

Geotechnische Charakterisierung des Hamburger Baugrundes

von Friedrich Kausch

Der Baugrund in Hamburg besteht im wesentlichen aus **Lockergesteinen des Quartär**.

Der sich auf größere Bauwerke im Bereich der Salzstöcke noch auswirkende **tieferer Untergrund** wird im allgemeinen von tertiären und kreidezeitlichen Schichten aufgebaut. In der Nähe des Salzstockes Langenfelde/Othmarschen sind aufgrund der Hochlage des Salzstockes und damit seiner darüber liegenden Hutgesteine (Gips, Anhydrit und andere) von zum Teil nur wenigen Metern unter Gelände Auswirkungen auf oberflächennahe Gründungen nicht auszuschließen. Der zur Verkarstung und Höhlenbildung neigende Gips hat jedoch keine große Ausdehnung, sondern ist zwischen standfesten Sedimenten eingeschlossen. Damit werden einbruchsfähige Hohlräume zwar nicht ausgeschlossen, ihre Stabilität ist aber ungleich höher als bei einem massereichen Hutgips.

Im Bereich des Salzstockes sind eine Reihe von Erdfällen mit Durchmessern von 10 bis 100 m und bis zu 25 Metern Tiefe nachgewiesen worden. Das bekannteste Beispiel ist der Bahrenfelder See. Die meisten Erdfälle sind sehr alt. In der Nähe des Allgemeinen Krankenhauses Altona wurde ein 12 m tiefer Erdfall untersucht, dessen älteste Ablagerungen aus der Eemwarmzeit (ca. 50000 Jahre) stammen. Die Absenkungsgeschwindigkeit solcher Erdfälle beträgt bis zu 3,5 mm/a. Zwischen 1929 und 1963 wurden lokal "Einsturzbeben" registriert. Dabei dürfte es sich um Einstürze kleinerer Hohlräume in Tiefen zwischen 30 und 100 m gehandelt haben, die sich nicht mehr zur Oberfläche durchgepaust haben. Das letzte große Einsturzbeben ereignete sich am 8.4.2001.

Der Salzstock Reitbrook hat wegen seiner Tiefenlage (ca. 800 m) keinen Einfluss auf den oberflächennahen Baugrund.

Nach der Baugrundbeschaffenheit lässt sich das Hamburger Gebiet in drei geologisch unterschiedliche Bereiche gliedern:

- Die **Geest** nördlich der Elbe ist aus wechsellagernden Grundmoränen (Geschiebelehm, Geschiebemergel), Beckensedimenten und Schmelzwassersanden aufgebaut, die in der Regel einen gut tragfähigen Baugrund darstellen. Im Bereich alter Entwässerungssysteme wurden während der Eem-Warmzeit Hohlformen zum Teil mit mächtigen verfor-

mungempfindlichen Böden wie Torfen und Mudden (organischer Schluff) verfüllt, die in der Regel ungünstige Baugrundeigenschaften aufweisen.

- Die Ablagerungen der Elbeniederung bestehen aus verformungsempfindlichen, holozänen Bodenarten wie Klei (toniger, humoser Schluff), organogenen Altwasserablagerungen wie Schlick und Mudde (organischer Schluff) und aus sedentär gebildetem Torf. In der südlich der Elbe gelegenen Elbmarsch überdeckt und/oder ersetzt Klei den Torf des weiter südlich anstehenden Geestrandmoores. Oberhalb des Grundwasserspiegels kann der Klei eine steife Konsistenz, darunter eine überwiegend breiige bis weiche Konsistenz aufweisen. Torfe, Grobdetritusmudden und Mudden können mit fließendem Übergang auftreten.

Die Mächtigkeit dieser Bodenarten schwankt zwischen wenigen Dezimetern und bis zu 10 Metern. Sie werden z.T. von Sandschichten unterbrochen. In größerer Tiefe können spätglaziale Basistorfe und Basismudden auftreten.

Die Weichschichten sind vor allem in den bebauten Bereichen durch mehrere Meter mächtige Auffüllungen bedeckt.

Im Liegenden stehen in der Regel gut tragfähige Sande an.

- Die Geest südlich der Elbe ist dagegen aus bis zu 80 m mächtigen Schmelzwassersanden aufgebaut, über denen örtlich Sandlöß (Flottsande und Flottlehm) ansteht. Geschiebelehm und Geschiebemergel sind im südöstlichen Bereich anzutreffen.

Auffüllung

Es handelt sich um Mischböden aus Sand, Schluff, organischen Beimengungen, Bauschutt etc. Diese Böden sind sehr heterogen zusammengesetzt und überwiegend locker gelagert. In Industriegebieten sind sie teilweise kontaminiert.

Kennwerte	Auffüllung
Feuchtraumwichte γ (kN/m ³), lockere Lagerung	16
Feuchtraumwichte γ (kN/m ³), dichte Lagerung	18
Reibungswinkel ϕ' (°), lockere Lagerung	27,5
Kohäsion c' (kN/m ²), lockere Lagerung	0
Reibungswinkel ϕ' (°), dichte Lagerung	32,5
Kohäsion c' (kN/m ²), dichte Lagerung	0
Steifemodul E (MN/m ²), lockere Lagerung	5 - 20
Steifemodul E (MN/m ²), dichte Lagerung	20 - 40

Tab. 1: Kalkulatorische, geotechnische Kennwerte der Auffüllungen

Als **Weichschichten** werden die in der Elbmarsch und deren Randmoorbereichen anstehenden Bodenarten zusammengefasst. Sie sind aus baugrundtechnischer Sicht in der Regel außerordentlich problematisch. Bei bautechnischen Entwürfen wird eine möglichst genaue Definition der geo-

technischen Eigenschaften erforderlich. Der Begriff Weichschichten umfasst Bodenarten wie Schlack, Mudde Torf und Klee, aber auch die eemzeitlichen Torfe, Mudden und Kalkmudden, die ein vergleichbares Verhalten aufweisen.

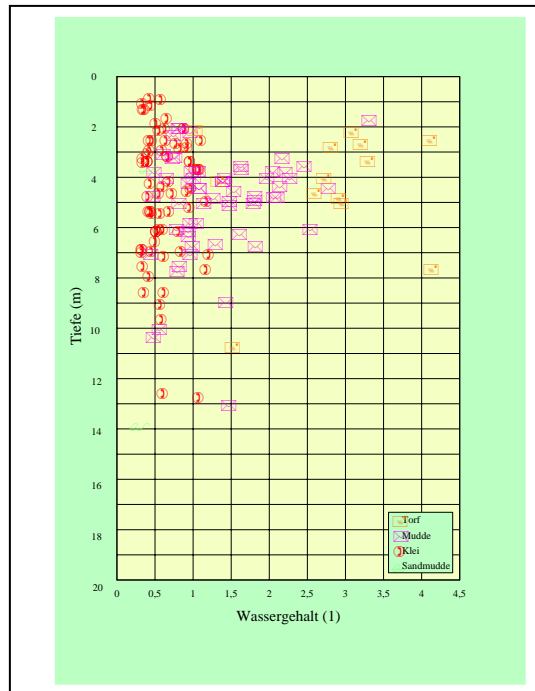


Abb. 1: Tiefenverteilung der Weichschichten und deren Wassergehalte

Schlack ist ein feinkörniges, schlammartiges Sediment in Gewässern jeder Art mit viel organischer Substanz. Typisch ist eine breiig-weiche Konsistenz. Im Bereich der Elbe, der Kanäle und der Hafenbecken ist Schlack – im Gegensatz zur Mudde – anthropogen beeinflusst (Muschelschill, Holz, Schwefeleisen, Vivianit).

Torfe sind in nährstoffarmen Standorten mit hohem Grundwasserstand sedentär entstanden, sie untergliedern sich in Niedermoor-, Übergangsmoor- und Hochmoortorfe unterschiedlicher Zersetzungsgrade, im allgemeinen mehr als 30% organische Substanz, welche aus pflanzlichen Mikro- und Makroresten und kolloidalen Huminstoffen in wechselnden Anteilen besteht.

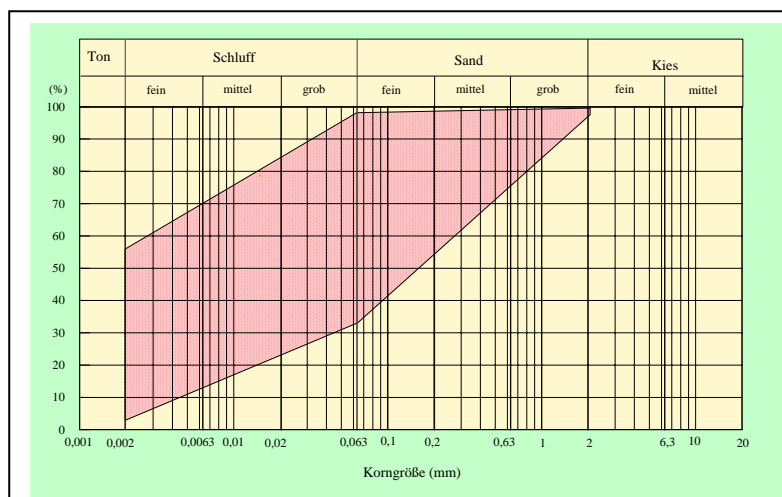


Abb. 2: Korngrößenverteilung der Mudden

Mudden sind in stehenden Gewässern abgelagerte limnische Sedimente, gekennzeichnet durch das Vorhandensein von Süßwasserdiatomeen und verschleppten brackischen Diatomeen. Sie gliedern sich in Abhängigkeit von der Kornverteilung in Tonmudden, Schluffmudden und Sandmudden. In Abhängigkeit von der organischen Substanz werden im Elbtal noch Detritus- und Grobdetritusmudde unterschieden.

Klei ist ein im Elbeästuar unter marinen und brackischen Bedingungen abgelagertes Gezeitensediment. Er ist gekennzeichnet durch Ausscheidungsprodukte der marinen und brackischen Fauna und Flora (u.a. brackische und marine Diatomeen) und sowohl hinsichtlich der Kornverteilung als auch hinsichtlich der organischen Bestandteile sehr unterschiedlich ausgebildet.

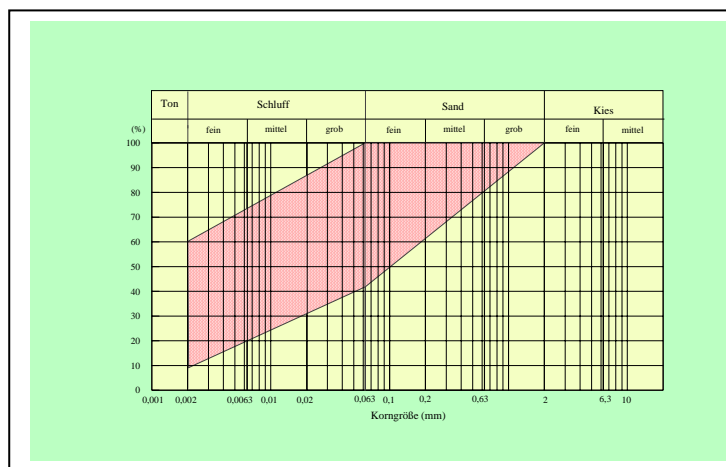


Abb. 3: Korngrößenverteilung Klei

Nach DIN 18 300 ist der Klei in die Bodenklasse 2 bzw. 4 - fließender bzw. mittelschwer lösbarer Boden - und nach DIN ISO 14688 als OU bzw. als OT einzustufen. Torfe, Mudden und Schlick gehören in die Bodenklasse 2. Nach DIN ISO 14688 sind sie als HN und HZ bzw. F zu klassifizieren.

Die wichtigsten kalkulatorischen, geotechnischen Kennwerte der Weichschichten werden in folgender Tabelle zusammengefasst:

Kennwerte	Mudde und Torf (qh)	Mudde und Torf (qee)	Klei
Feuchtraumwichte γ (kN/m ³)	12 - 16		13 - 20
Trockenraumwichte γ_d (kN/m ³)	2 - 10		6 - 15
Wassergehalt w (%)	50 - 570	40 - 210	20 - 120
Porenanteil n (%)	50 - 90		34 - 75

Reibungswinkel ϕ_{cu} (°)	8,5 - 24 (15,4)	17 - 25,5 (19,0)	15 - 25 (17,7)
Kohäsion c_{cu} (kN/m ²)	5 - 32 (15,7)	6 - 40 (11,3)	2,5 - 39 (11,5)
Steifemodul E (MN/m ²)			
$\sigma = 0,1$ MN/m ² , $w = 20\%$	3,5		
$\sigma = 0,1$ MN/m ² , $w = 400\%$	0,8		
Durchlässigkeit K (m/s)	1,5E-8 bis 6E-11	4E-9 bis 8E-11	2E-9 bis 5E-11

Tab. 2: Grenzwerte und kalkulatorische (..), geotechnische Kennwerte der Weichschichten

Alle diese Bodenarten sind stark verformungsempfindlich und sehr wenig wasserdurchlässig (staunässebildend). Für Böschungen in Einschnitten besteht Rutschungsgefahr. Bei einer Bebauung sind stets besondere Gründungsmaßnahmen erforderlich (z.B. Bodenaustausch, Tiefgründung). Bei geringer Mächtigkeit dieser Bodenarten kann für leichtere Bauwerke nach vorausgehender Setzungsschätzung eine Flachgründung möglich sein. Setzungen können durch Vorbelastung in Verbindung mit dem Einbau von Vertikaldräns beschleunigt werden. Bei höheren Aufschüttungen (Deiche, Dämme) besteht Grundbruchgefahr.

Grundwasserabsenkungen bei Baumaßnahmen und Sanierungsmaßnahmen sowie Dränagen und Entwässerungsgräben können zu Setzungen des Geländes und damit zu Schäden an vorhandenen Bauten und an Ver- und Entsorgungsleitungen führen. Das Grundwasser ist aufgrund der Sedimentationsbedingungen (Ablagerungen der Sedimente im Wasser, relativ geringer Konsolidierungsgrad infolge Auftrieb) ungespannt oder allenfalls halbgespannt.

Wassergehalt und organische Substanz

sind für diese Bodenarten prägende Faktoren.

Glühverlust Vgl.

Größenordnungsmäßig bestimmt er den Anteil an organischer Substanz. Da bei einer Glühtemperatur oberhalb 500°C auch Kristallwasser und anorganischer Kohlenstoff aus Kalziumkarbonat (fic) verlustig geht, wird häufig, u.a. für Prognoserechnungen zur Verlagerung organischer Schadstoffe, die Bestimmung des effektiven Gehaltes an

Organischem Kohlenstoff (foc/c_{org})

erforderlich. Er kann mit dem Carmhographen nach Wösterhoff ermittelt werden. Den Abb. 4 und 5 ist der statistische Zusammenhang zwischen Gehalt an organischem Kohlenstoff und Glühverlust zu entnehmen. Er ist aus dem Glühverlust gemäß

$$foc = e^{1,14 \ln(Vgl) - 1,45} (\%) \text{ in Abb. 5}$$

abzuleiten. Abweichungen sind systembedingt. Die gemessenen Werte liegen mit $N = 75$ und $r = 0,97$ zwischen 0,02 und 46%. Der organische Kohlenstoff hat maßgeblichen Einfluss auf die Sorption.

Der anorganische Kohlenstoff kann auch aus dem Kalkgehalt (Vca) nach Scheibler gemäß

$$f_{ic} = \frac{V_{ca}}{8,33}$$

abgeleitet werden. Aus dem Glühverlust (Vgl) ergibt sich dann der organische Kohlenstoff

$$f_{oc} = V_{gl} - f_{ic}.$$

Auf die aufwendigere Labortechnik kann dann verzichtet werden.

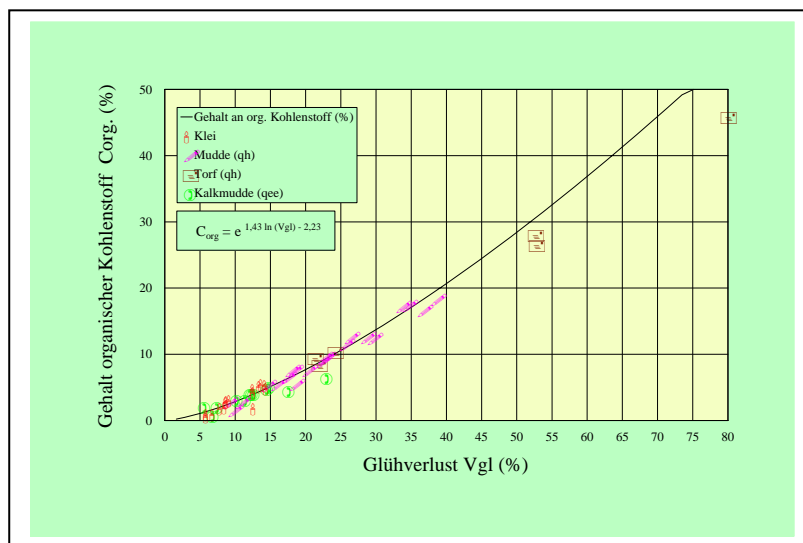


Abb. 4: Gehalt an organischem Kohlenstoff (foc) im Verhältnis zum Glühverlust

Für die folgende Grafik wurde die doppellogarithmische Auftragung gewählt, damit auch die für die Sorption wichtigen, niedrigen Gehalte an organischem Kohlenstoff (z.B. bei humosen Sanden) erkennbar werden.

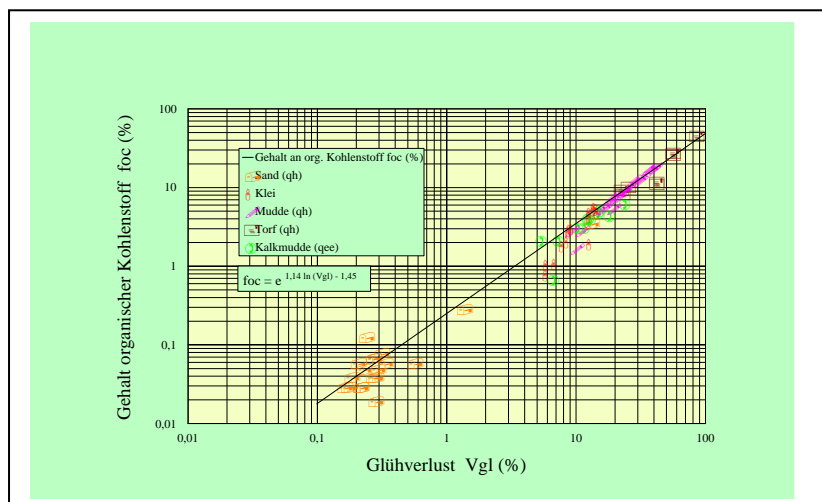


Abb. 5: Gehalt an organischem Kohlenstoff (foc) im Verhältnis zum Glühverlust

Die **Kornwichte** γ_s weicht bei organogenen Bodenarten z.T. erheblich von den üblichen Werten (26,5 bis 27,0 kN/m³) ab. Sie lässt sich aus dem leichter zu ermittelnden Glühverlust ableiten.

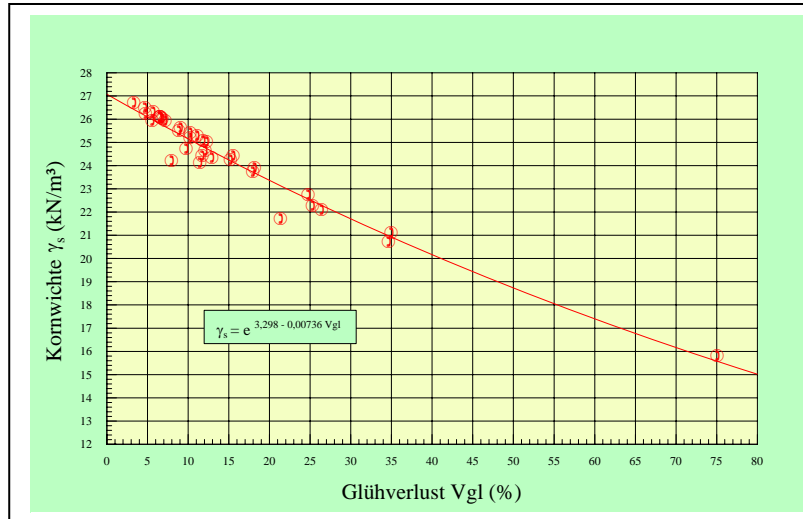


Abb. 6: Kornwichte im Verhältnis zum Glühverlust

Der **Wassergehalt** w gibt das Verhältnis der Masse m_w des im Boden vorhandenen Porenwassers zur Trockenmasse m_d des Bodens an.

$$w = \frac{m_w}{m_d} \quad [1]$$

Der **Porenanteil** n ist das Verhältnis des Porenvolumens zum gesamten Bodenvolumen

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \quad [\%].$$

Er ist nicht zu verwechseln mit dem nutzbaren Porenanteil P^* (nutzbare Porosität), der sich aus dem Porenanteil n abzüglich des Haftwasservolumens n_h ergibt.

Der Porenanteil ergibt sich aus dem Wassergehalt gemäß

$$n = 67,95 + 17,90 \ln w \quad (\%)$$

auf der Basis von $N = 244$ Proben, der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,81$ (Güte des Trends).

Die gemessenen Werte liegen zwischen 28,6 und 90%.

Die **Porenzahl** e ist das Verhältnis des Porenanteiles zum Anteil der Festmasse

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad [1].$$

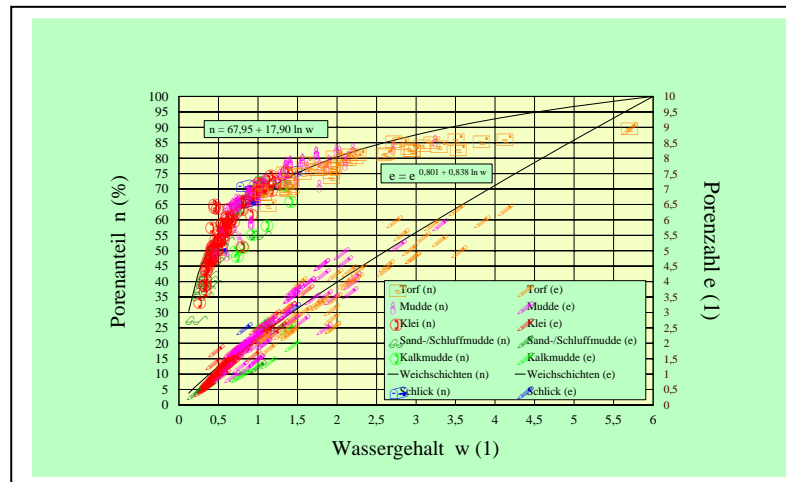


Abb. 7: Porenzahl im Verhältnis zum Wassergehalt

Die Porenzahl kann im Verhältnis zum Wassergehalt gemäß

$$e = e^{0,801 + 0,838 \ln w} \quad (1)$$

auf der Basis von $N = 244$ Proben ermittelt werden. Der Korrelationskoeffizient ist $r = 0,94$ (Güte des Trends). Die gemessenen Werte liegen zwischen 0,4 und 9.

Die **Trockenraumwichte** γ_d ist das Verhältnis der Masse des trockenen Bodens m_d zu dessen Volumen V

$$\gamma_d = \frac{m_d}{V} = \frac{\gamma}{1 + w} \quad \left[\text{kN} / \text{m}^3 \right].$$

Die Trockenraumwichte kann im Verhältnis zum Wassergehalt gemäß

$$\gamma_d = e^{1,91 - 0,74 \ln w} \quad (\text{kN/m}^3)$$

ermittelt werden. Die gemessenen Werte liegen zwischen 2,35 und 14,74 kN/m^3 bei $N = 133$ und $r = 0,88$.

Die **Feuchtraumwichte** γ ist das Verhältnis der Masse des feuchten Bodens m_f zu dessen Volumen V .

$$\gamma = \frac{m_f}{V} \quad \left[\text{kN} / \text{m}^3 \right]$$

Der statistische Zusammenhang ist

$$\gamma = e^{2,645 - 0,253 \ln w} \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

Die gemessenen Werte liegen zwischen 8,90 und 19,70 kN/m³ bei N = 133 und r = 0,87.

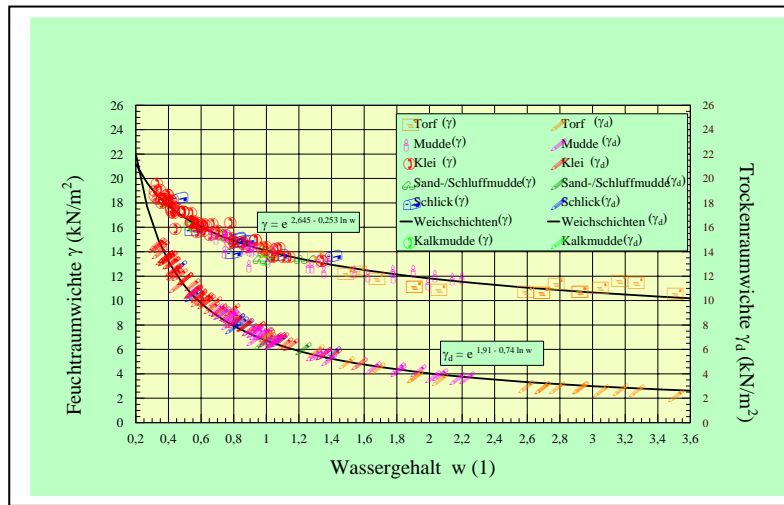


Abb. 8: Trockenraumwichte und Feuchtraumwichte im Verhältnis zum Wassergehalt

Bei mathematischen Transportmodellen wird in der Regel mit dem

Volumetrischen Wassergehalt Θ gerechnet; er gibt das Verhältnis des Wasservolumens zum gesamten Bodenvolumen an gemäß

$$\Theta = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot w \quad [1].$$

Es wurden daher auch die Zusammenhänge zwischen Porenanteil, Porenzahl, Trockenraumwichte und Feuchtraumwichte zum volumetrischen Wassergehalt ausgewertet.

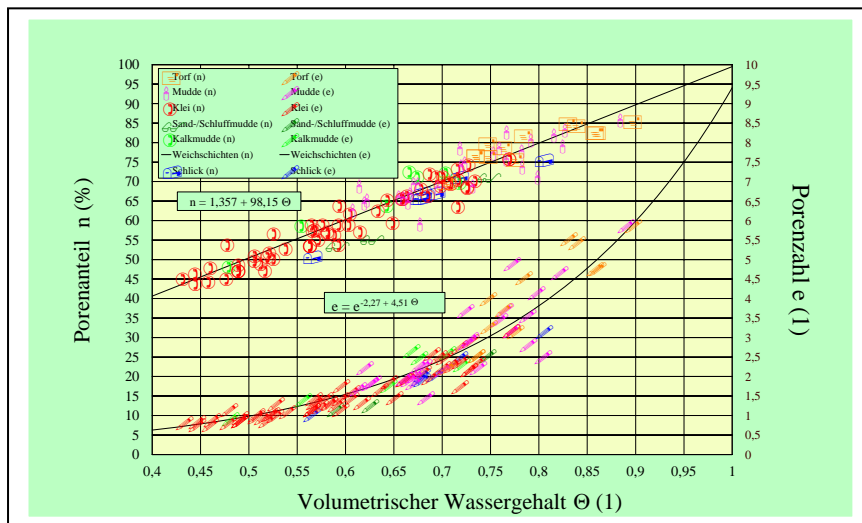


Abb.9: Porenanteil und Porenzahl im Verhältnis zum volumetrischen Wassergehalt

Der statistische Zusammenhang ist

$$n = 1,357 + 98,15 \Theta \quad [\%]$$

mit $N = 118$ und $r = 0,96$ und den gemessenen Werten 44 und 86% sowie

$$e = e^{-2,27 + 4,51 \Theta} \quad [1],$$

mit $N = 118$ und $r = 0,90$ und den gemessenen Werten 0,78 und 5,9.

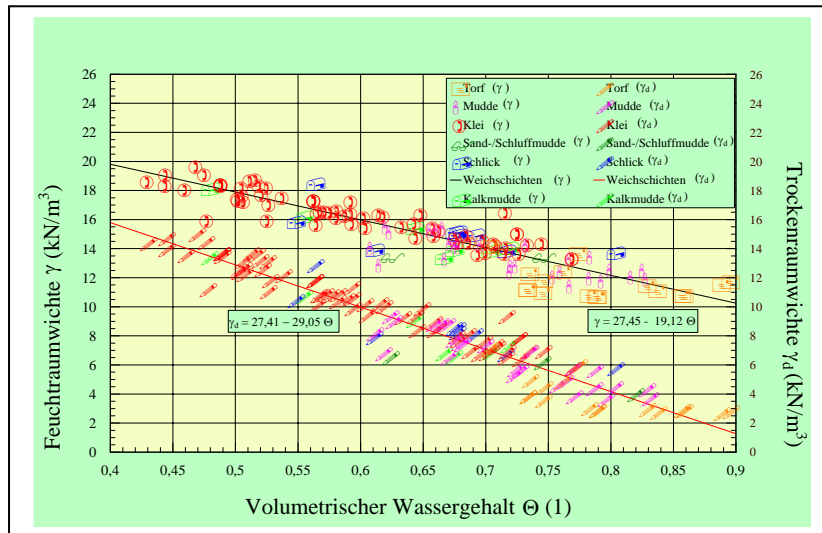


Abb. 10: Trockenraumwichte und Feuchtraumwichte im Verhältnis zum volumetrischen Wassergehalt

Der statistische Zusammenhang ist

$$\gamma = 27,45 - 19,12 \Theta \quad [\text{kN/m}^3]$$

mit $N = 132$ und $r = 0,91$ und den gemessenen Werten 10,78 und 19,7% sowie

$$\gamma_d = 27,41 - 29,05 \Theta \quad [\text{kN/m}^3],$$

mit $N = 132$ und $r = 0,95$ und den gemessenen Werten 2,73 und 15,05.

Für die Ermittlung spannungsbedingter Verformungen im Untergrund werden spannungsbezogene **Steifemoduln** der jeweiligen Bodenart erforderlich. Der Steifemodul ist eine Kennziffer, die dem Elastizitätsmodul fester Stoffe entspricht, allerdings von der Bodenart, dem Gefüge, der Lagerungsdichte und bei bindigen Böden vom Wassergehalt abhängig ist.

Der Steifemodul ergibt sich gemäß

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta h/h} \quad (\text{kN/m}^2)$$

und wird mit dem Ödometer ermittelt. Die Ergebnisse einer Vielzahl von Ödometerversuchen wurden mit dem Wassergehalt korreliert und in folgender Grafik dargestellt:

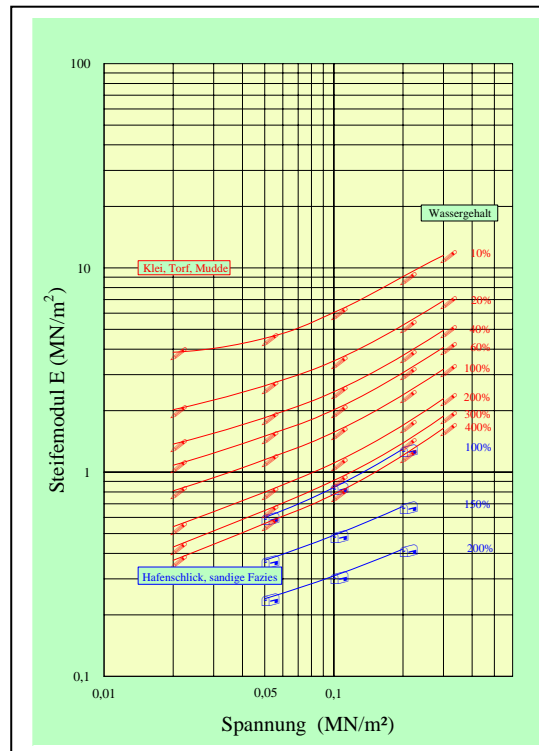


Abb. 11: Spannungsbezogener Erstbelastungssteifemodul für Weichschichten unterschiedlicher Wassergehalte

Für die Lösung von Grundwasserströmungsgleichungen wird u. a. der **spezifische Speicherkoeffizient** S_s benötigt. Er definiert den Speicherterm. Aus dem spezifischen Speicherkoeffizienten kann wiederum durch Multiplikation mit der Diffusivität die vertikale Durchlässigkeit des Systems ermittelt werden.

Der **Spezifische Speicherkoeffizient** S_s ergibt sich gemäß

$$S_s = \frac{\gamma_w \cdot g}{E^{\text{II}}} \quad (1/m)$$

aus dem Wiederbelastungsmodul E^{II} , der speziell für repräsentative Proben der Weichschichten mit niedriger Spannung ($0,02 \text{ MN/m}^2$) ermittelt wurde. Da üblicherweise nur die Erstbelastungsmoduln E^{I} gemäß Abb. 11 vorliegen, muss der Wiederbelastungsmodul hilfsweise über das Steifemodulverhältnis

$$E_v = \frac{E^{\text{II}}}{E^{\text{I}}} \quad (1)$$

ermittelt werden.

Für Wassergehalte

$$w \geq 1,0$$

ist $E_v \approx 6$,

$$w = 0,4 - 1,0$$

ist $E_v \approx 4$ und für

$$w \leq 0,4 \quad \text{ist } E_v \approx 2.$$

Diese spezifischen Speicherkoeffizienten S_s weisen im Verhältnis zum volumetrischen Wassergehalt einen leicht ansteigenden Trend auf. Die relativ starke Streuung resultiert aus der hilfswweisen Umrechnung über das Steifemodulverhältnis.

Unterteilt man die Weichschichten in Klei, Mudde und Torf, dann wird deutlich, dass die spezifischen Speicherkoeffizienten für den Klei mit zunehmendem Wassergehalt zwischen 0,002 und 0,006 liegen. Bei Mudden und Torfen ist die Wassergehaltsabhängigkeit geringer, der spezifische Speicherkoeffizient liegt bei einer größeren Streubreite zwischen 0,001 und 0,006.

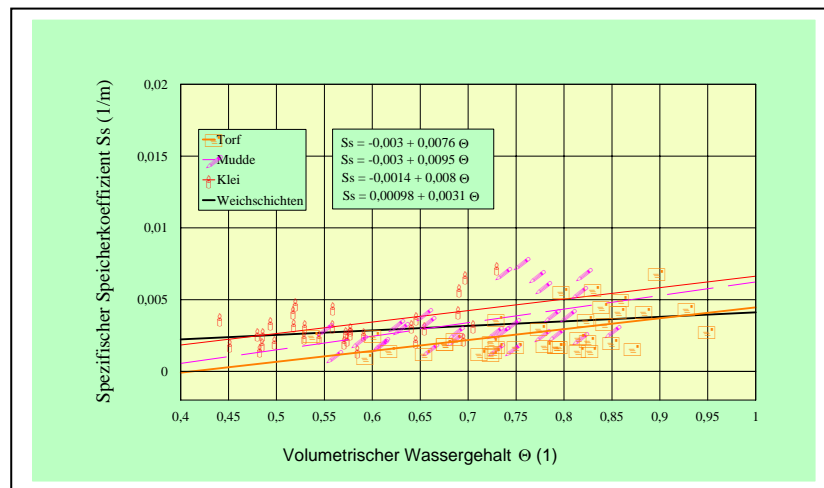


Abb. 12: Spezifischer Speicherkoeffizient S_s im Verhältnis zum volumetrischen Wassergehalt von Torf, Mudde und Klei

Der **Durchlässigkeitskoeffizient** k_r ist bei gesättigten Böden und laminarer Strömung der Wert, der sich aus der in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit des Bodens strömende Wassermenge ergibt. Dabei ist die Filtergeschwindigkeit

$$v = \frac{q}{A}$$

dem hydraulischen Gefälle

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

proportional. Mit

$$k_r = \frac{v}{i}$$

ergibt sich

$$k_r = \frac{q}{A \cdot \Delta t \cdot i} \quad (\text{m/s}).$$

Dabei ist

q = Wassermenge

A = Fläche

Δt = Zeiteinheit

i = hydraulisches Gefälle

Bei Weichschichten können durch Konsolidierung unter Auflasten und eine damit verbundene Verminderung des durchströmten Porenraumes erhebliche Veränderungen der hydraulischen Eigenschaften eintreten. Deshalb müssen vor Versuchsbeginn die zu untersuchenden Proben unter der mittleren Hauptspannung

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_v + 2\sigma_v \cdot K_0) \quad (\text{kN} / \text{m}^2) \quad \text{mit}$$

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad \text{und}$$

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \approx 0,5$$

konsolidiert werden.

Charakteristische Durchlässigkeitswerte für Torfe, Klei, Mudden und Sandmudden sind der Abb. 13 zu entnehmen. In dieser Abb. wurde für zwei repräsentative Mudden und einen repräsentativen Klei die Abnahme der Durchlässigkeit bei gleichem Gefälle und zunehmender Konsolidierung dargestellt. In der Abb. 14 wird dieser Zusammenhang noch einmal verdeutlicht.

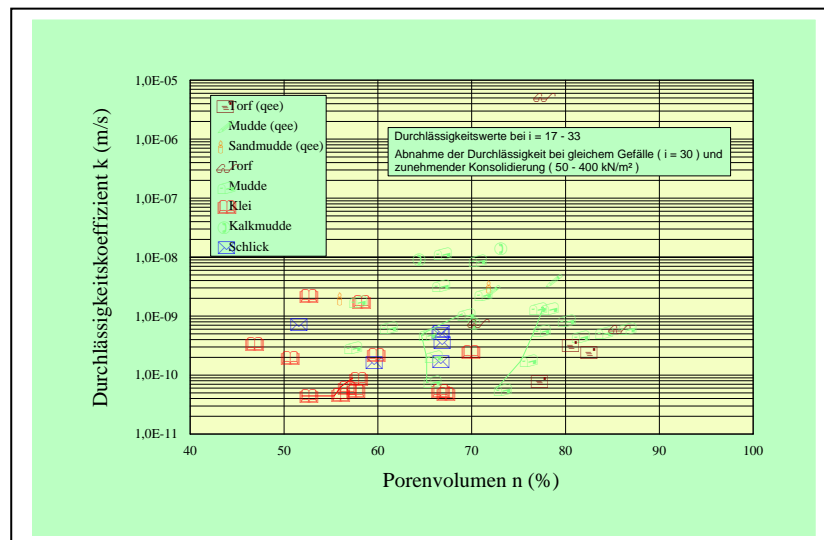


Abb. 13: Durchlässigkeitskoeffizienten im Verhältnis zum Porenvolumen

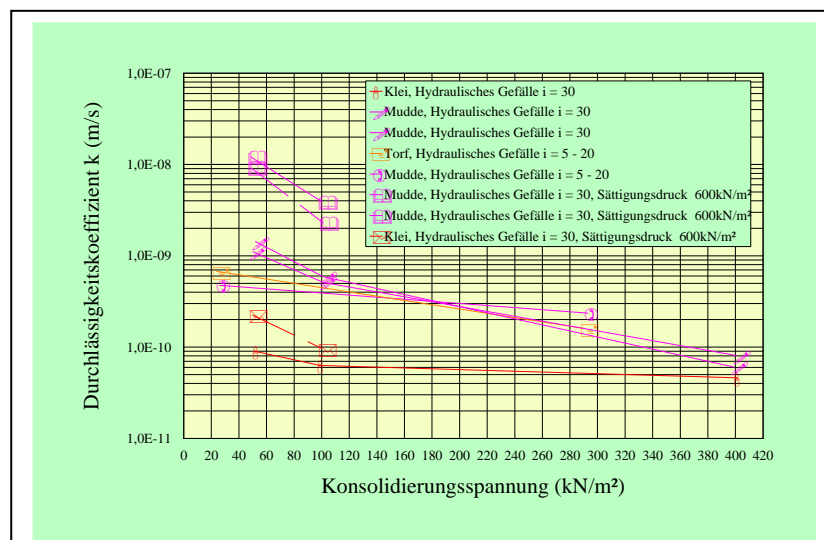


Abb. 14: Durchlässigkeitskoeffizienten in Abhängigkeit von der Konsolidierungsspannung

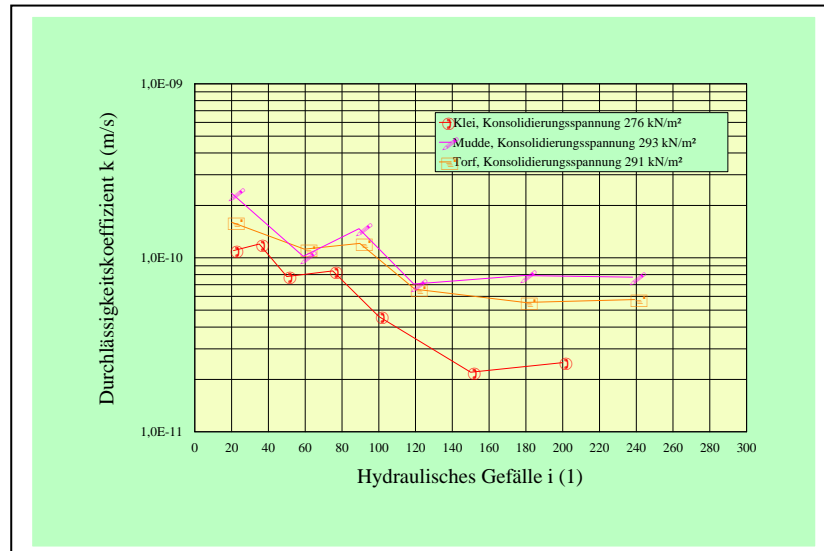


Abb. 15: Durchlässigkeitskoeffizient in Abhängigkeit vom hydraulischen Gefälle

Im Gegensatz zu Äußerungen anderer Autoren (Schildknecht und Schneider 1987) zeigt sich in der Abb.19 eine deutliche Abhängigkeit der Durchlässigkeit vom hydraulischen Gefälle.

Die Ursache ist vermutlich in der gefälleabhängigen Konsolidierung zu suchen, da sich bei den sehr verformungsempfindlichen Weichschichten nach der Gradientenerhöhung jeweils ein neues Gleichgewicht einstellen muss. Beispielsweise wird die bereits aktivierte Konsolidierungsspannung von 275 kN/m² durch eine Gradientenerhöhung von 160 kN/m² auf 435 kN/m² erhöht. Die wirksame Spannung $\sigma' = \sigma - u$ ist 435 kN/m² - 275 kN/m² = 160 kN/m² oben und 435 kN/m² - 435 kN/m² = 0 kN/m² unten mit der Wirkung einer teilweisen weiteren Konsolidierung. Das dabei austretende Wasser verfälscht die Durchlässigkeitskoeffizienten. Maßgeblich ist dieses Phänomen aber nur bei hohen Gradienten, die daher möglichst vermieden werden sollten.

Vorteilhaft ist, Wassereintritt und Wasseraustritt parallel zu messen. Bei Übereinstimmung ist der aus dem hydraulischen Gefälle resultierende Konsolidierungsvorgang abgeschlossen. Die Messwerte sind optimiert.

Bei **teilgesättigten Böden** ist die Durchlässigkeit vom Sättigungsgrad abhängig. Sie wurde an unterschiedlich verdichteten Böden gemessen. Der Sättigungsgrad ist

$$s_r = \left(\frac{w \cdot \gamma_s (1 - n)}{n \cdot \gamma_w} \right)$$

Dabei ergeben sich versuchsbedingt die größten Durchlässigkeiten bei den niedrigen Trockenraumwichten im „trockenen“ und im „feuchten“ Bereich. Die geringsten Durchlässigkeiten ergeben sich beim optimalen Wassergehalt (geringster Porenanteil, größte Trockenraumwichte) bzw. gleich danach im „feuchten“ Bereich.

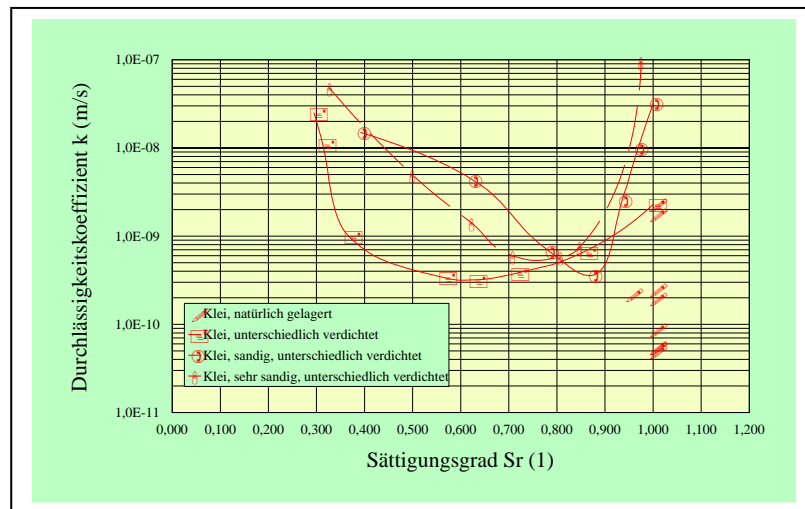


Abb. 16: Gemessene Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad

Vergleichsweise wurden die rechnerischen Durchlässigkeitskoeffizienten im Verhältnis zum Sättigungsgrad ermittelt. Dazu wurden für die untersuchten Proben jeweils die Trockenraumwichten des vergleichbaren Einbaubereich zugrundegelegt und für unterschiedliche Wassergehalte die volumetrischen Wassergehalte ermittelt. Damit wurde der beim üblichen Sedimentationsverhalten nicht auftretende Verdichtungseffekt ausgeschaltet. Nicht berücksichtigt wurden außerdem die beim Einbau deutlich unterhalb des optimalen Wassergehaltes entstehenden Texturen (porenabhängige Strömungswege). Den volumetrischen Wassergehalten θ wurden dann die Wasserspannungen ψ (cm WS) zugeordnet und mit diesen die Durchlässigkeiten ermittelt.

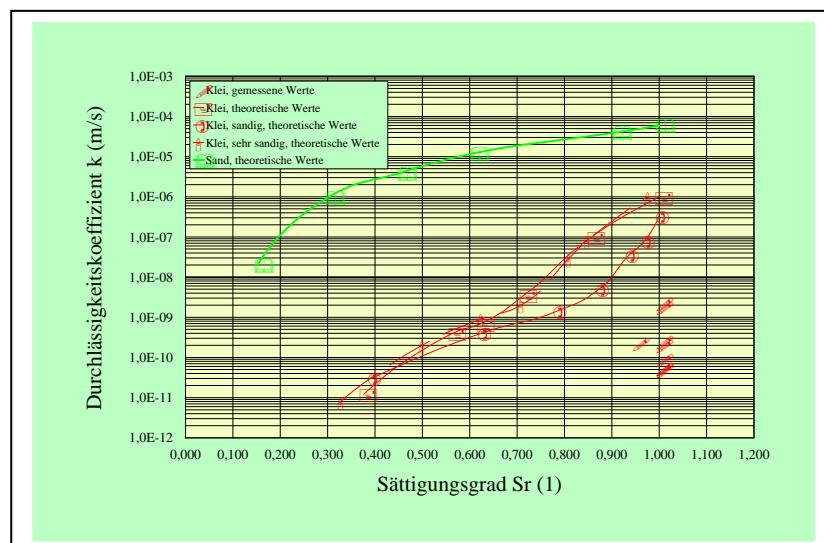


Abb. 17: Rechnerische Durchlässigkeit von Weichschichten und Sanden in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad

Diese rechnerisch ermittelten Durchlässigkeitskurven steigen mit zunehmendem Sättigungsgrad, wie es für teilgesättigte, natürliche Böden zu erwarten ist. Allerdings liegen die Ergebnisse im gesättigten Bereich deutlich höher als üblicherweise gemessen wird.

Künstlich verdichtete Systeme sind wegen ihrer spezifischen Herstellungskriterien und der damit verbundenen unterschiedlichen Verdichtungs- und Sättigungsgrade sowie der Strömungswege nicht nur in den Poren, sondern auch in den Texturen zu beurteilen (siehe auch Abb. 16).

Die **Plastizität I_p** eines bindigen Bodens wird definiert als der Wassergehaltsbereich, der gemäß

$$I_p = w_L - w_p,$$

zwischen der Fließgrenze w_L - Übergang von der flüssigen zur bildsamen Zustandsform - und der Ausrollgrenze w_p - Übergang von der bildsamen zur halbfesten Zustandsform - liegt.

Die Fließgrenze kann gemäß Abb. 18 vom Wassergehalt

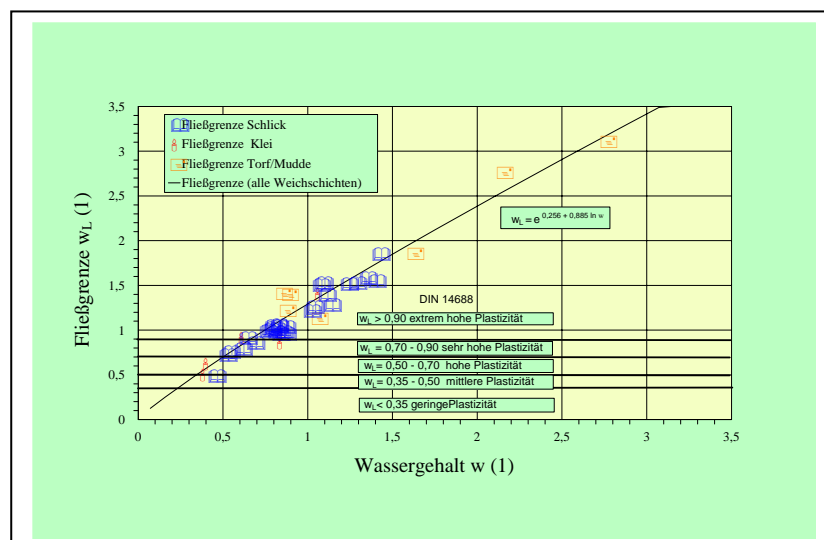


Abb. 18: Abhängigkeit der Fließgrenze vom Wassergehalt

und die Ausrollgrenze gemäß Abb. 19 ebenfalls vom Wassergehalt abgeleitet werden.

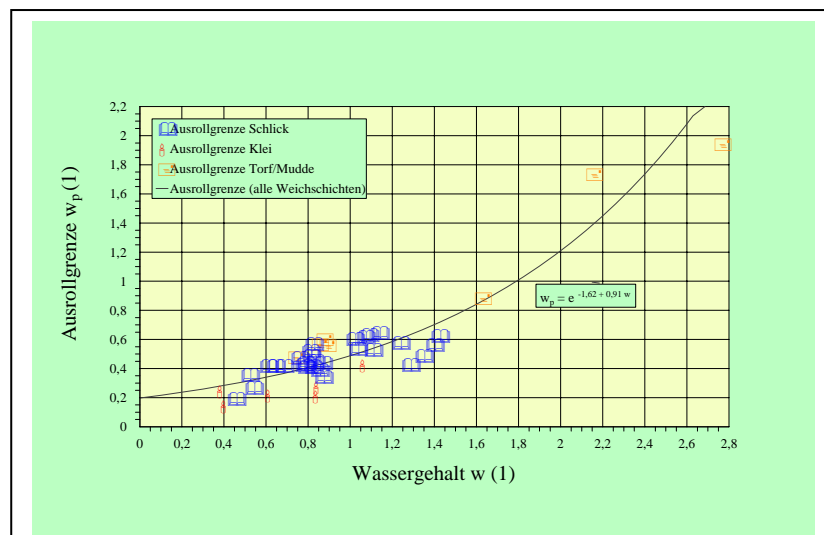


Abb. 19: Abhängigkeit der Ausrollgrenze vom Wassergehalt

Die Plastizität wird definiert als $I_p < 0,10$	leicht plastisch,
$I_p = 0,10 - 0,25$	mittel plastisch,
$I_p > 0,25$	ausgeprägt plastisch.

Die Plastizität kann auch nach der Fließgrenze untergliedert werden (siehe Abb. 18).

Dabei ist $w_L < 0,35$	geringe Plastizität,
$w_L = 0,35 - 0,50$	mittlere Plastizität,
$w_L = 0,50 - 0,70$	hohe Plastizität,
$w_L = 0,70 - 0,90$	sehr hohe Plastizität,
$w_L > 0,90$	extrem hohe Plastizität.

Die **Konsistenz I_c** eines bindigen Bodens ist ein Maß seiner Festigkeit.

$$I_c = \frac{w_L - w}{w - w_p} \quad (1)$$

Liegt der natürliche Wassergehalt w oberhalb der Fließgrenze w_L , so ist der Boden "breiig"; liegt er zwischen der Fließgrenze w_L und der Ausrollgrenze w_p , so ist er "weich" bis "steif"; liegt er unterhalb der Ausrollgrenze w_p , so ist er "halbfest". Liegt der Wassergehalt noch unterhalb der Schrumpfgrenze w_s , - definiert als der Wassergehalt, bei dem bei weiterer Trocknung keine Volumenminderung mehr eintritt, dann ist der Boden "fest".

Dabei wird definiert $I_c = 0 - 0,25$	breiig,
$I_c = 0,25 - 0,50$	sehr weich,
$I_c = 0,50 - 0,75$	weich,
$I_c = 0,75 - 1,00$	steif,
$I_c > 1,00$	halbfest.

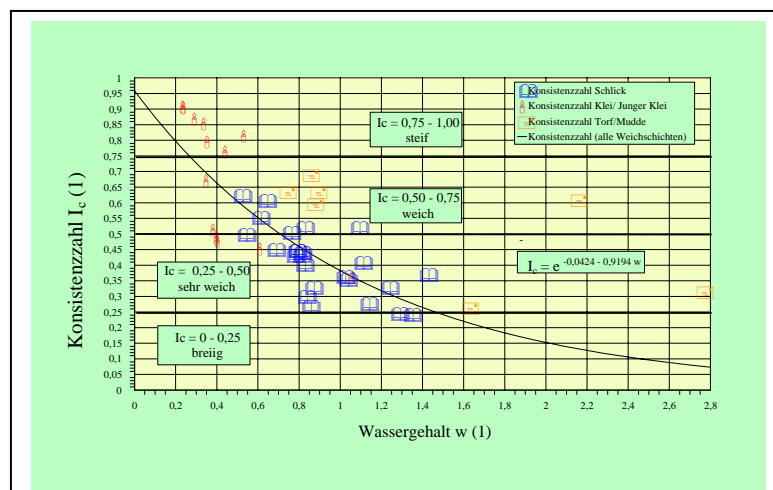


Abb. 20: Konsistenzzahl in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Abb.21 belegt, dass Klei, Mudde und auch Torf, wenn dieser stark zersetzt (HN) ist, ausgeprägt plastische Böden sind und eine "breiige" bis "weiche" Konsistenz aufweisen.

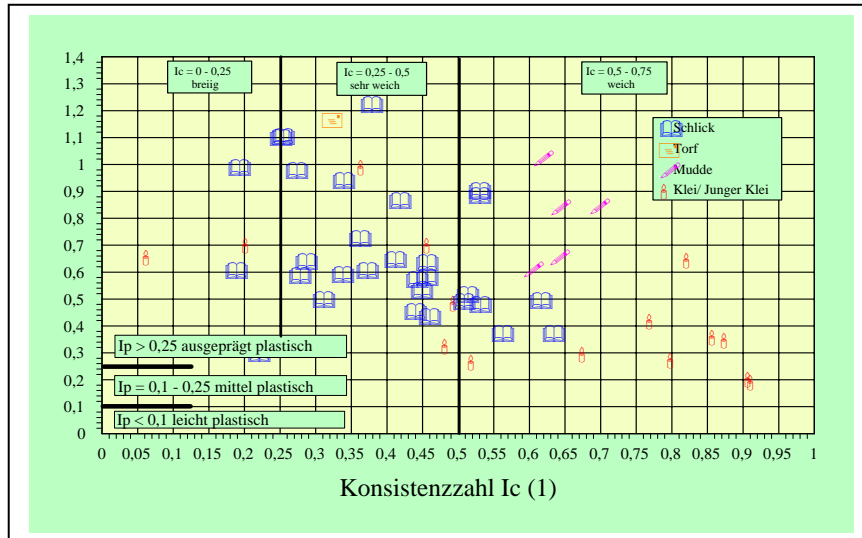


Abb. 21: Plastizitätszahl im Verhältnis zur Konsistenzzahl mit Gliederung der Konsistenz und der Plastizität

Abb. 22 belegt, dass der Klei im Plastizitätsdiagramm oberhalb der A - Linie in die ausgeprägt plastische Kategorie mit eher niedrigen Anteilen organischer Substanz einzuordnen ist, während Mudde und Torf mit hohen Anteilen an organischer Substanz unterhalb der A - Linie liegen.

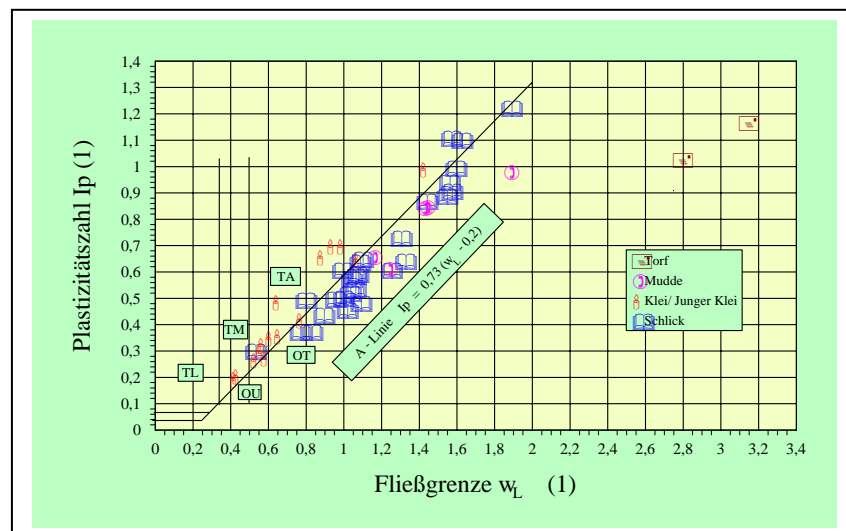


Abb. 22: Plastizitätsdiagramm nach Casagrande mit Gliederung in Plastizitätsgruppen

Die **undrÄnierte Scherfestigkeit** c_u bindiger Bodenarten kann entweder als unkonsolidiert-undrÄnierter Versuch bei völli ger Wassersättigung und in normal konsolidiertem Zustand ($\phi = 0$) oder als einaxialer Druckversuch mit $\sigma_3 = 0$ ermittelt werden. Diese Werte sind zur Beurteilung

der Konsistenzgrenzen und vieler geotechnischer Fragen (Stand sicherheitsaufgaben, Pfahltragfähigkeiten etc.) erforderlich.

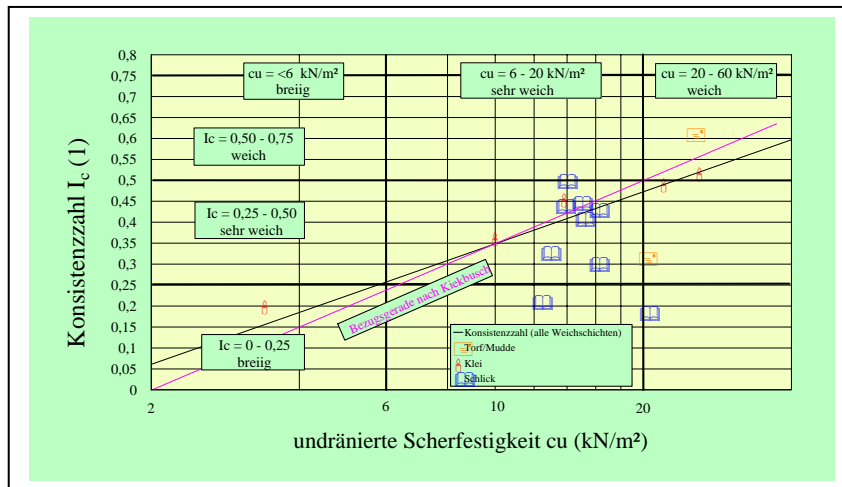


Abb. 23: Konsistenzzahl im Verhältnis zur undraineden Scherfestigkeit mit Gruppierung

Die Eingruppierung der Konsistenz nach cu-Werten auf der Basis moderner Labormethoden ist effektiver.

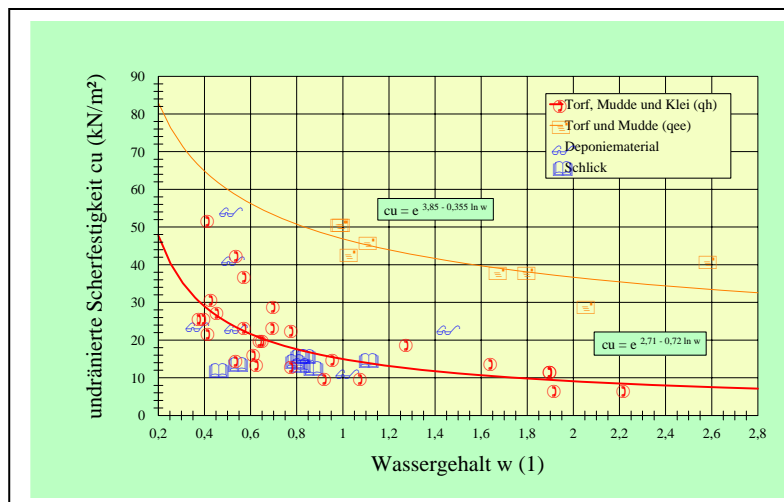


Abb. 24: Undrainede Scherfestigkeit im Verhältnis zum Wassergehalt

Die Wassergehaltsabhängigkeit der cu-Werte wird deutlich erkennbar. Der statistische Zusammenhang ergibt sich gemäß

$$cu = e^{2,71 - 0,72 \ln w} \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

mit $N = 27$ und $r = 0,63$ und den gemessenen Werten 6,7 bis 52 kN/m² für die holozänen Weichschichten und

$$cu = e^{3,85 - 0,355 \ln w} \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

mit $N = 8$ und $r = 0,70$ und den gemessenen Werten 29 bis 51 kN/m² für die eemzeitlichen Weichschichten.

Die **Scherparameter für konsolidierte Versuche (ϕ' , c') bzw. für konsolidiert - undrännierte Versuche (ϕ_{cu} , c_{cu})** werden unter den jeweiligen Bedingungen im Triaxialgerät ermittelt. Die Mittelwerte, Grenzwerte und Grundwerte (Wahrscheinlichkeit $P = 95\%$) sind der Tab.3 im Detail zu entnehmen.

Bodenart	Scherparameter, konsolidiert						Scherparameter, konsolidiert - undränniert					
	Mittelwerte		Grenzwerte		Grundwerte		Mittelwerte		Grenzwerte		Grundwerte	
	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)	ϕ_{cu} (°)	c_{cu} (kN/m ²)	ϕ_{cu} (°)	c_{cu} (kN/m ²)	ϕ_{cu} (°)	c_{cu} (kN/m ²)
Weichschichten, qh	26,9	9	16 – 39,6	0 – 20	25,4	7,2	18,8	17,4	8,5 – 30,5	2,5 – 40	17,6	15,2
Torf und Mudde, qh	24,5	7,7	18 – 31	2 – 18	21,1	4,0	17,0	18,8	8,5 – 24	5 – 32	15,4	15,7
Klei, qh	27,3	8,6	19 – 39,6	0 – 20	25,8	6,1	18,8	15,7	15 – 25	2,5 – 39	17,7	11,5
Torf und Mudde, qee	28	12,5	16 – 43,5	4 – 19	21	7,1	20,9	17,6	17 – 25,5	6 – 40	19,0	11,3

Tab.3: Scherfestigkeiten holozäner und eemzeitlicher Weichschichten

Torfe, Mudden und Kalkmudden der Eem - Warmzeit

Eemzeitliche Torfe sind nördlich der Elbe weit verbreitet, überwiegend aber entlang der alten Entwässerungssysteme. Vielfach treten an der Basis der Torfe noch Mudden und Kalkmudden auf. Sie stehen bis etwa 20 m unter Gelände an. Sie werden von Sanden und Geschiebemergel unterlagert.

Torfe wurden in nährstoffarmen Standorten mit hohem Grundwasserstand sendentär gebildet, sie werden untergliedert in Niedermoor-, Übergangsmoor- und Hochmoortorfe unterschiedlicher Zersetzungsgrade, im allgemeinen mit mehr als 30 % organischer Substanz, welche aus pflanzlichen Mikro- und Makroresten und kolloidalen Huminstoffen besteht.

Mudden sind in stehenden Gewässern abgelagerte limnische Sedimente, sie sind gekennzeichnet durch das Vorhandensein von Süßwasserdiatomeen. Sie gliedern sich in Abhängigkeit von der Kornverteilung und vom Kalkgehalt in Tonmudden, Schluffmudden (0 – 3%), Sandmudden (ca. 15%) und Kalkmudden (55 – 82%). Sie sind überwiegend schwach bis gut plastisch ausgebildet (teilweise schuppig) und haben eine breiige bis weiche Konsistenz. Mudden neigen zu schuhsohlenartigen Verfestigungen im Zentimeter- bis Dezimeterbereich.

Die eemzeitlichen Torfe, Mudden und Kalkmudden sind durch Sandüberschüttungen der Weichseleiszeit vorbelastet und in Abhängigkeit vom Wassergehalt stark verformungsempfindlich.

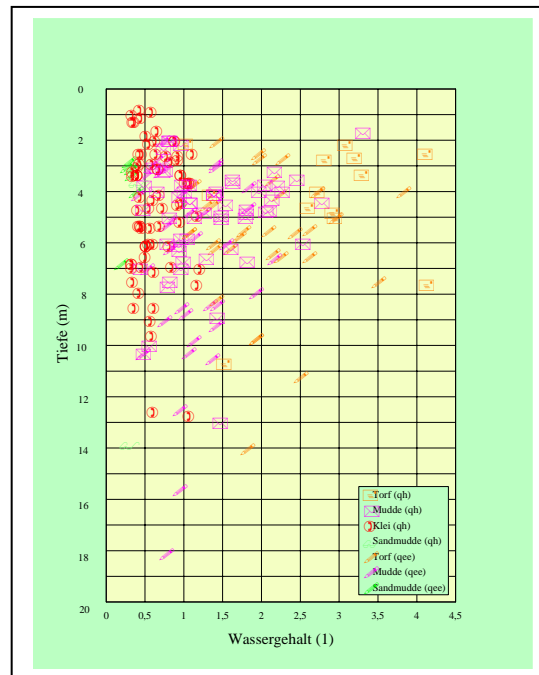


Abb. 25: Tiefenverteilung der Weichschichten und des Wassergehaltes

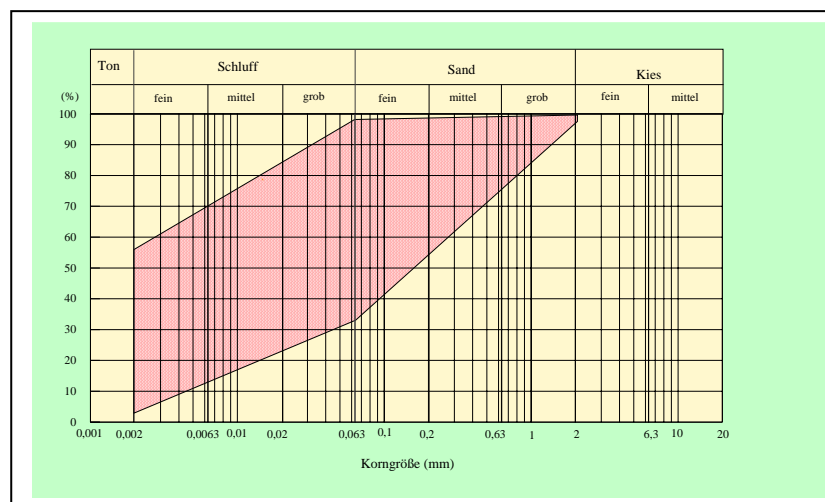


Abb. 26: Korngrößenverteilung der Mudden und Kalkmudden

Die wesentlichen geotechnischen Eigenschaften der eemzeitlichen Weichschichten werden wegen des überwiegend identischen Verhaltens im Abschnitt über die holozänen Weichschichten dargestellt.

Zur Abtragung von Bauwerkslasten sind sie in der Regel ungeeignet, so dass besondere Gründungsmaßnahmen (Bodenaustausch, Tiefgründung) erforderlich werden.

Nach DIN 18 300 sind die Torfe, Mudden und Kalkmudden in die Bodenklasse 2 - fließende Bodenarten - und 3 - leicht lösbare Bodenarten - einzustufen. Gemäß DIN ISO 14688 sind sie als HN (nicht bis mäßig zersetzte Torfe), HZ (zersetzte Torfe) und F (Mudde und Kalkmudde) zu klassifizieren.

Grundwasserabsenkungen bei Baumaßnahmen und Sanierungsmaßnahmen sowie Drainagen und Entwässerungsgräben können zu Setzungen des Geländes und damit zu Schäden an vorhandenen Bauten und an Ver- und Entsorgungsleitungen führen. Wegen der geringen Wasserdurchlässigkeit kann das Grundwasser unterhalb der Weichschichten gespannt sein. Die Böden sind staunässebildend.

Sandlöß

Die Windablagerungen Flottsand und Flottlehm sind wechselnd schluffige Feinsande bis feinsandige Schluffe, die im allgemeinen geringer als 2 m mächtig die eiszeitlichen Schmelzwassersande südlich der Elbe überdecken.

Die **Flottsande** sind feinkörnigen, schluffigen Sanden vergleichbar. Ihre Tragfähigkeit ist abhängig von der Lagerungsdichte, den Scherfestigkeitsparametern und dem Steifemodul.

Der **Flottlehm** ist dem Beckenschluff vergleichbar. Die Tragfähigkeit ist abhängig von Wassergehalt, Konsistenz, Scherfestigkeitsparametern und Steifemodul.

Die Böden sind nach DIN 18 300 der Bodenklasse 3 – leicht lösbar – und Bodenklasse 4 – mittellösbar – zuzuordnen. Gemäß DIN ISO 14 688 sind sie den Bodengruppen SE, SU und UL zuzuordnen. Wegen der geringen Durchlässigkeit sind sie als Wasserstauer zu betrachten. Sandlöß ist sehr frostempfindlich.

Geschiebelehm (Saale-Eiszeit, Elster-Eiszeit)

Beim **Geschiebelehm**, der sowohl an der Geländeoberfläche als auch unter geringer Sandbedeckung auftritt, handelt es sich um weiche bis steife, vorwiegend aber um steife, kalkfreie, tonige Sand-Schluff-Gemenge geringer Durchlässigkeit mit unregelmäßigen Einschaltungen von Kiesen und größeren Steinen (Geschieben). Untergeordnet können innerhalb des Geschiebelehms auch reine Sand- und Kieseinschaltungen vorkommen. Sie können eine gewisse Wasserführung des Geschiebelehms bedingen. Durch natürliche Vorgänge umgelagerter Geschiebelehm wird als Fließerde bezeichnet.

In den dem Geschiebelehm auflagernden Sanden kann, insbesondere in niederschlagsreichen Jahreszeiten, Stauwasser auftreten.

Der Geschiebelehm stellt bei steifer Konsistenz einen Baugrund von mittlerer Tragfähigkeit dar. Er muss jedoch als frostempfindlicher Boden angesprochen werden, der bei stärker sandiger Aus-

bildung bei Wasserzutritt und gleichzeitiger mechanisch-dynamischer Beanspruchung zu starken Strukturstörungen neigt.

Die sehr sandige Fazies neigt unter dem Wasserspiegel zum Fließen.

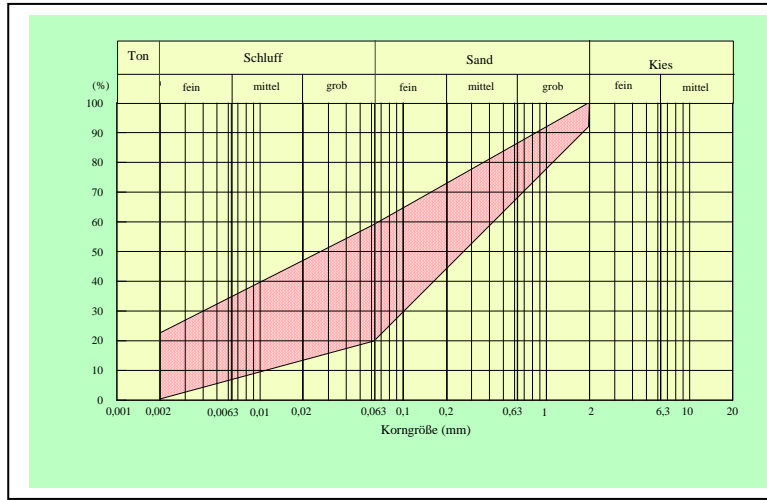


Abb. 27: Korngrößenverteilung Geschiebelehm

Geotechnische Kennwerte des Geschiebelehmes im Detail:

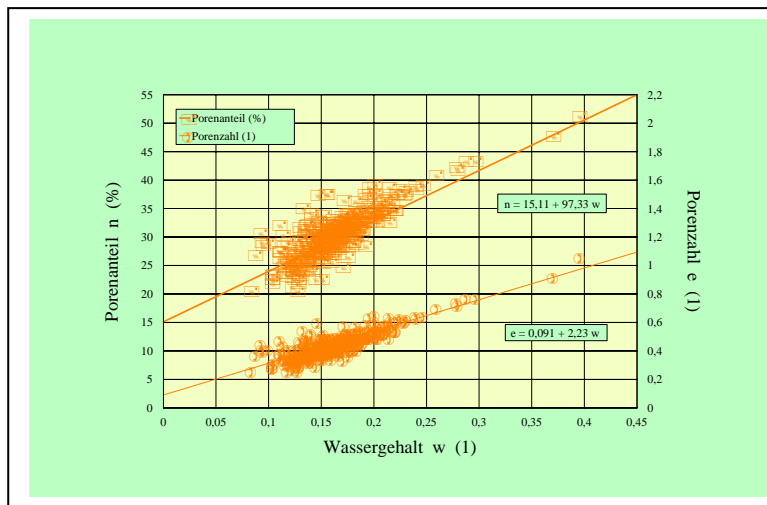


Abb. 28: Porenanteil und Porenzahl des Geschiebelehmes im Verhältnis zum Wassergehalt

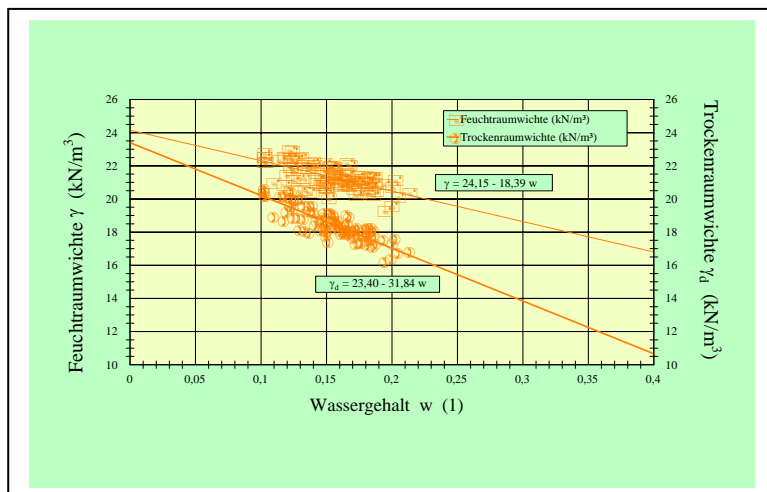


Abb. 29: Feuchtraumwichte und Trockenraumwichte des Geschiebelehmes im Verhältnis zum Wassergehalt

Der statistische Zusammenhang ist für

den Porenanteil	$n = 15,11 + 97,33 w$ [%]
mit gemessenen Werten zwischen	$n = 20,7$ und $51,4$ % bei $N = 386$ und $r = 0,83$
sowie für die Porenzahl	$e = 0,09 + 2,23 w$ [1]
mit gemessenen Werten zwischen	$e = 0,205$ und $1,059$ bei $N = 386$ und $r = 0,86$ und für
die Feuchtraumwichte	$\gamma = 24,15 - 18,39 w$ [kN/m ³]
mit gemessenen Werten zwischen	$\gamma = 19,34$ und $23,0$ [kN/m ³] bei $N = 105$ und $r = 0,73$
sowie für die Trockenraumwichte	$\gamma_d = 23,40 - 31,84 w$ [kN/m ³]
mit gemessenen Werten zwischen	$\gamma_d = 16,22$ und $20,68$ [kN/m ³] bei $N = 105$ und $r = 0,85$.

Die undrÄnirte Scherfestigkeit des Geschiebelehmes und des Geschiebemergels ist der folgenden Graphik zu entnehmen:

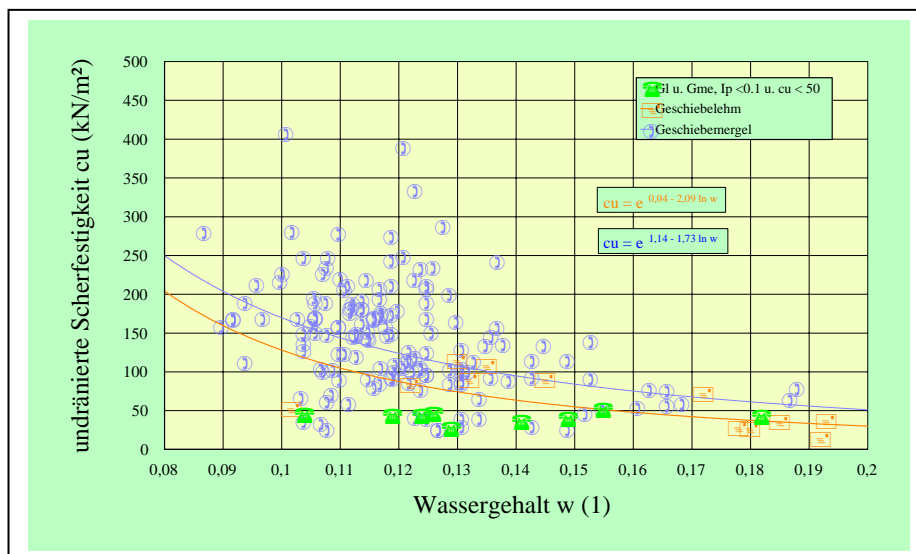


Abb. 30: UndrÄnirte Scherfestigkeit des Geschiebelehmes und des Geschiebemergels im Verhältnis zum Wassergehalt

Der statistische Zusammenhang ist für

die undrÄnirte Scherfestigkeit des Geschiebelehmes	$cu = e^{0,04 - 2,09 \ln w}$ [kN/m ²]
mit gemessenen Werten zwischen	$cu = 14,5$ und 116 kN/m ² bei $N = 12$ und $r = 0,71$
sowie des Geschiebemergels	$cu = e^{0,987 - 1,81 \ln w}$ [kN/m]
mit gemessenen Werten zwischen	$cu = 26$ und 408 (708) kN/m ² bei $N = 156$ und $r = 0,43$.

Die **Plastizitätszahl** im Verhältnis zur **Konsistenzzahl** und **Fließgrenze** sowie die **undrännierte Scherfestigkeit** im Verhältnis zu **Konsistenzzahl** bzw. **Plastizitätszahl** sind den entsprechenden Diagrammen (Abb. 39 – 42) im Abschnitt „Geschiebemergel“ zu entnehmen.

Die **spannungsbezogenen Steifemoduln** werden im Abschnitt „Glaziale Beckensedimente“ (Abb. 50) dargestellt.

Nach DIN 18 300 sind Geschiebelehm und Fließerde in die Bodenklasse 4 - mittelschwer lösbare Bodenarten - einzustufen. Entsprechend der Bodenklassifizierung nach DIN ISO 14 688 sind sie den Bodengruppen SU bis ST zuzuordnen.

Die geotechnischen Kennwerte in der Übersicht:

Kennwerte	Geschiebelehm
Feuchtraumwichte γ (kN/m ³)	19 – 23
Trockenraumwichte γ_d (kN/m ³)	16 – 21
Wassergehalt w (%)	8 - 39
Porenanteil n (%)	20 - 51
Reibungswinkel ϕ' (°)	22 - 41 (30,4)
Kohäsion c' (kN/m ²)	0 - 30 (7,8)
Undrännierte Scherfestigkeit c_u (kN/m ²)	10 - 120
Steifemodul E (MN/m ²)	
$\sigma = 0,1$ MN/m ² , $w = 10\%$	12
$\sigma = 0,1$ MN/m ² , $w = 20\%$	4,5
Durchlässigkeit k (m/s)	1,5E-8 bis 1,5E-10

Tab.4: Grenzwerte und kalkulatorische (..), geotechnische Kennwerte des Geschiebelehmes

Geschiebemergel (Saale-Eiszeit und Elster-Eiszeit)

Der Geschiebemergel bildet weithin das Liegende des Geschiebelehms. Er ist die weitgehend noch unverwitterte Grundmoräne und weist - bedingt durch den Kalkgehalt - eine überwiegend halb feste Konsistenz auf. Er ist sehr wenig durchlässig. Seine Tragfähigkeit ist sehr gut. Im übrigen gelten die für den Geschiebelehm gemachten Aussagen entsprechend. Der saaleeiszeitliche Geschiebemergel wird unterteilt in die Jüngere, Mittlere und Ältere Saalemoräne.

Die **Jüngere Saalemoräne** ist in Regel sehr sandig, ton- und kreidearm ausgebildet. Kalkgehalte liegen zwischen 5 und 15%. Unterhalb des Grundwassers neigt sie zu Fließeigenschaften. Die **Mittlere Saalemoräne** ist deutlich toniger, kalk- und kreidereicher und häufig sehr kompakt ausgebildet. Der Kalkgehalt liegt zwischen 8 und 26%.

Die **Ältere Saalemoräne** ist eher sandig und ton- und kreidearm. Der Kalkgehalt liegt zwischen 5 und 19%. Unter dem Grundwasserspiegel sind Fließeigenschaften nicht auszuschließen.

Unter Saalemoräne und Schmelzwassersanden können **elsterzeitliche Grundmoränen** anstehen.

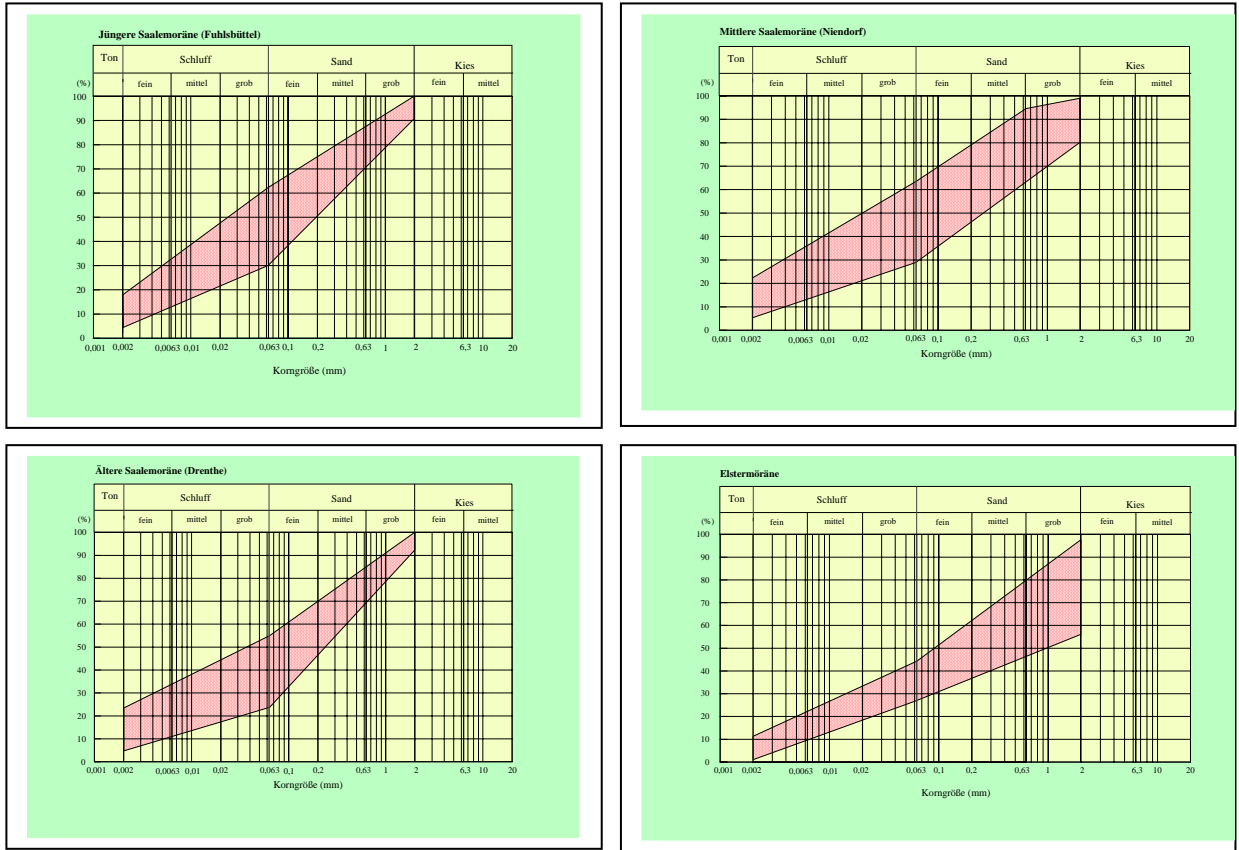


Abb.31 – 34: Korngrößenverteilungen Geschiebemergel

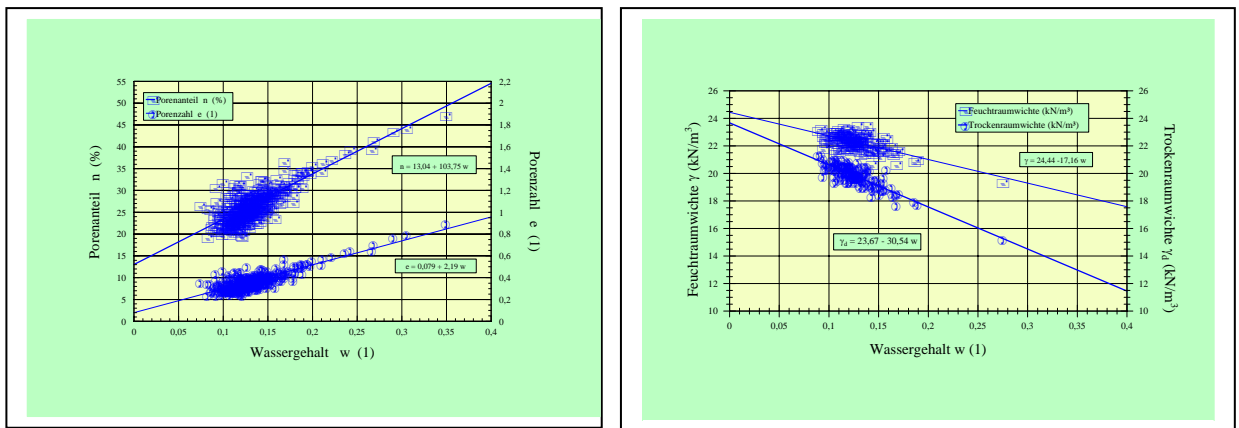


Abb. 35 u. 36: Porenanteil, Porenzahl, Feuchtraumwichte u. Trockenraumwichte des Geschiebemergels im Verhältnis zum Wassergehalt

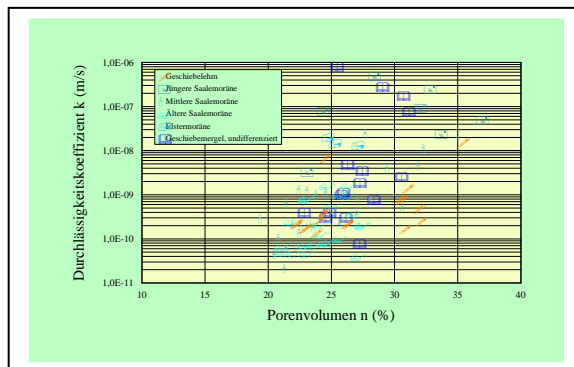


Abb. 37: Durchlässigkeit des Geschiebelehmes und Geschiebemergels in Abhängigkeit vom Porenvolumen

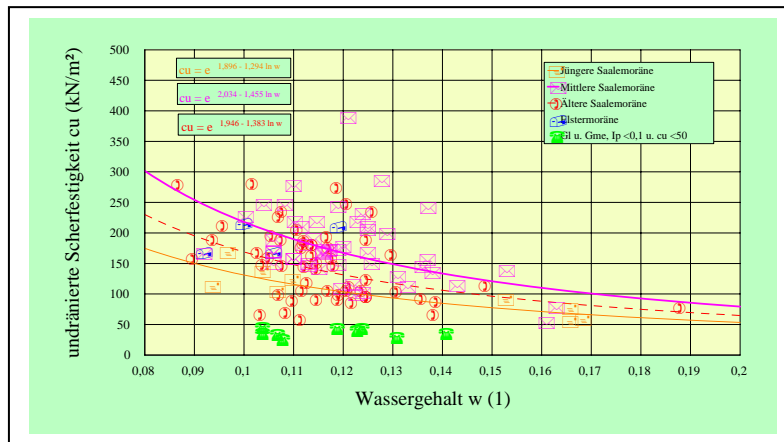


Abb. 38: Undrained shear strength of the clayey siltstone in relation to the water content

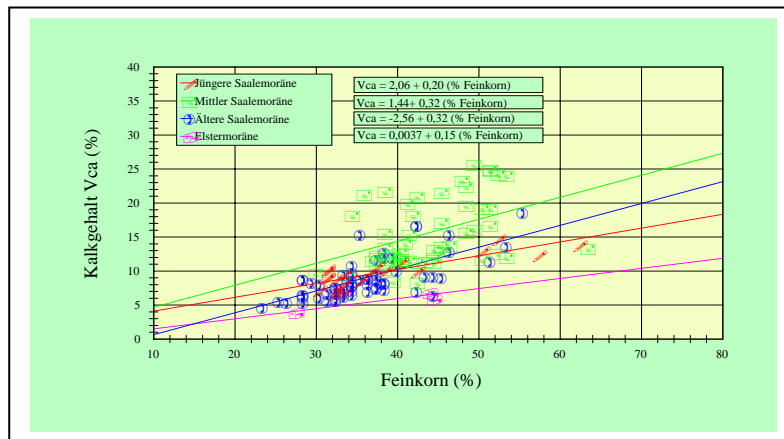


Abb. 39: Calcium content of the clayey siltstone in dependence of the fine grain content

The most important statistical relationships are taken from Abb. 35 – 39.

Further geotechnical criteria of the most important cohesive soil types will be summarized in the following illustrations:

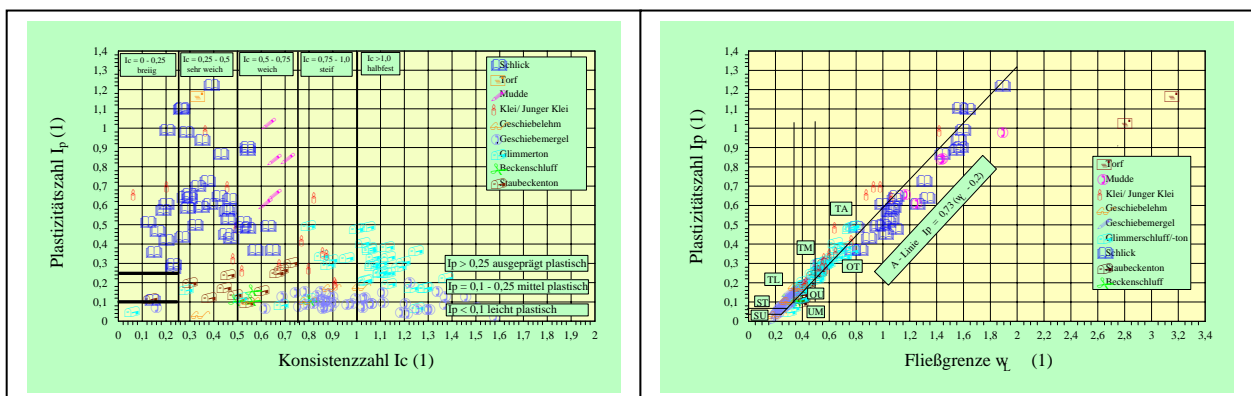


Abb. 40: Plastizitätszahl und Konsistenzzahl

Abb. 41: Plastizitätszahl und Fließgrenze

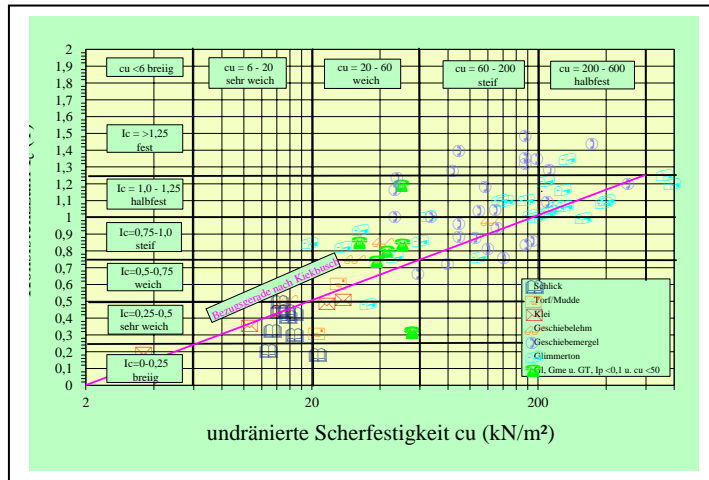


Abb. 42: Undrained shear strength in relation to consistency number

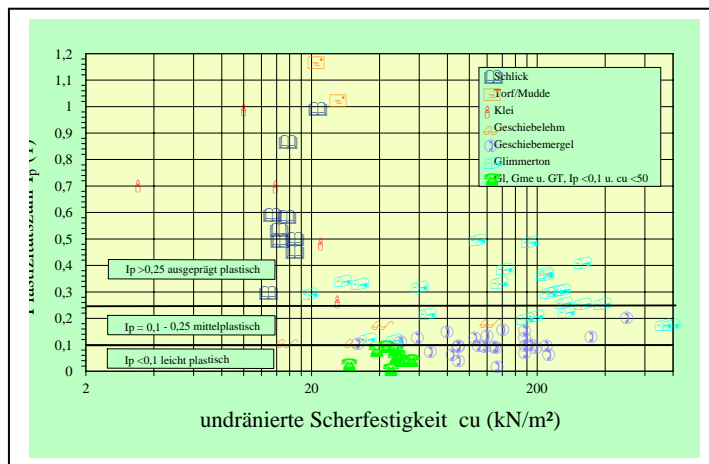


Abb. 43: Undrained shear strength in relation to plasticity index

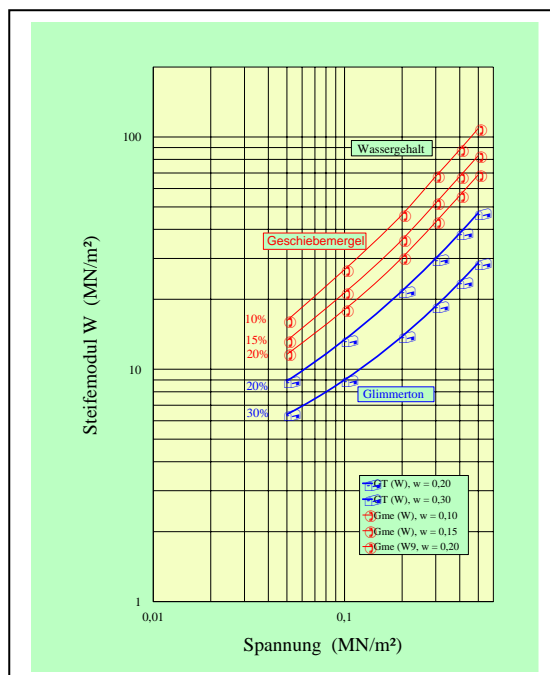


Abb. 44: Spannungsbezogene Steifemoduln W (Wiederbelastung) des Geschiebemergels und des Glimmertones für unterschiedliche Wassergehalte

In DIN 18 300 ist der Geschiebemergel in die Bodenklasse 4 - mittelschwer – und 5 – schwer lös-bare Bodenarten - einzustufen. Entsprechend der Bodenklassifizierung nach DIN ISO 14 688 sind sie den Bodengruppen SU bis ST zuzuordnen.

Die geotechnischen Kennwerte des Geschiebemergels in der Übersicht in der Übersicht:

Kennwerte	Geschiebemergel
Feuchtraumwichte γ (kN/m ³)	19 – 23,5
Trockenraumwichte γ_d (kN/m ³)	15 – 21,5
Wassergehalt w (%)	7 – 34
Porenanteil n (%)	19 – 47
Reibungswinkel ϕ' (°)	22,7 – 42,5 (32,4)
Kohäsion c' (kN/m ²)	0 - 40 (12,3)
Reibungswinkel ϕ' (°)	Jüngere Saalemoräne 29,5 – 40 (33,4)
Kohäsion c' (kN/m ²)	0 – 39,3 (5,1)
Reibungswinkel ϕ' (°)	Mittlere Saalemoräne 27 – 39,5 (30,9)
Kohäsion c' (kN/m ²)	0 – 46 (10,1)
Reibungswinkel ϕ' (°)	Ältere Saalemoräne 27 – 40 (32,8)
Kohäsion c' (kN/m ²)	0 – 50 (7,2)
Reibungswinkel ϕ' (°)	Elstermoräne 28 – 39,5 (-)
Kohäsion c' (kN/m ²)	32 – 63 (-)
Undrained Scherfestigkeit c_u (kN/m ²)	26 – 410 (708)
Steifemodul W (MN/m ²)	
$\sigma = 0,2$ MN/m ² , w = 10%	45
$\sigma = 0,2$ MN/m ² , w = 20%	30
Durchlässigkeit K (m/s)	Jüngere Saalemoräne 5E-7 bis 3E-9
	Mittlere Saalemoräne 3E-8 bis 2E-11
	Ältere Saalemoräne 2E-9 bis 4E-11
	Elstermoräne 1E-8 – 2E-8

Tab.5: Grenzwerte und kalkulatorische (..), geotechnische Kennwerte des Geschiebemergels

Glaziale Staubeckensedimente (Beckenschluff, Beckenton und Lauenburger Ton) und tertiärer Glimmertone

Beckenschluffe und Beckentone sind Staubeckenablagerungen, die in ungestörter und in ge-

stauchter Lagerung auftreten können. Sie haben einen Kalkgehalt zwischen 4 und 33%. Bei entsprechender Lagerung sind sie geologisch vorbelastet. Es handelt sich um bindige Böden, deren

Konsistenz seltener weich und häufiger steif ist. Nach der Kornzusammensetzung sind sie teils als reiner Schluff, teils als toniger Schluff und teils auch als tonig-sandiger Schluff zu bezeichnen.

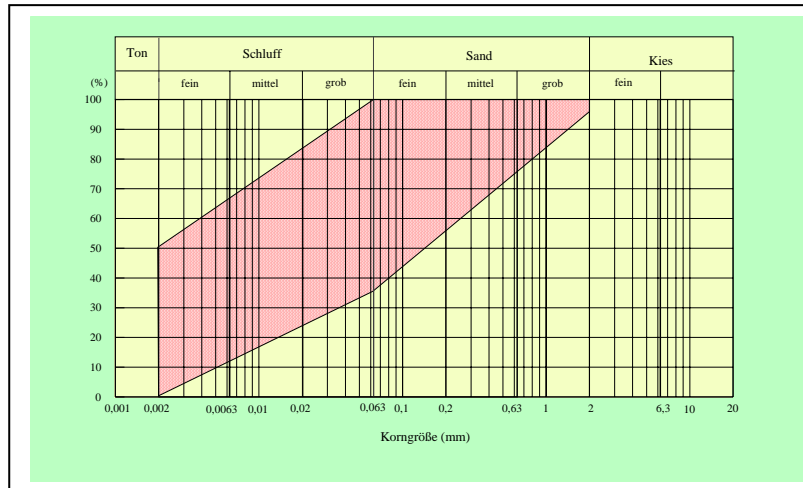


Abb. 45: Korngrößenverteilung Beckenschluff und Beckenton

Kennwerte	Beckenschluff / Beckenton
Feuchtraumwichte (kN/m ³)	18,5 - 22
Trockenraumwichte ρ_d (kN/m ³)	14 - 19
Wassergehalt w (%)	12 - 53
Porenanteil n (%)	23 - 61
Reibungswinkel φ (°)	27 – 39,5 (31,4)/18,9 – 28,1 (18,2)
Kohäsion c' (kN/m ²)	0 – 45 (4,3)/7,4 – 37,5 (7,5)
Undrainede Scherfestigkeit c_u (kN/m ²)	75 - 185
Steifemodul E (MN/m ²)	
= 0,2 MN/m ² , $w = 20\%$	10,5
= 0,2 MN/m ² , $w = 40\%$	6,5
Steifemodul W (MN/m ²)	
= 0,2 MN/m ² , $w = 20\%$	25
= 0,2 MN/m ² , $w = 30\%$	15
Durchlässigkeit K (m/s)	1E-7 bis 6E-11

Tab. 6 : Grenzwerte und kalkulatorische (..), geotechnische Kennwerte des Beckenschluffes / Beckentones

Beckenschluff/-ton ist gering durchlässig, verformungsempfindlich und als sandigere Fazies auch frostempfindlich. Bei Wasserzutritt und gleichzeitiger mechanisch-dynamischer Beanspruchung neigt er zu Strukturstörungen. Bei setzungsempfindlichen Bauwerken sind in der Regel zusätzli-

che konstruktive Maßnahmen erforderlich. Der Beckenschluff/Beckenton ist nach DIN 18 300 der Bodenklasse 4 - mittelschwer lösbar Bodenarten - und die sandigere Fazies bei hohem Wassergehalt unter Umständen der Bodenklasse 2 - fließende Bodenarten - zuzuordnen. Gemäß DIN ISO 14 688 sind diese Böden den Bodengruppen UL bis TA zuzurechnen.

Lauenburger Ton

Der Lauenburger Ton gehört wie der Beckenschluff/-ton zu den glazialen Beckensedimenten. Er ist jedoch häufiger tonig-schluffig ausgebildet und hat geringere Kalkgehalte (3 - 10%). Die Konsistenz ist eher steif. Das Verformungsverhalten ist dem der Beckenschluffe und Beckentone vergleichbar. Der Lauenburger Ton ist überwiegend geologisch vorbelastet.

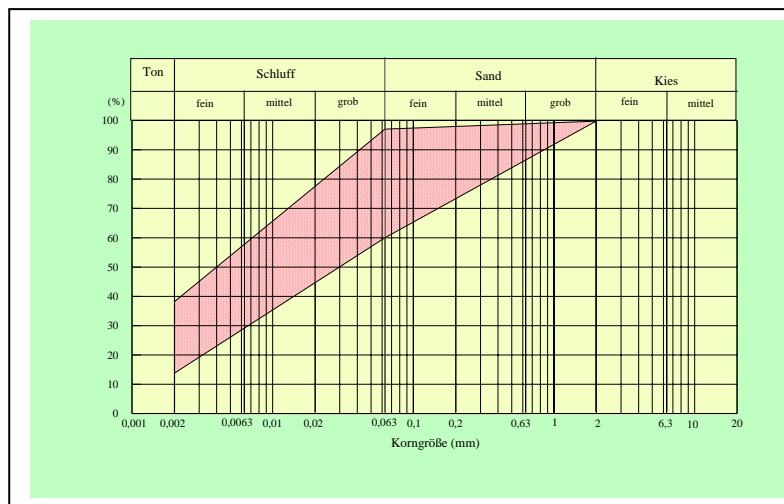


Abb. 46: Korngrößenverteilung Lauenburger Ton

Kennwerte	Lauenburger Ton
Feuchtraumwichte γ (kN/m ³)	17,5 - 20
Trockenraumwichte γ_d (kN/m ³)	12 - 16
Wassergehalt w (%)	12 - 47
Porenanteil n (%)	26 - 60
Reibungswinkel ϕ' (°)	12 - 26,5 (13,6)
Kohäsion c' (kN/m ²)	20 - 55 (30)
Undrained Scherfestigkeit c_u (kN/m ²)	30 - 320
Steifemodul E (MN/m ²)	
$\sigma = 0,2$ MN/m ² , $w = 20\%$	8,5
$\sigma = 0,2$ MN/m ² , $w = 40\%$	5
Steifemodul W (MN/m ²)	
$\sigma = 0,2$ MN/m ² , $w = 20\%$	20

$\sigma = 0,2 \text{ MN/m}^2, w = 30\%$	9
Durchlässigkeit K (m/s)	2E-10 bis 2E-11

Tab.7: Grenzwerte und Kalkulatorische (..), geotechnische Kennwerte des Lauenburger Tones

Lauenburger Ton ist nach DIN 18 300 der Bodenklasse 4 - mittelschwer lösbar Bodenarten - und gemäß DIN ISO 14688 den Bodengruppen TL bis TA zuzurechnen.

Glimmertone

Der Glimmertone ist als tertiäre Ablagerung generell als geologisch vorbelastet zu betrachten. Er ist häufig stärker tonig-schluffig ausgebildet als die glazialen Schluffe und Tone. Es ist mittel- bis ausgeprägt plastisch bei überwiegend halbfester Konsistenz. Der Kalkgehalt liegt zwischen kalkfrei und 20%. Glimmertone ist nach DIN 18300 der Bodenklasse 5 - schwer lösbar Bodenarten - zu zuordnen. Gemäß DIN ISO 14688 gehört der Glimmertone zur Bodengruppe UM bis TA.

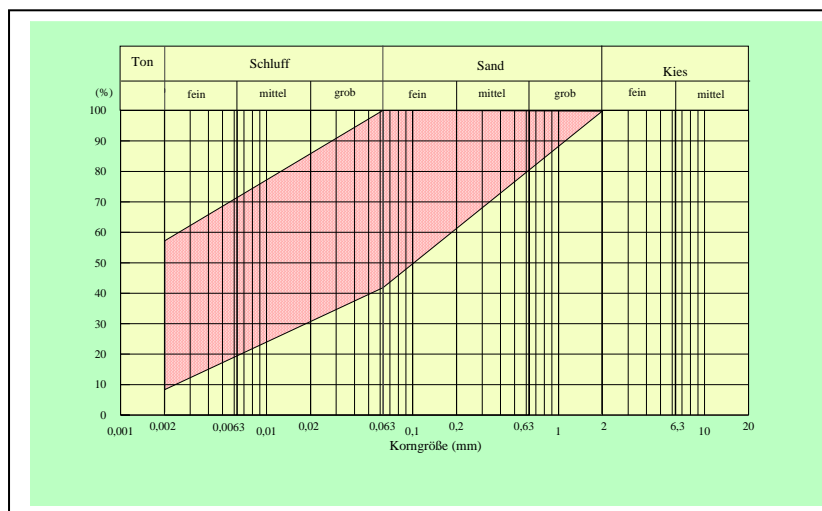


Abb. 47 Korngrößenverteilung Glimmertone und Glimmerschluff

Kennwerte	Glimmertone und Glimmerschluff
Feuchtraumwichte γ (kN/m ³)	17,5 – 22,5
Trockenraumwichte γ_d (kN/m ³)	12,5 - 19,5
Wassergehalt w (%)	12 - 38
Porenanteil n (%)	28 - 53
Reibungswinkel ϕ' (°)	13 - 39 (24,3)
Kohäsion c' (kN/m ²)	0 - 90 (27,6)
Undrained Scherfestigkeit c_u (kN/m ²)	10 - 750
Steifemodul W (MN/m ²)	
$\sigma = 0,2 \text{ MN/m}^2, w = 20\%$	22

$\sigma = 0,2 \text{ MN/m}^2, w = 30\%$	15
Durchlässigkeit K (m/s)	1,0E-8 bis 4E-12

Tab.8: Grenzwerte und Kalkulatorische (..), geotechnische Kennwerte des Glimmertones und Glimmerschluffes

Geotechnische Kennwerte der glazialen Staubeckensedimente und des tertiären Glimmertones in der Übersicht:

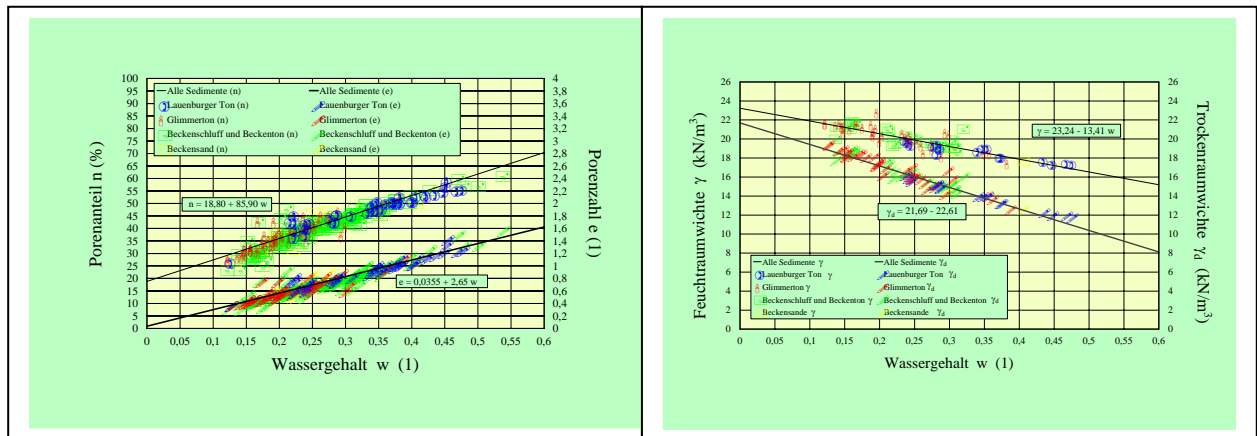


Abb. 48: Porenanteil und Porenzahl der glazialen Staubeckensedimente und des tertiären Glimmertones (links)

Abb. 49: Feuchtraumwichte und Trockenraumwichte der glazialen Staubeckensedimente und des tertiären Glimmertones (rechts)

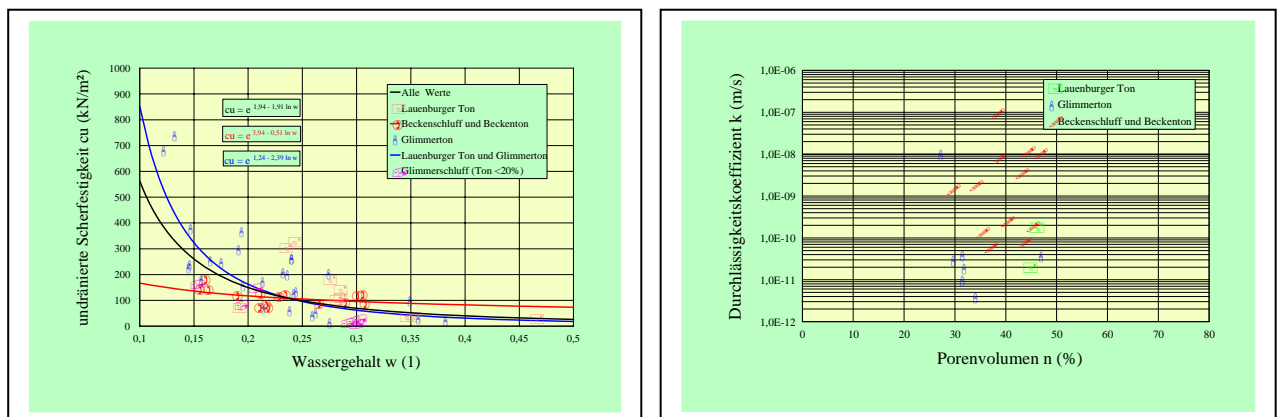


Abb. 50: Undrinierte Scherfestigkeit der glazialen Staubeckensedimente und des tertiären Glimmertones (links)

Abb. 51: Durchlässigkeit der Staubeckensedimente in Abhängigkeit vom Porenvolumen (rechts)

Der statistische Zusammenhang dieser geotechnischen Kennwerte ist den Abb. 48 – 50 zu entnehmen.

Die Kennwerte „Plastizität – Konsistenz“ bzw. „Fließgrenze“, „undrinierte Scherfestigkeit – Konsistenz“ bzw. „Plastizität“ werden dagegen im Kapitel „Geschiebemergel“ (Abb. 40 – 43) mit dargestellt.

Die **Erstbelastungssteifemoduln** für den geologisch nicht vorbelasteten Beckenschluff/-ton, den Geschiebelehm und den Lauenburger Ton ergeben sich gemäß Abb. 52

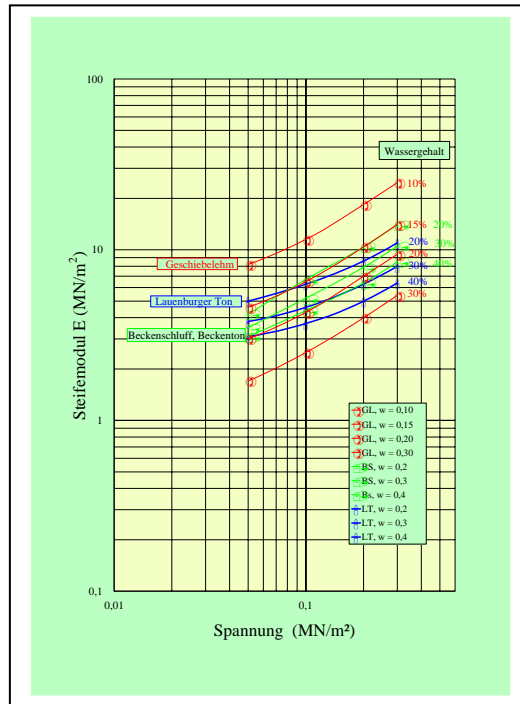


Abb. 52: Spannungsbezogener Steifemodul E (Erstbelastung) des Geschiebelehmes und der Staubeckensedimente Beckenschluff/-ton und Lauenburger Ton für unterschiedliche Wassergehalte

und die Wiederbelastungssteifemoduln für die geologisch vorbelasteten Staubeckentone Beckenschluff/-ton und Lauenburger Ton gemäß Abb. 53:

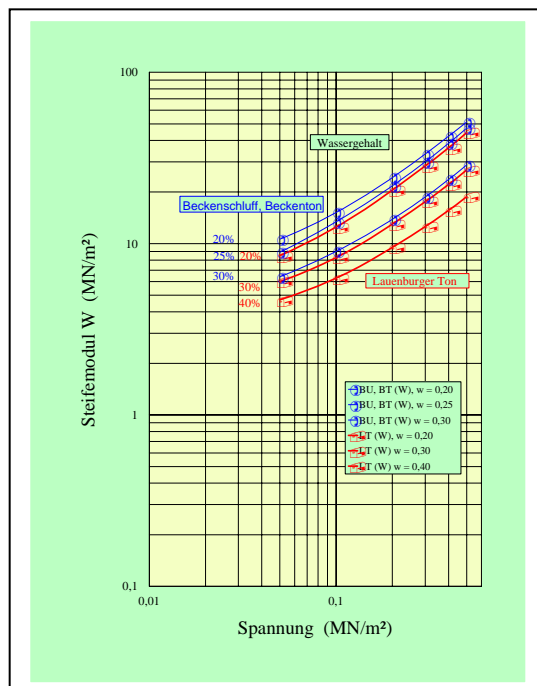


Abb. 53: Spannungsbezogener Steifemodul W (Wiederbelastung) der Staubeckensedimente Beckenschluff/-ton und Lauenburger Ton für unterschiedliche Wassergehalte

Der Wiederbelastungsmodul W für den Glimmerton wurde in Abb. 44 zusammen dem Geschiebemergel dargestellt.

Eignung bindiger Böden als Dichtungsmaterial (ausgewählte Beispiele)

Klei

Ton = 16%, Schluff = 63%, Sand = 21%; Wassergehalt $w = 26,9\%$, Glühverlust = 5,8%,

Proctordichte $\gamma_{dmax.} = 17,6 \text{ kN/m}^3$ beim optimalen Wassergehalt $w_{opt.} = 9\%$,

Ausrollgrenze $w_p = 23\%$, Fließgrenze $w_L = 43\%$, Plastizität $I_p = 20\%$,

Schrumpfgrenze $w_s = 4,5\%$, Schrumpfmaß $S = 3\%$,

undrÄnierte Scherfestigkeit c_u bei 97% Proctordichte = 104 kN/m²,

Durchlässigkeit $k_{max.} = 2,5E-8 \text{ m/s}$ bei $\gamma_d = 17,3 \text{ kN/m}^3$ und $w = 5,8\%$

Durchlässigkeit $k_{min.} = 3,4E-10 \text{ m/s}$ bei $\gamma_d = 17,6 \text{ kN/m}^3$ und $w = 10,5\%$

Einbaubereich: $w = 7 - 14\%$ mit $\gamma_d \geq 17,1 \text{ kN/m}^3 \geq 95\%$ Proctordichte, dann ist $k \leq 1E-9 \text{ m/s}$

Der Klei ist wegen der Trockenschrumpfung (bei $w = 5\%$ ist $k = 7E-7 \text{ m/s}$) nur bei EinbaumÄchtigkeiten von $\geq 1,5 \text{ m}$ als Dichtungsmaterial geeignet. Er sollte Gehalte von Ton = 10 - 20%, Schluff = 45 - 55%, Sand = 30 - 40% aufweisen.

Geschiebelehm

Ton = 5%, Schluff = 21%, Sand = 74%; Wassergehalt $w = 14,2\%$, Trockenraumwichte

$\gamma_d = 18,78 \text{ kN/m}^3$ bei natÄrlicher Lagerung

Proctordichte $\gamma_{dmax.} = 19,3 \text{ kN/m}^3$ beim optimalen Wassergehalt $w_{opt.} = 11\%$,

Durchlässigkeit $k_{max.} = 1,01E-7 \text{ m/s}$ bei $\gamma_d = 18 \text{ kN/m}^3$ und $w = 5\%$

Durchlässigkeit $k_{min.} = 3,5E-9 \text{ m/s}$ bei $\gamma_d = 19,2 \text{ kN/m}^3$ und $w = 12,8\%$

Einbaubereich: $w = 11 - 14\%$ mit $\gamma_d \geq 18,8 \text{ kN/m}^3 \geq 95\%$ Proctordichte, dann ist $k \leq 8E-9 \text{ m/s}$

Der Geschiebelehm ist bei Tongehalten $>10\%$ als Dichtungsmaterial gut geeignet.

Geschiebemergel

Ton = 17,5%, Schluff = 25,5%, Sand = 57%; Wassergehalt $w = 15,1\%$, Trockenraumwichte

$\gamma_d = 18,89 \text{ kN/m}^3$ bei natÄrlicher Lagerung

Proctordichte $\gamma_{dmax.} = 18,2 \text{ kN/m}^3$ beim optimalen Wassergehalt $w_{opt.} = 13\%$,

Durchlässigkeit $k_{max.} = 1,63E-7 \text{ m/s}$ bei $\gamma_d = 16,75 \text{ kN/m}^3$ und $w = 7\%$

Durchlässigkeit $k_{\min.} = 2,8E-10$ m/s bei $\gamma_d = 18,2$ kN/m³ und $w = 14,4\%$

Einbaubereich: $w = 11 - 18\%$ mit $\gamma_d \geq 17,8$ kN/m³ $\geq 95\%$ Proctordichte, dann ist $k \leq 1E-9$ m/s

Der Geschiebemergel ist bei Tongehalten $>10\%$ als Dichtungsmaterial gut geeignet.

Glimmerton

Ton = 22,5%, Schluff = 67,5%, Sand = 10%; Wassergehalt $w = 15,1\%$, Glühverlust = 6,5%,

Proctordichte $\gamma_{d\max.} = 16,7$ kN/m³ beim optimalen Wassergehalt $w_{opt.} = 18,3\%$,

Ausrollgrenze $w_p = 18,2\%$, Fließgrenze $w_L = 44,5\%$, Plastizität $I_p = 26,3\%$,

Schrumpfgrenze $w_s = 10\%$, Schrumpfmaß $S = 12\%$,

undrÄnirierte Scherfestigkeit c_u bei 97% Proctordichte = 80 kN/m²,

Durchlässigkeit $k_{\max.} = 3,5E-8$ m/s bei $\gamma_d = 15,9$ kN/m³ und $w = 15\%$

Durchlässigkeit $k_{\min.} = 5E-10$ m/s bei $\gamma_d = 16,5$ kN/m³ und $w = 17,5\%$

Einbaubereich: $w = 17 - 21\%$ mit $\gamma_d \geq 16,2$ kN/m³ $\geq 95\%$ Proctordichte, dann ist $k \leq 5E-10$ m/s

Der Glimmerton ist bei Gehalten an Ton = 10 – 20%, Schluff = 45 - 55%, und Sand = 30 – 40%.

Als Dichtungsmaterial bedingt geeignet Die Durchlässigkeit erhohert sich bei Trockenschrumpfung sehr stark ($w = 10\%$, $k = 3,5E-6$ m/s). Es wird eine Einbaumachtigkeit von $\geq 1,5$ m erforderlich.

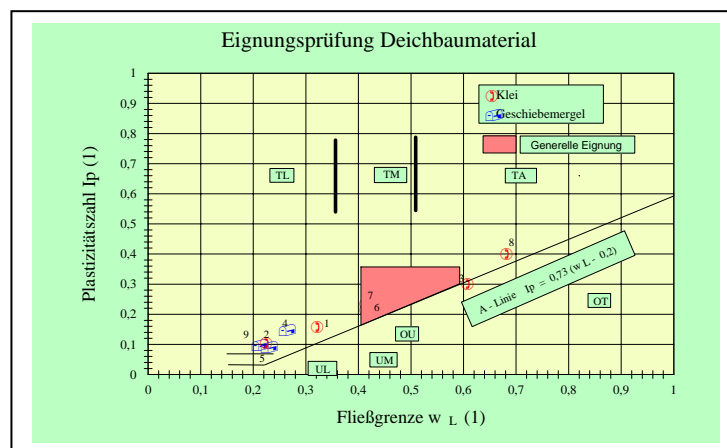


Abb. 54: Eignung bindiger Böden als Dichtungsmaterialien

Generelle Einbauhinweise

Einbau in den angegebenen Grenzen, Verdichtung mit einer Schaffuwalze in 5 – 10 Arbeitsgängen bis zum „walk out“.

Damit sind die wesentlichen geotechnischen Kennwerte der bindigen Bodenarten des

Hamburger Raumes ausreichend - allerdings mit unterschiedlicher statistischer Sicherheit - beschrieben und stehen zur Lösung fast aller geotechnischen Fragestellungen zur Verfügung.

Fluviatile Sedimente des Holozäns und des Pleistozäns

Holozäne Verschwemmungsablagerungen finden sich in den zum Elbtal offenen Tälern. Diese Sande sind vorwiegend fein- bis mittelkörnig, in der Regel eng gestuft und weisen eine lockere bis mitteldichte Lagerung auf. Im Elbtal stehen zunächst holozäne, überwiegend eng gestufte Sande und zur Tiefe hin pleistozäne, überwiegend weit bis intermittierend gestufte Sande an.

Kennwerte	Sande, eng gestuft
Trockenraumwichte γ_d (kN/m ³), lockerste Lagerung	12,2 – 17,2
Trockenraumwichte γ_d (kN/m ³), dichteste Lagerung	15,6 – 20,6
Porenanteil n (%), lockerste Lagerung	34 - 54
Porenanteil n (%), dichteste Lagerung	23 - 41
Durchlässigkeit K (m/s), lockerste Lagerung	2E-3 bis 1,5E-5
Durchlässigkeit K (m/s), dichteste Lagerung	7E-4 bis 3E-6

Tab.9: Geotechnische Kennwerte eng gestufter Sande

Diese Durchlässigkeitbeiwerte gelten für Sande mit Schluffanteilen <10%. Höhere Schluffanteile (z.B. 10 bis 20%) reduzieren die Durchlässigkeit z.B. von 1,5E-5 auf 2E-6 m/s bei lockerster Lagerung und von 3E-6 auf 1,5E-7 m/s bei dichtester Lagerung.

Die Sande sind nach DIN 18 300 in die Bodenklasse 3 - leicht lösbare Bodenarten - einzustufen. Nach DIN ISO 14 688 sind sie überwiegend der Bodengruppe SE, gelegentlich SW und SI zuzuordnen.

Die nicht frostempfindlichen Sande haben in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte eine mittlere bis gute Tragfähigkeit.

Glazifluviatile Sedimente der Saaleeiszeit und der Elstereiszeit

Die Schmelzwassersande und -kiese der Saale- und Elstereiszeit sind weit verbreitet. Sie sind eng, weit und intermittierend gestuft und weisen damit eine unterschiedlich große Ungleichförmigkeit

auf. An ihrer Zusammensetzung haben meist Fein-, Mittel- und Grobsand sowie zum Teil

auch Kies- und Steinbeimengungen Anteil. Gelegentlich können innerhalb dieser Sande jedoch auch schluffige Beimengungen vorkommen.

In der Regel liegen die eiszeitlichen Sande, abgesehen von der lockeren oberen Bodenzone, in mitteldichter bis dichter Lagerung vor. Gelegentlich tritt aber auch mehrere Meter mächtiger Sand in lockerer Lagerung auf.

In diesen Sanden treten deutliche Schichtstrukturen auf.

Kennwerte	Sande, weit bis intermittierend gestuft
Trockenraumwichte γ_d (kN/m ³), lockerste Lagerung	15,8 – 19,3
Trockenraumwichte γ_d (kN/m ³), dichteste Lagerung	19,4 – 22,3
Porenanteil n (%), lockerste Lagerung	27 - 40
Porenanteil n (%), dichteste Lagerung	16 - 27
Durchlässigkeit K (m/s), lockerste Lagerung	3E-3 bis 6E-5
Durchlässigkeit K (m/s), dichteste Lagerung	2E-3 bis 7E-6

Tab.10: Geotechnische Kennwerte weit bis intermittierend gestufter Sande

Diese Durchlässigkeitbeiwerte gelten für Sande mit Schluffanteilen <10%. Höhere Schluffanteile (z.B. 10 bis 20%) reduzieren die Durchlässigkeit z.B. von 6E-5 auf 2E-6 m/s bei lockerster Lagerung und von 7E-6 auf 1,5E-7 m/s bei dichtester Lagerung.

Die locker bis dicht gelagerten Sande sind nach DIN 18 300 in die Bodenklasse 3 - leicht lösbare Bodenarten - einzustufen. Nach DIN ISO 14 688 sind die Sande überwiegend den Bodengruppen SE, SW und SI zuzuordnen. Hohe Kies- oder Steinanteile können gelegentlich auch die Zuordnung GW bedingen. Steine und Blöcke sind im Grundbau und Tiefbau häufig Arbeitshindernisse. Die Sande stellen einen gut tragfähigen Baugrund dar.

Geotechnische Kennwerte der fluviatilen und der glazifluviatilen Sande in der Übersicht:

Raumwichten, Porenanteile, Porenzahlen und Durchlässigkeitskoeffizienten nicht bindiger Böden sind abhängig vom häufigsten Korndurchmesser d_{50} und vom Sortierungskoeffizienten

$$S_o = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}$$

der wie folgt definiert wird:

$S_o < 1,4$

$S_o = 1,4 - 2,0$

$S_o > 2,0$

sehr gut bis gut sortiert,

mittel bis schlecht sortiert

schlecht sortiert.

Aus der Raumwichte

$$\gamma_d = \frac{m_d}{V} \text{ (kN/m}^3\text{)},$$

dem Porenanteil

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \text{ (%),}$$

und der Porenzahl

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \text{ (1)}$$

ergibt sich die Lagerungsdichte

$$D = \frac{\max.n - \min.n}{\max.n - \min.n} = \frac{\gamma_d - \min.\gamma_d}{\max.\gamma_d - \min.\gamma_d}$$

bzw. die bezogene Lagerungsdichte

$$I_d = \frac{\max.e - e}{\max.e - \min.e} = \frac{\max.\gamma_d}{\gamma_d} \cdot D$$

mit

$I_d \leq 0,20$ sehr locker

$= 0,20 - 0,40$ locker

$= 0,40 - 0,60$ mitteldicht

$= 0,60 - 0,80$ dicht

$= 0,80 - 1,00$ sehr dicht

Die Ermittlung der **Lagerungsdichte** I_d kann auch mit den Spitzendruckwerten q_c erfolgen gemäß der verbesserten Ausgleichsgeraden nach DIN 14 688 der folgenden Abbildung bzw. Tabelle:

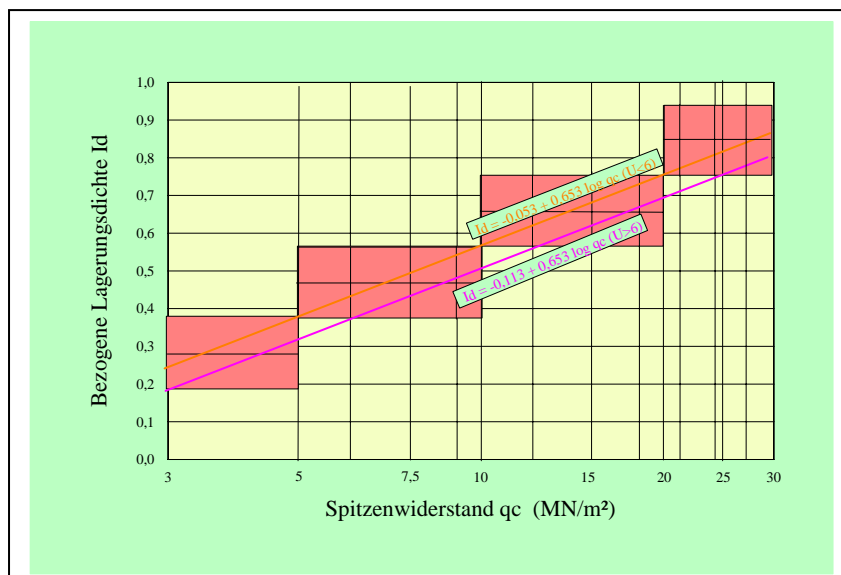


Abb. 55 : Bezogene Lagerungsdichte I_d aus dem Spitzenwiderstand q_c

q_c	I_d	Bewertung nach DIN 14688
>2,5	<0,2	sehr locker
2,5 – 5	0,2 – 0,4	locker
5 – 10	0,4 – 0,6	mitteldicht
10 – 20	0,6 – 0,8	dicht
>20	>0,8	sehr dicht

Der statistische Zusammenhang der **Trockenraumwichten bei lockerster und dichtester Lagerung** für Sande mit weniger als 10% Schluff ergibt sich dann wie folgt:

Trockenraumwichte (lockerste Lagerung,) $\gamma_0 = e^{\frac{\ln d_{50} + 23,18}{8,16}}$ [kN/m³], N = 121, r = 0,60

Trockenraumwichte (dichteste Lagerung, $S_o < 2$) $\gamma_d = e^{\frac{\ln d_{50} + 28,05}{9,28}}$ [kN/m³], N = 125, r = 0,61

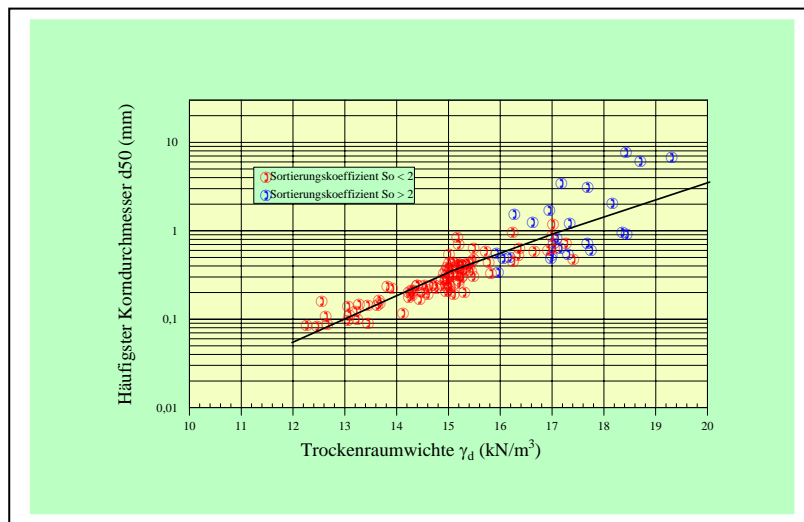


Abb. 56: Trockenraumwichte von Sanden mit <10% Schluffanteilen bei lockerster Lagerung

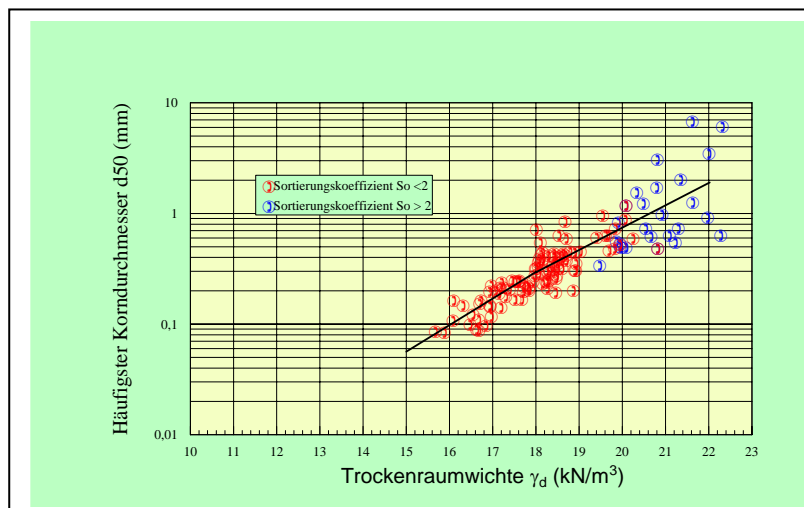


Abb. 57: Trockenraumwichte von Sanden mit <10% Schluffanteilen bei dichtester Lagerung
Die folgende Abbildung bietet einen Überblick auf die Raumwichten von Sanden mit weniger als 10% Schluff bei natürlicher Lagerung im Verhältnis zu den Ausgangswassergehalten:

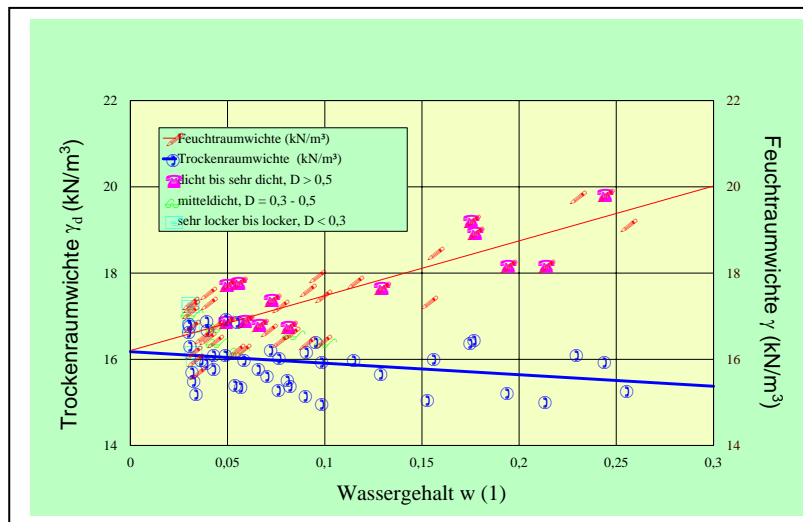


Abb. 58: Raumwichten von Sanden in natürlicher Lagerung in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Der statistische Zusammenhang von **Porenanteil und Porenzahl bei lockerster und dichtester Lagerung** für Sande mit weniger als 10% Schluff ergibt sich dann wie folgt:

$$\text{Porenanteil (lockerste Lagerung)} \quad n = e^{-\frac{\ln d_{50} - 19,151}{-5,39}} \quad [\%], N = 129, r = 0,59$$

$$\text{Porenanteil (dichteste Lagerung)} \quad n = e^{-\frac{\ln d_{50} - 10,548}{-3,41}} \quad [\%], N = 125, r = 0,59$$

$$\text{Porenzahl (lockerste Lagerung)} \quad e = e^{-\frac{\ln d_{50} + 1,984}{-3,186}} \quad [1], N = 129, r = 0,53$$

$$\text{Porenzahl (dichteste Lagerung)} \quad e = e^{-\frac{\ln d_{50} + 3,20}{-2,587}} \quad [1], N = 126, r = 0,57$$

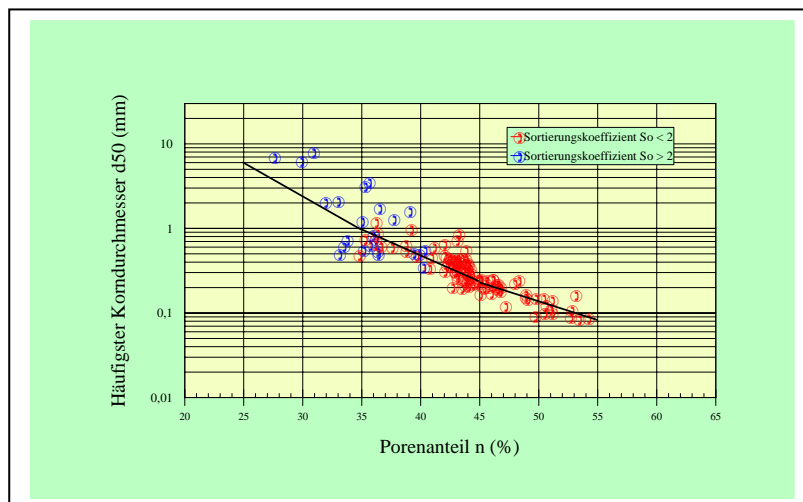


Abb. 59: Porenanteil von Sanden mit <10% Schluffanteilen bei lockerster Lagerung

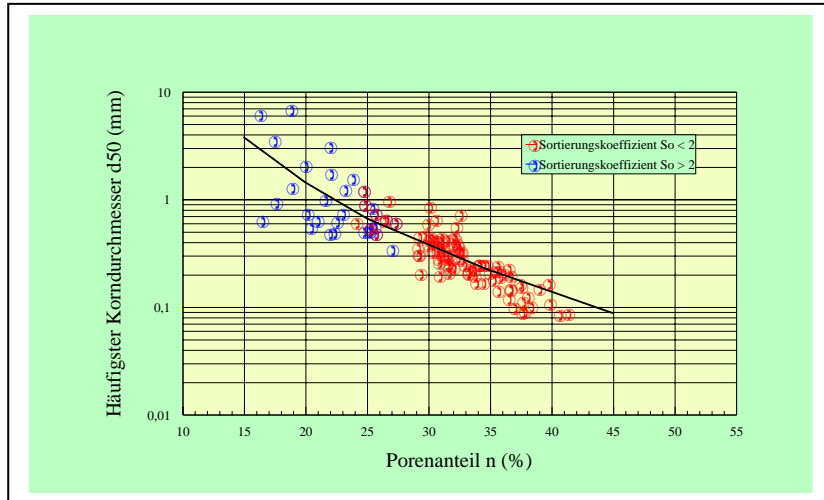


Abb. 60: Porenanteil von Sanden mit <10% Schluffanteilen bei dichtester Lagerung

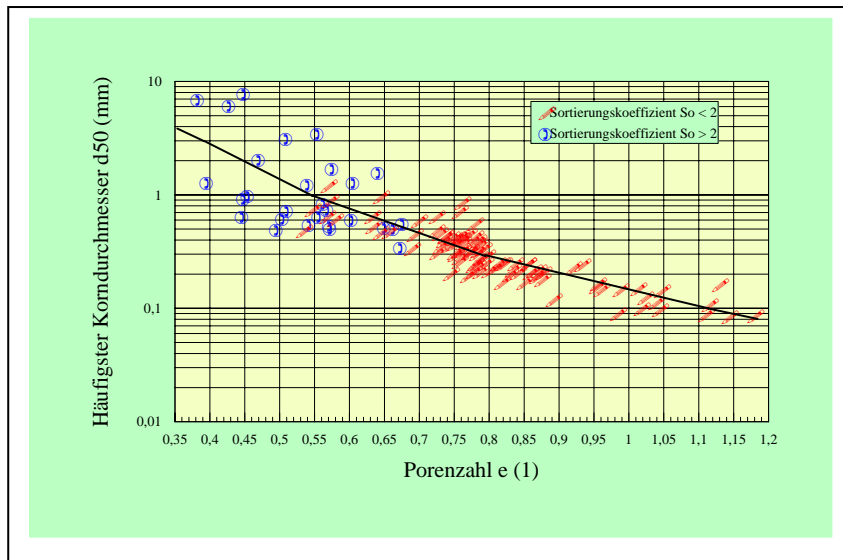


Abb. 61: Porenzahl von Sanden mit <10% Schluffanteilen bei lockerster Lagerung

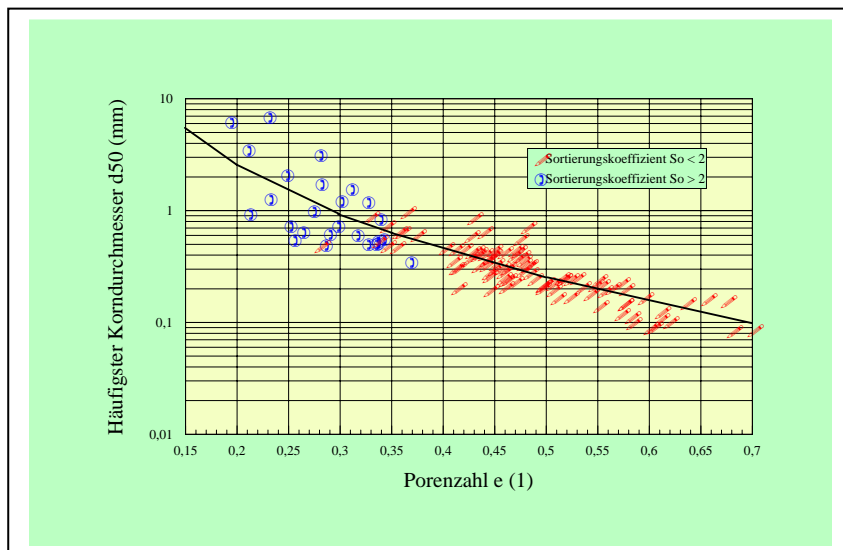


Abb. 62: Porenzahl von Sanden mit <10% Schluffanteilen bei dichtester Lagerung

Der hydraulisch **nutzbare Porenanteil** der Sande (Schluffanteile <4%) bei lockerster und dichtester Lagerung ergibt sich nach Beyer aus dem effektiven Porenanteil und der Durchlässigkeit gemäß $n_0 = s_0 \cdot n$ und $s_0 = f(k)$ und $n_0 = f(I_d)$. So ermittelte Werte werden in den folgenden Abbildungen dargestellt:

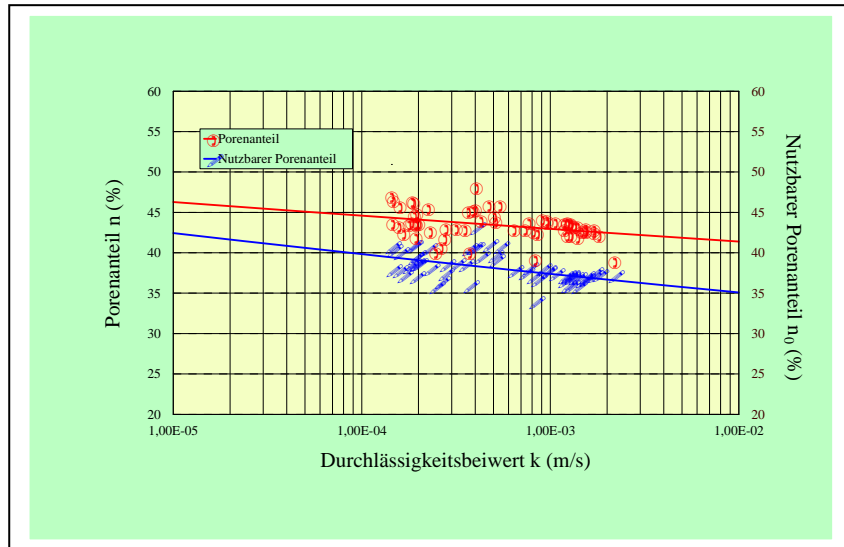


Abb. 63: Porenanteil und hydraulisch nutzbarer Porenanteil der Sande bei lockerster Lagerung im Verhältnis zur Durchlässigkeit

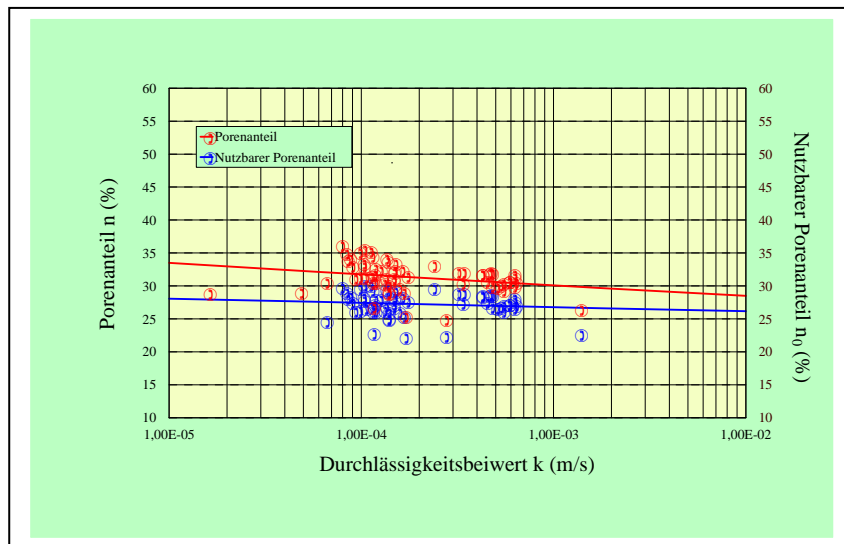


Abb. 64: Porenanteil und hydraulisch nutzbarer Porenanteil der Sande bei dichtester Lagerung im Verhältnis zur Durchlässigkeit

Der **Porendurchmesser d_p** ergibt sich aus der Korngrößenanalyse der Sande mit dem Ungleichförmigkeitsbeiwert $U = d_{60} / d_{10}$ und Parameter d_{17} gemäß

$$d_p = 0,535 \cdot \sqrt[6]{U} \cdot d_{17}$$

Der statistische Zusammenhang der **Durchlässigkeitsbeiwerte bei lockerster und dichtester Lagerung** für Sande mit weniger als 10% Schluff ergibt sich dann wie folgt:

Durchlässigkeitsbeiwert (lockerste Lagerung, $S_o < 1,4$) $k_0 = e^{\frac{\ln d_{50} - 1,37}{0,337}}$ [1], $N = 109$, $r = 0,82$

Durchlässigkeitsbeiwert (lockerste Lagerung, $S_o = 1,4 - 2$) $k_0 = e^{\frac{\ln d_{50} - 2,499}{0,40}}$ [1], $N = 73$, $r = 0,78$

Durchlässigkeitsbeiwert (lockerste Lagerung, $S_o > 2$) $k_0 = e^{\frac{\ln d_{50} - 8,82}{1,144}}$ [1], $N = 47$, $r = 0,85$

Durchlässigkeitsbeiwert (dichteste Lagerung, $S_o < 1,4$) $k_d = e^{\frac{\ln d_{50} - 1,64}{0,325}}$ [1], $N = 108$, $r = 0,87$

Durchlässigkeitsbeiwert (dichteste Lagerung, $S_o = 1,4 - 2$) $k_d = e^{\frac{\ln d_{50} - 1,789}{0,267}}$ [1], $N = 78$, $r = 0,63$

Durchlässigkeitsbeiwert (dichteste Lagerung, $S_o > 2$) $k_d = e^{\frac{\ln d_{50} - 12,35}{1,34}}$ [1], $N = 46$, $r = 0,91$

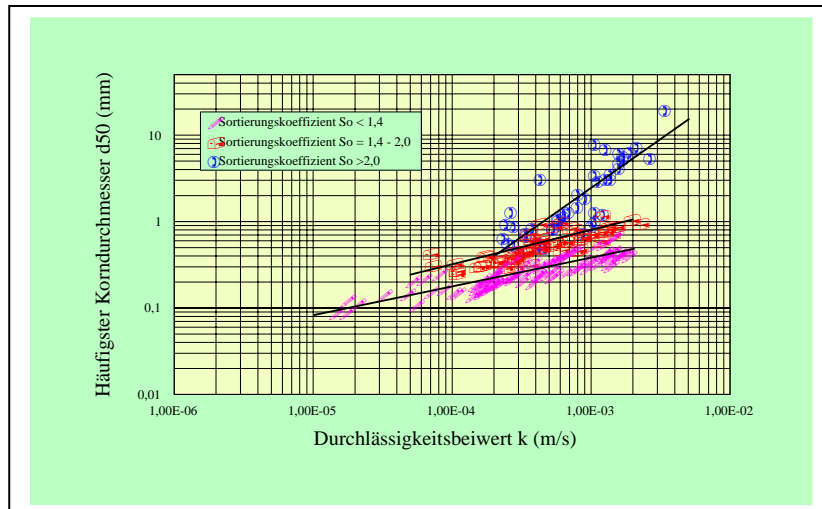


Abb. 65: Durchlässigkeitsbeiwerte von Sanden mit <10% Schluffanteilen bei lockerster Lagerung

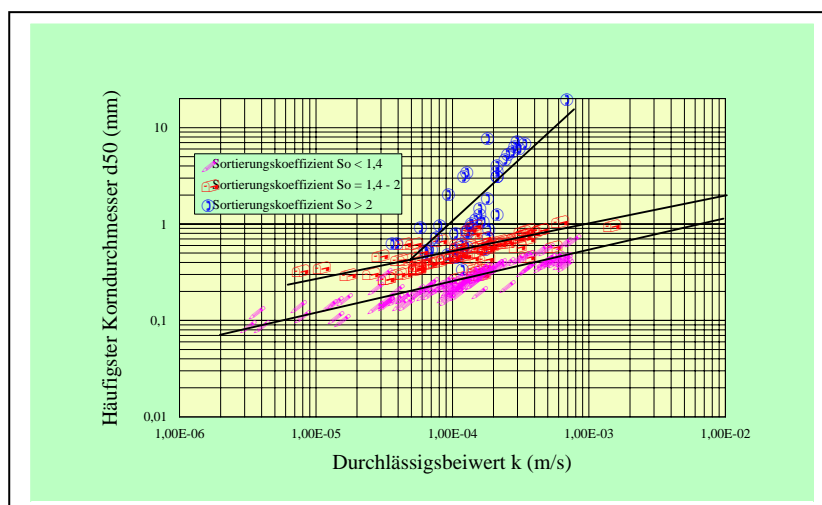


Abb. 66: Durchlässigkeitsbeiwerte von Sanden mit <10% Schluffanteilen bei dichtester Lagerung

Die Durchlässigkeitsbeiwerte wurden bei der Versuchstemperatur $\pm 20^\circ$ ermittelt und gemäß

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \quad [\text{m/s}]$$

in den Abbildungen dargestellt.

Sie können nach DIN 18 130 mit der Temperaturkorrektur ($T =$ Wassertemperatur beim Versuch) auf die jeweilige Gebrauchstemperatur umgerechnet werden.

$$k_r = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \cdot k_T = \alpha \cdot k_T$$

Die **horizontale Durchlässigkeit** ist bei geschichteten Böden in der Regel größer als die vertikale Durchlässigkeit. Sie werden nach folgenden Gleichungen ermittelt:

$$k_{\text{hges.}} = \frac{1}{h_{\text{ges.}}} \sum_{i=1}^n (k_{\text{hi}} \cdot m_i) \quad \text{und}$$

$$k_{\text{vges.}} = \frac{m_{\text{ges.}}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i}{k_{\text{vi}}} \right)}$$

Das Verhältnis $k_h/k_v > 1$ wird als Anisotropie der Durchlässigkeit bezeichnet.

An Hand ungestörter Proben aus ungeschichteten und geschichteten Sanden wurden folgende Anisotropiewerte ermittelt:

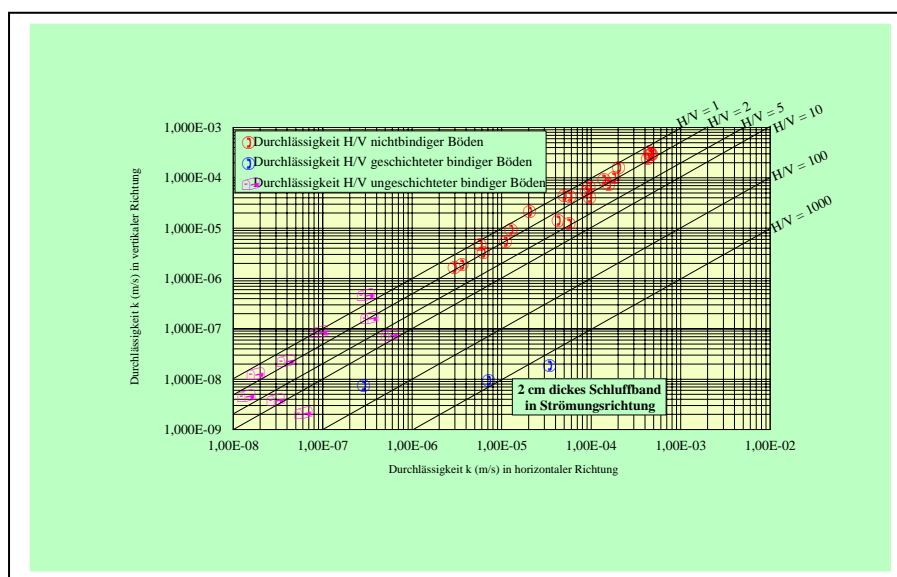


Abb. 67: Durchlässigkeit von Sanden und bindigen Böden bei natürlicher Lagerung in horizontaler und vertikaler Richtung

Schluffanteile, aber auch Kiesanteile beeinflussen die Durchlässigkeit erheblich. Dieses zu verdeutlichen, werden Diagramme für Durchlässigkeiten in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte, den Kiesanteilen 0 bis 20% und den Schluffanteilen 0 bis 20% dargestellt.

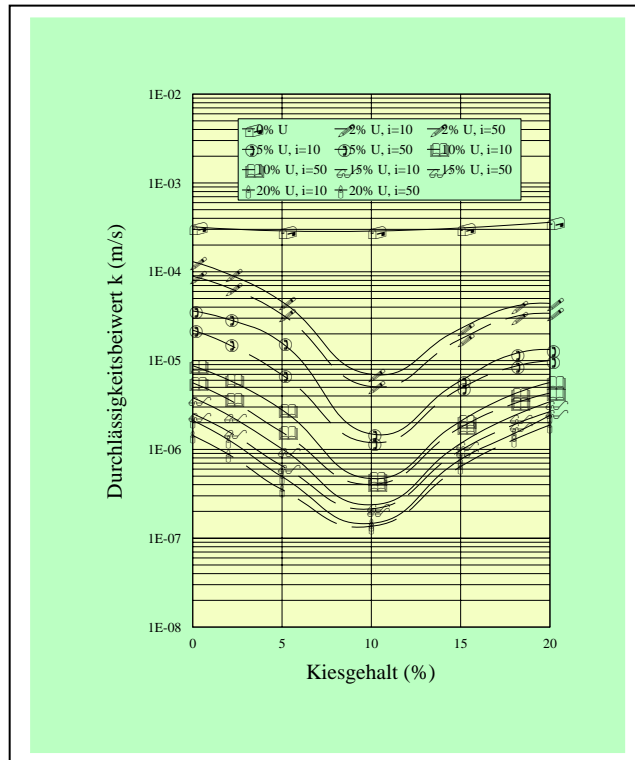


Abb. 68: Durchlässigkeitsbeiwerte für Sand-Kies-Schluff-Gemische bei lockerster Lagerung

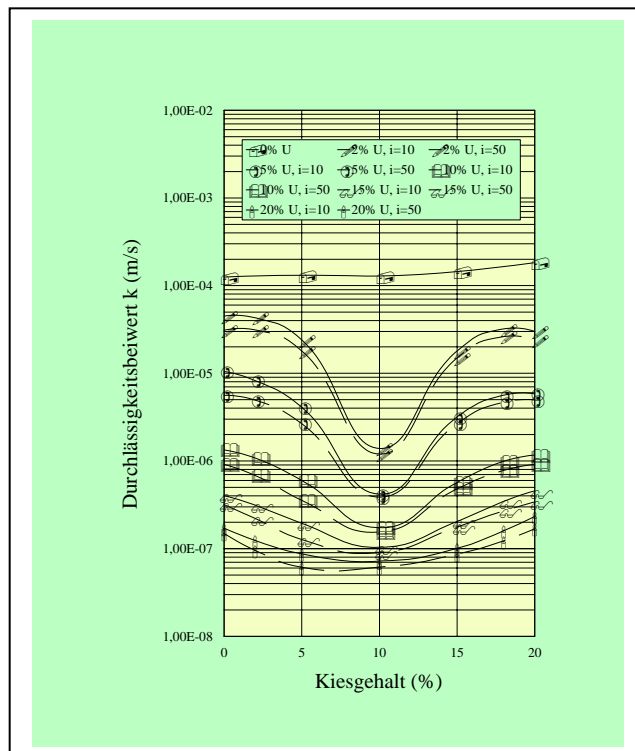
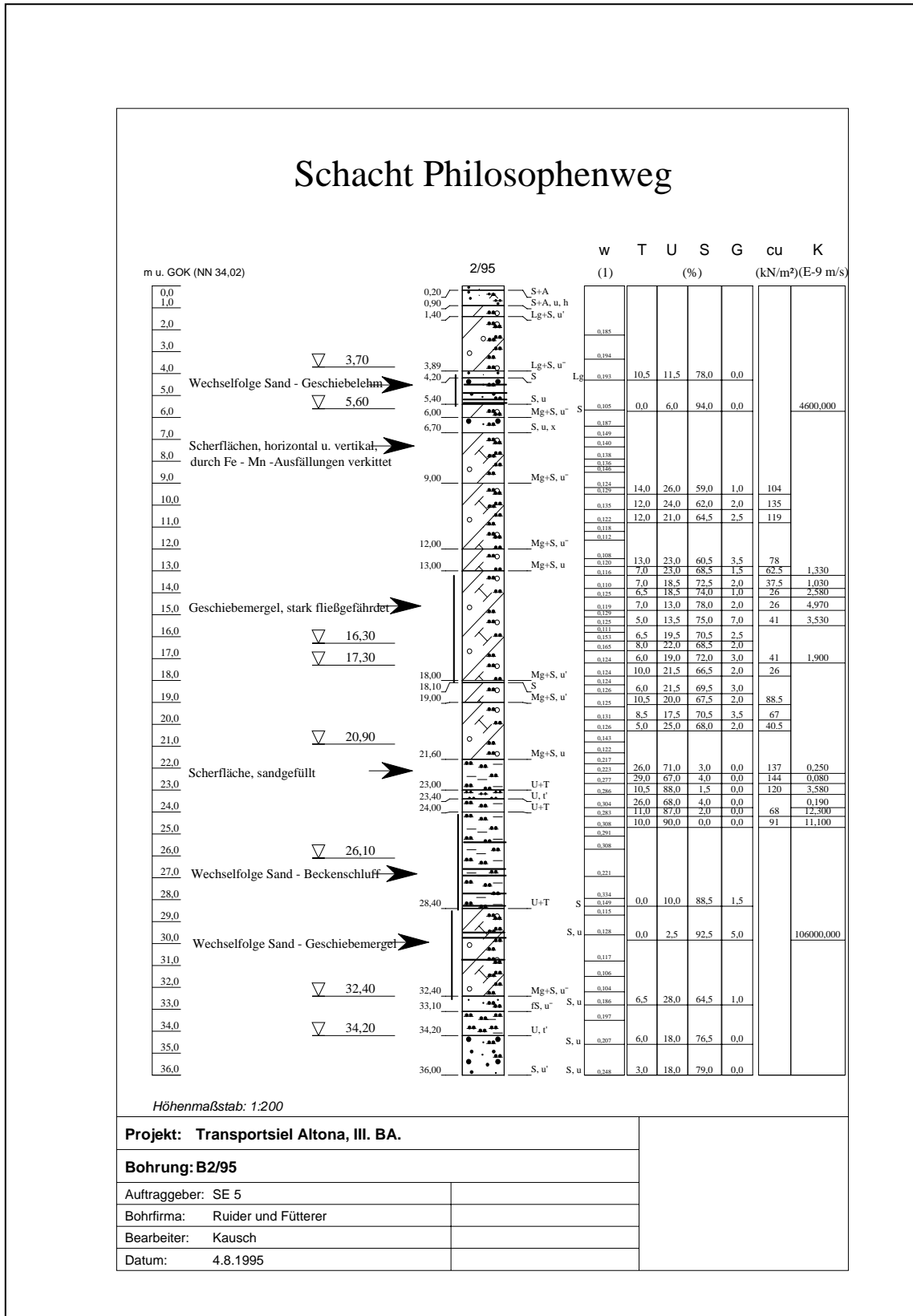


Abb. 69: Durchlässigkeitsbeiwerte für Sand-Kies-Schluff-Gemische bei dichtester Lagerung

Mit dem folgenden **Geologischen Profil** soll die mögliche, ausgeprägte Varianz der geotechnischen Eigenheiten der wichtigsten Hamburger Böden dargestellt werden.



Abschließend wird eine tabellarische Zusammenfassung der Scherfestigkeiten der bindigen Bodenarten dargestellt.

Bodenart	Scherfestigkeit bindiger Bodenarten (5%-Fraktile)											
	konsolidiert (D)						konsolidiert - undräniert (CU)					
	Mittelwerte		Grenzwerte		Grundwerte		Mittelwerte		Grenzwerte		Grundwerte	
	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	c' (kN/m ²)	ϕ_{cu} (°)	c _{cu} (kN/m ²)	ϕ_{cu} (°)	c _{cu} (kN/m ²)	ϕ_{cu} (°)	c _{cu} (kN/m ²)
Weichschichten (qh)	26,9	9	16-39,6	0-20	25,4	7,2	18,6	17,5	8,5-30,5	2,5-40	17,6	15,1
Mudden und Torfe (qh)	22,4	5,7	16-31	2-12	18,9	3,3	16,9	18,2	8,5-24	5-32	15,1	15,1
Mudden und Torfe (qee)	31	15,3	23-34,5	10-19	27	11,7	20,9	19,4	17-30,5	6-40	18,4	13,7
Klei	27,3	8,6	19-39,6	0-20	25,8	6,1	18,9	16	15-25	2,5-39	17,9	11,9
Geschiebelehm	31,5	10,1	22-41	0-30	30,2	8	25,15	20,24	16-39	0-50	23,1	15,6
Geschiebemergel	33,3	17,9	22,7-42,5	0-63	32,5	15,1	26,15	47,24	13 - 38	0 - 128	24,5	37,2
Jüngere Saalemoräne	34,7	8,9	29,5-40	0-22	33,2	4,7						
Mittlere Saalemoräne	32,8	16,7	27-39,5	0-46	30,9	10,1						
ältere Saalemoräne	34,4	14,5	28-42	0-50	33,2	9,2						
Elstermoräne	32,5	50	28-29,5	32-63	*	*						
Beckenschluff	33,6	10,2	27-39,5	0-45	31,4	4,3	30,9	19,2	21-35,9	3,5-40	*	*
Beckenton	22,8	23,7	18,9-28,1	7,4-37,5	18,2	7,5	*	*	*	*	*	*
Lauenburger Ton	17,8	51,7	12-26,5	20-105	13,6	30	16,6	39,7	10-29*	20-75*	11,5	22,8
Glimmerton	27,1	38,1	13-39	0-90	24,3	27,6	*	*	29,8-36	80-160	*	*

- zu wenige Werte

