

BODENMECHANIK

© chager - Version 1.0

Prof. Diverse, ETHZ

EINFÜHRUNG

WICHTIGE THEMEN

Bauwerk-Boden	Bodenaufbau, Geologie Kennwerte Grundwasser Andere Bauwerke
Bauwerk	Abmessung, Geometrie Einwirkungen Setzungen
Dimensionierung	Grenzzustand Tragsicherheit Grenzzustand Gebrauchstauglichkeit
Veränderungen	Be/Entlastung Verdichtung Entwässerung Verschmutzung
Bodenkennwerte	Scherfestigkeit Steifigkeit Durchlässigkeit

TONMINERALIEN

→ Entstehung durch chem. Verwitterung von Feldspat, Glimmer, basischen Erstarrungsgesteinen

- Quellen/Schwinden bei Wasseraufnahme/Abgabe
- Hohe Spezifische Oberfläche
- Durch Salzwasser Mineralien einbauen → Kartenhaus → Auswaschung, Ladungen zu Gering → Quickclay
- Bei mehr als 10% Anteil dominieren Tone die Eigenschaften
- Tonfraktion: Definition nach Geometrie, Grösse
- Tonminerale: Definition nach Chemie, Stoff

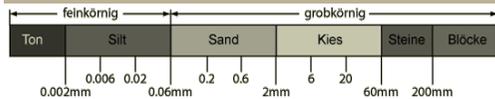
BODENEIGENSCHAFTEN

BESCHREIBUNG

- Struktur: Korngrössenverteilung
 - Textur: Bodenaufbau, Schichtung
 - Gefüge: Zusammenfassung Textur, Struktur Bodenkörper
- Je nach Sprachregion unterschiedlich definiert

KLASSIFIKATION

46-59



→ Betrachte Korngrössenverteilung

Gut Abgestuft: konstante Steigung
Schlecht Abgestuft: horizontale/steile Anteile

→ **Grobkörnige Böden:** S47-53

Aufgrund Hauptbestandteil und Verteilung

$C_u \geq 4$ gut abgestufter Kies $C_u = C_k = 1$ Einkornboden
 $C_u \geq 6$ gut abgestufter Sand $1 < C_k < 3$ gut abgestufter Boden
 $C_u < 3$ gleichförmiger Boden $C_k < 0.1$ fehlende Korngrösse

→ **Feinkörnige Böden:** S54-58

Aufgrund Form/Oberflächenladung Partikel
→ mit Plastizitätsdiagramm (A-Linie)

KENNGRÖSSEN

ALLGEMEIN 66, 67

Porengehalt	Konsistenz
Wassersättigung	Wassergehalt
Dichte, Raumgewicht	Belastungsgeschichte
Lagerungsdichte	
X In Situ	
X_d Trocken	
X_s Festsubstanz	
X_w Wasser (Konstant)	
X_g Gesättigt	
X_L, X_p Luft, Poren	
Erdbeschleunigung $g = 10 \text{ m/s}^2$	$[\text{m/s}^2]$
Dichte $\rho = \frac{m}{V}$	$[\text{g/cm}^3], [\text{t/m}^3]$
Raumlast, Wichte $\gamma = \rho \cdot g$	$[\text{kN/m}^3]$
Gewicht $G = m \cdot g$	$[\text{kN}]$

Feuchtdichte	$\rho = \frac{m_s + m_w}{V_{tot}} = \frac{\rho_s + S_r e \rho_w}{1 + e}$ in Situ
Trockendichte	$\rho_d = \frac{m_s}{V_{tot}} = \frac{\rho_s}{1 + e}$ bez. Festsubstanz
Spez. Dichte Körner	$\rho_s = \frac{m_s}{V_d}$

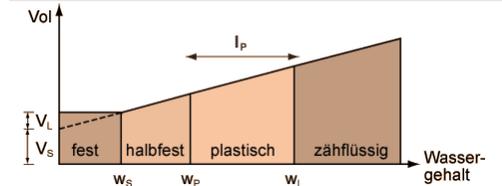
Feuchtraumgewicht	$\gamma = \frac{G_s + G_w}{V_{tot}} = \frac{\gamma_s + S_r e \gamma_w}{1 + e}$ in Situ
oder kleiner	$\gamma = \gamma_d (1 + w)$
Trockenraumgew.	$\gamma_d = \frac{G_s}{V_{tot}} = \frac{\gamma_s}{1 + e} = \frac{\gamma}{1 + w} = \gamma_s (1 - n)$
Spez. Raumlast Körner	$\gamma_s = \frac{m_s g}{V_s} = \frac{\gamma_w}{(1 - \frac{\gamma}{\gamma_d} + \frac{\gamma_w}{\gamma_d})}$

Gesättigte Böden $\gamma_d < \gamma < \gamma_g$ wenn $S_r = 1$
18 – 22 kN/m³

KORNVERTEILUNG 47-53

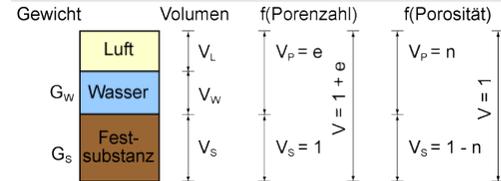
Ungleichförmigkeit $C_U = d_{60}/d_{10}$
Krümmung $C_K = d_{30}^2/d_{60}d_{10}$

KONSISTENZ/PLASTIZITÄT 55-58, 70



Wassergehalt	w in Situ
Fließgrenze	w_L Fallkonus 10mm, 60g, 60°
Ausrollgrenze	w_p Würstchen 3mm zerbrösel
Schrumpfgrenze	w_s Schrumpfen bei Wasserentz.
Plastizitätsindex	$I_p = w_L - w_p$
Aktivitätszahl	$I_A = I_p / q^*$ $q^* = d_{0.002mm} / d_{0.5mm}$ Wasserbindungsvermögen
Konsistenzindex	$I_C = \frac{w_L - w}{I_p}$ In Situ Schwerfest. bez w
Liquiditätszahl	$I_L = \frac{w - w_p}{I_p} = 1 - I_C$

POREN UND WASSER 61-68



Porenzahl	$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 = \frac{n}{1 - n}$
Porosität	$n = \frac{V_p}{V_{tot}} = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} = \frac{e}{1 + e}$
Spez. Volumen	$V = 1 + e = \frac{V_{tot}}{V_s}$
Luftporenvolumen	$V_L = V_p - V_w = e(1 - S_r)$
Luftporengehalt	$A_L = \frac{V_L}{V_{tot}} = n(1 - S_r)$
Sättigungszahl	$S_r = \frac{V_w}{V_p} = \frac{w \gamma_d}{n \gamma_w} = \frac{w \gamma_s}{n \gamma_w} (1 - n) = \frac{w \gamma_s}{e \gamma_w}$
Wassergehalt	$w = \frac{G_w}{G_s} = \frac{S_r e \gamma_w}{\gamma_s}$

LAGERUNGSDICHTE / DICHTINDEX 69

→ Boden locker oder dicht gelagert → Bereich Porosität n
Lagerungsdichte $D = \frac{n_{max} - n}{e_{max} - e}$
Dichteindex $I_D = \frac{e_{max} - e_{min}}{e_{max} - e}$
→ gut abgestufte Böden haben grössere Variabilität, lassen sich somit besser verdichten

BAUGRUNDUNTERSUCHUNGEN

Untersuchungstiefe: Siehe s 86-88

FELDVERSUCHE 71-141

AUSSTECHVERSUCH 71

- Feinkörniger Boden, einfach
- Wassergehalt, Raumlast

SANDERSATZMETHODE 72

- Grobkörniger Boden, Sand als Bodenersatzvolumen
- Wassergehalt, Raumlast

BALONMETHODE 72

TIME DOMAIN REFLECTOMETRY TDR 73

- Dielektrizitätskonstante → Wassergehalt

ISOTOPENSONDEN 74

- Schnelle Neutronen → Wassergehalt
- Gammastrahlen → Dichte

PROBEN 93-110

→ Entnahme von Proben
Güteklassen 1=ungestört bis 4=gestört, 5=petrografische Probe

KOLBENENTHAHMEGERÄT 95-99

- Feinkörniger (klebriger) Boden
- Spezielle Anforderungen Geometrie Entnahmebüchse

SONDIERSCHLITZ 100

- Baggerschlitz bis 4m tiefes Loch, kleine Bauten

SONDIERSTOLLEN 101

- Im Untertagebau

SONDIER-KERNBOHRUNG 101-110

- Punktuntersuchungen des Bodens
- Kann gerammt, gedreht, gedrückt werden, bis 300m ++

SONDEN 110-

→ Keine Probeentnahmen möglich

RAMM-SONDIERUNG 110-116

- Fallgewicht, Anzahl Schläge wird aufgezeichnet, bis 10m
- Verschiedene Grössen für versch. Böden/Tiefen
- SPT Standard Penetration Test, Standardisiertes Verfahren

DRUCKSONDIERUNG – CONE PENETRATION TEST 116

- Einpressen Sonde mit Statisches Gewicht

GRAVIMETRIE 122

• Dichteunterschied wegen Gravitationsfeld (Erze)

MAGNETIK 123

- Magnetische Gesteine (Erz, Altlasten)

SEISMIK 123-132

- Kompressions- und Scherwellen führen zu Reflexion und Refraktion (vollständige Reflexion) → GWSP, Fels

GEOELEKTRIK 132-136

- Potentialfeld → Leitfähigkeit → Wassersättigung, Porosität, Anwesenheit von Tonen

GEORADAR 136-138

- Messung Laufzeit von Elektrischen Wellen → Schichten

WASSERPROBEN 89-92

Trübung, Färbung, Geruch, Temp, pH-Wert, Härte, Aggressivität

BAUGRUNDMODELL 139-142

→ Es soll nun ein Konsistentes Baugrundmodell erstellt werden. Die Vorhandenen Daten sind meist nicht eindeutig, es ist Vorsicht geboten. Gegebenfalls werden weitere Untersuchen benötigt.

SPANNUNGEN 147

Allgemein: $\sigma = \gamma \cdot z$ $u = \gamma_w \cdot h$ in $kPa, kN/m^2$

VERTIKALE SPANNUNGEN 147-164

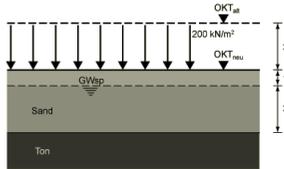
Für Bodenmechanik sind Effektive Spannungen massgebend:

$\sigma'_v = \sigma - u$
 Effektive Spannungen = Totale Spannungen - Porenwasserdruck
Totale Spannungen: Gesamtes Gewicht
Porenwasserdruck: Wassersäule über betrachtetem Punkt
Eff. Spannungen: σ zwischen den Bodenkörner

BERECHNUNG

$$\sigma'_v = \sum \gamma_i z_i - \gamma_w h_w + q$$

$$\sigma'_v = \gamma_i z_i + \gamma'_i z_i + q \quad \gamma' = \gamma - \gamma_w$$



σ'_v ändert sich nur wenn GWSP unterhalb OKT schwankt

NEGATIVER PORENWASSERDRUCK 153

Aufgrund Kapillarkräften in feinkörnigen Böden. Wasser steigt in Kapillaren nach oben (bis 20m in Tonen) Es herrscht ein Unterdruck, was die Körner zusammenhält und eff. Spannungen erhöht. Damit darf aber nicht gerechnet werden, da bei Regen zB diese Kräfte zusammenfallen (vgl. Sandburg)

ÄNDERUNGEN DER EFFEKTIVEN SPANNUNGEN 161

Eine Änderung von σ'_v bewirkt im Allgemeinen eine Änderung der Scherfestigkeit sowie eine Volumenänderung

HORIZONTALE SPANNUNGEN 164

→ Durch Vertikale Spannungen entstehen ebenfalls horizontale

$$\sigma_h = \sigma'_h + u = K \sigma'_v + u$$

Erddruckbeiwert K ist abhängig von wirksamen Reibungswinkel φ' bei trockenem Boden sowie der Spannungsgeschichte

ÜBERKONSOLIDATION 166-170

OC: Überkonsolidiert NC: Normal Konsolidiert

OverConsolidationRatio: $OCR = \sigma'_{vmax} / \sigma'_v$

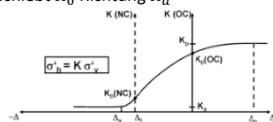
ERDRUCKBEIWERTE

Erdruchedruck: $K_0 \sigma'_h = K_0 \sigma'_v$
 $K_0(OC) = K_0(NC) \cdot OCR^n \quad n = 0.5$
 $K_0(NC) = 1 - \sin \varphi'$

Aktiver Druck: Entlastung des Bodens aufgrund verschiebung zB der Stützmauer weg vom Boden. K grösser bis $\max K_a = \tan^2(45 - \frac{\varphi'}{2})$

Passiver Druck: Belastung des Bodens aufgrund Kraftaufbringung zb wegen Baugrubensich. K kleiner bis $K_p = \tan^2(45 + \frac{\varphi'}{2})$

→ Bei OC verschiebt K_0 Richtung K_a



SPANNUNGEN UND DEHNUNGEN

Spannung: $\sigma = F_n/A$ $\epsilon = \delta z/z_0$
 Schub: $\tau = F_s/A$ $\gamma = \delta h/z_0$

! In Bodenmechanik sind Druckkräfte auf Körper Positiv!

SPANNUNGSZUSTÄNDE 171-172

Allgemeiner Fall unterschiedliche Spannungen und Dehnungen in alle 3 Richtungen

Axialsymmetrisch/Triaxialer Zustand Spannungen/Dehnung in 2 Richtungen identisch.

Ebener Zustand Dehnung in einer Richtung gleich Null

Ein dimensionale Kompression Längliche Bauwerke wie Dammschüttungen

Einaxiale Kompression Dehnungen in 2 Richtungen sind gleich Null

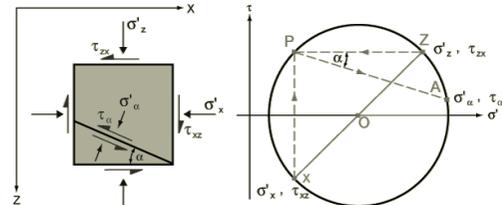
Einaxiale Kompression Spannungen in 2 Richtungen sind gleich Null

- Isotroper Spannungszustand: gleiche Spannung in alle Richt. (Erddruckbeiwert $K=1$)
- Einaxialer Spannungszustand ($\epsilon_h \neq 0$, Druckversuch)
- Einaxialer Verformungszustand (Ödometerversuch)

MOHR 173-182

Vorzeichen: S174

Mohrscher Kreis:



Mittelpunkt: $s = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ $\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$
 Volumenänderung Formänderung

Häufig: $\sigma_1 = \sigma'_v$, $\sigma_3 = \sigma'_h$

TIEFENWIRKUNG 184-199

86-88: Untersuchungstiefe

Allgemein: Auflast q kann mit Faktor J aus Kurve oder Diagramm multipliziert werden → Ergibt Tiefenwirkung der Auflast.

- Fläche unter Kurve entspricht der Auflast
- Bei effektiven Spannungen im Boden kommen noch Eigengewichte hinzu!

Punktlast Vertikal: $\sigma_{184-185}$
 Punktlast Horizontal: σ_{186}
 Linienlasten: $\sigma_{187-189}$
 Flächenlasten: $\sigma_{189-199}$

Bei Rechteckfundamente unter Platte: 4 Rechtecke daraus machen → Eckwerte Superponieren.

GRUNDWASSER 201

Definition GWSP: Übergang gesättigt-ungesättigt Boden

Schwebender Grundwasserleiter: 2. Grundwasserstock

Gespannter GWSP: Undurchlässige Schicht drückt GWSP nach unten → artesischer Brunnen

Druckhöhe: $h_w = u_x / \gamma_w$
 Geodätische Höhe: h_z von Bezugshorizont nach oben
 Piezometerhöhe: $h = h_z + h_w$

KAPILLARE STEIGHÖHE 203-205

Negative Porenwasserdrücke → Boden oberhalb GWSP gesättigt
 Steighöhe: $h_k = \frac{4 S \cos \alpha}{\gamma_w d_{10}}$ $\alpha \approx 15^\circ, S = 75 \cdot 10^{-6} kN/m$

STRÖMUNGEN 209-214

Hydraulisches Gefälle $i = \frac{\Delta H}{\Delta s} = \frac{\text{Höhenunterschied}}{\text{Sickerstrecke}}$

Fließgeschwindigkeit: $v = \frac{Q}{A} = k \cdot i$

Durchlässigkeitswert: $k [m/s] \approx 0.01 \frac{(d_{10})^2}{C_u} [mm^2]$

	Kies	Sand	Silt	Ton
$k \frac{[m]}{[s]}$	10^{-2}	$10^{-2} \div 10^{-5}$	$10^{-5} \div 10^{-8}$	$< 10^{-8}$

→ s248/249

Strömungskraft pro Volumeneinheit in Fließrichtung:

$$s \left[\frac{kN}{m^3} \right] = i \cdot \gamma_w$$

Porenwasserdruck bei Abpumpen in Tiefe z :
 $u = (1 - i) \gamma_w z$ S.212

Porenwasserdruck wenn Wasser reindrückt:
 $u = (1 + i) \gamma_w z$

Druckab/aufbau über eine Schicht infolge Strömung:
 $\Delta u = i \gamma_w z \quad i = \Delta H / d$

HYDRAULISCHER GRUNDBRUCH 215

→ Aufwärtsgerichtete Strömung im Boden führt zu Reduktion effektiven Spannungen, werden diese null, verhält sich Boden wie eine Flüssigkeit → Wegschwemmen der Bodenkörner

Vorhandenes Gefälle:

$$i_{vorn} = \frac{\Delta H}{\text{Sickerstrecke}}$$

$$i_{krit} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w(1 + e)}$$

$$F_h = \frac{i_{krit}}{i_{vorn}} \geq 1.5$$

INNERE EROSION 216

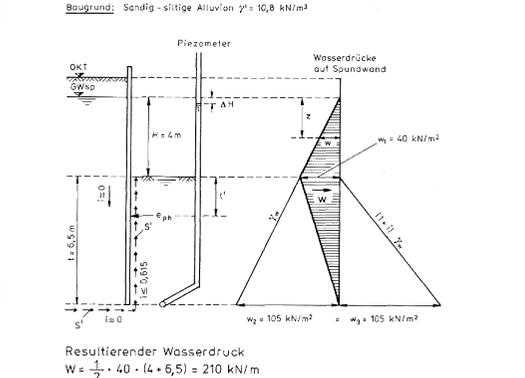
→ Feinkornanteil des Bodens wird in Poren von Boden mit grösserer Durchlässigkeit gespült. ($\Delta k > x100$)
 → Filterkriterien für Kornverteilung und Rohrdurchmesser

ABSCHÄTZEN BEI STÜTZWAND 235-238

Isotrop: i_m bilden über „Wandumfang“ und ΔH
 Anisotrop: i_m nur in Baugrubinnenseite bilden
 → u -Verlauf Aufzeichnen, Fläche darunter ist Wasserdruck

Anisotrop ist konservativer, da Strömung hinter Baugrube den Aktiven Wasserdruck reduziert, was nicht immer so ist.

Anisotroper Boden mit Wasserdruck:



AUFTRIEB 217-219

Allgemeine Sicherheit: $F_A = \frac{c}{A} \geq 1.1$

Auftrieb: $A = \gamma_w \cdot V_{Dept}$ Eigengewicht: G
 → Höchstmögliche Lage des GWSP annehmen

Bei **gespannten Grundwasserleiter** Überprüfung bei Schichtfolge vornehmen: $\sigma_z \geq F_A \cdot \gamma_w \cdot h_w$

SCHICHTKOMBINATIONEN 224-225

VERTIKAL

$$k_v = \frac{\sum t_i}{\sum \frac{t_i}{k_i}} \quad Q, v = \phi$$

Schicht mit kleinen k kann massgebend sein, Druck wird dort abgebaut

HORIZONTAL

$$k_h = \frac{\sum k_i \cdot t_i}{\sum t_i} \quad u, i = \phi$$

BRUNNENSTRÖMUNGEN 220-223

→ Siehe Skript

ZYLINDRISCH, BEGRENZT 220-221

Isotroper Grundwasserleiter, der oben und unten Beschränkt ist

ZYLINDRISCHE GRUNDWASSERABSENKUNG 221-222

Pumpen aus einem isotropen Grundwasserleiter

SPHÄRISCHER BRUNNEN 222-223

Punktuelle Grundwasserentzug

REICHWEITE BRUNNEN 223

$$r = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{k} \quad \text{mit } s \text{ die Absenktiefe}$$

STRÖMUNGSNETZ 228-234

Potentiallinien PL Konstanter Druck, gleiche Piezometerhöhe

Stromlinien SL Fließrichtung Strömung

Konstruktion siehe Skript s228-234
 → Bei Erddämmen gibt es eine freie Wasseroberfläche
 Hier ist $u = 0$ → Intervalle so wählen, dass $h = h_w$

BERECHNUNG DURCHFLUSS 229-230

$$q = \frac{n_d}{n_a} \cdot k \cdot \Delta H \quad \text{pro Laufmeterbreite des betr. Querschnitts}$$

SKRIPT 1 ENDE

VERFORMungsverhalten 11

VOLUMENÄnderung 11-18

Aufgrund Änderung der Poren durch Wasser/Luft

- Verdichtung: Luft wird ausgepresst
- Konsolidation: Aufgrund Eigengewicht
- Schrumpfen/Quellen: Tonige Böden
- Kriechen: Tone verändern Struktur

DRAINiert UND UNDRAINiert 19-25

Drainage: Entwässerung, abhängig von Durchlässigkeit

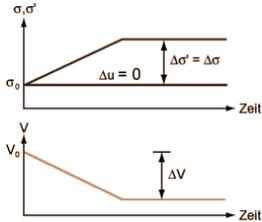
DRAINiert 19

Porenwasserdrücke ändern sich nicht

$$\Delta u = 0$$

$$\Delta \sigma' = \Delta \sigma$$

→ Aufgebrachte Lasten erhöhen sofort die effektiven Spannungen



→ Setzungen treten sofort ein

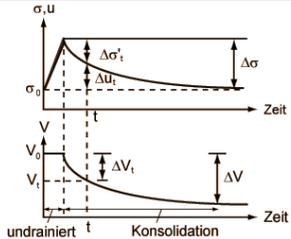
- Grobkörnige Böden (Sand, Kies) und kurze Drainagewege
- Feinkörnige Böden mit langsamer Belastungsgeschwindigkeit

UNDRAINiert 20

$$\Delta u = \Delta \sigma$$

$$\Delta \sigma' = 0$$

→ Aufgebrachte Lasten erhöhen nur Porenwasserdruck Δu



→ Setzungen treten nur über längere Zeit ein

→ Nach Konsolidation wie drainiert

Keine Setzungen am Anfang in gesättigten Böden

- Laborversuche mit veränderter Drainage
 - Rasche Belastungsänderungen
 - Böden mit geringer Durchlässigkeit oder lange Drainagewege
- Es reicht Boden entweder drainiert oder untrainiert zu Betrachten

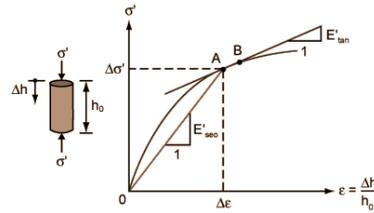
→ Bei Entlastung entstehen Porenunterdrücke und Quellen

STEIFIGKEIT UND PARAMETER 26-38

Drainiert: mit Apostroph X'
 Untrainiert: mit Index X_u

MODULE

Zusammendrückungsmodul $M_E = \frac{d\sigma_z}{d\varepsilon_z} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$
 Tangentenmodul $E'_{tan} = d\sigma'/d\varepsilon$ (kleine Änd)
 Sekantenmodul $E'_{sek} = \Delta\sigma'/\Delta\varepsilon$ (grosse Änd)



Kompressionsmodul $K = \frac{d\sigma'_m}{d\varepsilon'_v} = \frac{E}{3(1-2\nu)}$
 Schubmodul $G = \frac{d\tau}{d\gamma} = \frac{E}{2(1+\nu)}$

ÜBERSICHT

Parameter	drainiert	undrainiert
Poissonzahl	ν'	$\nu_u = 0.5$
Elastizität	E'	E_u
Zusammendrückungsmodul	M_E	$M_E = \infty$
Schermodul	$G' = G$	$G_u = G$
Kompressionsmodul	K'	$K_u = \infty$

→ E', M_E sind abhängig von Spannungen!
 → Typische Werte: S34 oder S248 Skript 1

PLASTISCHE DEHNUNGEN 37-38

Verfestigung: Locker gelagerte Böden verfestigen sich, weil sich Körner mehr zusammenfügen
Entfestigung: Dicht gelagerte Böden benötigen zuerst eine Dilatanz um Körner aneinander vorbeizuschieben

ÖDOMETER 39-48

→ Schrittweise Belastung einer Bodenprobe mit Messung der Setzung. Aufgezeichneter Graph e zu σ wird logarithmiert und linearisiert → Konstanten ablesbar

Dabei charakterisiert die Porenzahl die Volumenänderung

Erstbelastung $C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_z}$ **Wiederbelastung** $C_s = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_z}$
 $e = e_N - C_c \log \sigma'_z = e_0 - C_c \log \frac{\sigma'_z}{\sigma'_0}$ $e = e_k - C_s \log \sigma'_z = e_B - C_s \log \frac{\sigma'_z}{\sigma'_B}$

Sekantenmodul: $M_E = \frac{(1+e_0)\Delta\sigma'_z}{C_c \log(\frac{\sigma'_z + \Delta\sigma'_z}{\sigma'_z})}$ **sekme** $(e_0, C, \Delta\sigma, \sigma)$
 $M'_E = \frac{(1+e_0)\Delta\sigma'_z}{C_s \log(\frac{\sigma'_z + \Delta\sigma'_z}{\sigma'_z})}$

e_0 bezieht sich auf in situ Wert vor der Belastung ($e_0 \neq e'_0$)

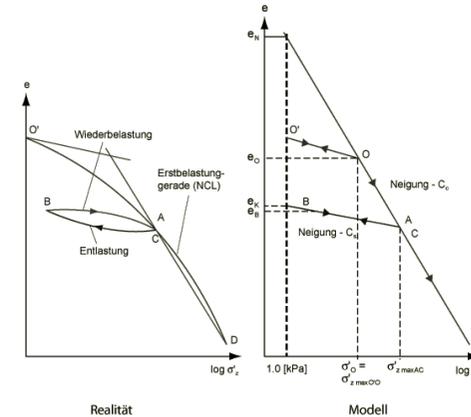
Tangentenmodul:
 $M_E = \frac{2.3(1+e_0)\sigma'_m}{C_c}$ $M'_E = \frac{2.3(1+e_0)\sigma'_m}{C_s}$

$e_0 = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d}$ $\Delta e = \frac{\Delta h(1+e_0)}{h_0} - 1$

Typische Werte:

	Sand	Silt	Ton
C_c	0.096-0.177	0.090-0.300	0.250-0.400
C_s	0.007-0.026	0.005-0.040	0.011-0.050

→ **Direkte Zustandsänderung** durch Verdichten/Vibrieren bei Sanden oder Kriechen bei Tonen (senkrecht in Diagramm)



Weiter kann die **Durchlässigkeit** bestimmt werden: $k = \frac{C_v \gamma_w}{M_E}$

KONSOLIDATIONSBEIWERTE 49-60..

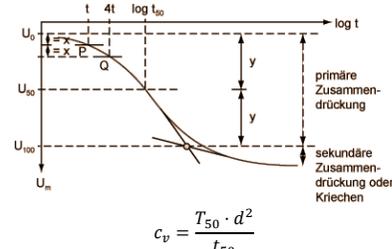
→ Mit Zeitlicher Verlauf einer Lastaufbringung des Ödometerversuches kann C_v bestimmt werden. (Nur bei Terzaghi konst)
 → Damit lassen sich Zeitabhängige Setzungen berechnen

$$c_v = \frac{k M_E}{\gamma_w} = \frac{T_v d^2}{t_v}$$

U_m Quantil der Primärsetzung, T_v Zeitfaktor

LOG-ZEIT-METHODE 49

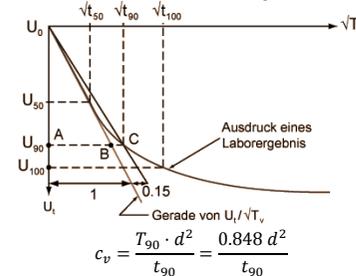
Über 50% Quantil mit Tangentenkonstruktion.



$T_{50} = 0.196$ für Ödometer
 $d = h/2$ für beidseitige Drainage

WURZEL-ZEITMETHODE 50

Über 90% Quantil mit Geradenannäherung



Beispielwerte für Tone auf Seite s52

SETZUNGSBERECHNUNG (60-)66-67

→ Nach Terzaghi

Konsolidationsgrad:

$$U_m = \frac{\text{Setzung}}{\text{Endsetzung}}$$

Zeitfaktor (Fall 1, sonst Graph s66):

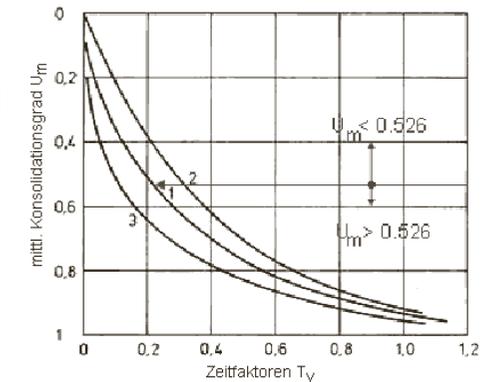
$$T_v \approx \frac{\pi}{4} \frac{U_m^2}{m} \quad T_v = -0.933 \log(1 - U_m) - 0.085$$

für $U_m < 0.526$
 $T_v < 0.217$

Zeit für bestimmte Setzung:

$$t_x = \frac{T_v d^2}{c_v} = T_v \cdot \frac{d^2 \gamma_w}{k M_E} \quad c_v [mm^2/min]$$

$d = h$ für Einseitige Drainage
 $d = h/2$ für beidseitige Drainage



ISOCHRONEN 59-65

Porenwasserüberdrücke werden von Drainageort abgebaut

→ Siehe Skript für Fall 1-3

Diagramme für Δu in Skript Seite 62-65

SEKUNDÄRE KOMPRESSION/KREICHEN 68

Bei jungen organischen Böden...

KRIECHBEIWER

$$c_\alpha = -\frac{\Delta e}{\Delta \log t}$$

FELDVERSUCHE 70-80

PLATTENDRUCKVERSUCH

→ wie Ödometerversuch, nur seitliche Ausweichung nicht Behindert. Häufig im Verkehrsbau für oberflächennahes Modul
 → Deformation kann zunehmen ohne Spannungszuwachs (Mechanischer Grundbruch)

WEITERE

- Pressiometerversuch (Bohrlochaufweitung)
- Dilatometer
- SBPMT (Selbstbohr Pressiometer)

MESSRESULTATE

C_c, C_s, M_E Verlässlich, C_v, k weniger

SCHERFESTIGKEIT 85

DEFINITION

→ Ist Dimensionierungsgrösse, maximale Scherspannung die aufgenommen werden kann ohne zu versagen.

Abhängig von:

- Drainage-Bedingungen, Dichte, Spannungsgeschichte, Kornzusammensetzung, Belastungsgeschichte.

REIBUNGSWINKEL

Effektiver Reibungswinkel φ'

- Locker, trocken oder gesättigt: $\beta = \varphi'$
- Gesättigt, vertikale Strömung: $\beta = \varphi'$
- Strömung parallel zu Böschung: $\beta = \varphi'/2$
- Horizontale Strömung: $\beta < \varphi'/2$

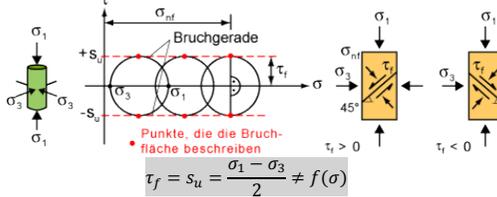
β : Böschungswinkel eines Haufens

KOHÄSION

Erhöht Stabilität, spannungsunabhängig: c'

- Effektive Kohäsion: Zementierung, Stabilisierung
- Scheinbare Kohäsion: teilges. Boden durch Kapillarwirkung Porenunterdrücke Entstehen (gefährlich, nach Regen weg)

TRESCA – UNDRAINIERT, FEINKÖRNIC 93-94



- Keine Änderung der Scherfestigkeit
- Effektive Spannungen bleiben konstant
- Totale Spannungen nehmen mit Porendruck zu
- Bruchfläche +/- 45° zur Ebene der Hauptspannung

UNDRAINIERTER SCHERFESTIGKEIT

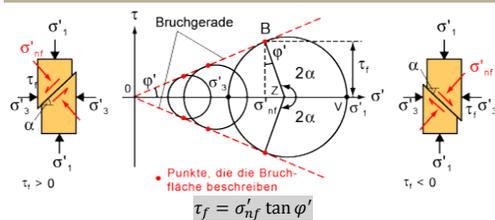
$s_{u, undr}$ undrainierte Scherfestigkeit

→ Je grösser der Wassergehalt w, desto kleiner $s_{u, undr}$

→ Je grösser I_p , desto kleiner $s_{u, undr}$

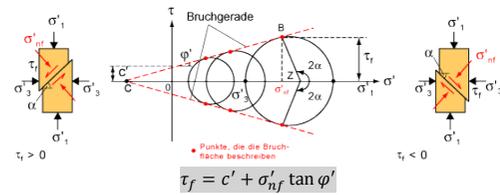
→ Abschätzung von $s_{u, undr}$: Seite 95

MOHR-COULOMB – DRAINIERT, GROBKÖRNIC 95



- Scherfestigkeit nimmt linear mit effektiven Spannungen zu
 - Effektive Spannungen nehmen mit Belastung zu
 - φ' ist Winkel der inneren Reibung
 - Bruchfläche $\alpha = \pm (45 + \frac{\varphi'}{2})^\circ$ zur Ebene Hauptspannung
- Ton wird kurzfristig mit Tresca, langfristig mit Coulomb beschrieben

MOHR-COULOMB MIT KOHÄSION 96



- Wie vorher, nur mit Kohäsion
 - Material hab bei $\sigma' = 0$ eine Zugfestigkeit
 - c' hat nicht die gleiche Bedeutung wie s_u
 - Bruchfläche $\alpha = \pm (45 + \frac{\varphi'}{2})^\circ$ zur Ebene Hauptspannung
- wenn c' vorhanden, kann der Boden die gleiche Scherspannung aufnehmen bei kleineren effektiven Normalspannungen (resp. höhere Scherspannung bei gleichen eff. Normalspannung)

SCHERFESTIGKEITEN 98-107

→ Abhängig von NC/OC, locker/dicht, Scherweg...

KRITISCHE SCHERFESTIGKEIT 98-99

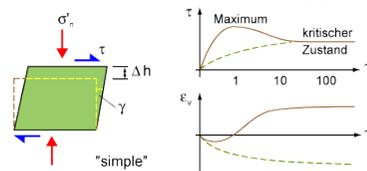
→ Maximaler Wert bei lockerem Boden (Normalkonsolidiert)

- Volumen bleibt konstant
- Reibungswinkel bei Mohr φ'_{cv}

MAXIMALE SCHERFESTIGKEIT 98-102

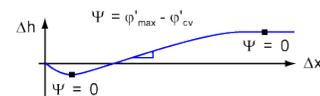
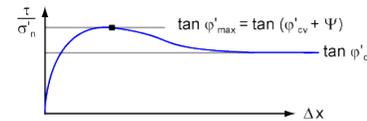
→ Bei dicht gepackten Böden ist die Scherfestigkeit im ersten Moment erhöht, da Körner sich aneinander vorbeibewegen müssen

- NC/locker: $\varphi'_{max} = \varphi'_{cv}$
gestrichelt Führt zu Volumenabnahme Boden verhält sich duktil (I_D klein)
- OC/dicht: $\varphi'_{max} > \varphi'_{cv}$
ausgezogen Führt zu Volumenzunahme, da keine Ebene Bruchfläche vorhanden → Körner müssen sich aneinander vorbeibewegen → Dilatanz Boden verhält sich dilatierend (I_D gross)



DILATANZ 99-102

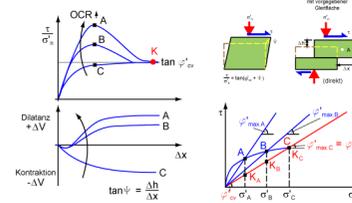
Dilatanzrate: $\tan \psi = \Delta h / \Delta x$
 $\psi = \varphi'_{max} - \varphi'_{cv}$



→ ψ entspricht Steigung des Dilatanzverlaufes

OCR 102

Je überkonsolidierter der Boden, desto grösser φ'_{max}



→ φ'_{cv} bleibt aber konstant

RESIDUALSCHERFESTIGKEIT 103-107

→ Bei Böden mit 30-50% Tonfraktion

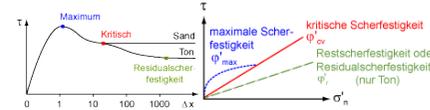
- Nach langen Dehnungswegen (dm): Glättung der Bruchfläche
- Scherfestigkeit nimmt ab, Reibungswinkel φ'_r
- Etwa halb so gross wie die kritische Scherfestigkeit
- Tabelle auf Seite 107

Sensitivität:

→ Empfindlichkeit, dass Boden unter Scherbeanspruchung die innere Struktur zusammenbricht

$S_t = s_{uu} / s_{ug}$

Vorbelastet etwa 1, normal bis empfindlich etwa 2-8



LABOR UND FELDVERSUCHE 108-128

LABOR

- Triaxialscherversuch: Bestimmung $c', \varphi', s_{u, undr}$ s108
- Direktscherversuch s111
- Ringschergerät: zwei Ringe mit eingebautem Boden rel zueinander scheren → Residualscherfestigkeit messen s113
- Fallkonusversuch s114

FELD

- Flügelsondierung: Sonde drehen s115
- Pocket Penetrometer s117
- In Situ Scherversuch s118
- Drucksondierung: s119
Messung des Spitzendrucks q_s und Mantelreibung f_s
 - Tiefenbezogenes Reibungsverhältnis $R_f = \frac{f_s}{q_s}$
 - Zusätzlich Möglichkeit Porenwasserdruck zu messen
- Relative Dichte D_r und undrainierte Scherfestigkeit $s_{u, undr}$ S.127

BÖSCHUNGSSTABILITÄT 133

URSACHEN FÜR BEWEGUNGEN 135-138

LANGZEITIGE, STANDSICHERHEITSMINDERNDE 135

- Änderung Neigung, Nutzung
- Geologie
- Entstehung (Gletscher ect...)
- Alte Rutschungen
- Tektonisch beanspruchte Flächen, Trennflächen
- Verwitterung
- Erosion
- Wasser durch Quellen, Karst, Porenwasserdrücke

KURZZEITIGE, BEWEGUNGS AUSLÖSENDE 136

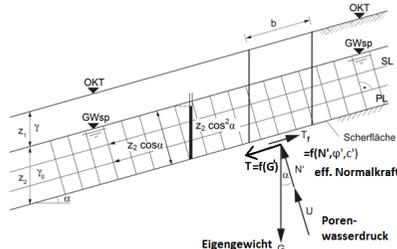
- Niederschlag, Schneeschmelze, Frost
- Defekte Wasserleitungen, Dachwasser
- Strömungsdruck
- Erdbeben, Sprengungen
- Belastungen durch Aufschüttungen, Bauwerke
- Änderung Böschungs-, Hanggeometrie, Nutzung

ABLAUF STABILITÄTSUNTERSUCHUNG 138-146

- Reduktion auf ebenes Problem
- Erfassen des geologischen Profils (Gleithorizonte, wie tektonische Störung oder verwitterte Schichten)
- Bestimmung Bodenparameter für Schichten: Dichte, Scherfestigkeit, drainiert/undrainiert
- Festlegen der hydrologischen Verhältnisse (Porenwasserdrücke, Strömungen, Äussere Kräfte einführen)
- Wahl Berechnungsverfahren (numerisch oder analytisch)
- Wahl Bruchfigur
- Durchführen der Berechnung
- Bewerten der Ergebnisse der Berechnung
- Erfassen der Bewegungsabläufe einer Rutschung

BERECHNUNG 146-159

UNENDLICHER HANG 146-148



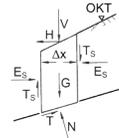
$$F_s = \frac{T_f(N', \varphi', c')}{T(G)} = \frac{\text{Rückhaltende Kräfte}}{\text{Treibende Kräfte}} \geq 1.3$$

$N' = N - U$

→ Wasser hat Einfluss auf Hangsicherheit (4 Fälle) s148-149

GLEITKREIS 150-159

- Annahme eines Gleitkreises, Aufteilen Boden in Lamellen
- Lamellenbreite 1/5 bis 1/10 des Radius oder nach Gelände
- Momenten-Gleichgewicht
- Horizontales Gleichgewicht
- Vertikales Gleichgewicht



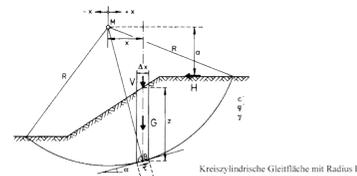
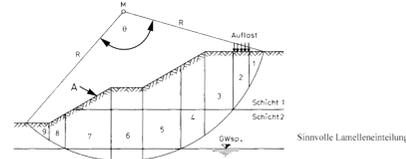
- E_s = Horizontalkomponente des Erddrucks
- G = Gewichtskraft der Bodenlamelle
- H = Horizontalkraft an der Oberfläche (OKT)
- N = Normalkraft an der Scherfläche (SF)
- T_s = Schubkraft an der Scherfläche (SF)
- V = Vertikalkomponente des Erddrucks
- V = Vertikalkraft der Oberfläche (OKT)

Allgemein gilt: $F_s = \frac{M_T(N', \varphi', c')}{M_G(G, V, H)} = \frac{\text{Rückhaltende Momente}}{\text{Treibende Momente}}$

→ Übersicht Methoden: s159

VERFAHREN NACH BISHOP 156-158

→ Gleichgewicht Momente und Horizontalkräfte (ohne T_s, E_s)



$$F_s = \frac{\sum [c' \Delta x + (G + V - u \Delta x) \tan \varphi'] \frac{1}{m_a}}{\sum [(G + V) \sin \alpha] + H \frac{a}{R}}$$

$$m_{a0} = 1, \quad m_a = \cos \alpha \left[1 + \frac{\tan \varphi' \tan \alpha}{F_s} \right]$$

→ Tabelle erstellen für Ausdrücke:

Nr	Schichthöhen	Δx	G_i	V	$U \Delta x$	α, φ'	$GV \sin$	$GV \tan$

VERFAHREN NACH JANBU 158

- Gleichgewicht Horizontal, Vertikalkräfte
- sehr analog Bishop

RESULTATE 159-160

- Abhängig von Daten und Kennwerten sowie Berechnungsmethode
- Relative Verbesserung anstatt Absolutwerte betrachten (Sensitivitäts-Analysen) (Dichte, Scherfest, drainiert)
- Frage nach Bewegungsablauf bei Versagen (schnell, langsam)
- Grundlage Beurteilung: Ring, Direktscherversuch (drainiert) oder Flügel, Konus (undrainiert) oder Triaxialversuche (zyklisch undrainiert)
- Verschiedene Bodentypen weisen Scherfestigkeitsabfall auf: Bentonite, Opalinuston, Seebodenlehm, Molassemergel (drainiert)

SETZUNGEN 165

DEFINITION 165-171

- Bestehen aus Sofortsetzungen (Kies, Sand)
- Konsolidationssetzungen (u , Silt, Ton) und Sekundären Effekten (Strukturveränderungen)
- $s = s_i + s_c + s_{\alpha}$

ANNAHMEN 169

- Boden ist elastisch
- homogen und isotrop
- kann Zugspannungen übertragen
- vor Belastung gewichtslos
- greift an Oberfläche an
- Als flexibles Fundament

SCHLAFFES/STARRES FUNDAMENT 171-173

Man unterscheidet zwischen Flach und Tiefenfundationen
Systemsteifigkeit Flachfundation:

$$K = \frac{E \cdot b d^3}{M_E \cdot b l^3}$$

Fundament **Steif falls:** $K \geq 0.1$ $E \approx 30'000 \text{ MPa}$

KENNZEICHNENDER PUNKT

→ Berechnung Allgemein als Schlanges Fundament

Setzungen sind für starres und schlanges Fundament im

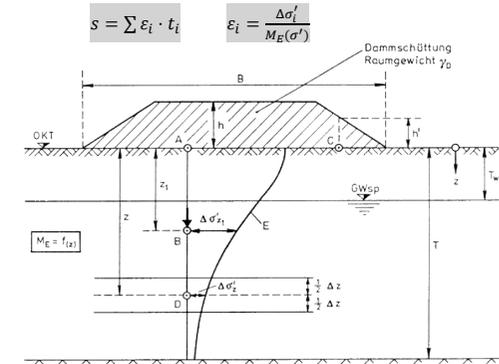
- Rechteckfundament: $0.74 \cdot b/2$
- Kreisfundament: $0.845 R$

→ So kann auf Setzungen bei steifen Fund. geschlossen werden

BERECHNUNG (1D) 174-180

VORGEHEN 175

- 1) Eruiere **Spannungsverteilung in Boden** (Skript 1 s184-199)
- 2) Unterteile Boden in geeignete Schichte (oben dünner)
- 3) Definieren der Bodenparameter
- 4) Berechne **Zusammendrücken** jeder Schicht aufgrund der mittleren Spannungszunahme durch Auflast
- 5) Summiere alle Setzungsinkremente auf

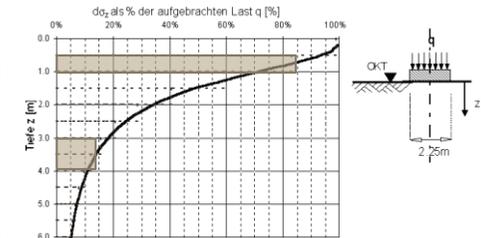


$\sigma' = \gamma \cdot z_m$ Eigengewicht Boden bis Schichtmitte
 $\Delta \sigma'$ Auflast als Funktion der Tiefe (Literatur)
→ Diese Werte in Formel für M_E' einsetzen

TIEFENWIRKUNG

Setzungen bis 5-10% Wirkung der Auflast berechnen

- Faustregeln: Rechteckfundament: s188 unten
- Kreisfundament: $2 - 2.5 \cdot D$



(Schlanges Kreisfundamente $D = 2.25 \text{ m}$)

Spannungen am Ecken Rechteck: $dsz(q, a, b, z)$

ZUSAMMENDRÜCKUNGSMODUL (1D) 177-180

→ Verschiedene Modelle

- M_E' konstant über Tiefe (zB 5MPa)
- Mittels Ödometerversuch und bekannte Formeln ($C_s \approx 0.03$)
- Lineare Funktion (zB $4.5 + z \text{ MPa}$)
- Siehe auch Skript S179

BEISPIELE 184-189

- Plastische Zone S184
- Big Ben: FEM ↔ Elastisch S185
- Computer, 1D S187
- Fundamentgeometrie S188
- Gebrauchstauglichkeit, Weiche Schichten S189

SETZUNGSBEGRENZUNG 190-198

→ Beispiel mit Wasserhaltung, Aushub s191-192

GEWICHTSAUSGLEICH 193-194

→ Auftrieb und Eigengewicht Gebäude sind gleich Schwer wie Aushub

$$G - [(\gamma t_u + \gamma' t_g) b l + A] \stackrel{!}{=} 0$$

VORBELASTUNG 195-195

→ Vorgängige Setzungen erzeugen bevor Bauwerk gebaut wird
→ Interessant sind Setzungen und Zeitdauer

ÜBERBELASTUNG 196-198

→ Überbelastung des Bodens/Bauwerks
→ Setzung wird beschleunigt.

- Überhöhter Damm
- Tiefgarage Fluten

KÜNSTLICHE VERDICHTUNGEN 199

DEFINITION 199-200

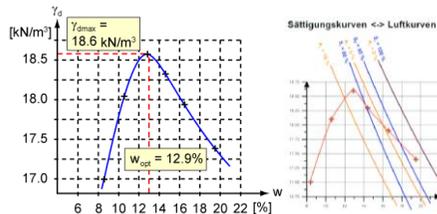
→ Prozess, welcher Raumgewicht/Dichte erhöht und gleichzeitiger Abnahme des Luftvolumens. Wassergehalt verändert sich.

ZIEL DER VERDICHTUNG 200

Erhöhung der Scherfestigkeit, Tragfähigkeit und Steifigkeit, Reduktion von Setzungen, verringern des Luftporengehaltes und Durchlässigkeit, Reduktion der Gefahr von Frostschäden

PROCTORVERSUCH 201-

→ Versuch: Boden mit verschiedenen Wassergehalt wird verdichtet und so Trockenraumgewicht bestimmt → Kurve



→ Maximales Trockenraumgewicht stellt sich bei **optimalem Wassergehalt** ein (für eine **gegebene Verdichtungsarbeit**)

SÄTTIGUNGSZAHL UND LUFTPORENGEHALT 203-204

Dazu können Sättigungs- oder Luftporenlilien gezeichnet werden ($A_L = 0 \Leftrightarrow S_r = 1$)

Linien sind nicht gleich skaliert, A_L ist weniger sensitiv → Beziehungen Seite 203 Skript

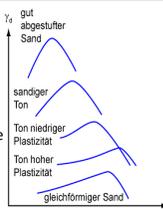
ZUSAMMENHANG PARAMETER 205-206

Verdichtungsarbeit, w_{opt} und $\gamma_{d,max}$ sind voneinander abhängig

Höhere Verdichtungsarbeit: Erhöht max Trockenraumgewicht
Verkleinert opt. Wassergehalt
Luftporengehalt bleibt etwa konst.

EINFLUSS BODENART 206-207

- Gut abgestufte körnige Böden können besser verdichtet werden als einheitliche oder siltige Böden
- Höherer Feinanteil oder Plastizität führt zu flacherer Kurve, unempfindlicher gegen Wasser, tieferes Trockenraumgewicht
- Tone: gesättigte Tone haben hohe undrained Scherfestigkeit bei kleinem Wassergehalt; nur schwer zu verdichten; je höher der w desto weicher und schwächer Tonstücke und umso einfacher Verdichtung
- Grobkörnige Böden: je grösser w , desto kleiner Saugkräfte an Kontaktstellen der Körner → einfachere Verdichtung



ÜBERKORNANTEIL 207

→ Verfälschung bei versuch durch Fehlende Grosskörner

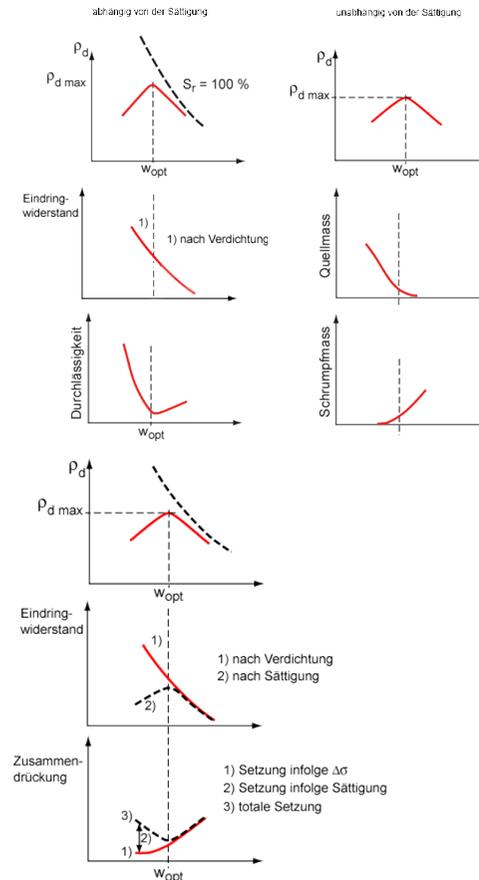
$$\gamma_{dN} \approx \gamma_{dV}(1-p) + 0.9\gamma_s p, \quad w_{optN} \approx w_{optV}(1-p)$$

p Überkornanteil, grösser als 8mm

MOISTURE CONDITION VALUE MCV 210

Fallversucht mit Messung der Einschlagsänderungstiefe
→ Siehe Seite 210

EIGENSCHAFTEN VERDICHTETER BÖDEN 211-213



Tendenzen und Eigenschaften vom Wassergehalt beim Verdichten

SÄTTIGUNGSSCHOCK 211, 213

Wenn Wassergehalt unter Optimum: Bei Regen kann es zum Sättigungsschock kommen → Setzungen und Veränderung der Bodenparameter. Bei w_{opt} bleibt Boden auch bei Regen stabil

WEITERE FORMELN

$$\gamma_d = \frac{1}{\frac{w}{S_r \gamma_w} + \frac{1}{\gamma_s}} = \frac{\gamma_s}{1 + w \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_w}} (1 + A_L)$$

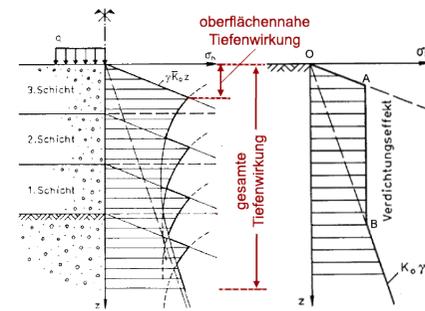
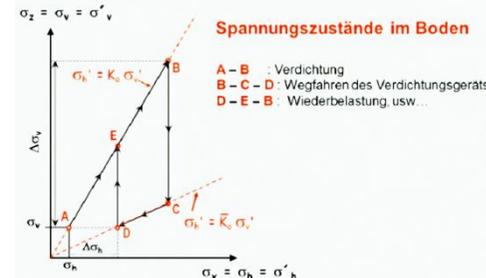
$$S_R = \frac{w}{\frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{\gamma_w}{\gamma_s}} = 1 - \frac{A_L(1+e)}{e}$$

$$A_L = \frac{e(1-S_r)}{1+e}$$

HORIZONTALE SPANNUNGEN 214-218

→ Durch Verdichten nehmen auch horizontale Spannungen zu. Gerade hinter Stützmauer ist Vorsicht geboten, da Spannungen nicht durch Verformungen abgebaut werden können.

Auswirkung der Verdichtung: horizontale Spannungen



$$K_0(NC) = 1 - \sin \phi'$$

Häufige Annahme:

$$\bar{K}_0 = \frac{1}{K_0(NC)} > K_0(NC)$$

Geraden OA und OB durch $\gamma \bar{K}_0 z$ resp $\gamma K_0 z$ gegeben

VERDICHTUNGSGERÄTE 219-221

→ Selbsterklärend

ANFORDERUNGEN 221-223

SPEZIFIKATION DES ERGEBNISSES

Für vorhersehbare Bedingungen, angestrebter Wassergehalt und Trockenraumgewicht mit Toleranz wird angegeben

METHODISCHE SPEZIFIKATION

Angabe von Gerät, Schichtstärke ect.
Geignet für wechselhafte und nasse Bedingungen

DIVERSES

LINKS TYPISCHE WERTE

Jenste Bodenparameter:	Skript 1, s248,249
Poissonzahl:	Skript 2, s182
Tiefenwirkungen:	Skript 1, s184-199
Feldklassierung grobkörnig:	Skript 1, s47-53
Feldklassierung feinkörnig:	Skript 1, s54-58

PRÜFUNG SOMMER 2012

Kurze Info zu unserer Prüfung:

1. TEIL 40MIN, OHNE UNTERLAGEN

→ 6 Aufgaben, viele Formeln auswendig! Wenig zu Baugrunduntersuchungen, Zeit reicht gerade

- Phasen im Boden zeichnen (Bild das auch in ZF ist) inkl. Beziehungen Volumen, Gewicht, Poren. Dazu Formeln für e , n , w , Plastizität
- Proctorversuch beschreiben und Multiple-Choice darüber
- Kornverteilungsdiagramm Grenzen eintragen, Vorgehen wie diese Kurve erstellen beschreiben
- Aktiver, Passiver Erddruck beschreiben, Graphen dazu zeichnen und erklären
- Grundwasser Formeln für Schichtkombinationen aufschreiben (seriell, parallel), noch Multiple-Choice und sagen, was konstant ist bei welchem Fall
- Irgendein Multiple Choice und 2-3 einfache Antworten

2. TEIL 80MIN, MIT UNTERLAGEN

→ 5 Aufgaben, sehr unterschiedlich schwierig und lange, Annahmen relativ frei (Anz Schichten ect), Zeit reicht nicht, soll auch nicht reichen, da nicht alle Punkte nötig sind...

- Grundwasserabsenkung, berechnen ob genügend Tief abgesenkt, und Absenkung an weiter entferntem Punkt berechnen. Einfach.
- Bodenklassierung anhand Werte und Kornverteilung
- Vorbelastung mit Damm, Setzungen berechnen, Zeitdauer Vorbelastung, Verbesserungsvorschläge (Bohrungen mit Materialersatz...)
- Setzungen unter Gebäude anhand Tabelle berechnen (Sekantenmodul, ect...)
- Ödometerversuch, Mohrscher Kreis (mit Kohäsion). Winkel, Bruchfläche bestimmen, etwas unklar.