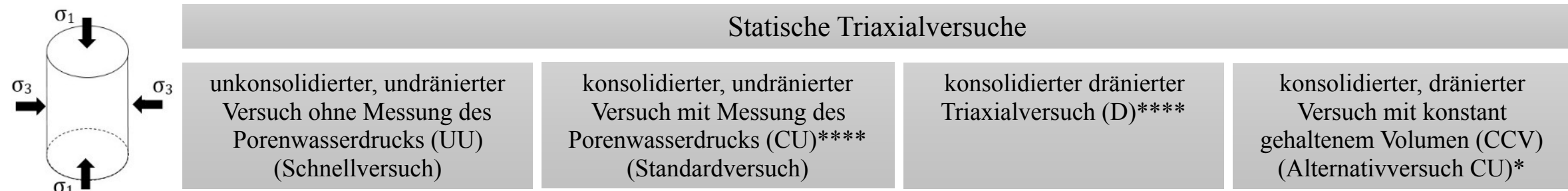


Triaxialversuche

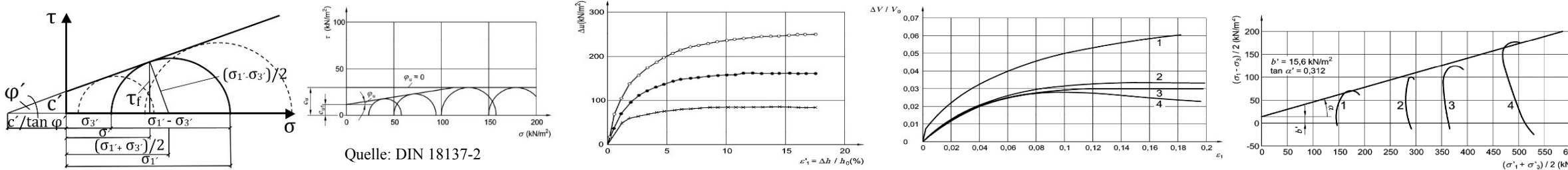


Statische Triaxialversuche				
	unkonsolidierter, undräierter Versuch ohne Messung des Porenwasserdrucks (UU) (Schnellversuch)	konsolidierter, undräierter Versuch mit Messung des Porenwasserdrucks (CU)**** (Standardversuch)	konsolidierter dräierter Triaxialversuch (D)****	konsolidierter, dräierter Versuch mit konstant gehaltenem Volumen (CCV) (Alternativversuch CU)*
Anwendung	-bindige Böden -während/direkt nach Baumaßnahme -liefert Anfangsstandfestigkeit	-(gesättigte) bindige und nichtbindige Böden** -normal oder überkonsolidiert möglich	-(gesättigte) bindige und nichtbindige Böden** -Langzeit-Belastungswirkung	-(gesättigte) bindige und nichtbindige Böden** -halb feste bindige Böden mit unzureichender Sättigung (B-Test)
Zeitaufwand	gering (h)	mittel (d)	hoch (d-w)	mittel (d)
Probenanzahl***	3	3	3	3
Scherparameter [Resultat]	Totale Spannungen (ϕ, c) [undräierte Scherfestigkeit c_u]	Effektive Spannungen (ϕ', c') [Zunahme Porenwasserdruck]	Effektive Spannungen (ϕ', c') [Volumenänderung]	Effektive Spannungen (ϕ', c') [Zunahme Porenwasserdruck]

*DIN 18137-1: 4.42.3 ANMERKUNG 2: effektive Spannungspfade von CU- und CCV-Versuch stimmen bei gleicher Konsolidation überein (Sättigungsgrad zu niedrig: CCV-Test).
 **für die Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens teilgesättigter Böden sind sowohl die Saugmessung (Triaxialversuch), als auch Materialparameter (K0-Test) notwendig; siehe auch genauere Messverfahren: teilgesättigte Böden.
 ***DIN 18137-1: 4.37.2.1 ANMERKUNG 3: nichtbindige Böden (=kohäsionslos): Gerade der Umhüllenden verläuft durch Ursprung des Spannungsdiagrammes nach Mohr-Coulomb. Nur 2 Probekörper nötig für die Ermittlung von Scherparametern.
 ****DIN ISO/TS 17892-9 (Januar 2005): Konsolidation kann isotrop oder anisotrop erfolgen. Daraus ergibt sich eine neue Nomenklatur: CIU-, CAU-, CID- und CAD-Versuch.

Ventile	-Porenwasser geschlossen -Dränage geschlossen (Wasser kann sich der äußeren Belastung nicht entziehen)	-Dränage während der Konsolidation offen -Dränage während Abschervvorgang geschlossen	-Dränage ständig geöffnet	-Dränage geschlossen -Messung Porenwasserdruck -Regelung Zellentdruck (σ_3): konstanter Porenwasserdruck
Sättigungsvorgang*	-	+	+	+
Kontrolle Dichtheit	-	+	+(alternativ)	+
B-Test**	-	+	+	+
Messwerte***	$t, \Delta h, P, \sigma_3$	$t, \Delta h, P, \sigma_3, u$	$t, \Delta h, P, \sigma_3, \Delta V$	$t, \Delta h, P, \sigma_3, u$

*abhängig von Testverfahren (offene oder geschlossene Dränage), Schwellfähigkeit und Konsolidationsgrad der Probe, sowie Zeitpunkt der Sättigung (vor oder nach Konsolidation).
 **DIN 18137-2: Wenn eine ausreichende Wassersättigung durch die ausführbaren Sättigungsdrücke nicht zu erreichen ist, was vor allem bei halbfesten bindigen Böden vorkommt, ist der CCV-Versuch dem CU-Versuch vorzuziehen.
 ***Zusätzlich zu dokumentieren nach DIN 18137-2: Zeit t , Zusammendrückung Δh , Stempelkraft P , Zellentdruck σ_3 , Porenwasserdruck u , ausgepresstes Volumen ΔV ; Zeitintervalle so wählen das 15 Ableseungen bis zum Bruch erfolgen; nach dem Versuch Masse der feuchten Probe auf 0,5%o wiegen und Feuchtegehalt bestimmen. Neben der Kolbenstangenkorrektur für Stempelkraft P und einer Korrektur für die Stempelgeometrie (Zelldruck wirkt auf Stempel axial), sind nach DIN ISO/TS 17892-8 und -9 ebenfalls Korrekturen für Membran (Gummihülle) und Filterstein vorzunehmen.



Auswertung*	UU	CU	D	CCV
rechnerisch	-Querschnittsfläche $A=(V_0)/(h_0-\Delta h)=A_0/(1-\epsilon_1)$ -Deviatorspannung $\sigma_1-\sigma_3=(P-P_0)/A$ -totale Scherparameter (ϕ_u, c_u)	-Querschnittsfläche $A=(V_0)/(h_0-\Delta h)=A_0/(1-\epsilon_1)$ -effektive Axialspannung $\sigma_1'=(P-P_0)/A+\sigma_3-u_0$ -effektive Scherparameter (ϕ', c')	-mittlere Querschnittsfläche Probekörper $A=(V_0-\Delta V)/(h_0-\Delta h)$ -effektive Axialspannung $\sigma_1'=(P-P_0)/A+\sigma_3-u_0$ -effektive Scherparameter (ϕ', c')	Siehe CU-Versuch
grafisch	-($\sigma_1-\sigma_3$)/2, ϵ_1 -Diagramm - τ, σ -Diagramm (Spannungskreise der totalen Hauptspannungen mit größter Deviatorspannung $\sigma_1-\sigma_3$)	-($\sigma_1-\sigma_3$)/2 (bei normalkonsolidierten Proben) σ_1'/σ_3' , ϵ_1 -Diagramm - $\Delta u, \epsilon_1$ -Diagramm ($\Delta u = u-u_0$) -($\sigma_1-\sigma_3$)/2, ($\sigma_1'-\sigma_3'$)/2-Diagramm	-($\sigma_1-\sigma_3$)/2, ϵ_1 -Diagramm - $\Delta V/V_0, \epsilon_1$ -Diagramm -($\sigma_1-\sigma_3$)/2, ($\sigma_1'-\sigma_3'$)/2-Diagramm -effektive Scherparameter (ϕ', c')	Siehe CU-Versuch (σ_3' anstelle Δu)

*Allgemeine Angaben: Bodenart nach DIN EN ISO 14688-1 und Bodengruppe nach DIN 18196; Güteklasse der Probe nach DIN EN 1997-2; Prüfkörpermaße, Anfangs- und Endwassergehalt, Anfangsdichte, Korndichte und Porenzahl; Versuchsordnung und Versuchsart; Angaben über Konsolidation; Methode der Sättigung und Sättigungsdruck; Vorschubgeschwindigkeit.



Dynamische Triaxialversuche*				
	CU-Versuch E-Module und Dämpfungskoeffizient D	CU-Versuch Zyklischer Belastungswiderstand	CD-Versuch	CW-Versuch**
Hintergrund	-undräiert, konsolidiert -Probenentnahme, Systemvorbereitung, Sättigung, Konsolidation wie ST	- undräierter, konsolidierter Versuch zur Ermittlung der Scherparameter	- konsolidierter, dräierter Versuch	-Versuch bei konstantem Wassergehalt und dräierter Porenluft
Durchführung	-axiale Belastung erhöhen (steigert Dämpfungskoeffizienten) -Porendruck Messung erfolgt	-Probe bis Bruch belasten (Porendruckdifferenz konstant 1,0 oder 20% Verformung) -Porendruckmessung erfolgt	- siehe statischer Triaxialversuch	-Entwässern und Konsolidation*** -Normalspannung steigern -Porendruck messen
Ergebnis	- Dämpfungskoeffizient D, E-Modul, Schermodul G, Scherdehnung γ	- Proben mit verschiedenen zyklischen Belastungsraten in Kraft-Kurven gegeneinander auftragen	- Scherparameter	- vorerst steigt Saugspannung und somit Scherfestigkeit, später Schwellverhalten und Dehnungsentfestigung

*zyklisch ≤ 5 Hz \leq dynamisch, ein typischer Bereich für triaxiale Versuche liegt bei 0,1 bis 2 Hz
 **TOYOTA ET AL. 2001: In diesem Versuch wurde festgestellt, dass die Scherfestigkeit und Verformungsbedingung unabhängig von der Dränagebedingung sind.
 ***BECKER 2012: Entwässert konsolidierte Proben verzeichnen bei Steigerung der Normalspannung eine stärkere Abnahme von Scherfestigkeit und von Scherverformung abhängiger Saugspannung als konsolidiert entwässerte Proben.

Individuelle Frequenzen

Es gibt **einfache** (Schwellversuche, Maschinen) und **komplexe** (Wechselversuche, alternierend, Erdbeben) Frequenzen. Herkömmliche Triax-Anlagen können meist nur einfache Frequenzen durchführen. Praktisch existieren harmonische, periodische, transiente und impulsartige dynamische Belastungen, welche aber idealisiert als harmonische angenommen werden.

Einwirkungsart	Hz	Lastamplitude
Erdbeben	>1	groß
Zugverkehr	1..3	klein
Wellen, Winde	0.1..1	klein, groß
Dynamische Intensivverdichtung	<0.1	sehr groß
Vibrationsverdichtung	>50	klein

variierende Parameter	Wertebereich	gesuchte Größen
Anfangsporenzahl e_0	0.50..0.62	Kompressionsmodul K
Spannungszahl I_s	30..3000kPa	Schubmodul G
Anfangs sättigungsgrad S_{a0}	82..100%	Grenzzustände
Lastamplitude $\Delta\sigma_{max}$	50..600kPa	Saugspannung $-u_w$
Zykluszahl N	2..2000	

Quelle: LESNY & REICHWEIN 2004

Quelle: BECKER 2012

Allgemeiner Ablauf

1. System vorbereiten
2. Sättigung
3. Konsolidation
4. Abscheren

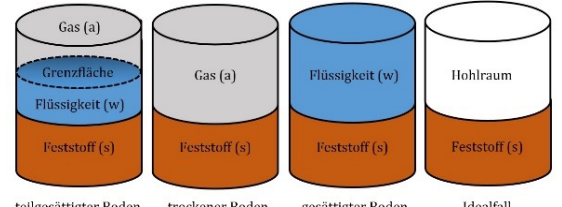


Prüfpresse und Druckzelle

Vorgeschaltete Tests/Zwischentests/Kontrollen

	Dichtheitsprüfung	B-Test	K0-Test
Zweck	Dichtheit Druckzelle	Kontrolle Sättigungsvorgang**	teilgesättigte Proben (vgl. Oedometerversuch)
Zeitpunkt	nach Sättigung	nach Sättigung	vor Triaxialversuch
Ergebnis	Dichtheit Gummihülle* und Porenwasserdrucksystem	Wassersättigungsgrad Probe	Materialparameter für teilgesättigte Böden
Durchführung	- Dränage nach Sättigung schließen - Kontrolle ob Porenwasserdruckanzeige konstant bleibt	- Dränagekanäle schließen, - u messen - Zelldruck erhöhen ($\Delta\sigma$) - u nimmt dadurch zu (Δu) - Dauer ca. 2 min	-Konsolidation -Dränage öffnen - σ_1 in sinnvollen Stufen erhöhen, radiale Dehnungsmessung passt Zelldruck an -Ziel: keine Radialdehnung (=eindimensionale Konsolidation, ohne Wandreibung)
Auswertung	- Anstieg: undichte Gummihülle - Abnahme: undichtes Porenwasserdrucksystem (außerhalb Druckzelle)	- B-Wert = $\Delta u/\Delta\sigma \geq 0,95$ für weiche bis steife bindige und nichtbindige Böden ist, oder $\geq 0,90$ für hoch überkonsolidierte, halbfeste bindige Böden ist.	Last-Setzungs-Parameter

*DIN 18137-2: D-Versuch: Dichtheit Gummihülle darf anhand Standrohr kontrolliert werden.
 **DIN 18137-2: Bei halbfesten feinkörnigen Böden sollte immer eine Prüfung der Wassersättigung erfolgen, da hier eventuell die Sättigungsdrücke nach Tabelle 3 nicht ausreichen.



teilgesättigter Boden, trockener Boden, gesättigter Boden, Idealfall

		teilgesättigte Böden	Messung lokalen Porenwasserdrucks	Bender-Element Test	Messung lokaler Verformungen	Vorbelastete Proben	Resonant-Column-Test (Resonanzsäule)	3-fach gekoppelte Systeme	Be- und Entwässerung
Hintergrund	Probleme (notwendiges Vorgehen): A) Zuführung von Druck auf Luftporen B) Messung der Volumenänderung: nach Sättigung erfolgt Entsättigung durch Erhöhung der Saugwirkung der Matrix. Somit sind herkömmliche Messungen ungenau, da Luftporen sehr kompressibel sind.	Da Porenwasserdruck u nur am Kopf/Fuß oder außerhalb der Druckzelle gemessen wird, sind Ergebnisse nicht für die Scherzone repräsentativ.	Abschätzung des maximalen Schermoduls durch Induktion und Messung von Spannungen in Form von P- und S-Wellen (Primär- bzw. Sekundärwellen) m. H. paarweise horizontal und vertikal in Probe eingebrachte Bender-Elemente.	Verformung wird global gemessen und ist durch Kopf- bzw. Fußplatte eingeschränkt. Somit ist nur das mittlere 1/3 der Probe repräsentativ.	Proben die in der Vergangenheit einer Belastung ausgesetzt waren, die größer war als die Belastung zum Zeitpunkt der Probenentnahme können durch sog. Überkonsolidierung modellhaft wieder in diesen Zustand versetzt werden.	Zur Ermittlung von Materialdämpfung und dynamischem Deformationsmodul. Während dynamische Triaxialversuche eher für niedrige Frequenzen und hohe Axialdehnungsamplituden geeignet sind, ist es beim RC-Test genau umgekehrt.	Herkömmliche Triaxialgeräte untersuchen den Boden auf mechanisch-hydraulische Eigenschaften. Eine zusätzliche thermische Komponente könnte Temperatureinflüsse auf den Boden mit analysieren (radioaktives Material).	Eine Modifikation des Triax-Versuchsstandes zur Messung und Durchführung von Be- und Entwässerungsvorgängen unter definierten Spannungszuständen würde zu genaueren Ergebnissen führen.	
zusätzliche Geräte	*	Porendruckmessgerät für Mittelebene	Bender-Elemente	Bender-Elemente, Hall Sensor	-	RC-Gerät	Temperaturmessung	zusätzlicher Druckregler (z.B. Burette)	

*A) regulierte Druckluftzufuhr oder Gerät zur Kontrolle inneren Porenluftdrucks bzw. Volumens. B) Luftporendruck/Volumen Kontrolle C) Luftporendruck/Volumen-Kontrolle, intrazellulärer Niederfrequenz-Differentialdruckumwandler, Doppelverglaste Triaxialzelle, lokale radiale und axiale Belastungs(um)wandler.