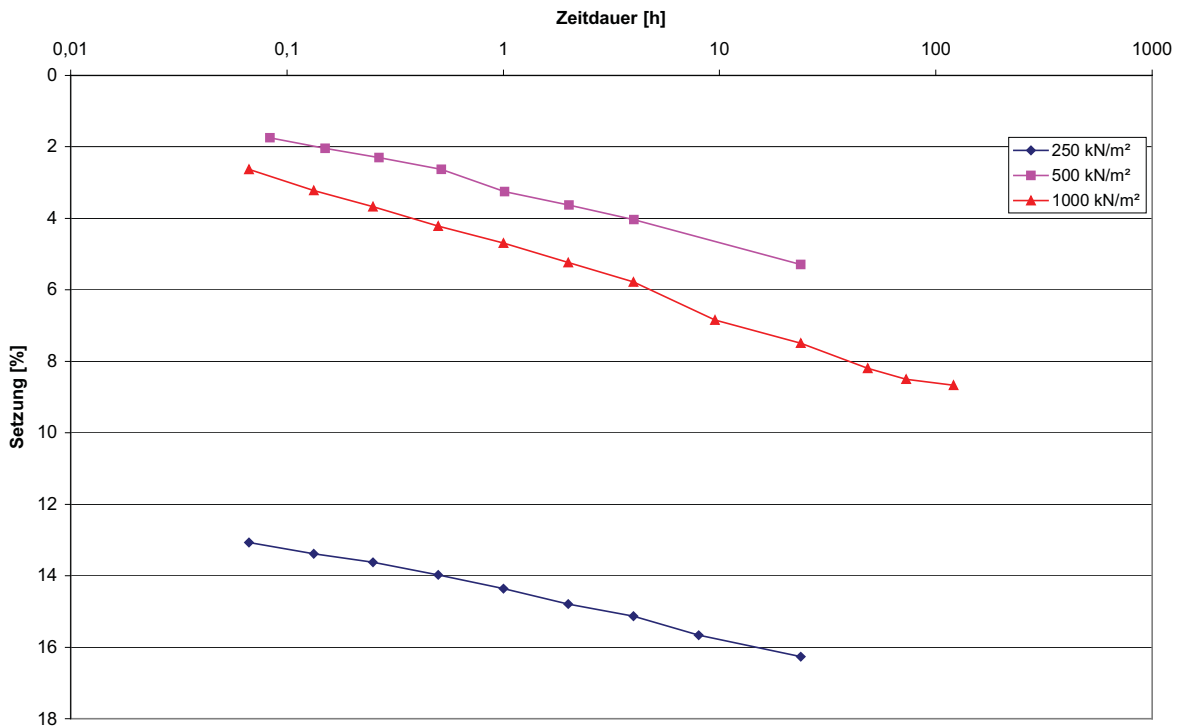
Anlage 2.21: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V22_2



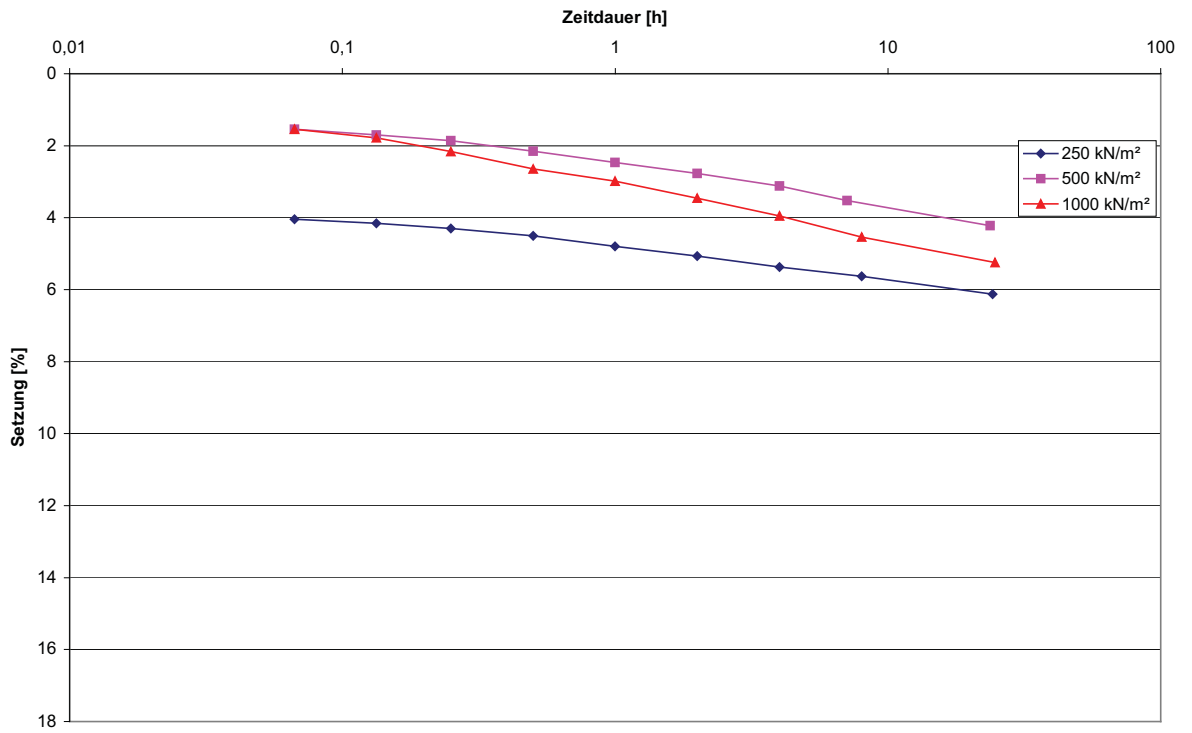
Anlage 2.22: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V24_1



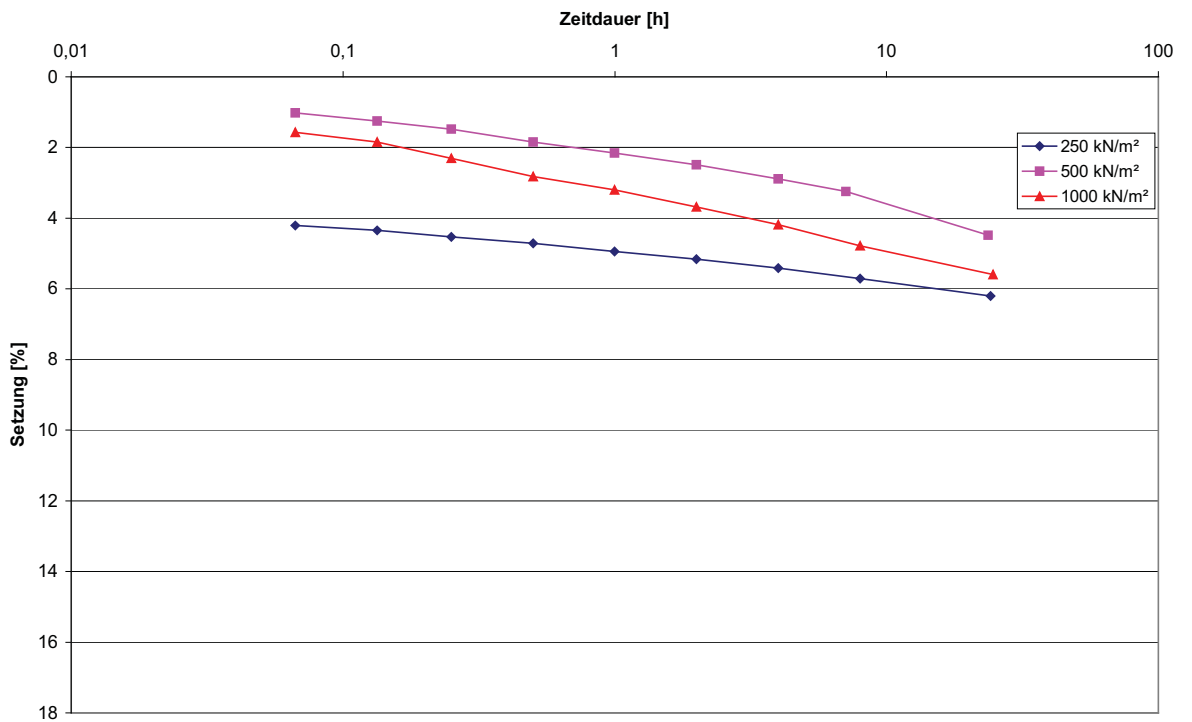
Anlage 2.23: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V24_2



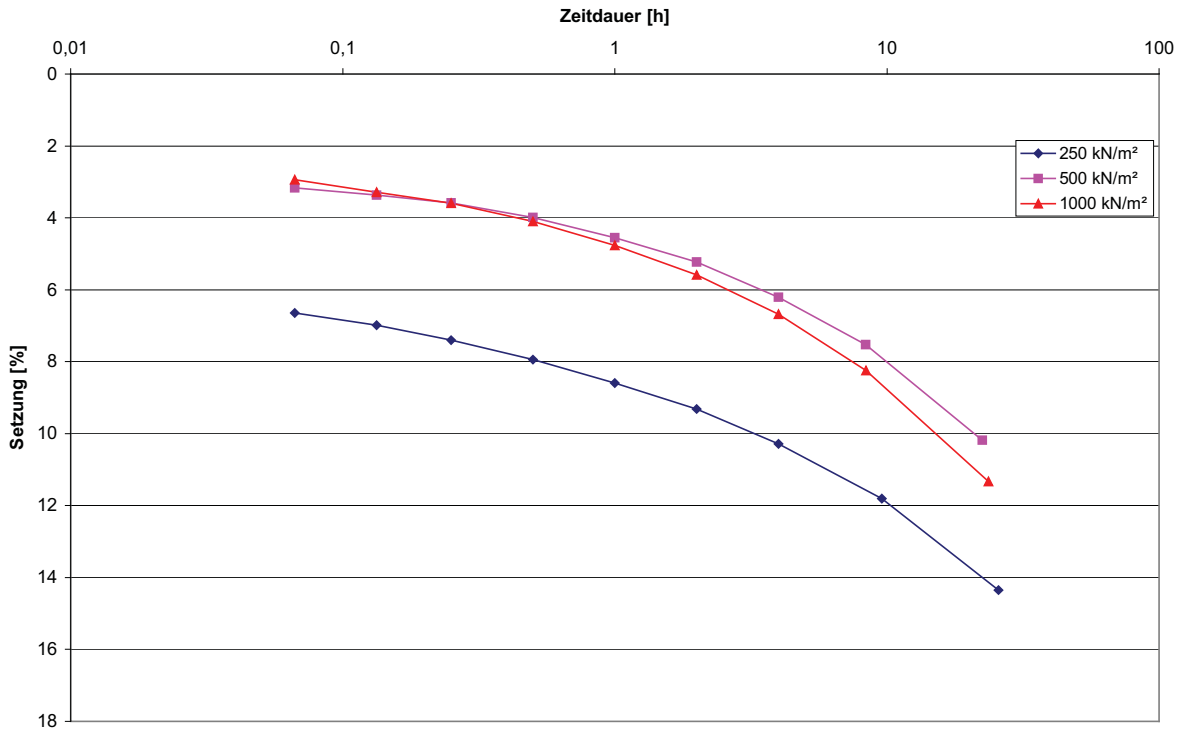
Anlage 2.24: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V24_3



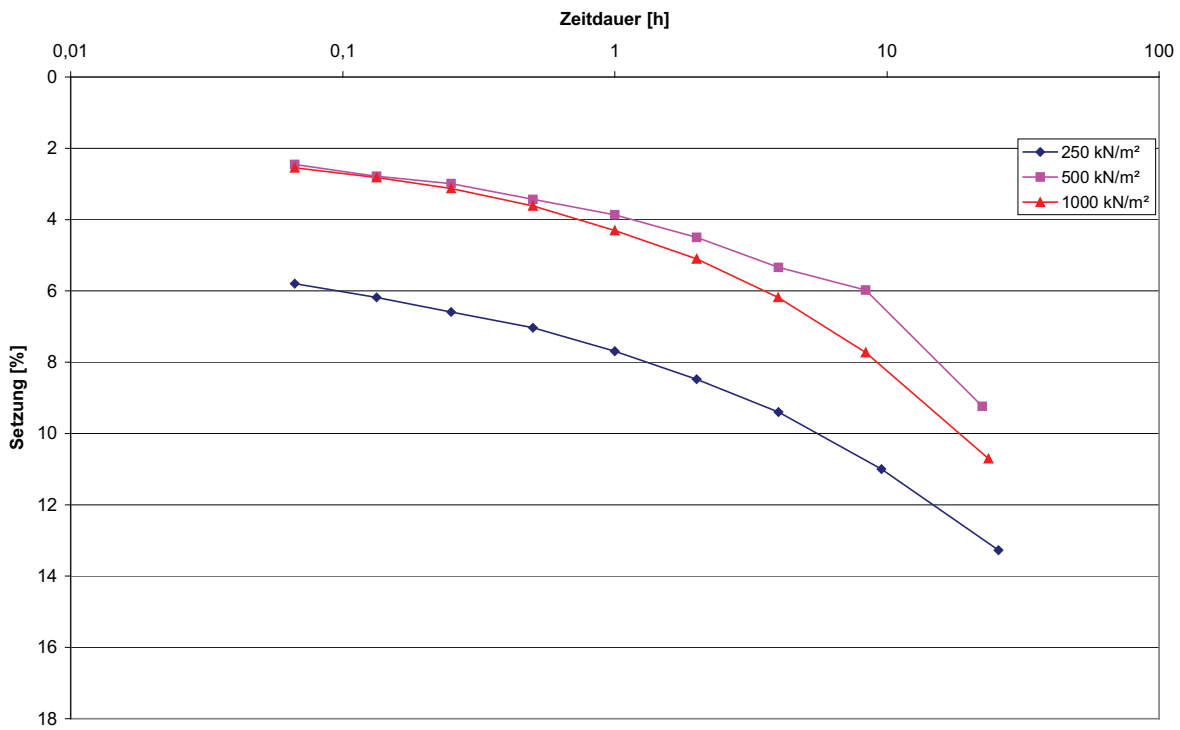
Anlage 2.25: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V25_1



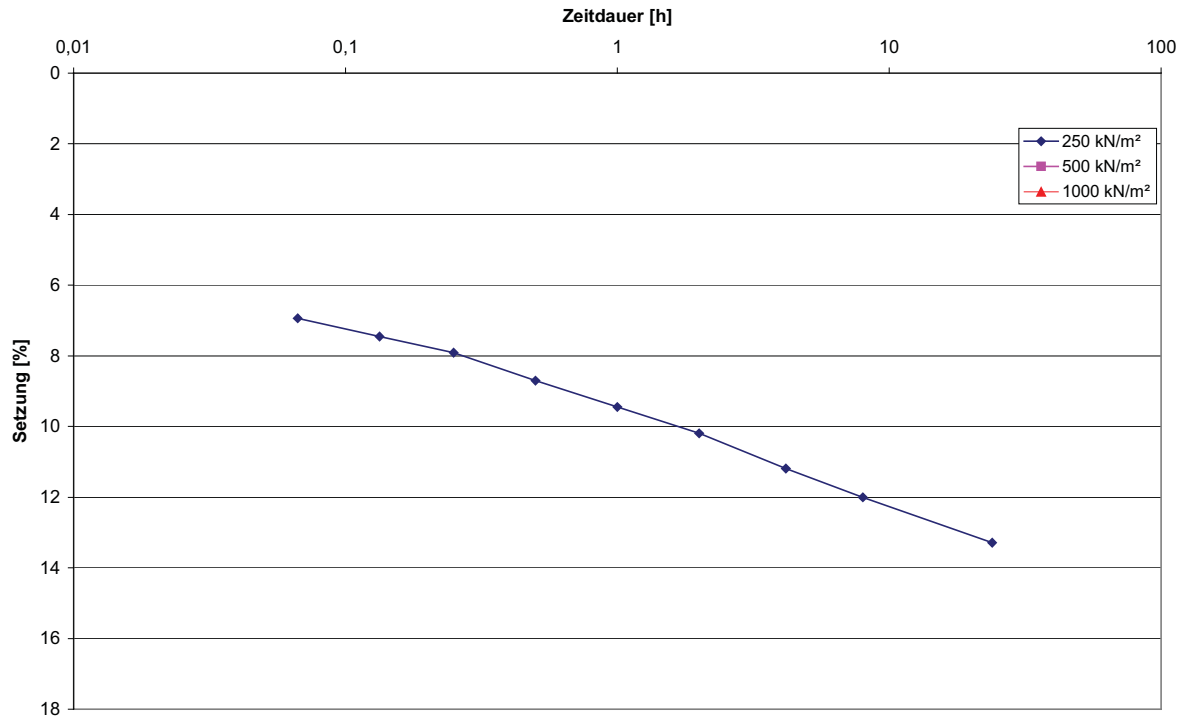
Anlage 2.26: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V25_2



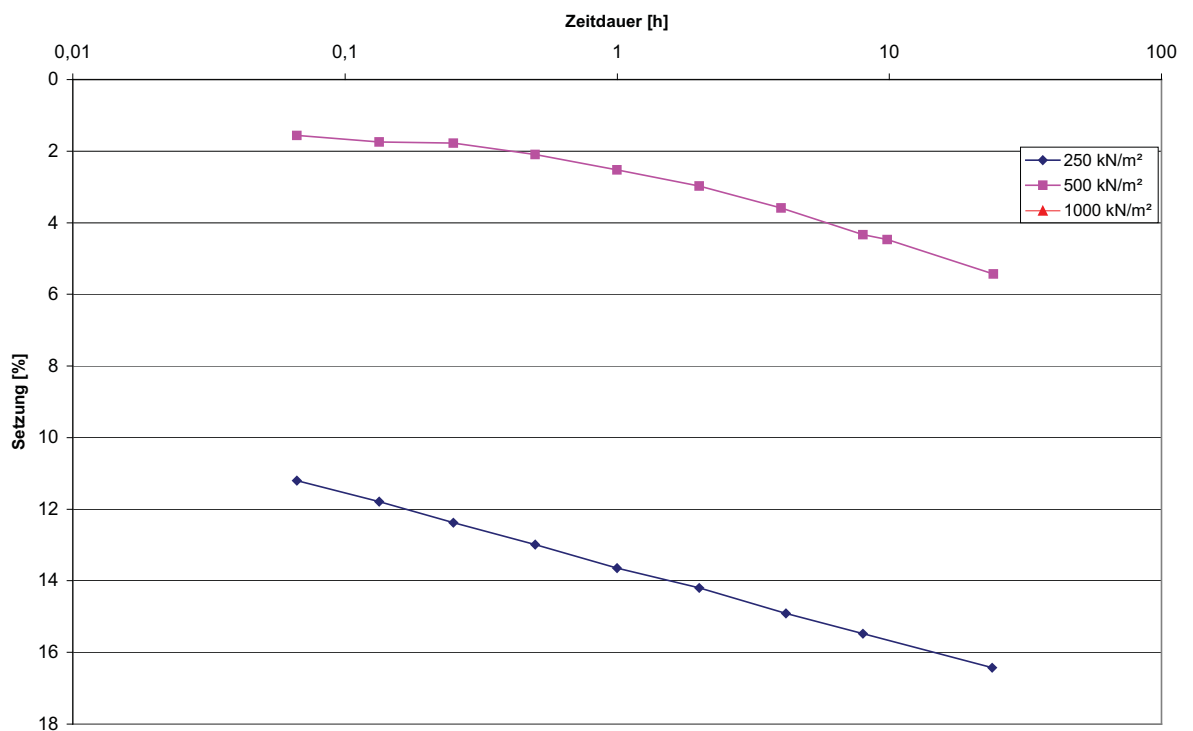
Anlage 2.27: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V26_1



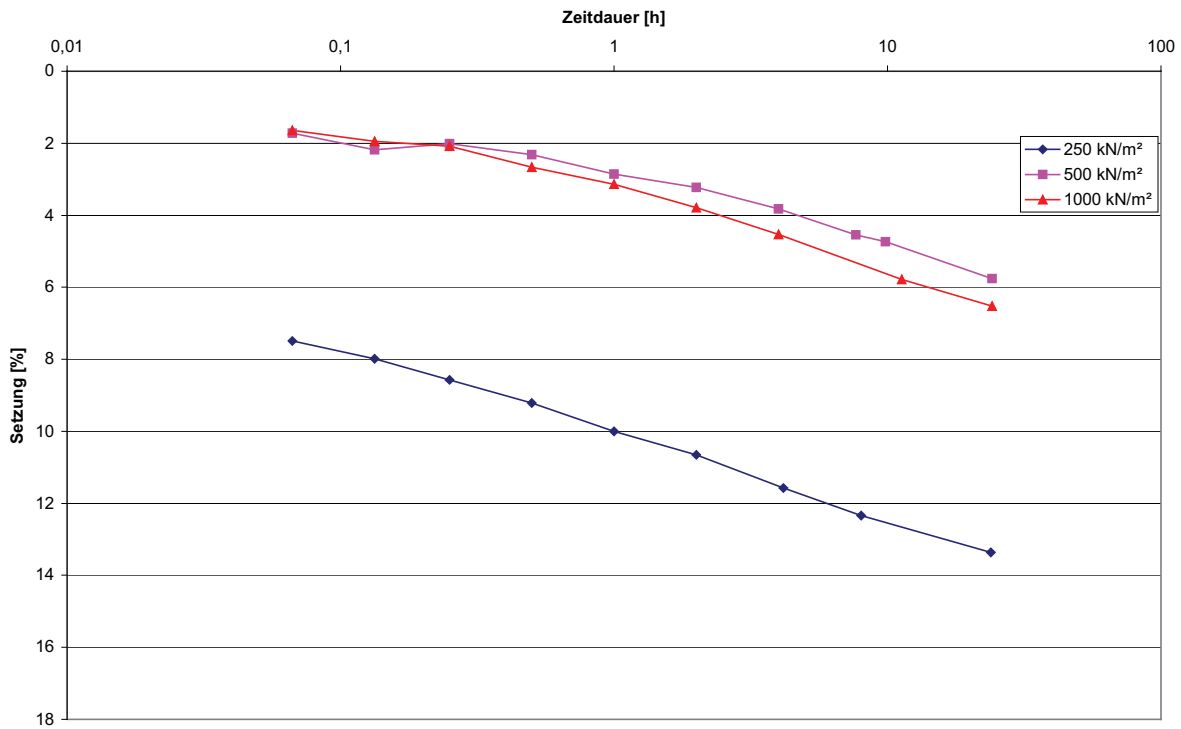
Anlage 2.28: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V26_2



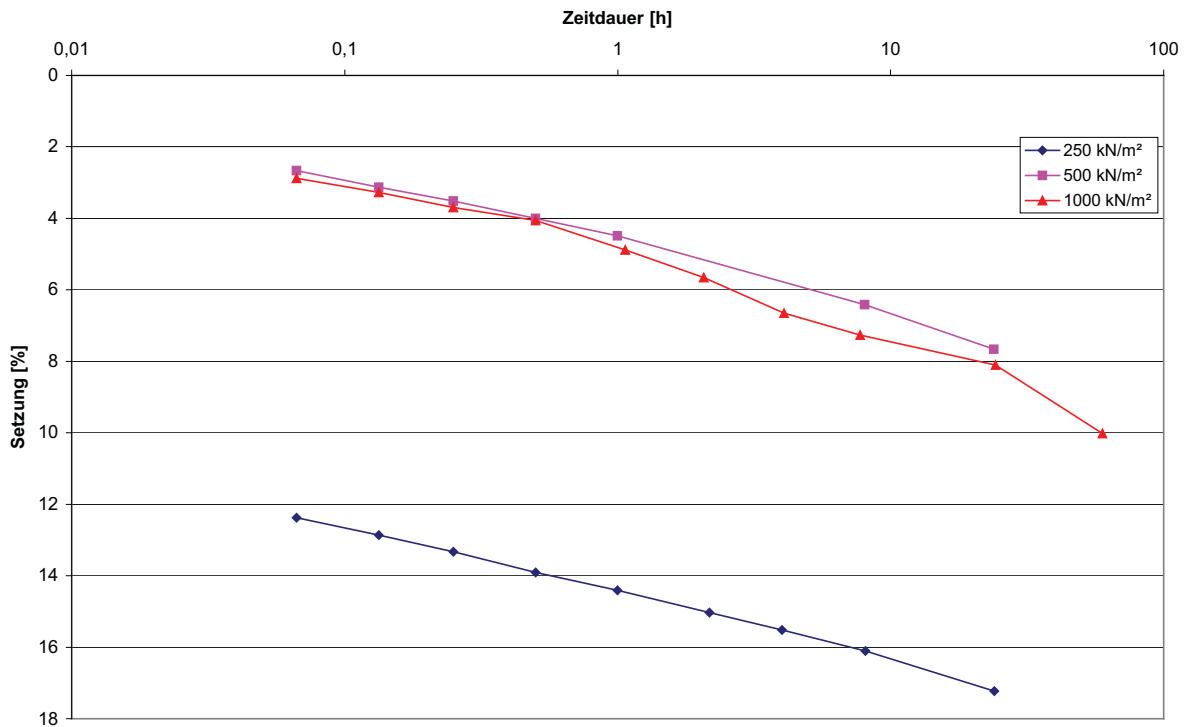
Anlage 2.29: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V27_1



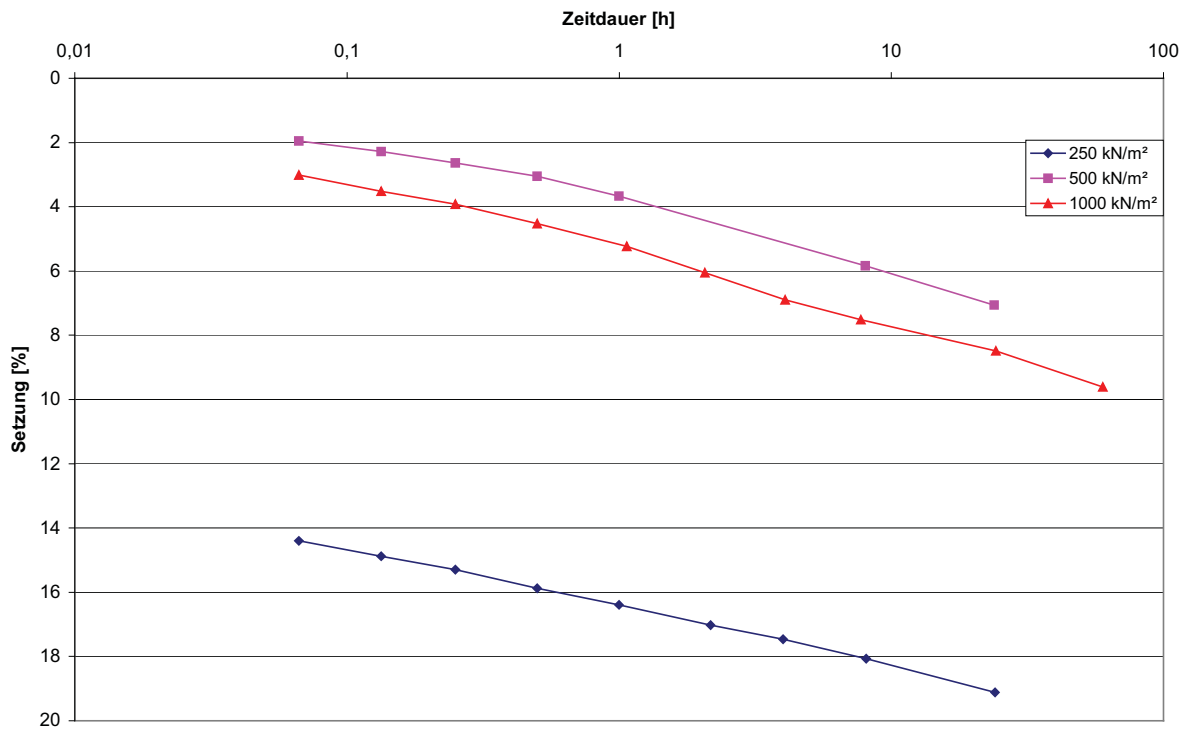
Anlage 2.30: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V27_2



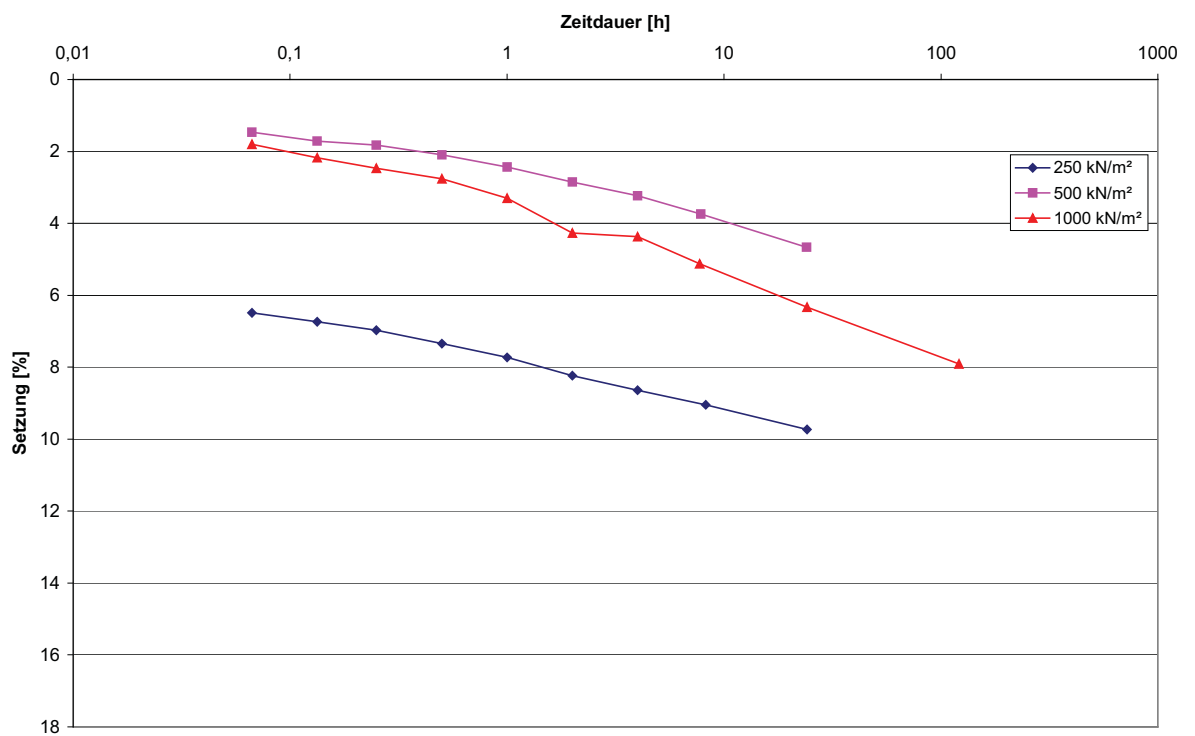
Anlage 2.31: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V27_3



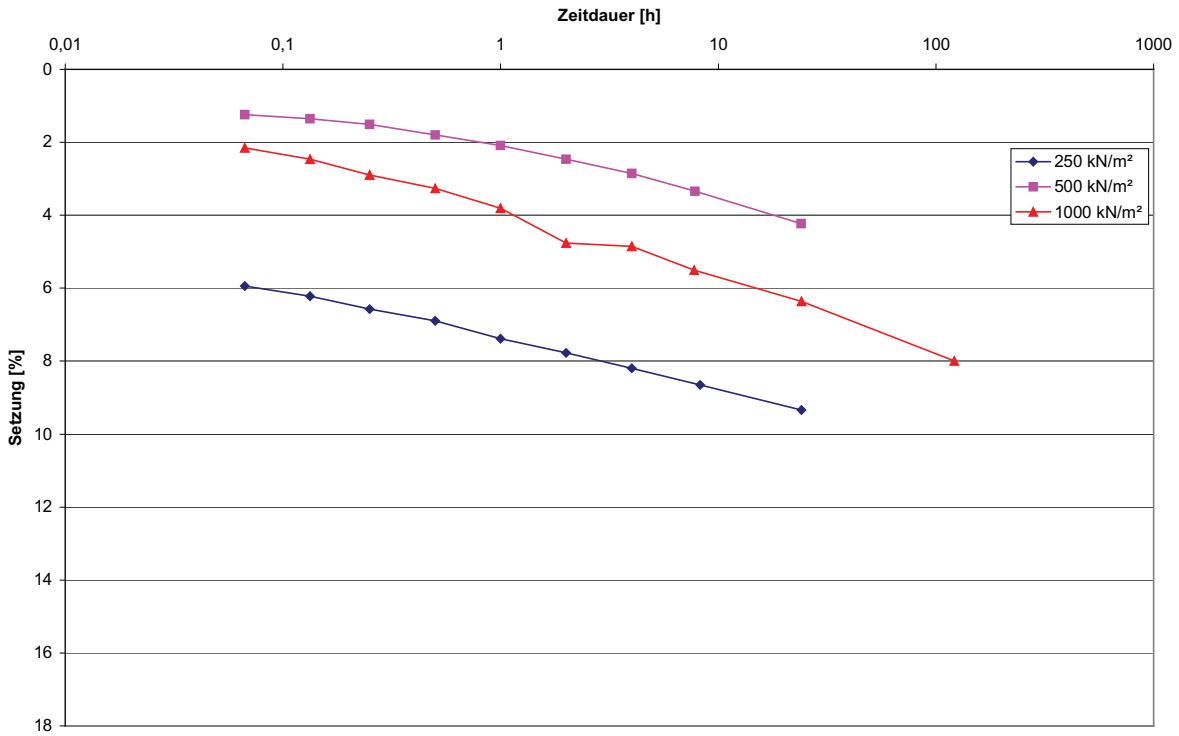
Anlage 2.32: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V28_1



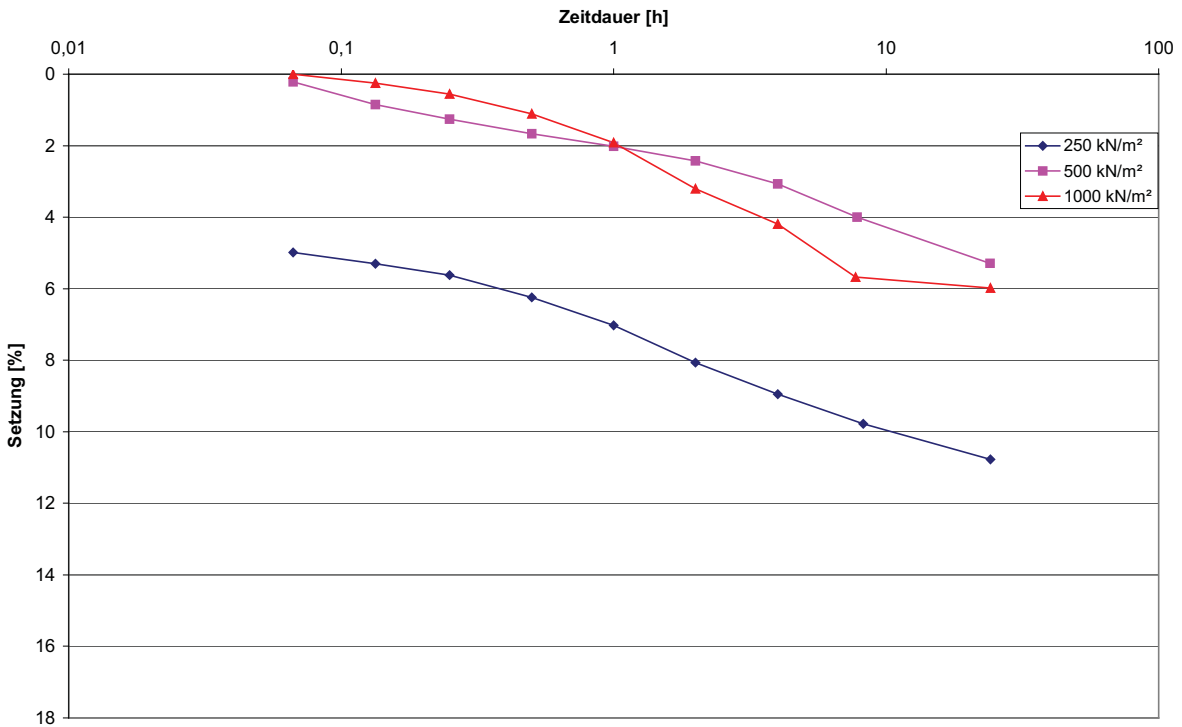
Anlage 2.33: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V28_2



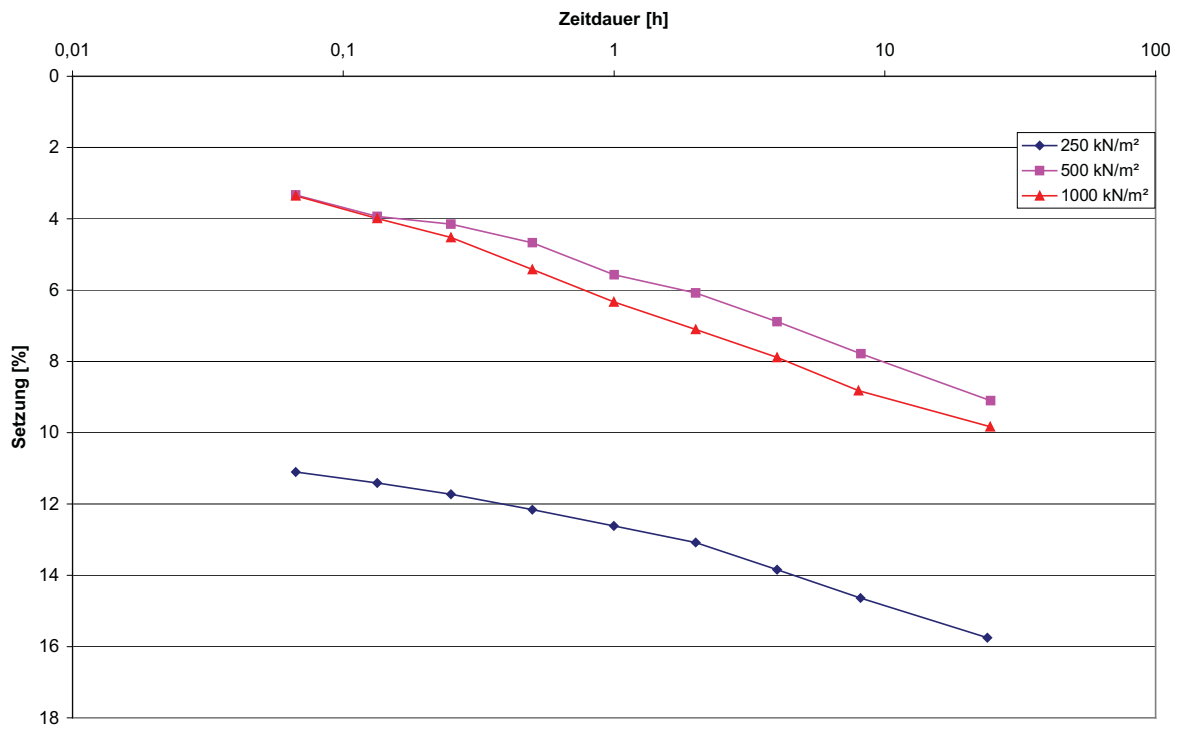
Anlage 2.34: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V29_1



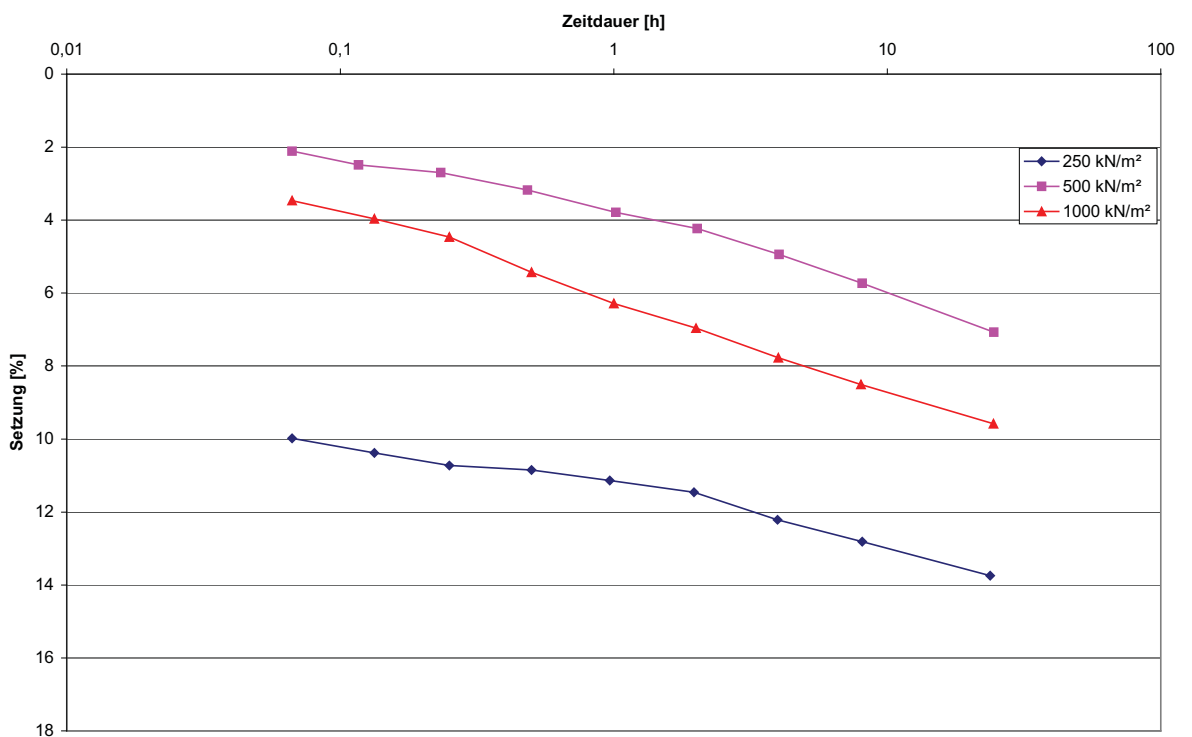
Anlage 2.35: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V29_2



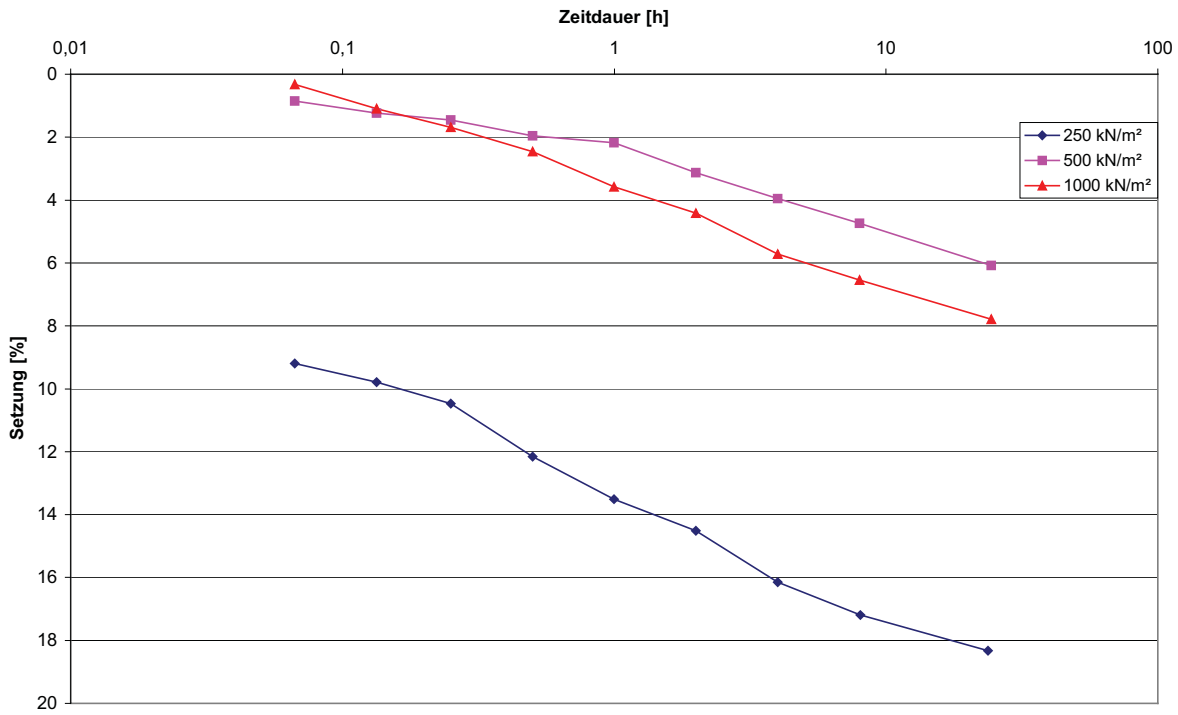
Anlage 2.36: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V29_3



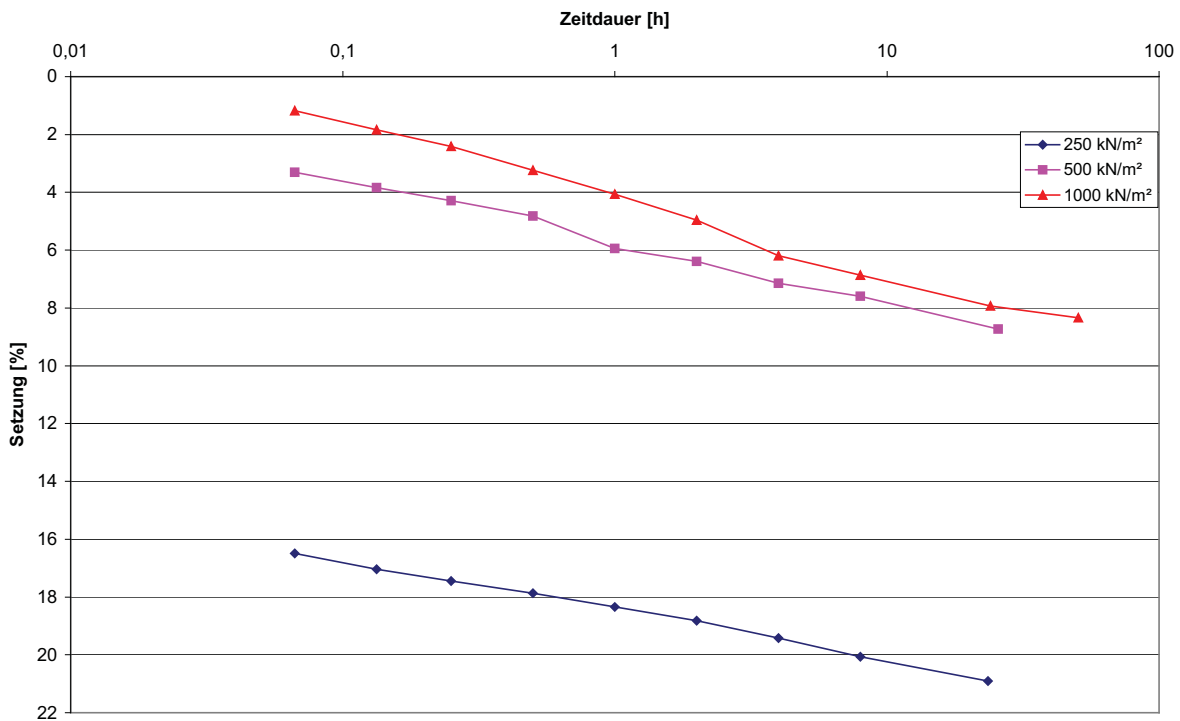
Anlage 2.37: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V30_1



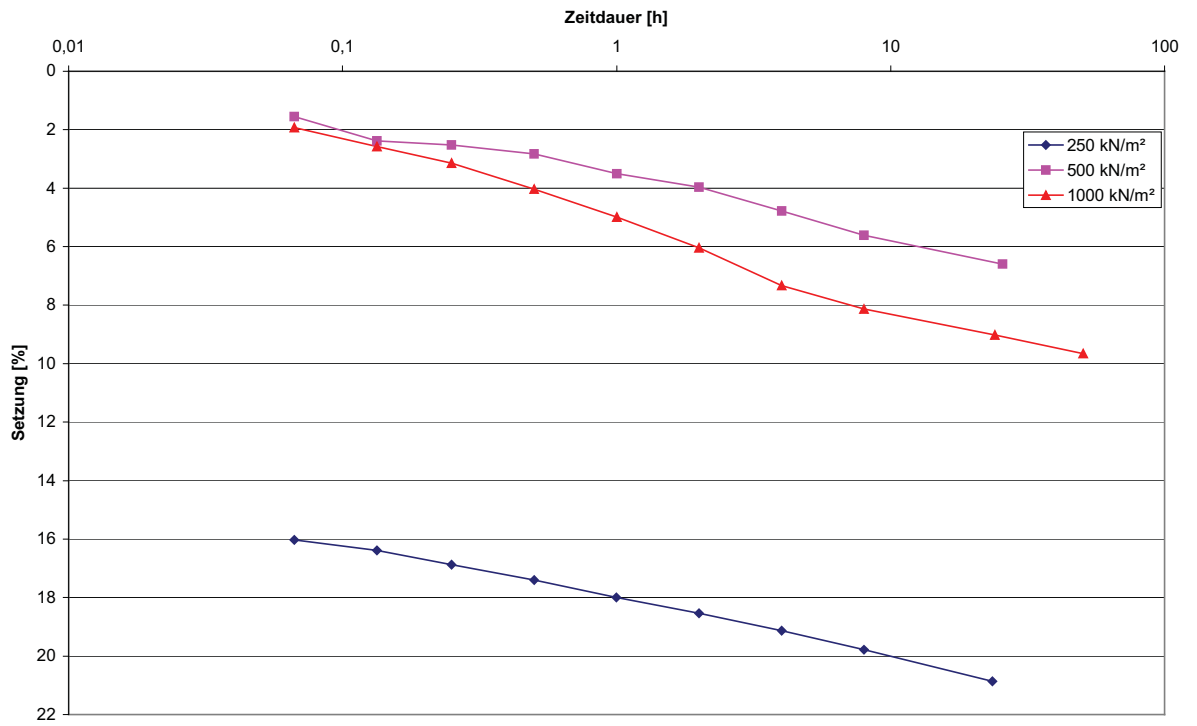
Anlage 2.38: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V30_2



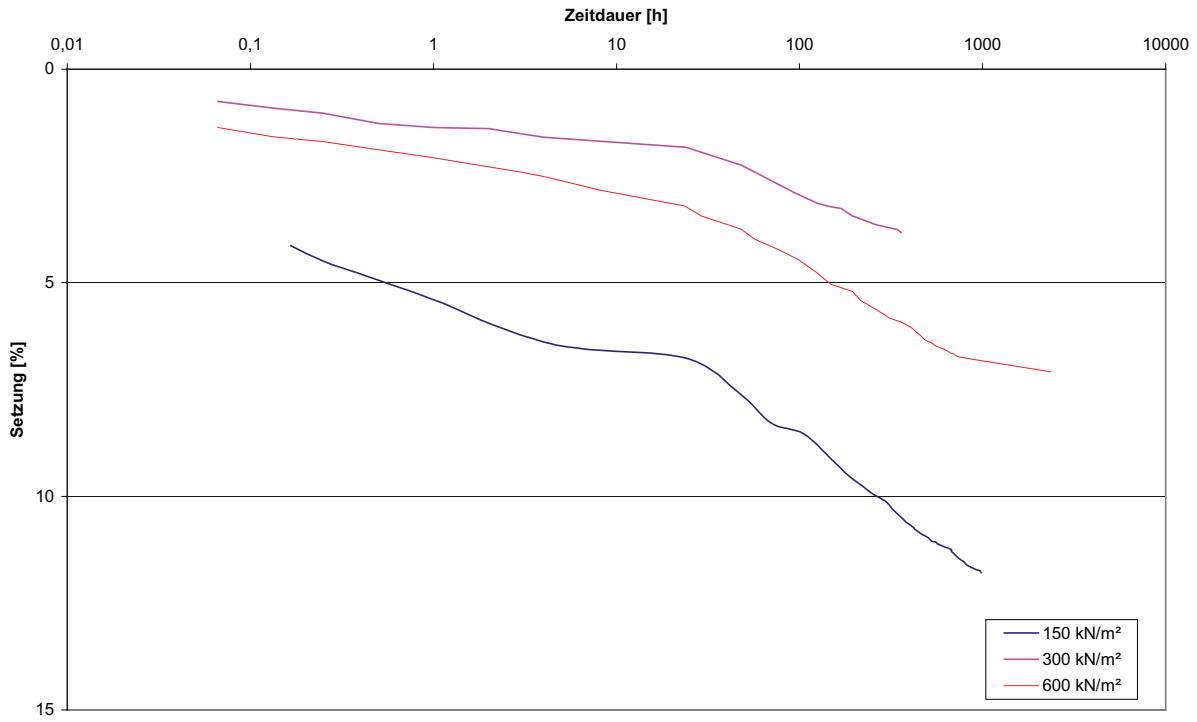
Anlage 2.39: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V30_3



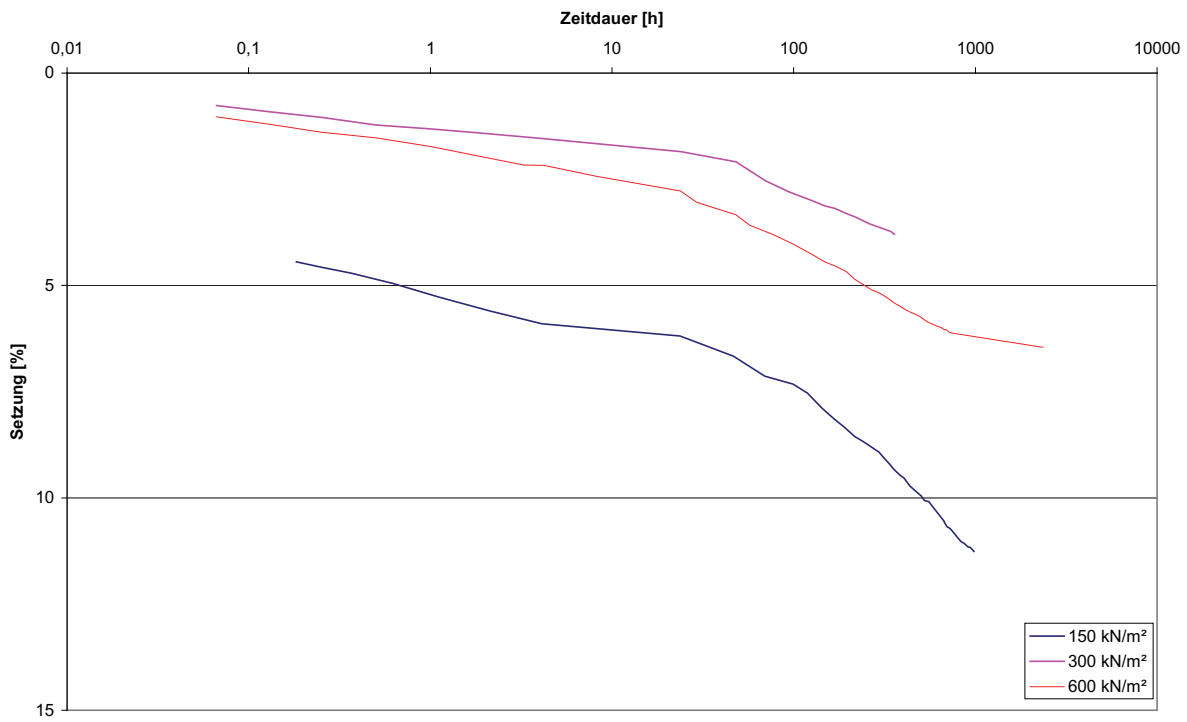
Anlage 2.40: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V31_1



Anlage 2.41: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches V31_2



Anlage 3.1: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches GR_1



Anlage 3.2: Zeit-Setzungsverlauf des Versuches GR_2

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Gunnar Ziehmann
Geburtsdatum: 10.02.1970
Geburtsort: Flensburg
Familienstand: Verheiratet, drei Kinder
Staatsangehörigkeit: Deutsch

Lebenslauf:

August 1976 bis
Juni 1989 Besuch der UNESCO-Grundschule und der Goethe-Schule in
Flensburg
Schulabschluss: Allgemeine Hochschulreife mit der Note 2,1

Juli 1989 bis
September 1989 Praktikum bei der Firma Wübbenhorst, Bauunternehmung,

Oktober 1989 bis
Oktober 1990 Zivildienst bei den Mürwiker Werkstätten, Werkstätten für
Behinderte in Flensburg

Oktober 1990 Beginn des Bauingenieurstudiums an der Technischen
Universität Braunschweig

Juni 1991 bis
Oktober 1991 Zivildienst im Holländerhof, Wohnheim für Behinderte in
Flensburg

November 1992 bis
Juni 1996 Tätigkeit als wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für
Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig

Juni 1996 Abschluss des Bauingenieurstudiums mit der
Diplomnote „Gut“
Vertiefungsrichtungen: Massivbau, Holzbau und Grundbau

Seit Juli 1996 Wissenschaftlicher Angestellter am Leichtweiß-Institut für
Wasserbau, Abteilung für Abfallwirtschaft, der Technischen
Universität Braunschweig

