

Laboruntersuchungen zum Verformungsverhalten saalekaltzeitlicher Geschiebemergel

CHRISTIAN SOELLIG & CHRISTOF LEMPP

INSTITUT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND GEOGRAPHIE, MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG, VON-SECKENDORFF-PLATZ 3, 06120 HALLE, GERMANY.

Schlüsselworte: Geschiebemergel, Verformungsverhalten, Steifeziffer, Kompressionsversuch, Steifeparameter, Zähigkeitsindex, Setzungsberechnung, überkonsolidierte Böden

Key words: till, compressional behaviour, stiffness modulus, compression test, rate dependence, stiffness parameters, settlement calculation, overconsolidated soils

Zusammenfassung

Das Verformungsverhalten saalekaltzeitlicher Geschiebemergel aus dem Raum Halle-Leipzig-Bitterfeld ist bestimmt durch die ehemalige Eisauflast und deren Rückgang, also den heute noch überkonsolidierten Zustand dieser überwiegend feinkörnigen Sedimente (nach DIN 18196: TL oder ST*), die in weicher bis halbfester Konsistenz großflächig vorkommen und als Baugrund genutzt werden. Das Ergebnis von Setzungsprognosen in diesem Baugrund hängt maßgeblich von den spannungsabhängig anzunehmenden Steifemoduln ab. Kompressions- und Triaxialversuche wurden zur Bestimmung von Erst- und Wiederbelastungsmoduln und zur Charakterisierung des Verformungsverhaltens eingesetzt. Daraus ist abzuleiten, dass die Vorkonsolidierungsspannung zwar überwiegend $> 800 \text{ kN/m}^2$ betragen haben muss, dass aber bis heute im hier betrachteten oberflächennahen Bereich (bis ca. 1,5 m u. G.) eine sehr weitgehende Entspannung stattgefunden hat. Die enge Korrelation zwischen Porosität und aktuellem Wassergehalt bei zugleich hohem Sättigungsgrad der Geschiebemergel weist auf einen gleichmäßigen Prozess der Dekonsolidierung hin, der auch durch hohe Verhältniswerte zwischen Wieder- und Erstbelastungsmoduln von drei bis fünf sowie durch wenig ausgeprägte Kurvenknicke im Druck-Setzungsdiagramm bei Erstbelastung zum Ausdruck kommt. Die spannungsunabhängigen Parameter Steifebeiwert ν und Steifeexponent ω , die mittels Potenzfunktion zur Berechnung der Steifemoduln nutzbar sind, korrelieren wiederum gut mit Wassergehalt und Porosität der Proben. Ein ermittelter Zähigkeitsindex I_v um 0,031 als Ausdruck des geschwindigkeitsabhängigen Verformungsverhaltens weist auf die Wirksamkeit des Tonanteils für das heutige Verformungsverhalten dieser eiszeitlichen Ablagerungen hin.

Abstract

Deformation behavior of till sediments from Saaleian ice age in the region of Halle-Leipzig-Bitterfeld may be controlled by the former ice load and their reduction,

i.e. the today even overconsolidated state of this dominantly fine grained sediment (according to DIN 18196: TL or ST*) that appears in wide areas in firm to very stiff consistency and is used as foundation ground. The results of settlement prognoses in this ground depend primarily on the modules of stiffness which have to be assumed as stress dependent. Compression- as well as Triaxialtests were executed to determine deformation modules during first and repeated loading in order to characterize the deformation behavior. From these tests a preconsolidation stress of mostly $> 800 \text{ kN/m}^2$ is deduced. Nevertheless, in the investigated area and near the surface (up to 1,5 m b. g.) a very well developed deloading process took place. The strong correlation between porosity and recent water content at always high saturation grades in all till samples indicates a regular deconsolidation process, which is also referred to a high proportional number between the modules at reloading and loading of three to five as well as weakly developed buckling in the stress-strain curve at first loading. The stress independent parameters of stiffness coefficient ν and stiffness exponent ω , which are suited to calculate the modules of stiffness, are again well correlated with water content and porosity of the till samples. The determined viscosity index I_v at about 0,031 represents the rate dependence of the deformation behavior and gives hint to the effectiveness of the clay content as important for the actual deformation behavior of this ice age sediment.

1. Einleitung

Eine möglichst gute Kenntnis über das Verformungsverhalten des Baugrunds ist Voraussetzung für sichere als auch wirtschaftliche Gründungen. Eine besondere Betrachtung erfordern dabei geologisch vorbelastete bindige Böden: Während das Verformungsverhalten normalkonsolidierter Böden vorwiegend von der Bodenart bestimmt ist, wird dieses bei geologisch vorbelasteten

Böden zusätzlich in unterschiedlich hohem Maß von der Spannungsvorgeschichte beeinflusst.

Die Geschiebemergel stellen einen solchen bindigen, durch ehemalige Eis- oder Bodenauflast potentiell vorbelasteten Boden dar. Sie weisen außerdem eine gemischtkörnige Ausbildung mit einer ausgeprägt schlechten Kornsortierung auf. Dies erschwert, über den unbestimmten Einfluss der Vorbelastung hinaus, die Anwendbarkeit von Erfahrungswerten oder Korrelationen. Die dann notwendigen Schätzungen auf der sicheren Seite können zu überdimensionierten Gründungen führen.

Im Rahmen einer Masterarbeit am Fachgebiet Ingenieurgeologie der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg wurde daher das Verformungsverhalten saalekaltzeitlicher Geschiebemergel unter Berücksichtigung dieser geologischen Besonderheiten untersucht. Die Geschiebemergel der Saalekaltzeit stehen in Mittel- und Norddeutschland über weite

Flächen oberflächennah an und bilden damit häufig den maßgeblichen Baugrund.

2. Untersuchungsgegenstand

Der Geschiebemergel ist ein Sediment, welches an der Basis eines Gletschers aus der mitgeführten Eisfracht abgelagert und daher auch als Grundmoräne bezeichnet wird. Durch die fehlende Sortierung bei der Ablagerung sind die Geschiebemergel in der Regel ungeschichtet und weit gestuft, der Korngrößenbereich erstreckt sich von Ton bis zu groben Blöcken. Der unverwitterte Geschiebemergel ist meist kalkhaltig, bei sekundärer Entkalkung infolge von Verwitterung wird er als Geschiebelehm bezeichnet.

Innerhalb der Saalekaltzeit sind im mitteldeutschen Raum 3 Eisvorstoßphasen bekannt, welche von EISSMANN (1995) als Zeitzer Phase, Leipziger Phase und Fläming Phase bezeichnet werden. Während der Zeitzer Phase kam es zur Ablagerung der

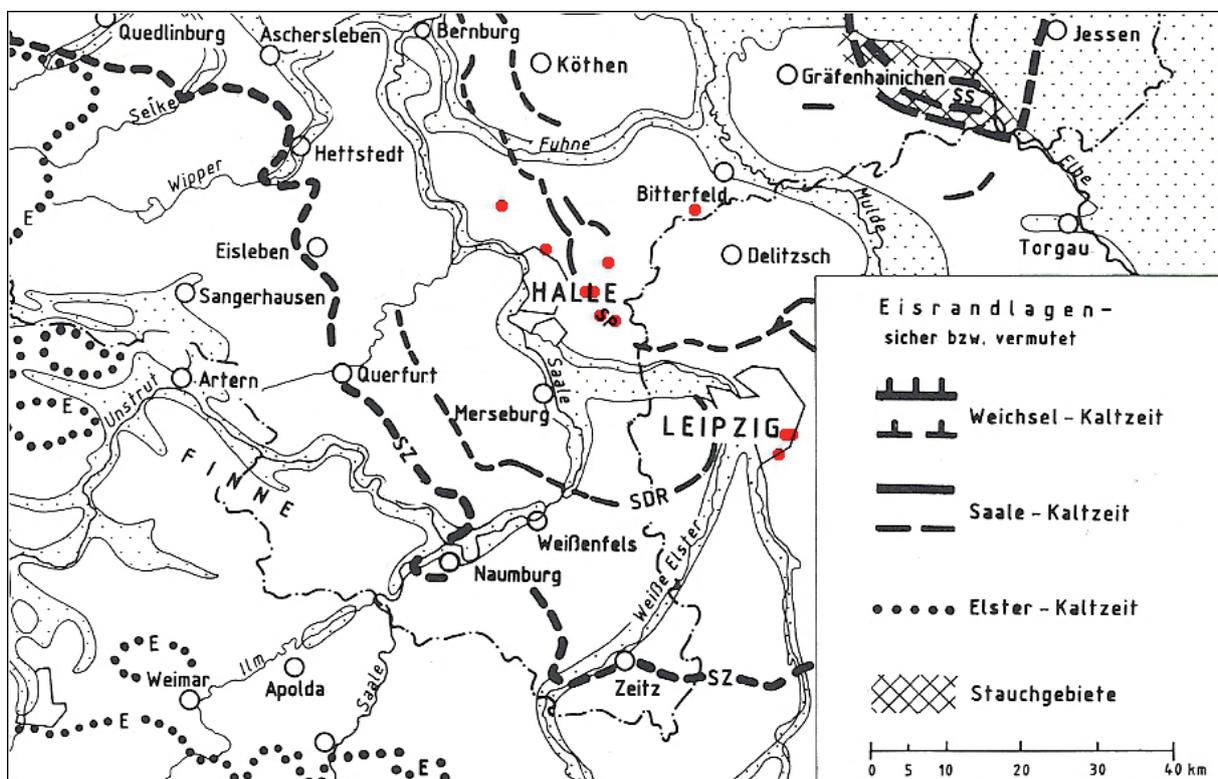


Abb. 1 Übersicht der Probenahmepunkte (verändert nach KNOTH 1995)

ersten Saalegrundmoräne. Sie entspricht dem maximalen Eisvorstoß der Saalekaltzeit. Die Ausdehnung kann etwa mit der Linie Naumburg-Zeitz-Altenburg beschrieben werden. Die in der Leipziger Phase abgelagerte zweite Saalegrundmoräne teilt sich in eine untere und eine obere Bank. Die untere Bank (Bruckdorfer Vorstoß) ist bis über Halle und Leipzig hinaus verbreitet. Die obere Bank (Breitenfelder Vorstoß) ist nur noch lückenhaft nördlich von Halle und Leipzig, im Rückland der Petersberger Endmoräne und der Breitenfelder Endmoräne vorhanden (LITT et al. 2007). Die Fläming Phase reichte nur noch bis zur Altmark und in Sachsen bis nördlich von Weißwasser.

3. Probenahme

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Proben wurden im Großraum Halle-Leipzig-Bitterfeld aus Baugruben und Erkundungsschürfen gewonnen. Insgesamt wurden 21 Proben an 11 Standorten entnommen. Die Entnahmetiefen lagen zwischen 0,8 m und 1,5 m unter Geländeoberkante. Die Probenahme erfolgte mittels Stechzylinder, welcher nach der Entnahme mit Folie umwickelt wurde, um ein Austrocknen der Probe zu verhindern. Die gewonnenen Proben können der Güteklasse 1 nach DIN 1997-2 (2010) zugeordnet werden.

Abbildung 1 zeigt die regionale Einordnung der Probenahmestandorte mit Darstellung bekannter saalekaltzeitlicher Eisrandlagen (Petersberger Randlage SP, Dehlitz-Rückmarsdorfer Randlage SDR, Zeitzer Randlage SZ). Die endgültige stratigrafische Zuordnung erfolgte anhand der Lithofazieskarten LKQ 50 bzw. des hydrogeologischen Kartenwerks HK-50. Die untersuchten Proben sind danach der ersten Saalegrundmoräne (Zeitzer Phase) sowie der zweiten Saalegrundmoräne, untere Bank (Bruckdorfer Vorstoß der Leipziger Phase) zuzuordnen.

Für eine konventionelle bodenmechanische Klassifizierung der untersuchten Proben wurden an 7 Proben die Kornverteilungskurven

und die Konsistenzgrenzen bestimmt. Die untersuchten Geschiebemergel sind danach entsprechend DIN 18196 (2004) als leicht plastische Tone (Bodengruppe TL) bzw. stark tonige Sande (Bodengruppe ST*) anzusprechen. Die natürlichen Wassergehalte lagen zwischen 9,1 % und 17,9 %, die Konsistenzen lagen im Bereich weich bis halbfest.

4. Zusammendrückbarkeit

4.1 Grundlagen und Methodik

In der geotechnischen Praxis wird bei der Berechnung von Setzungen unter Gründungen allgemein von einer eindimensionalen Zusammendrückung des Baugrunds ausgegangen. Ein seitliches Ausweichen des Bodens wird unter Begründung der horizontal weit aushaltenden Baugrundsichten vernachlässigt.

Die Berechnung erfolgt daher mit dem Verformungsmodul für eindimensionale Zusammendrückung, dem Steifemodul E_s . Dieser wird anhand eindimensionaler Kompressionsversuche (Ödometer) und zunehmend auch über K_0 -Triaxialversuche im Labor ermittelt oder über Rückrechnung von real gemessenen Bauwerksetzungen bestimmt. Der Steifemodul ist dabei für einen betrachteten Spannungsabschnitt definiert als das Verhältnis zwischen der Zunahme der lotrechten Normalspannung $\Delta\sigma$ und der damit hervorgerufenen auf die Ausgangshöhe der Probe bezogenen Setzung $\Delta\varepsilon$:

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

In der vorliegenden Arbeit wurden die Steifemoduln mittels eindimensionaler Kompressionsversuche in Anlehnung an DIN 18135 (1999) ermittelt. Die Lastaufbringung erfolgte stufenweise von 50 bis 800 kN/m². Dabei wurden Versuche mit jeweiliger Verdopplung der Last pro Stufe als auch Versuche mit durchgängig kleinen Lastsprüngen von max. 100 kN/m² durchgeführt. Die Dauer der Laststufen lag zwischen 2 h und 16 h, wobei das Ende

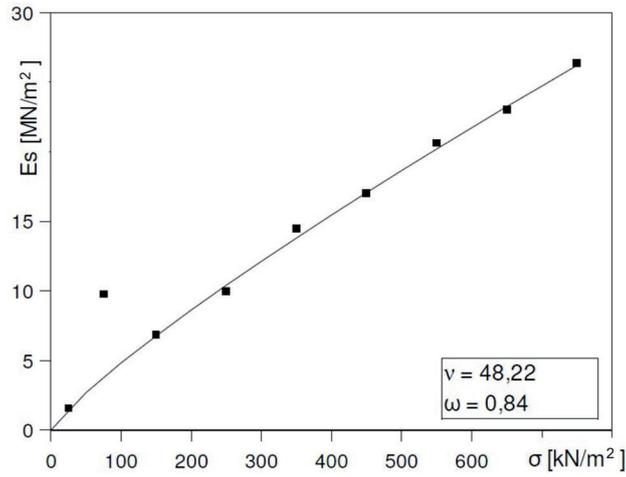


Abb. 2 Beispiel der Regression zwischen E_s und σ bei der Probe TO/UP1/2

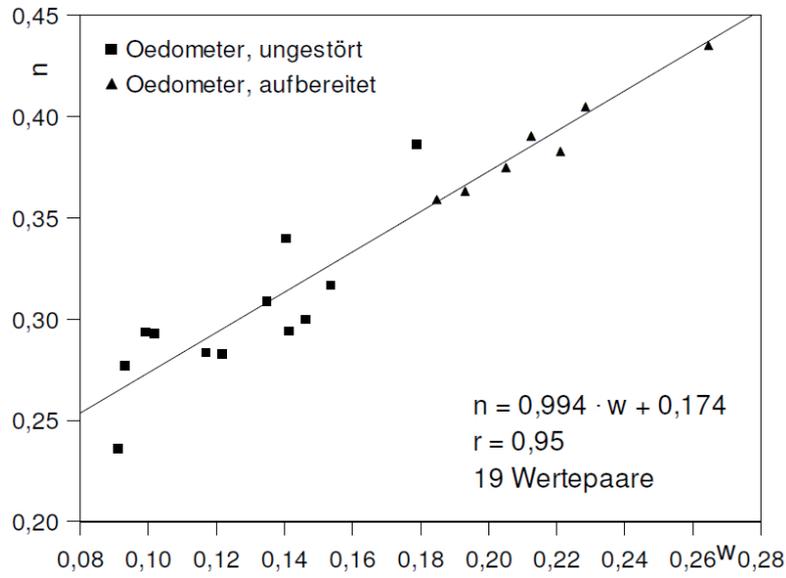


Abb. 3 Einbaukennwerte: Porenanteil in Abhängigkeit des Einbauwassergehalts

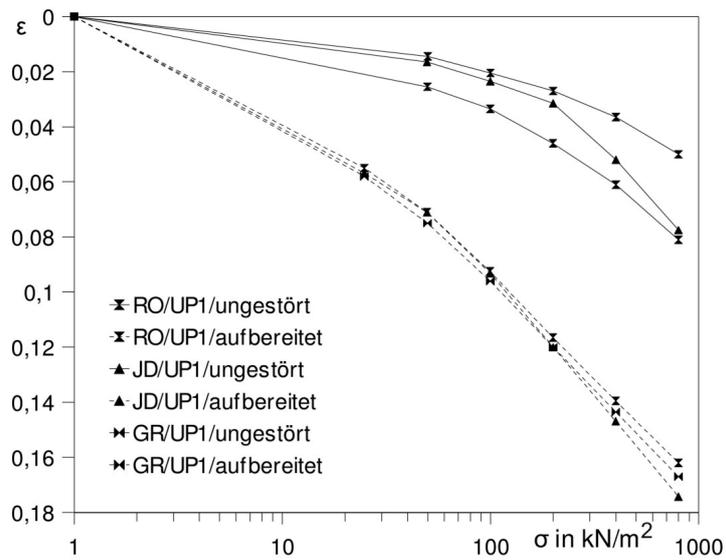


Abb. 4 Beispiele der Drucksetzungslinien für ungestörte (durchgezogen) und aufbereitete (gestrichelt) Proben

der Primärsetzung jeweils erreicht war. Die Proben wurden während des Versuchs nicht geflutet und wurden durch eine Folienabdeckung und ein untergestelltes Wasserglas vor Austrocknung geschützt. Weiterhin wurden beispielhaft an drei Proben Wiederbelastungsmoduln bestimmt. Dafür mussten die Proben im Versuch geflutet werden, da die Geschiebemergel ohne Flutung bei Entlastung mangels Wasser keine Rückverformung zeigten und damit keine Moduln auswertbar waren. Die untersuchten Geschiebemergel verformen sich also ohne Wasserzufuhr rein plastisch.

Ergänzend zu den Kompressionsversuchen an ungestörten Proben wurden Versuche mit etwa an der Fließgrenze aufbereitetem Material durchgeführt.

Da der Steifemodul eine spannungsabhängig veränderliche Größe darstellt, wird für Korrelationen von Bodenkennwerten oder Sondiererergebnissen mit dem Steifemodul in der Praxis ein Potenzansatz nach OHDE (1939) bzw. JANBU (1963) verwendet:

$$E_s = \nu \cdot \sigma_{at} \cdot \left(\frac{\sigma_z + 0,5 \cdot \Delta\sigma}{\sigma_{at}} \right)^\omega \quad (2)$$

mit: ν Steifebeiwert
 ω Steifeexponent
 σ_{at} mittlerer atmosphärischer Druck = 100 kN/m² = 1 bar
 σ_z Anfangsspannung, z. B. aus Überlagerungsdruck
 $\Delta\sigma$ Spannungsänderung

Gleichung 2 bietet mit dem Steifebeiwert und dem Steifeexponent zwei spannungsunabhängige Parameter zur Beschreibung der Zusammendrückbarkeit eines Bodens. Für die Ermittlung der Steifeparameter wurden in der vorliegenden Arbeit die ermittelten Steifemoduln gegenüber der Spannung aufgetragen, wobei die Spannung entsprechend Gleichung 2 als mittlere Spannungsänderung $\sigma_z + 0,5 \cdot \Delta\sigma$ berechnet wurde. Anschließend wurde durch die Anpassung einer potenziellen

Regressionskurve der Steifebeiwert und der Steifeexponent ermittelt. Ausreißer im niedrigen Spannungsbereich, welche auf geringe Vorbelastungsspannungen bzw. Störungen bei der Probenahme zurückgeführt wurden, fanden dabei keine Berücksichtigung (Abb. 2).

4.2 Ergebnisse

Die Einbaukennwerte der untersuchten Proben sind in Abbildung 3 in Form des Porenanteils n in Abhängigkeit des Wassergehalts w dargestellt. Für die Ermittlung des Porenanteils wurde dabei eine Korndichte von 2,75 g/cm³ nach OHDE (1956) für tonige Geschiebemergel angesetzt. Es ergibt sich eine hohe Korrelation mit $r = 0,95$, wobei anzumerken ist, dass stärker ausgetrocknete Proben mit einem Sättigungsgrad $S_r < 0,6$, z. B. durch Sonneneinstrahlung bei länger auflässiger Baugrube zum Zeitpunkt der Probenahme, in der Auswertung generell nicht berücksichtigt wurden, da das Einarbeiten des Ödometerrings zu einem Zerbrechen und damit einer starken Störung der Proben führte.

In Abbildung 4 sind beispielhaft die Druck-Setzungslinien (Erstbelastung) von drei Proben für den ungestörten und den etwa an der Fließgrenze aufbereiteten Zustand halblogarithmisch dargestellt. Während die ungestörten Proben jeweils abweichende Drucksetzungslinien zeigen, nähern sich diese im aufbereiteten Zustand für alle Proben einem etwa einheitlichen Verlauf an. Dies zeigt, dass die Unterschiede in der Zusammendrückbarkeit der untersuchten Geschiebemergel maßgeblich im Konsolidierungszustand begründet sind.

Der Drucksetzungslinie der ungestörten Probe JD/UP1 nimmt ab dem Spannungsintervall 100 bis 200 kN/m² einen stärker geneigten, annähernd linearen Verlauf ein, wie er für normalkonsolidierte Tone typisch ist und auch bei den aufbereiteten Proben beobachtet werden kann (Abb. 4). Die Vorkonsolidierungsspannung kann demnach etwa in diesem Spannungsbereich angenommen werden. Der überwiegende

Teil der untersuchten Proben wies jedoch bis zu einer Auflastspannung von 800 kN/m² noch einen gekrümmten, flacheren Verlauf der Drucksetzungslinie auf (vgl. Proben RO/UP1 und GR/UP1), so dass für diese eine deutlich höhere Vorkonsolidierungsspannung angenommen werden muss. Eine exakte Bestimmung, z. B. anhand des Verfahrens nach CASAGRANDE (1936), wurde nicht vorgenommen, da bis zur Maximalspannung noch kein eindeutiger Übergang in einen linearen Erstbelastungsverlauf erfolgt.

Die an den ungestörten Proben ermittelten Steifemoduln lagen im Mittel bei 9 ± 3 MN/m² im Lastbereich 100 bis 200 kN/m², 13 ± 4 MN/m² im Lastbereich 200 bis 400 kN/m² und 20 ± 5 MN/m² im Lastbereich 400 bis 800 kN/m². Die Ergebnisse sind mit Literaturwerten relativ gut vergleichbar. OTTO (1990) ermittelte an einem steifplastischen Geschiebemergel der Saalekaltzeit im Raum Münster im Lastbereich 50 bis 200 kN/m² einen Steifemodul von 6 MN/m². CHAMIER & GALLASCH (2005) geben für den Lastbereich 100 bis 400 kN/m² Steifemoduln von 6 bis 8 MN/m² an. Nach KAUSCH (2010) liegen die Steifemoduln für Geschiebelehme der Saale- und Elsterkaltzeit im Raum Hamburg mit einem Wassergehalt von 10 % im Lastbereich 50 bis 100 kN/m² bei 12 MN/m². Ergebnisse aus Setzungsmessungen (ohne Lastangabe) zitiert RICHTER (1994) aus den technischen Vorschriften des ehemaligen VEB Baugrund Berlin mit 5 bis 20 MN/m² für Geschiebelehme sowie 15 bis 40 MN/m² für Geschiebemergel, jeweils für weiche bis halbfeste Konsistenz.

Die an drei Proben beispielhaft ermittelten Verhältniswerte der Wiederbelastungsmoduln zu den Erstbelastungsmoduln lagen zwischen 3 und 5. In der Fachliteratur wird häufig ein Verhältniswert von 3 zur überschlägigen Abschätzung von Wiederbelastungsmoduln aus der Erstbelastung angegeben (z. B. RICHTER 1994). Trotz der anhand der Drucksetzungslinien rekonstruierbaren hohen Vorkonsolidierungsspannungen liegen die an den untersuchten Proben ermittelten Steifemoduln demnach deutlich unterhalb

echter Wiederbelastungsmoduln, so dass davon ausgegangen werden kann, dass bereits eine weitestgehende Entspannung der Geschiebemergel nach der Entlastung durch den Wegfall der Gletscherauflast stattgefunden hat.

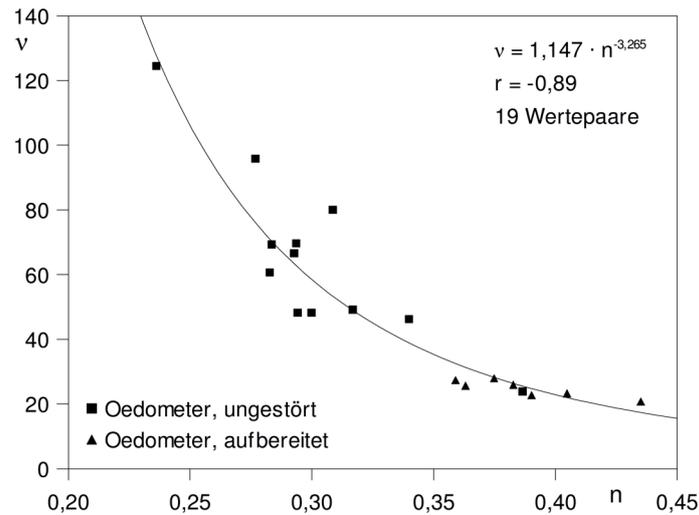
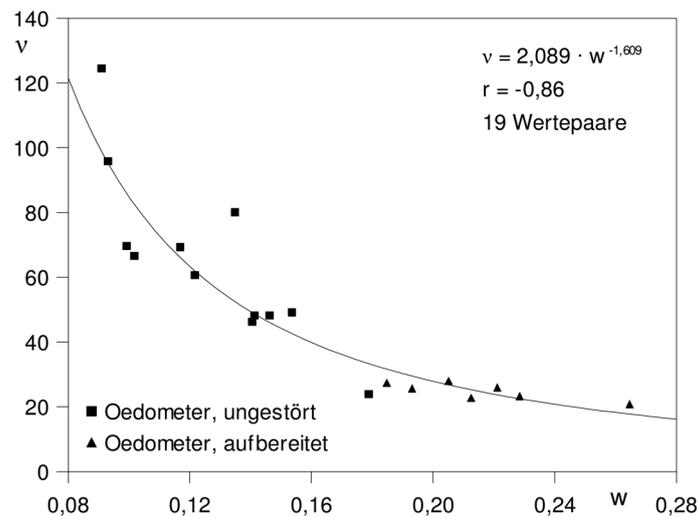
Die ermittelten Steifebeiwerte ν lagen zwischen 23,9 und 124,49, wobei Proben mit geringerem Porenanteil bzw. Wassergehalt größere Steifebeiwerte und damit eine geringere Zusammendrückbarkeit aufwiesen. Die an der Fließgrenze aufbereiteten Proben zeigten, analog zu den Drucksetzungslinien, sehr nah beieinander liegende Werte zwischen 20,77 und 27,95. Die Abhängigkeit der Steifebeiwerte vom Porenanteil und vom Wassergehalt ist in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt. Es ergeben sich hohe Korrelationen mit $r = -0,89$ bzw. $-0,86$.

Die Steifeexponenten ω der untersuchten ungestörten Proben lagen zwischen 0,44 und 0,97. Proben mit niedrigeren Porenanteilen und Wassergehalten wiesen dabei geringere Steifeexponenten und damit eine stärkere Krümmung der Steifemodul-Spannungskurve auf. Die aufbereiteten Proben zeigten nahezu konstante Steifeexponenten zwischen 0,92 und 0,97. Die gefundene Abhängigkeit der Steifeexponenten vom Porenanteil und vom Wassergehalt ist in den Abbildungen 7 und 8 dargestellt. Es ergeben sich ebenfalls hohe Korrelationen mit $r = 0,81$ bzw. $0,87$.

5. Viskosität

5.1 Grundlagen und Methodik

Die Viskosität kennzeichnet die Tendenz eines Gesteins zu Kriechverformungen, also Verformungen, die bei konstantem Spannungszustand lange Zeit andauern und nicht auf eine zeitlich verzögerte Porenwasserströmung zurückzuführen sind. Hierzu zählen z. B. die volumentreue Verformung bindiger, wassergesättigter Böden unter vertikaler Belastung oder Kriechbewegungen an Hängen. Die Viskosität drückt sich in einer Abhängigkeit des Verformungswiderstands von der Verformungsgeschwindigkeit (rate sensitivi-

Abb. 5 Steifebeiwert v in Abhängigkeit des Porenanteils n Abb. 6 Steifebeiwert v in Abhängigkeit des Wassergehalts w

ty) aus. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Verformungswiderstands τ kann nach Kolymbas (2007) angegeben werden mit:

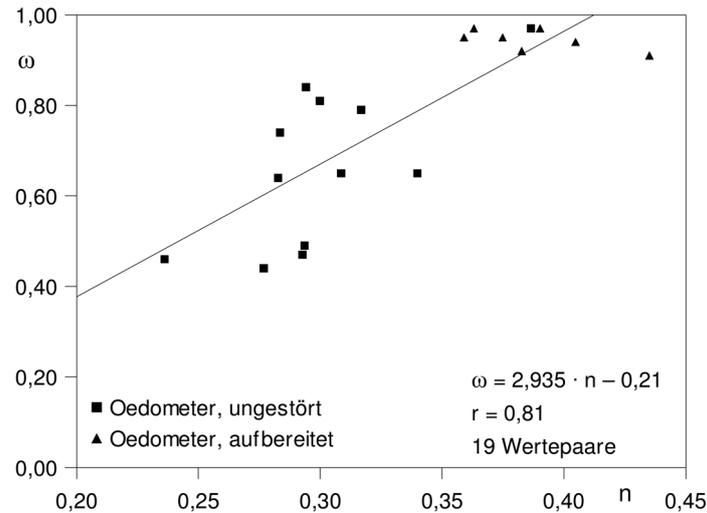
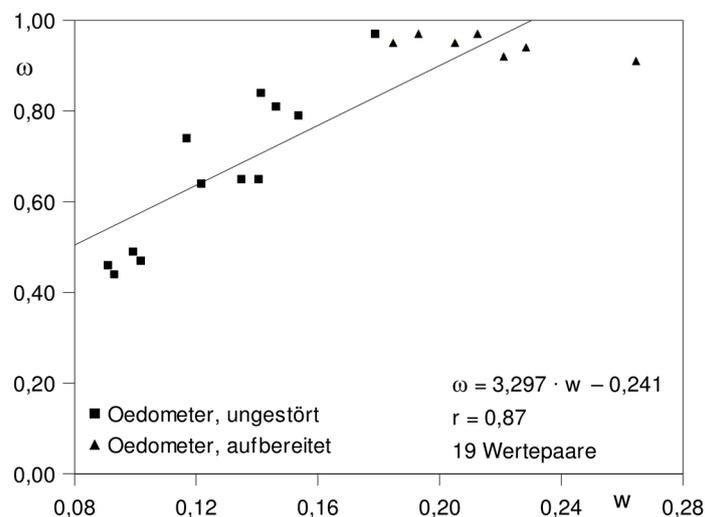
$$\Delta\tau = \tau \cdot I_v \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_0} \quad (3)$$

- I_v Zähigkeitsindex
 $\dot{\epsilon}_1$ Verformungsgeschwindigkeit vor deren Änderung
 $\dot{\epsilon}_0$ Verformungsgeschwindigkeit nach deren Änderung

Dabei ist der Zähigkeitsindex I_v ein Maß für die Geschwindigkeitsabhängigkeit

des Verformungsverhaltens und geht auf LEINENKUGEL (1967) zurück. Er stellt für eine definierte Verformungsgeschwindigkeit eine Bodenkonstante dar (GÜDEHUS 1981). Anwendung findet er z. B. in der Bemessung von Pfahldübeln bei der konstruktiven Hangsicherung kriechanfälliger Böden (siehe BRANDL 2009).

In der vorliegenden Arbeit wurde an fünf ungestörten Geschiebemergelproben der Zähigkeitsindex in undrainierten, weggesteuerten Triaxialversuchen mit sprunghafter Änderung der Verformungsgeschwindigkeit

Abb. 7 Steifeexponent ω in Abhängigkeit des Porenanteils n Abb. 8 Steifeexponent ω in Abhängigkeit des Wassergehalts w

bestimmt. Der Zelldruck wurde während des Versuchs konstant gehalten. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde von der Referenzgeschwindigkeit $v_0 = 0,1$ mm/min sprunghaft auf $v_1 = 0,01$ mm/min erniedrigt bzw. auf $v_1 = 1$ mm/min erhöht.

Die vorhandenen Literaturwerte für Zähigkeitsindizes werden in der Regel für eine Vorschubgeschwindigkeit von

$$\dot{\epsilon}_1 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

angegeben (GUDEHUS 1981). Bei den in der vorliegenden Arbeit verwendeten Probenhöhen von 90 bis 120 mm entspricht die Referenzgeschwindigkeit von 0,1 mm/min etwa

$$\dot{\epsilon}_0 = 1,5 \text{ bis } 2 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1},$$

so dass die Vergleichbarkeit der Werte gegeben ist. Die Höhenänderung während des Versuchs wurde aufgrund der geringen Gesamtverformungen vernachlässigt.

Bei der Versuchsauswertung wurde aus den gemessenen Werten für alle Messschritte der Verformungswiderstand mit $\tau = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$ bestimmt und im τ - s -Diagramm dargestellt. Wie in Abbildung 9 erkennbar, erfolgt der Anstieg des Verformungswiderstands bei Erhöhung der Geschwindigkeit nicht sprunghaft, sondern steigt aufgrund der verzögerten Beschleunigung der Triaxialpresse langsam an. Bei der Verringerung der

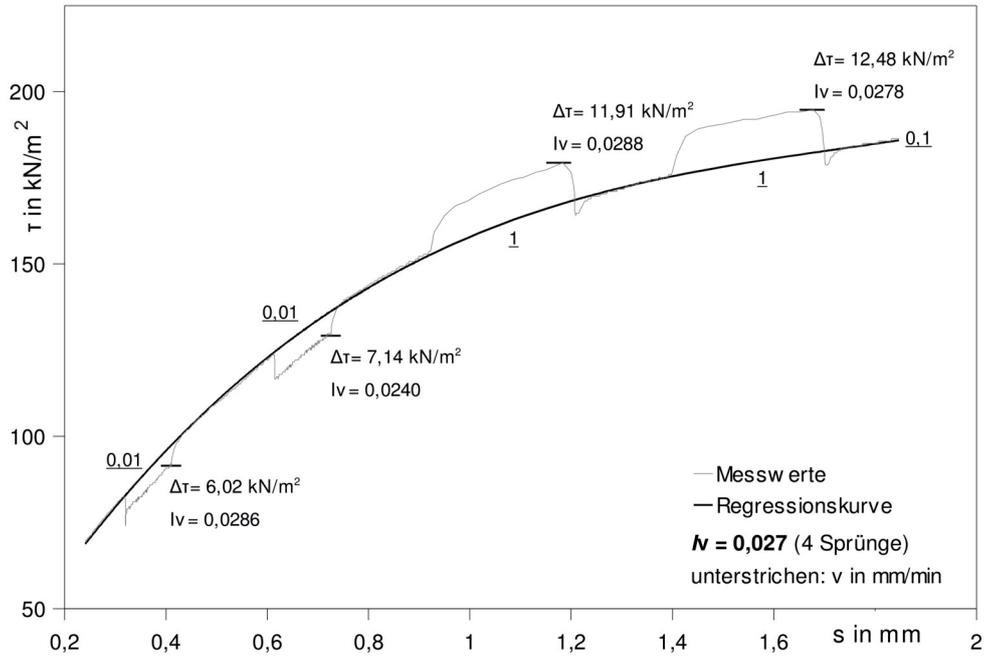


Abb. 9 Auswertung des Sprungversuchs, Probe JD/UP2

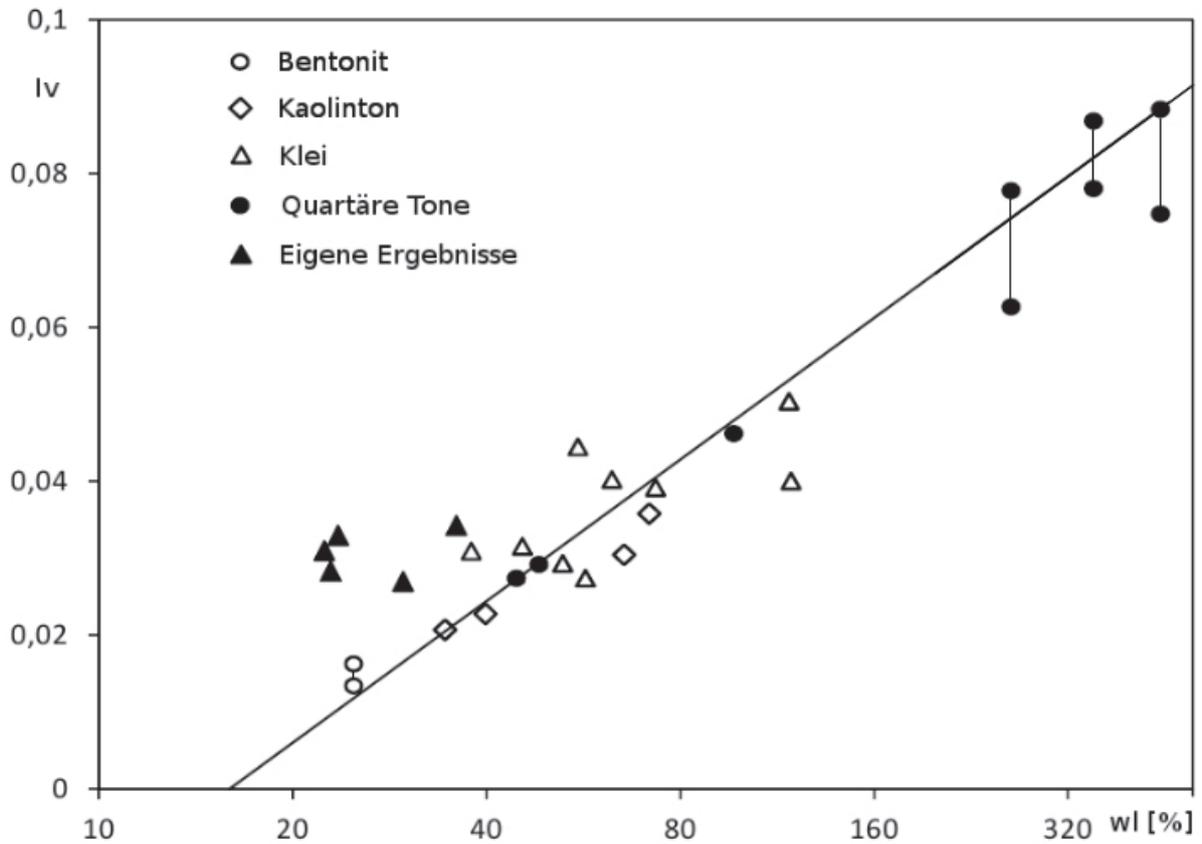


Abb. 10 Abhängigkeit des Zähigkeitsindex von der Fließgrenze (Daten aus Brandl 2009, ergänzt durch eigene Ergebnisse)

Verformungsgeschwindigkeit kommt die Presse durch das abrupte Abbremsen zunächst zum Stillstand und beschleunigt anschließend ebenfalls mit Verzögerung auf die Zielgeschwindigkeit. Für die Bestimmung von $\Delta\tau$ wurde daher eine Regressionskurve über ein Polynom dritten Grades an den Verlauf von τ für die Referenzgeschwindigkeit 0,1 mm/min angepasst. Auf diese Weise konnte $\Delta\tau$ an einem von Beschleunigungs- bzw. Bremsseffekten nicht beeinflussten Bereich berechnet werden. Anhand $\Delta\tau$ wurde der Zähigkeitsindex I_v für jeden Sprung durch Umstellung von Gleichung (3) berechnet und anschließend der Mittelwert aller Sprünge ermittelt.

5.2 Ergebnisse

Die ermittelten Zähigkeitsindizes lagen zwischen 0,027 und 0,034. Im Mittel ergab sich ein Zähigkeitsindex von 0,031. Im Vergleich mit Ergebnissen von GUDEHUS (1981) liegen die untersuchten Geschiebemergel damit im Bereich von Rohton (Mineralbestand Kaolinit und Illit), für welche ein Zähigkeitsindex von 0,03 angegeben wird. Für schluffigen Ton (Mineralbestand Quarz und Kaolinit) wird ein Zähigkeitsindex von 0,02 angegeben. Eine deutlich höhere Viskosität ($I_v \geq 0,04$) weisen Montmorillonit sowie organische Böden wie Klei und Torf auf. In Abbildung 10 erfolgt der Vergleich der eigenen Ergebnisse mit Literaturwerten in Abhängigkeit der Fließgrenze, welche auf GUDEHUS & LEINENKUGEL (1978) zurückgehen. Die eigenen Ergebnisse lassen sich befriedigend in die bisher gefundenen Ergebnisse einordnen, sie zeigen jedoch etwas höhere Zähigkeitsindizes im Vergleich zur bisher gefundenen Abhängigkeit von der Fließgrenze.

Der Vergleich der eigenen Ergebnisse mit den Literaturangaben zeigt, dass die untersuchten Geschiebemergel eine verhältnismäßig hohe Viskosität, vergleichbar mit reinem Ton, aufweisen. Die hohe Viskosität kann wohl damit erklärt werden, dass die tonige Feinkornmatrix

vorrangig für das geschwindigkeitsabhängige Verformungsverhalten maßgeblich ist. So treten nach röntgenographischen Untersuchungen von BAERMANN & WÜSTENHAGEN (1985) in der Feinkornmatrix saalekaltzeitlicher Geschiebemergel neben nicht quellfähigen Tonmineralen wie Illit, Kaolinit und Chlorit auch quellfähige Tonminerale hoher Viskosität in Form von Montmorillonit (Smektit) auf.

6. Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit weisen darauf hin, dass die tonige Feinkornmatrix der Geschiebemergel für das Verformungsverhalten maßgeblich ist. So ergeben sich anhand der Kompressionsversuche an etwa an der Fließgrenze aufbereitetem Material für erstverdichtete Tone typische lineare Drucksetzungslinien. Auch bei der Untersuchung der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Verformungsverhaltens (Viskosität) ergeben sich Zähigkeitsindizes, welche am besten mit Ton vergleichbar sind.

Die Ergebnisse der Kompressionsversuche weisen außerdem darauf hin, dass die Unterschiede in der Zusammendrückbarkeit der Geschiebemergel maßgeblich nicht auf der Materialzusammensetzung der Proben (Kornverteilung), sondern auf den unterschiedlichen Konsolidierungszustand beruhen. Die Geschiebemergel weisen anhand der Drucksetzungslinien überwiegend hohe Vorkonsolidierungsspannungen auf und sind als überkonsolidiert zu charakterisieren, da die momentane Auflast der oberflächennah gewonnenen Proben deutlich unterhalb der maximalen Auflast liegt. Durch den Vergleich der ermittelten Erstbelastungsmoduln mit den Wiederbelastungsmoduln zeigt sich jedoch, dass die Proben weitgehend entspannt sind und die hohe Vorkonsolidierungsspannung nur noch schwach eingepreßt ist.

Mit der Arbeit konnten außerdem neben der Ermittlung charakteristischer Steifemoduln Korrelationen mit dem Porenanteil und dem Wassergehalt erarbeitet werden, welche in der geotechnischen Praxis für

die Berechnungen von Setzungen unter Gründungslasten verwendet werden können. Da die in Kompressionsversuchen ermittelten Steifemoduln insbesondere für überkonsolidierte Tone wie Geschiebemergel oder Tertiärtone gegenüber den Feldmessungen erfahrungsgemäß deutlich zu gering ausfallen (PRINZ & STRAUSS 2011), können dabei die aus Setzungsmessungen ermittelten Korrekturbeiwerte der DIN 4019 angewendet werden. Aufgrund der oberflächennahen Probenahme empfiehlt sich gegebenenfalls außerdem eine tiefenabhängige Korrektur, wie sie von HOLZLÖHNER (1985) vorgestellt wurde:

$$E_s' = E_s \sqrt{z} \quad (4)$$

mit: z Tiefe in m

Da die Ergebnisse an einer relativ kleinen Probenanzahl ermittelt wurden, sind weitere Untersuchungen zur Überprüfung und Anpassung der gewonnenen Erkenntnisse wünschenswert. Dabei sollte besonders auch die Untersuchung von Proben aus größeren Entnahmetiefen angestrebt werden, um den Einfluss der bestehenden Überdeckung auf den Konsolidierungszustand berücksichtigen zu können. Es empfehlen sich außerdem vergleichende Untersuchungen zwischen Laborergebnissen und durch Rückrechnungen von Setzungsmessungen ermittelten Steifemoduln, da exakte Aussagen zum realen Setzungsverhalten letztendlich nur anhand von Setzungsbeobachtungen erfolgen können.

7. Literaturverzeichnis

- BAERMANN, A. & WÜSTENHAGEN, K. (1985): Ingenieurgeologische Untersuchungen an Geschiebemergeln im Hamburger Raum. In: HEITFELD, K.-H. (Hrsg.): Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgestein, 434-448, Springer-Verlag, Heidelberg.
- BRANDL, H. (2009): Stützbauwerke und konstruktive Hangsicherungen. In: WITT, K. J. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch, Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke. 747-902, Ernst & Sohn, Berlin.
- CASAGRANDE, A. (1936): The Determination of the Preconsolidation Load and its Practical Significance. Proc. 1. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Harvard Univ., 3, 60. Zitiert in KOTZIAS (1963).
- CHAMIER, H. & GALLASCH, K. (2005): Erdbau mit bindigen Böden unter ungünstigen hydrogeologischen Bedingungen. Tagung Erdbau für Verkehrswege 2005. Als Download verfügbar unter www.baugrund-bb.de (zuletzt aufgerufen am 05.03.2013).
- DIN 1997-2 (2010): Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds.
- DIN 4019-1 (1979) : Baugrund - Setzungsberechnungen bei lotrechter, mittiger Last.
- DIN 18122-1 (1997): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze.
- DIN 18123 (1996): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Korngrößenverteilung.
- DIN 18135 (1999): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Eindimensionaler Kompressionsversuch.
- DIN 18137 (1990): Baugrund - Versuche und Versuchsgeräte; Bestimmung der Scherfestigkeit, Triaxialversuch.
- DIN 18196 (2004): Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke.
- EISSMANN, L. (1995): Sachsen. In : BENDA, L. (Hrsg): Das Quartär Deutschlands. 171-198, Gebrüder Bornträger, Berlin/Stuttgart.
- GUDEHUS, G. (1981): Bodenmechanik, Enke Verlag.
- GUDEHUS, G. ; LEINENKUGEL, H. J. (1978): Fließdruck und Fließbewegung in bindigen Böden: Neue Methoden. Vorträge zur Baugrundtagung 1978 in Berlin. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Essen. Zitiert in BRANDL (2009).

- HOLZLÖHNER, U. (1985): Sand Properties Governing Foundation Settlement, XI ICS-MFE, San Francisco. Zitiert in RICHTER (1994).
- JANBU, N. (1963): soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. In: Problems of settlements and compressibility of soils, 1, 19-25.
- KAUSCH, F. (2010): Geotechnische Charakterisierung des Hamburger Baugrundes. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg. Als Download verfügbar unter www.hamburg.de/baugrund-start/ (zuletzt aufgerufen am 05.03.2013).
- KNOTH, W. (1995): Sachsen-Anhalt. In: BEN-DA, L. (Hrsg.): Das Quartär Deutschlands. 148-170, Gebrüder Bornträger, Berlin/Stuttgart.
- KOLYMBAS, D (2007): Geotechnik - Bodenmechanik und Grundbau. 2. Ausgabe, Springer-Verlag.
- KOTZIAS, P. (1963): Die Zusammendrückbarkeit von Schluff. Mitteilungen aus dem Institut für Verkehrswegebau, Grundbau und Bodenmechanik der Techn. Hochschule Aachen, Heft 28
- LEINENKUGEL, H. J. (1976): Deformations- und Festigkeitsverhalten bindiger Erdstoffe. Veröffentlichungen des Instituts für Boden- und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 66.
- LITT, T. ; BEHRE, K.-E. ; MEYER, K.-D. ; STEPHAN, H.-J. ; WANSA, S. (2007): Stratigraphische Begriffe für das Quartär des norddeutschen Vereisungsgebietes. Eiszeitalter und Gegenwart, Quaternary Science Journal, 56, 7-65.
- OHDE, J. (1939): Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund. Der Bauingenieur, 20 (1939), Nr. 33/34, 451-459.
- OHDE, J. (1956): Grundbaumechanik. In: HÜTTE. Band III, 36-902, Ernst & Sohn, Berlin.
- OTTO, R. (1990): Der saaleiszeitliche Geschiebemergel am westlichen Stadtrand von Münster/Westfalen: Lithologie und seine Eigenschaften als Baugrund. Geol. Paläont. Westf., 16, 27-33
- PRINZ H. & STRAUSS, R. (2011): Ingenieurgeologie. 5. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag.
- RICHTER, T. (1994): Zur rechnerischen Abschätzung des Lastsetzungsverhaltens von Bauwerken, Heft 40 des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energie-wasserbau (IGBE) Universität Hannover, 204-216.
- SCHULZ, H. (2000): Ruhedruck und Entspannungsbewegungen überkonsolidierter Böden. Mitt. Inst. Bodenmechanik und Grundbau, Uni Bundeswehr München, 14, 2-46. Zitiert in: VON SOOS et al. (2008).
- VON SOOS, P. & ENGEL, J. (2008): Eigenschaften von Boden und Fels - ihre Ermittlung im Labor. In: WITT, K. J. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen, 123-218, Ernst & Sohn, Berlin.

Kartenwerke

Hydrogeologisches Kartenwerk der DDR, Maßstab 1:50.000 (HK-50).

Lithofazieskarten Quartär, Maßstab 1:50.000 (LKQ-50).