Aalborg Universitet

Silts egenskaber og styrkeparametre undersøgt ved konsoliderede drænede triaxialforsøg og CPT

Kandidatafhandling

af

Maria Krogh Mortensen

December 2014

Department of Civil Engineering

School of Engineering and Science

Byggeri og Anlæg

Projektets titel:

Silts egenskaber og styrkeparametre undersøgt ved konsoliderede drænede triaxialforsøg og CPT

Projekts periode:

September 2013 – December 2014 (inklusiv barsel)

Studerede:

_____

Maria Krogh Mortensen

Vejleder:

Benjaminn Nordahl Nielsen

Liste over artikler:

M. K. Mortensen. (2014). ”Undersøgelser for fastlæggelse af silts opførsel og styrkeparametre”. Department of Civil Engineering, Aalborg University.

M. K. Mortensen. (2014). ”Undersøgelse af Dronninglund silts egenskaber og styrkeparametre ved triaxialforsøg”. Department of Civil Engineering, Aalborg University.

M. K. Mortensen. (2014). ”Tolkning af friktionsvinklen ved CPT i Dronninglund silt og friktionsvinklen for Dronninglund silt fundet ved triaxialforsøg”. Department of Civil Engineering, Aalborg University.

Antal sider:

43

Appendiks, sider:

88

Forord

Ved dette speciale ”Silts egenskaber og styrkeparametre undersøgt ved triaxialforsøg og CPT” opnås der 45 ECTS og det er udført ved Department of Civil Engineering, Aalborg Universitet under den geotekniske forsknings gruppe.

Specialet består af fire dele.
Første del er en introduktion til projektet, problemstilling og problemformulering.
Anden del består af tre artikler. Den første artikel er et litteraturstudie, hvor det er undersøgt hvilke tidligere undersøgelser og triaxialforsøg, der er lavet med silt. Den anden artikel omhandler beskrivelse og behandling af de triaxialforsøg og klassificeringforsøg, der er udført i dette projekt. Den tredje artikel omhandler tolkning af friktionsvinklen ud fra CPT forsøg sammenlignet med friktionsvinklen fundet ved triaxialforsøg.
Tredje del er en konklusion og perspektivering.
Fjerde del er appendiks hvor data fra forsøg, beregninger og tolkninger af data kan findes. Endvidere findes der også en udførelsesmanual for triaxialforsøgene, der er udført på Dronninglund silten.

I rapporten og artiklerne vil der forekomme kildehenvisninger. I teksten er kildehenvisningen vist ved (navn, år) eller navn (år). I slutningen rapporten og i hver artikel findes en detaljeret liste over de anvendte kilder.

Indholdsfortegnelse

DEL I: Introduktion 6
Introduktion 7
Problemstilling: 7
Problemformulering: 7
DEL II: Artikler 9
DEL IV: Konklusion 10
Konklusion 11
Perspektivering 12
Litteraturliste 13
DEL V: Appendiks 14
A.1: Boreprofiler 15
A.2: Manual for udførelse af konsoliderede drænede, CD, triaxialforsøg på silt. 16
A.3: Dronninglund silt 17
A.3.1 Den relative densitet 17
A.3.2 Rumvægt 17
A.4 Hydrometer- og sigteanalyse 18
A.4.1 Forsøg nr. 130801 18
A.4.2 Forsøg nr. 130802 20
A.4.3 Forsøg nr. 130803 22
A.4.4 Forsøg nr. 130807 24
A.4.5 Forsøg nr. 130808 26
A.4.6 Forsøg nr. 130809 28
A.4.7 Forsøg nr. 130810 30
A.4.8 Forsøg nr. 130811 32
A.5 Bestemmelse af den relative lejringstæthed 34
A.6 CPT Forsøg 36
A.6.1 Teori og Beregninger 36
A.6.2 CPTs2a2 39
A.6.3 CPTs2b4 41
A.6.4 CPTs2c2 43
A.6.5 Vurdering af prøver til triaxialforsøg 45
A.7 Konsolideringsforsøg 46
A.7.1 Intaktprøve 70, boring S2B2 46

A.7.2 Intaktprøve 59, boring S4B2 48
A.7.3 Intaktprøve 68, boring S2B2 49
A.7.4 Intaktprøve 71, boring S2B2 50
A.8 Resultater fra drænede triaxialforsøg 51
A.8.1 Beregninger og tolkning af triaxialforsøg 51
A.8.2 Beregninger og beskrivelse af Handys metode til bestemmelse af φ og c' 54
A.8.3 Forsøgsprocedure 55
A.8.4 Oversigt over udførte forsøg 56
A.8.5 Forsøg nr. 130801 57
A.8.6 Forsøg nr. 130802 59
A.8.7 Forsøg nr. 130803 61
A.8.8 Forsøg nr. 130807 63
A.8.9 Forsøg nr. 130808 65
A.8.10 Forsøg nr. 130809 67
A.8.11 Forsøg nr. 130810 69
A.8.12 Forsøg nr. 130811 71
A.9 Undersøgelse af sammenhæng mellem friktionsvinkel og lejringstæthed. 73
A.10 Undersøgelsel af skønsformel for friktionsvinkel 74

DEL I:

Introduktion

Introduktion

I den danske geologi træffes der ofte silt. Silt er defineret som havende en kornstørrelse mellem 0,063 mm og 0,002 mm, men den træffes sjældent i ren tilstand. Dette gør det vanskeligt, at klassificere silt og projektere konstruktioner i silt.

I geoteknisk litteratur nævnes silt og dets egenskaber i begrænset omfang eller slet ikke, dette skyldes, at kendskabet og forskning om silt er begrænset. Idet der kun er indsamlet beskedent data om silt, er det yderst vanskeligt at fastsætte styrkeparametre for silt.
Det kan stilles tvivls spørgsmål ved, hvordan silt opfører sig under forskydning. I Danmark er det almindelig praksis at antage, at silten opfører sig som sand i drænet tilstand og som ler i udrænet tilstand.

Problemstilling:

Ved byggeprojekter i Danmark træffes der ofte silt eller siltlag. Der er endnu ikke et bredt kendskab til siltens egenskaber og dermed heller ikke til dens styrkeparametre. I designsituationer, hvor der skal fastlægges styrkeparametre for silt, er der tradition for, at friktionsvinklen bliver fastsat som lers, og kohæsion c' som sands, som vist i Tabel 1. Dette formodes at være konservativt i nogle tilfælde.

Tabel 1: Typiske styrkeparametre på silt

Jordart	γ [kN/m^3]	γ' [kN/m^3]	Drænet		Udrænet	
			φ'_k [°]	c'_k [kN/m^2]	φ_k [°]	c_{uk} [kN/m^2]
Silt	19	9	30	0	0	*

** Udrænet forskydningsstyrke fastsættes ud fra eks. vingeforsøg.*

Problemformulering:

Der undersøges silt fra Dronninglund, der betegnes Dronninglund silt.

Der udføres og tolkes konsoliderede drænede, CD, triaxialforsøg for at undersøge silts opførsel og styrkeparametre. Det ønskes undersøgt, om det er muligt, at øge de oftest fastsatte drænede styrkeparametre for silt, som vist i Tabel 1.
For udførelsen af triaxialforsøg på silt forefindes der ingen standard, og derfor udarbejdes der en manual for udførelse af triaxialforsøg på silt. Der udføres forsøg på intaktprøver. Ved udførelse af triaxialforsøgene ligges der særligt vægt på tildannelse af prøven, således en så intakt prøve som muligt anvendes.
Siltprøverne klassificeres efterfølgende ved sigte- og hydrometeranalyse for at fastlægge kornkurven for alle de testede prøver.
Det formodes, at siltens opførsel og styrke er afhængig af spændingstilstanden og den relative lejringstæthed. Derfor findes den relative lejringstæthed for de testede siltprøver ved efterfølgende udførelse af forsøg med løseste og fasteste lejring.

Der foreligger CPT på Dronninglund silten udført ved forskellige nedtrængningshastigheder. I dette speciale fokuseres der på standard nedtrængningshastigheden 20 mm/s±5. Styrkeparametrene tolkes fra CPT forsøgene med teorierne Schmertmann og Sennest. Styrkeparametrene tolket fra triaxialforsøgene sammenlignes med de styrkeparametre der kan tolkes fra CPT, for at undersøge hvorledes CPT kan tolkes i

silt. De styrkeparametre der tolkes ved triaxialforsøgene må give det mest pålidelige resultat for styrkeparametrene. Derved antages styrkeparametrene fra triaxialforsøgene at kunne danne grundlag for dem, der tolkes fra CPT forsøg.
Nedtrængningshastigheden for CPT har betydning for, om silten er i drænet eller udrænet tilstand, det er ved tidligere studier vist, at en standard nedtrængningshastighed resulterer i en delvist udrænet tilstand. I dette speciale fokuseres der på standard nedtrængningshastigheden, og det diskuteres hvilken betydning dette har for sammenligning af CPT med de udførte drænede triaxialforsøg.

DEL II:

Artikler

Undersøgelser for fastlæggelse af silts opførsel og styrkeparametre

Maria Krogh Mortensen[1]

Department of Civil Engineering, Aalborg University

Abstract

De fleste geoteknikere betragter silt som et materiale, der opfører sig som ler i udrænet tilstand og som sand i drænet tilstand. Denne opfattelse giver ikke en fuld realistisk tilgang til opfattelsen af styrkeparametrene for silt (T. L. Brandon and Duncan, 2006). Igennem tiden er der blevet lavet forsøg og undersøgelser for at fastlægge silts egenskaber og opførsel. I denne artikel gives der et indblik i nogle af de undersøgelser, der er lavet for, at undersøge hvordan silt opfører sig.

I triaxialforsøg er et af de største problemer at få tildannet en prøve. Igennem tiden er det blevet undersøgt, hvorvidt det er muligt, at rekonstruere siltprøver med forskellige metoder. Triaxialforsøgene med rekonstruerede siltprøver har resulteret i en ændring af spændings- og tøjningshistorien for silten, og endvidere opfører rekonstruerede siltprøver sig sprødt, mens intaktprøver opfører sig duktilt (K. Hoeg and Sandbækken, 2000). Triaxialforsøg på silt er derfor mest retvisende, hvis de udføres på intakte siltprøver.

Den generelle opførsel af silt er ikke studeret i samme grad som sands og lers opførsel. De første studier af silt begyndte for ca. 60 år siden (Wang and R. Luna P.E., 2012). I denne artikel er der beskrevet et uddrag af tidligere udførte undersøgelser for, at fastlægge siltens tendenser og der gives således ikke et komplet overblik over, hvilke undersøgelser der er lavet på silt.

I 1953 studerede Penman (Penman, 1953) den statiske opførsel af silt ved normal konsoliderede triaxialforsøg både drænet og udrænet. Siltprøverne bestod af ca. 55 - 85 % indhold af silt og med 45 - 15 % sandindhold. Siltprøverne blev tildannet ved air-free slurry metode, som foregår ved at tilsætte koldt destilleret vand til tør silt under vakuum. Vandet tilsættes indtil silten er dækket og derefter fjernes vakuummet. Triaxialforsøgene blev udført som flytningsstyrede forsøg. I de drænede triaxialforsøg komprimerede silten sig først, og derefter dilaterede silten til et stadie, hvor der ikke længere kunne ses nogen ændringer som vist på figur 1. Friktionsvinklen fandtes ved peak værdierne for hver test, og det konkluderes også, at hvis poretallet øges mindskes friktionsvinklen. Grunden til at friktionsvinklen er større ved mindre poretal, forklarer Penman ved "interlocking" mellem kornene. Generelt fås der friktionsvinkler på 33 - 37 grader.
Ved de udrænede triaxialforsøg blev al påført tryk båret af poretrykket. Det fandtes, at ved en given densitet og påført tryk opførte silten sig som et $\varphi = 0$ materiale. Ved lavere påført tryk opførte silten sig som c og φ materiale, dette er vist på Mohrs cirkel som ses på figur 2.

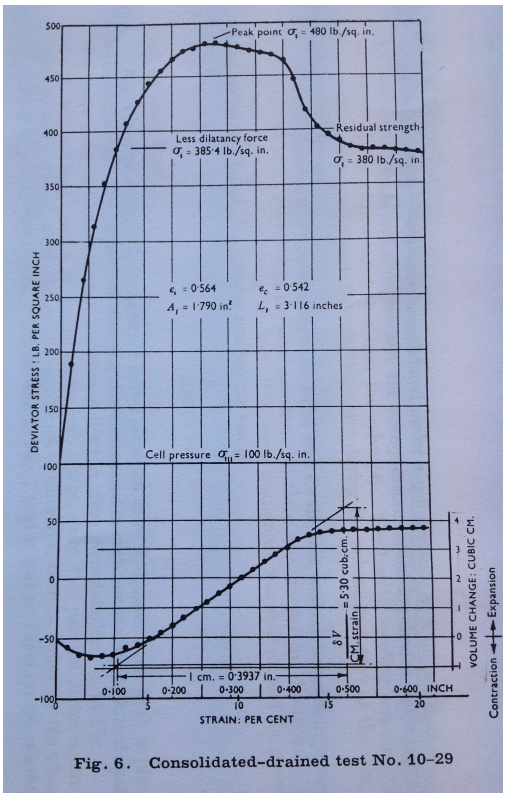


Fig. 6. Consolidated-drained test No. 10–29

Figure 1: Konsoliderede drænede triaxialforsøg (Penman, 1953).

I 1990 undersøgte Fleming og Duncan (Fleming and Duncan, 1990) normal og overkonsoliderede prøver af silt fra Alaska for at sammenligne dem med ler. De fandt frem til, at poretrykket øges til maksimum og så falder kontinuerlig med tøjningerne, og derfor er der ingen unik værdi for den udrænede forskyd-

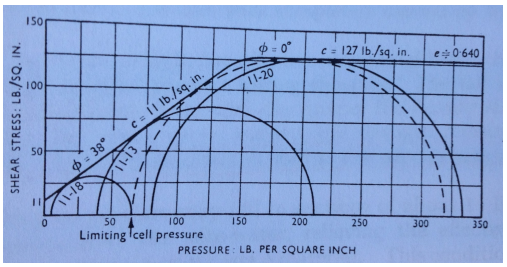


Figure 2: Mohr's cirkel fra udrænede triaxialforsøg (Penman, 1953).

ningsstyrke. Yderligere konkluderede Fleming og Duncan, at siltprøver meget nemt forstyrres.

I 1999 undersøgte Christensen og Holm (T. V. Christensen og A. V. Holm, 1999) forskellige metoder for at tildanne en siltprøve. De tager udgangspunkt i de metoder der allerede findes:

- Moist Tamping (fugtig stampning). Problemet med denne metode er, at bløde finkornede materialer i løst stadie undergår store tøjninger ved fugtig stampning, fordi vandspændingen mellem kornene fjernes.
- Air Pluviation: (introducering af betydelig sammentrækning). Problemet med denne metode er, at sandet silt vil blive metastabil og undergår meget store tøjninger under air pluviation.
- Water Pluviation (Jorden fyldes først med vand). Problemet med denne metode er partikel størrelses adskillelse.
- Slurry Deposition: (Luften trækkes ud og prøven mikses ved rotation af tube som materiale befinder sig i)

De foreslår en metode, hvor luften trækkes ud, og prøven vibreres under vakuum til ønsket lejringstæthed. Resultatet af dette minder om air pluviation. De finder ud af, at problemet med denne metode er, at prøven undergår store tøjninger under tildannelsen, og derved ændres spændingshistorien. De har sammenlignet in situ prøver med rekonstruerede prøver ved slurry deposition metoden, og konklusionen er, at når prøven rekonstrueres bliver brudbetingelsen lidt underestimeret, og spænding-tøjnings kurven er meget anderledes i forhold til in situ prøver. Yderligere har den rekonstruerede prøve tendens til større dilation end in situ prøven. Sammenligningen af en rekonstrueret og in situ prøve ses på figur 3. Yderligere fandt de frem til at friktionsvinklen lå højre for in situ test i forhold til tests med de rekonstruerede prøver.

I 2000 studerede Hoeg, Dyvik og Sandbækken (K. Hoeg and Sandbækken, 2000) styrken af en siltprøve, når den er blevet rekonstrueret sammenholdt med styrken for en intakt siltprøve. Dette gjorde de ved udrænede triaxialforsøg med monotonisk tryk ved, at øge den aksiale tøjning og holde den laterale totale spænding konstant. At forudsige in situ opførsel ved brug af rekonstruerede prøver er svært, derfor er der tidligere i praksis brugt CPT forsøg til at forudsige in situ opførsel. Problemet ved udelukkede brug af CPT er, at de empiriske formler der bruges til, at tolke CPT er baseret på rekonstruerede prøver og delvist på analyse at eksisterende projekter. Hoeg og Sandbækken fandt ud af, at in situ prøver dilatede, og havde duktil opførsel uden tøjnings softening, hvorimod rekonstruerede triaxial prøver komprimerede ved meget lavere poretal, og opførte sig sprødt (brittle), se figur 4. Ved konsolideringsspændingen dilaterede in situ prøven, mens den rekonstruerede prøve ved samme poretal komprimerede sig. Poretryk og tøjning-spændings kurver for in situ og rekonstruerede prøver var meget forskellige. In situ prøverne var stærkere end de rekonstruerede prøver. En af de rekonstruerede prøver resulterede i højere udrænet forskydnings styrke end den fundet for in situ prøven. Hoeg og Sandbækken (2000) konkluderede, at alle in situ prøver dilaterede og opførte sig duktilt, mens de rekonstruerede prøver havde lavere peak styrke og opførte sig sprødt. Yderligere fandt de ud af at forskydningsmodulet var ca. 25 % lavere for rekonstruerede prøver i forhold til in situ prøver.

I 2006 udførte Brandon mf. (T. L. Brandon and Duncan, 2006) ukonsoliderede (UU) og konsoliderede (CU) udrænede triaxialforsøg på lav-plasticitets silt. Der blev udført triaxialforsøg på rekonstruerede prøver og på in situ prøver på trods af den opfattelse, at det er meget svært, at tildanne en in situ prøve uden at forstyrre den. UU tests viste upålidelige resultater, fordi ved lavt kammertryk var prøven ikke længere vandmættet, da der opstod luftbobler i porevandet. CU tests blev lavet ved lave tøjninger, fordi prøven dilaterede meget, hvilket resulterede i en reduktion af poretryk samt en øgning af det effektive kammertryk og deviatorspændinger. Denne opførsel, dilatering, opfattes som karakteristisk.

I 2006 udførte Boulanger og Idriss (Boulanger and Idriss, 2006) monotoniske og cykliske udrænede triaxialforsøg på tre typer silt med PI på 0; 4 og 10,5. Her vil der kun blive refereret til de monotoniske test. Alle deres prøver tildannede de ved slurry sedimentation procedure, hvor luften trækkes ud og prøven mikses ved rotation af tuben som materialet befinder sig i. Silten med PI = 0 undergik tøjningshærdening og dilaterede også. NCL og CSL var ikke parallelle for silt med PI = 0, hvilket ses på figur 5. Silten med PI = 4 og PI = 10,5 havde også

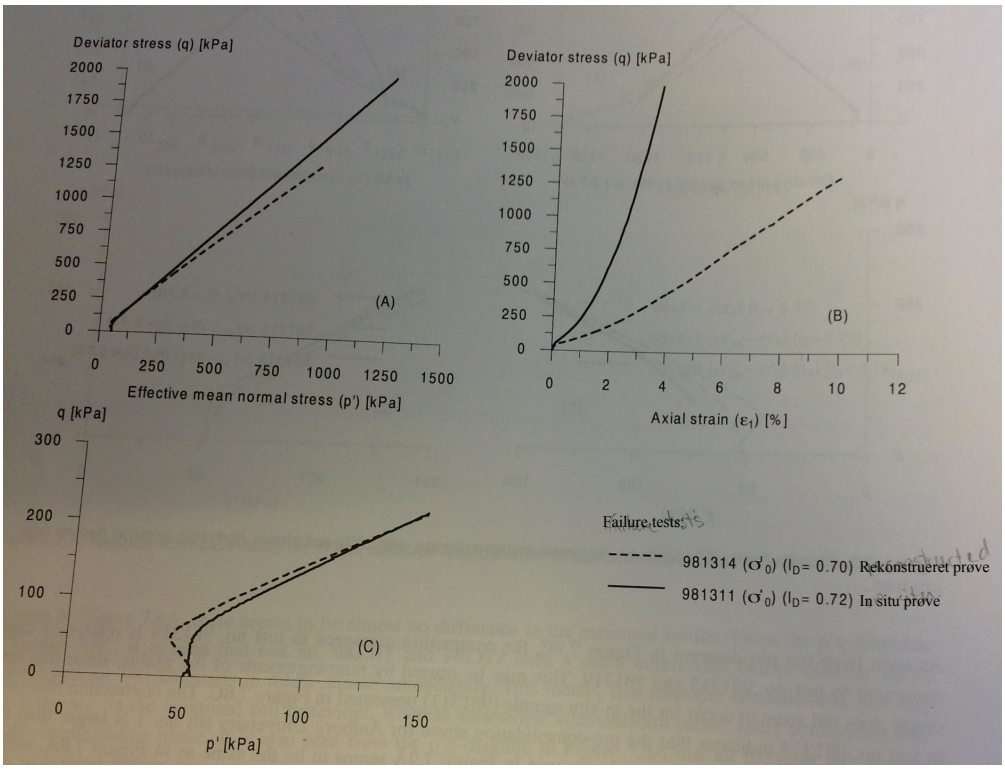


Figure 3: Sammenligning af rekonstrueret og in situ prøve lastet til brud. (T. V. Christensen og A. V. Holm, 1999)

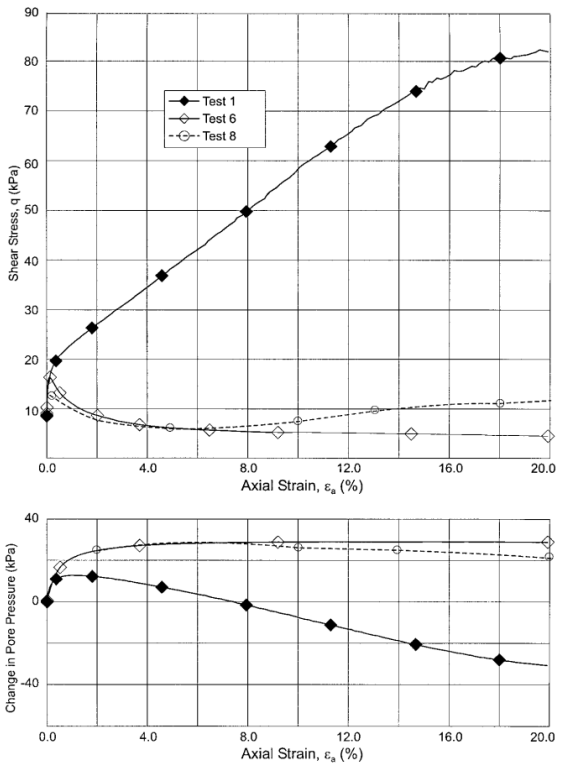


FIG. 4. Comparison of Typical Triaxial Stress-Strain Curves and Pore Pressure Development for Undisturbed (Test 1), Moist Tamped (Test 6), and Slurried (Test 8) Specimens (Table 1)

Figure 4: Hoeg og Sandbækken (2000), sammenligning af udrænede triaxialforsøg med tildannelse ved in situ (Test 1), moist tamped (Test 6) og slurried (Test 8). (K. Hoeg and Sandbækken, 2000)

tendens til tøjningshærdening. De konkluderede at, i praksis kunne silt med PI >> 7 opfattes at opføre sig som ler, og silt der ikke falder indenfor dette kriterium, kan opfattes at opføre sig som sand.

I 2006 undersøgte Nocilla, Coop og Colleselli (A. Nocilla and Colleselli, 2006) forskellige siltprøver med forskellige graderinger. Siltprøverne var karakteriseret ved procent materiale mindre end 2 μm, dvs. lerindhold, og de var 45%, 25%, 8% og 3,5%. Næsten alle prøver var rekonstrueret ved enten slurry metode eller ved tør eller våd komprimering. Prøver med 45% og 25% lerindhold havde næsten isotropisk NCL, og CSL var parallel til NCL som forventet. Prøver med 8 % lerindhold havde ikke en isotropisk NCL, og der fandtes ingen unik CSL for prøverne med lavt lerindhold. Ved et lerindhold på 45% sås et typisk udrænet spændingsforløb sammenlignet med normal konsolideret ler, dog var spændingsforløbet lidt stejlere. Ved reduceret lerindhold sås der mere og mere dilation. For lerindhold på 3,5% sås der opførsel som sand lastet fra stadiet under NCL, hvor prøven initial blev komprimeret og efterfølgende transformation fase og til sidst dilation til store tøjninger. (A. Nocilla and Colleselli, 2006).

I 2011 undersøgte Usmani (A. Usmani and Sharma, 2011) spændings, tøjnings og volumenændringer af Delhi silt ved triaxial tryk og træk forsøg. Prøverne blev tildannet ved slurry metoden. Der blev udført forsøg med prøver der havde forskelligt siltindhold. Ved drænet tryk forsøg viste prøverne, der kunne karakteriseres som sandet silt, tøjningshærdening for alle kammertryk.

I 2012 undersøgte Wang og Luna (Wang and R. Luna P.E., 2012) silt ved triaxialforsøg. Flere forskellige siltprøver med varierende OCR blev testet. Prøverne var ikke fuldt intakte, men så vidt muligt blev de mindst forstyrret. Med en OCR på 1 eller 2 komprimerede silten initialt, og derefter dilaterede den. Med OCR på 8 dilaterede silten. Alle prøver, OCR på 1, 2, og 8, udviste normal opførsel, dvs. lille dilation ved store effektive konsoliderings tryk. Prøver med OCR på 4 opførte sig anderledes med stor dilation ved store effektive konsolideringstryk. Prøver med OCR større eller lig 2 udviste dilation, og tøjningssoftening efter initial peak af deviatorspændingen. Yderligere fandt de ud af, at CSL ikke var parallel til NCL. Til sidst fandtes det også, at friktionsvinklen udregnes bedst ved begrænsede tøjninger, fordi her var der en mere ensartet friktionsvinkel, som ses på figur 6.

Lav-plasticitet silt kan udvise tøjningshærdening, tøjningssoftening og plastisk spændings-tøjnings opførsel, men alt dette afhænger hovedsageligt af PI, OCR og tildannelse af prøven (Wang and R. Luna P.E., 2012).

1 Konklusion

Et af de store problemer ved at udføre triaxialforsøg på silt er at få tildannet en prøve. De fleste tidligere studier af silt er udført på rekonstruerede siltprøver, og det er svært, at forudsige in situ opførsel ved brug af rekonstruerede prøver. Derfor er der tidligere i praksis brugt CPT forsøg til at forudsige in situ opførsel. Problemet ved udelukkede brug af CPT er, at de empiriske formler der bruges til, at tolke CPT er baseret på rekonstruerede prøver og delvist på analyse at eksisterende projekter (K. Hoeg and Sandbækken, 2000).

Mange har gennem tiden forsøgt, at rekonstruere silten i et prøverør, med forskellige metoder, men dette har resulteret i en ændring af spændings- og tøjnings historien for silten. Det ses, at rekonstruerede siltprøver opfører sig sprødt, i forhold til in situ prøver som opfører sig duktilt (K. Hoeg and Sandbækken, 2000). Derfor kan det konkluderes, at triaxialforsøg på silt er mest retvisende, hvis de udføres på in situ prøver. Intaktprøver af silt er vanskelige, at arbejde med hvilket gør det svært at opnå en intakt siltprøve. Derfor lægges der stor vægt på observering og beskrivelse af hvad der sker når en intaktprøve skal tildannes til triaxialforsøg. Det ønskes forsøgt, at presse intaktprøver ud således de kan anvendes til triaxialforsøg i intakt tilstand, det forventes, at noget af vandet kan dissipere væk ved udpresning af silten, men dette undgås så vidt muligt.

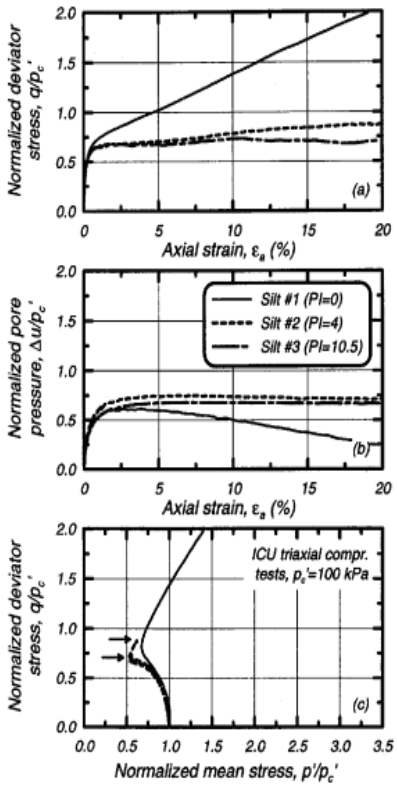


Fig. 8. Results of ICU axial compression tests on normally consolidated specimens of three blended silt mixtures (adapted from Romero 1995)

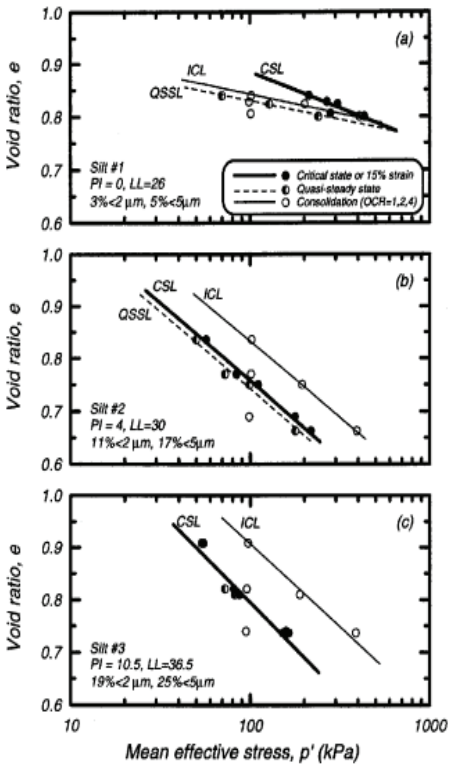


Fig. 9. Critical state lines (CSL), quasisteady state lines (QSSL), and isotropic consolidation lines (ICL) from ICU triaxial compression tests on three blended silt mixtures (Romero 1995, used with permission)

Figure 5: Resultater fra triaxialforsøg på tre forskellige silt udført af Boulanger og Idriss i 2006. (Boulanger and Idriss, 2006)

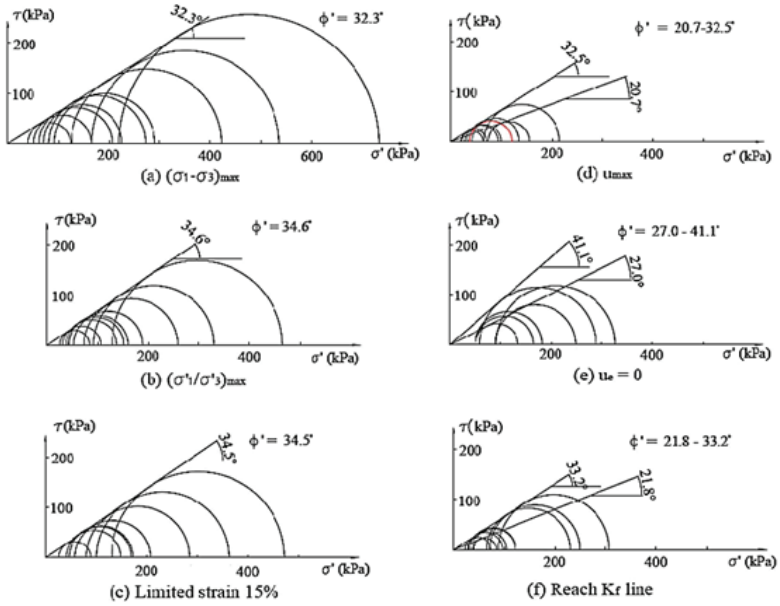


Fig. 6. Friction angleon the basis of various failure criteria

Figure 6: Bestemmelse af friktionsvinkel ved begrænsede tøjninger og ved Kf linje. (Wang and R. Luna P.E., 2012)

References

A. Nocilla and Colleselli, **2006**. M. R. Coop A. Nocilla and F. Colleselli. *The mechanics of an italian silt: An example of 'Transitional' behavior*. Geotechnique, 56(4), 261–271, 2006.

A. Usmani and Sharma, **2011**. G.V. Ramana A. Usmani and K. G. Sharma. *Experimental Evaluation of Shear-Strength Behavior of Delhi Silt under Static Loading Conditions*. American Society of Civil Engineers, pages 533–541, 2011.

Boulanger and Idriss, **2006**. R. W. Boulanger and I. M. Idriss. *Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 132(11), 1413–1426, 2006.

Fleming and Duncan, **1990**. L. N. Fleming and J. M. Duncan. *Stress-deformation characteristics of Alaskan silt*. J. Geotech. Eng., 116(3), 377–393, 1990.

K. Hoeg and Sandbækken, **2000**. R. Dyvik K. Hoeg and G. Sandbækken. *Strength of undisturbed versus reconstituted silt and silty sand specimens*. J. Geotech. Geoen-viron. Eng., 126(7), 606–617, 2000.

Penman, **1953**. A. D. M. Penman. *Shear characteristics of a saturated silt, measured in triaxial compression*. Geotechnique, 3(8), 312–328, 1953.

T. L. Brandon and Duncan, **2006**. A. T. Rose T. L. Brandon and J. M. Duncan. *Drained and undrained strength interpretation for low-plasticity silts*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 132(2), 250–257, 2006.

A. V. Holm, **1999**. Aalborg University T. V. Christensen og A. V. Holm. *Experimental Procedures for Testing with Silty Sand*, 1999.

Wang and R. Luna P.E., **2012**. S. Wang and F.ASCE. R. Luna P.E. *Monotonic behaviour of Mississippi River Valley Silt in triaxial compression*. American Society of Civil Engineers, pages 517–525, 2012.

Undersøgelse af Dronninglund silts egenskaber og styrkeparametre ved triaxialforsøg

Maria Krogh Mortensen[1]

Department of Civil Engineering, Aalborg University

Abstract

For at undersøge silts opførsel og styrkeparametre er der blevet lavet konsoliderede drænede, CD, triaxialforsøg. Der er anvendt intaktprøver til udførelse af triaxialforsøgene, da dette i tidligere studier har vist det mest retvisende billede af siltens spændings- og tøjnings opførsel (Mortensen, 2014).

Spændings- og tøjningsforløbet i forsøgene viser ikke en specifik tendens, da enkelte prøver udviste work-softening, og andre forsøg udviste plastisk opførsel. Dronninglund silten viste en tydelig tendens for volumenændringer under forskydning, idet den først komprimerede sig og derefter dilaterede.

Dilation er afhængig af spændingstilstanden. Der er ikke fundet en tendens for sammenhængen mellem dilation og lejringstæthed, men det formodes, at der er sammenhæng mellem lejringstæthed og dilation. For at påvise dette skal der udføre flere forsøg. Der er fundet sammenhæng mellem lerindhold og dilation. For prøver med et højt lerindhold observeres der mindre dilation sammenlignet med en prøve med et lavt lerindhold.

Ved brug af brudbetingelsen Mohr-Coulomb er friktionsvinklen fundet til 32° og kohæsion til c' = 12 kPa. Brudbetingelsen er optegnet i σ_3 - q diagram, og ved denne metode fås friktionsvinklen til 32° og kohæsionen til c' = 14 kPa. Ved brug af beregningsmetoden udviklet af R.L. Handy (Handy, 1981) er friktionsvinklen for Dronninglund silten fundet til 32° og kohæsion til c' = 34 kPa. Det vurderes, at kohæsionen i en designsituation vil give et urealistisk bidrag til bæreevnen for silt, og derfor er sekant friktionsvinklen fundet for hvert triaxialforsøg ved antagelse af c' = 0. Sekant friktionsvinklerne varierer mellem 32° og 41° og er spændingsafhængige. Alle prøverne, der er anvendt til triaxialforsøg, er blevet klassificeret ved en hydrometeranalyse og en sigteanalyse for at finde kornkurven for hver testet prøve. Der er fundet en sammenhæng mellem friktionsvinklen og sand- og lerindhold. For prøver med et højt lerindhold og lavt sandindhold ses en mindre friktionsvinkel sammenlignet med prøver med et lavt lerindhold og højt sandindhold. Der er ikke fundet en sammenhæng mellem friktionsvinkel og lejringstæthed, men det formodes, at friktionsvinklen er højere for prøver med høj lejringstæthed sammenlignet med prøver, der har en lav lejringstæthed. For at påvise dette skal der laves flere forsøg. Den karakteristiske friktionsvinkel φ_{cl} er fundet til 25°. Dilationsvinklen ψ er fundet til 7°.

For silt er der i Danmark tradition for at fastsætte friktionsvinklen til $\varphi = 30°$, og i nogen tilfælde vil dette være konservativt. Der er endnu ikke det brede kendskab til siltens egenskaber og styrke. For det drænede tilfælde antages der oftest en friktionsvinkel som lers, $\varphi = 30°$ og en kohæsion c' = 0 ligesom sand. Ved undersøgelse af Dronninglund silten tyder det på, at der kan være væsentlige fordele ved at teste silts styrke, idet der er fundet friktionsvinkler større end 30°.

1 Indledende undersøgelser og overvejelser

Der er blevet udført triaxialforsøg for at undersøge silts opførsel og styrkeparametre. For at klassificere de testede prøver der er anvendt til triaxialforsøgene, er der udført klassifikationsforsøg i form af hydrometer- og sigteanalyser for at finde kornkurven.

Triaxialforsøgene er udført på intaktprøver, idet tidligere studier viser, at rekonstruerede siltprøver resulterer i en ændring af spændings- og tøjningshistorien. Endvidere opførte den rekonstruerede silt sig sprødt, mens intaktprøver opførte sig duktilt (Mortensen, 2014).

Der undersøges marint senglacialt silt, såkaldt yoldiasilt fra Dronninglund i Nordjylland. Testområdets placering er vist på figur 1. I området er der målt et vandspejl i 1,3 m u.t. til 2,5 m u.t.



Figure 1: Geografisk placering af testområde.

Der er blevet udført 6 forede boringer Ø70 mm, som er benævnt S1B1, S2B1 til S2B2, S3B1 og S4B1 til S4B2, hvor S henviser til serieområde, og B henviser til boringsnummer indenfor det pågældende serienummer. Der er i alle boringer blevet udtaget poseprøver, og der er udtaget intaktprøver i A-rør i boringerne S2B2 og S4B2.

På figur 2 ses en situationsplan, for de boringer der er anvendt i dette projekt. I boring S2B2 og S4B2 er der udtaget intaktprøver, som anvendes til triaxialforsøgene.

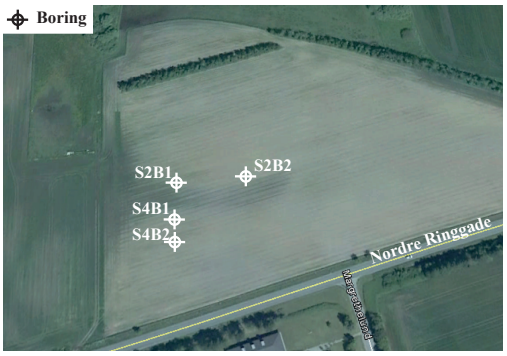


Figure 2: Situationsplan over boringer.

1.1 Håndtering og opbevaring af intaktprøver

Normalt skal intaktprøver opbevares liggende. Ved opbevaring og håndtering af Dronninglund silten blev det observeret, at silten blev flydende og mistede sin struktur inde i intaktrørene og således omlejrede sig. Dronninglund silten er opbevaret lodret i intaktrør og er således håndteret anderledes sammenlignet med standard metoden, da det var ønskeligt at bevare silten så intakt som muligt. Endvidere blev det vurderet, at prøverne ville få slag og stød, hvis de lå vandret under transport. Derfor blev det besluttet at producere en kasse af polystyren til intaktprøverne, således de kunne stå fast og stille under transport til laboratoriet. På figur 3 ses kassen med polystyren, som er anvendt til transport og opbevaring.



Figure 3: Kasse til transport og opbevaring af intaktprøver. Intaktprøverne opbevares ved 5°C.

De intaktprøver der er anvendt til triaxialforsøgene, er vist i tabel 1.

1.2 Konsolideringsforsøg

Triaxialforsøgene er udført som drænede forsøg med konstant kammertryk σ_3. Konsolideringsforsøg er brugt for, at undersøge om forbelastningsspændingen kunne findes for, at bruge denne til at fastsætte kammertrykket. Ved at bruge et kammertryk lig med forbelastningsspændingen ville Dronninglund silten kunne tilbagebringes til dets in situ spænding. Men ved tolkning af konsolideringsforsøgene fandtes der ikke en eksakt forbelastningsspænding.

Der er udført 4 konsolideringsforsøg på intaktprøverne 68, 70 og 71 fra boring S2B2 samt på intaktprøve 59 fra boring S4B2. Ved konsolideringsforsøgende fandtes en arbejdskurve der ikke blev retlinjet i logaritmisk afbildning som ses på figur 4. På figur 4 er forsøget fra intaktprøve 71 vist, og de resterende forsøg viser samme tendens.

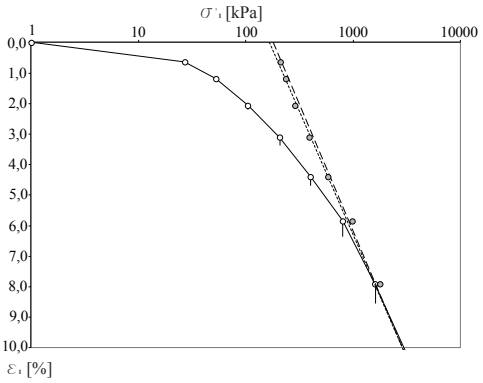


Figure 4: Arbejdskurve fundet ved tolkning af konsolideringsforsøg på intaktprøve 71.

Den ikke retlinjede arbejdskurve kunne tyde på, at konsolideringsforsøgene ikke er kørt til tilstrækkelig belastning, men det kan også tolkes, at silten opfører sig som sand, der undergår tøjninger. Ved konsolideringsforsøgene kunne tolkes en arbejdskurve, der mindede om sands, da der var store tøjninger for nybelastning, og kurven fartsatte krumning i logaritmisk diagram (Jacobsen, 1993). Arbejdskurven for silt er således ikke som den for normalkonsolideret ler, hvor kurven bliver retlinjet i logaritmisk afbildning efter in situ spændingen, og derved er det vanskeligt at fastsætte en eksakt forbelastningsspænding. Ved tolkning af konsolideringsforsøgene fandtes der forbelastningsspændinger som vist i tabel 2, men der er stor usikkerhed forbundet med disse, idet arbejdskurven ikke er retlinjet i logaritmisk afbildning.

Idet arbejdskurven for Dronninglund silten ikke er retlinjet i logaritmisk afbildning, efter in situ spændingen er opnået, er der stor usikkerhed forbundet med de forbelastningsspændinger, der

Boring nr.	Intaktprøve nr.	Triaxial-forsøg nr.	Dybde [m u.t.]	Kote DVR90 [m]	Beskrivelse, if. boreformand
S2B2	68	130803	7,0 - 7,3	15,8 - 15,5	Silt, sandholdig med lerstriber
	71	130808-07	10,0 - 10,3	12,8 - 12,5	Silt, sandholdig med lerstriber
S4B2	56	130809-11	5,0 - 5,5	17,5 - 17,0	Silt, sandholdig med lerstriber
	62	130801-02	11,0 - 11,3	11,5 - 11,0	Silt, sandholdig med lerstriber

Table 1: Intaktprøver der benyttes til triaxialforsøgene.

Boring nr.	Intakt-prøve nr.	Dybde [m u.t.]	Forbelastnings-spænding $[kPa]$
S2B2	68	7,0 - 7,3	450
	70	9,0 - 9,3	650
	71	10,0 - 10,3	330
S4B2	59	8,0 - 8,5	650

Table 2: Forbelastningsspændinger fundet ved konsolideringsforsøg.

er fundet ved konsolideringsforsøgene. Forbelastningsspændingerne fundet ved konsolideringsforsøg anvendes derfor ikke til fastsættelse af kammertrykket. I stedet vælges det at tilbagebringe silten til den spændingstilstand, som den er udtaget fra, det vil sige svarende til omtrentlig $\gamma \cdot d$.

Der udføres triaxialforsøg med kammertryk σ_3 på 50 kPa, 100 kPa og 200 kPa for at opnå punkter til optegning af Mohr-Coulombs brudbetingelse. Intaktprøverne er udtaget i intervallet $\gamma \cdot d = 50$ kPa - 100 kPa, hvilket betyder, at prøver kørt ved $\sigma_3 = 200$ kPa udelukkende er for at få punkter til Mohr-Coulombs brudbetingelse.

2 Materiale

Efter hver endt triaxialforsøg er der foretaget en ingeniørgeologisk bedømmelse af materialet. Den ingeniørgeologiske vurdering af det testede materiale ses herunder.

- Forsøg nr. 130801: Silt, svagt sandet, indhold af svagt fedt ler, sorte sandsliere.
- Forsøg nr. 130802: Silt, stærkt leret, sandet til stærkt sandet, organiske striber.
- Forsøg nr. 130803: Silt, sandet, leret.
- Forsøg nr. 130807: Silt, striber der er stærkt sandet i den ene ende (øverst), striber der er stærkt leret i den anden ende (nederst).
- Forsøg nr. 130808: Silt, stærkt sandet, svagt leret, øverst er der en tynd stribe af stærkt leret silt.
- Forsøg nr. 130809: 2/3 del af prøven (øverst): Silt, ler striber, svagt sandet. 1/3 del af prøven (nederst): Sand, siltet.
- Forsøg nr. 130810: Silt, med en lerstribe (ca 1/4 del af prøven), sandet, leret.
- Forsøg nr. 130811: Silt, sandet, leret, indslag af lerstykker.



Figure 5: Siltprøve fra triaxialforsøg nr 130802.

Alle prøverne udviste "harmonikastruktur", idet de gimpede ved test af en udrulningsprøve, og alle prøverne tørrede hvidt op, hvilket er tydelige silt egenskaber. På figur 5 er der vist et billede af silten fra triaxialforsøg nr. 130802. På billedet ses der en tydelig mørk stribe, hvilket er en organisk stribe, prøven indeholdte flere mindre organiske striber, som ikke kan ses på billedet.

2.1 Kornkurve

For at klassificere jorden fra triaxialforsøgene, er der udført sigte- og hydrometeranalyse på de testede jordprøver. Hydrometer- og sigteanalyserne er udført efter gældende standard, DS/CEN ISO/TS 17892-4 (DS, 2004). Det er ved tidligere undersøgelse af Dronninglund silten fundet, at kornstørrelsesfordelingen er mere pålidelig til klassificering af silt end plasticitetsindekset. Plasicitetsindekset fundet med Casagrandes kop, giver upålidelige resultater, idet jorden glider i koppen og ved skæring af furen trækkes jorden fra hinanden (R. Poulsen, 2012). Tidligere er det fundet, at forsøg med faldkegle ikke giver repræsentative resultater ved jord med meget høj eller lav plasticitet (R. Poulsen, 2012). På baggrund af disse observationer blev det besluttet, at bestemme kornkurven for at klassificere Dronninglund silten

der er udført triaxialforsøg på.

For at bestemme kornkurven er der udført hydrometeranalyse og sigteanalyse. Hydrometeranalysen er udført på en repræsentativ mængde jord fra prøven, der er udført triaxialforsøg på. Da hydrometeranalysen er udført på en udvalgt repræsentativ mængde jord, kan dette udgøre en fejlkilde, men denne vurderes acceptabel. Kornkurverne, der er optegnet ud fra hydrometeranalysen og en sigteanalyse af materiale større end 0,063 mm, er vist i figur 6. Endvidere er der på figur 6 optegnet grænseværdier for ler, silt og sand.
Ud fra kornkurven kan det ses, at prøverne fra de respektive triaxialforsøg har sand-, silt- og lerindhold som vist i tabel 3. For prøverne fra triaxialforsøgene er der fundet et siltindhold mellem 39% og 73 %.

Silts kornstørrelse ligger mellem ler og sand, men i praksis bliver silt sjældent truffet i ren form, hvilket ofte gør det vanskeligt at klassificere en silt. For at klassificere en silt kan der kigges på ler- og sandindholdet. Hovedbetegnelsen silt kan anvendes ved et plasticitetsindeks I_p mindre end 4%, hvilket erfaringsmæssigt viser sig ved et lerindhold mindre end 10% (B. N. Nielsen, 2014). Endvidere kan Casagrandes plasticitetsdiagram bruges ved klassificering af silt, her foreskrives der ligeledes et lerindhold mindre end 10% for, at en jordart kan få hovedbetegnelsen silt (G. Larsen, 1995), medmindre sandindholdet i prøven er så stort, at denne skal betegnes som sand.

I tabel 3 er der angivet jordart for prøverne, denne er bestemt udelukkede på kornstørrelsesfordelingen i prøven. Ved betegnelse af en jordart er klassifikation ikke altid egnet til at angive prøvematerialets egenskaber, idet det er jordartens opførsel, der er afgørende for, hvilken hovedbetegnelse denne skal have (G. Larsen, 1995). I tabel 3 har to prøver fået hovedbetegnelsen ler og en sand, men ved den ingeniørgeologiske vurdering af prøverne var det muligt at lave en udrulningsprøve.

Den ingeniørgeologiske prøvebedømmelse stemmer ikke fuldt overens med den jordart der er tolket ud fra kornkurven. Det kan skyldes, at den mængde jord der er valgt til udførelse af hydrometeranalysen, ikke har været fuldt ud repræsentativ, idet få procent ler kan have afgørende betydning for jordartens hovedbetegnelse. Men det kan også indikere, at der er vanskeligt at lave en ingeniørgeologisk bedømmelse af silt. Det at jordarten tolket ud fra hydrometeranalysen og den ingeniørgeologiske prøvebedømmelse ikke stemmer overens viser, hvor vanskeligt det er at klassificere silt.

2.2 Den relative lejringstæthed

Det forventes, at prøvernes opførsel og styrke er afhængig af spændingstilstand og lejringstæthed. Derfor er der udført forsøg til bestemmelse af den relative lejringstæthed. Dette er gjort ved bestemmelse af siltens løseste og fasteste lejring. Bestemmelse af den relative lejringstæthed er udført på en repræsentativ mængde jord fra de respektive prøver, der er udført triaxialforsøg på. De relative lejringstætheder er vist i tabel 4.

Forsøg nr.	Relativ lejringstæthed I_D [%]
130801	75,6
130802	89,7
130803	77,3
130807	65,2
130808	80,4
130809	71,2
130810	70,9
130811	85,3

Table 4: De relative lejringstætheder fundet ved forsøg med løseste og fasteste lejring.

3 Apparat og forsøgsprogram

Der er udført 8 konsoliderede drænede, CD, triaxialforsøg som vist i tabel 5.

Triaxial apparatet, som er vist på figur 7, består af flere styringsenheder og en opsamlingsenhed. Kontrolpanelet bruges både under tildannelse af prøven og under forsøgene. Under tildannelse af prøven bruges der vakuum til at hjælpe prøven med at stå, således at den ikke belastes unødigt under installationen. Vakuum styres på kontrolpanelet. På kontrolpanelet kontrolleres også vandmætningsprocessen, og endvidere kan der åbnes og lukkes for vandet, der bruges til kammertrykket samt måling af kammertrykket. Bagtryk systemet bruges til at sikre vandmætningen. Under triaxialforsøget måler bagtryk systemet prøvens volumenændringer. Stempeltrykket er flytningskontrolleret.

En detaljeret tegning af triaxial apparatet er vist på figur 8. Den aksiale flytning måles med to flytningstransducere på prøven. Under forsøget køres stemplet således, at prøven undergår tryk, og lastcellen måler stempeltrykket. Flytningen påføres med en konstant hastighed. I disse CD triaxialforsøg er poretrykket styret af bagtryk systemet, og poretrykket er således konstant under alle forsøg.

Triaxialforsøgene er udført ved, at prøverne først blev vandmættet ved brug af bagtrykket. Dernæst blev prøverne isotropisk belastet med et kammertryk σ_3, hvor kammertrykket var konstant i ca. et døgn, for at tilbagebringe prøverne til deres

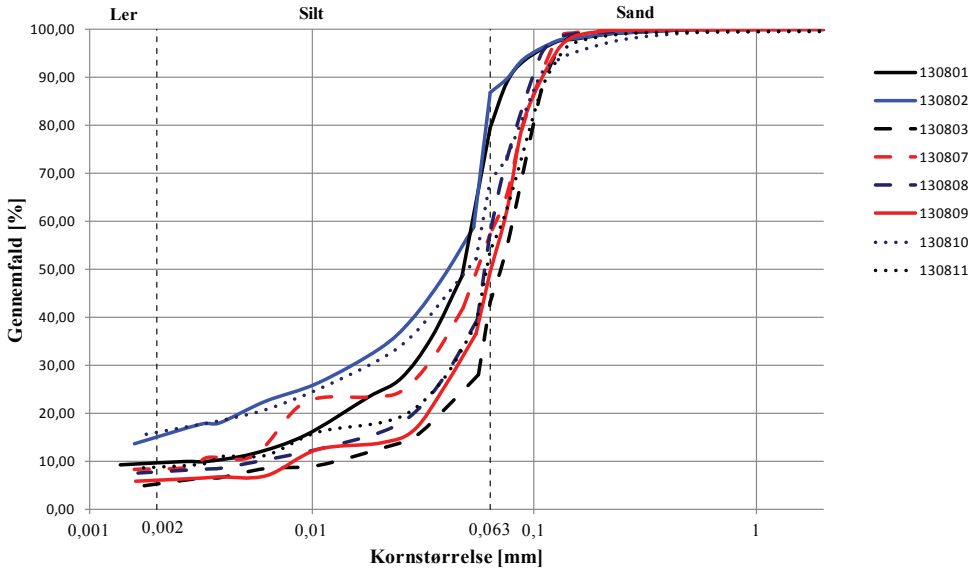


Figure 6: Kornkurver for materialet der er udført triaxialforsøg på.

Forsøg nr.	Kornstørrelses fordeling Sand [%]	Silt [%]	Ler [%]	Jordart
130801	21	69	10	Silt, stærkt leret, stærkt sandet
130802	13	73	13	Ler, stærkt siltet, sandet
130803	56	39	5	Sand, stærkt siltet, leret
130807	43	49	8	Silt, stærkt sandet, leret
130808	42	50	8	Silt, stærkt sandet, leret
130809	50	44	6	Silt, stærkt sandet, leret
130810	32	52	16	Ler, stærkt siltet, stærkt sandet
130811	46	45	9	Silt, stærkt sandet, leret

Table 3: Kornstørrelsesfordeling for materialet der er udført triaxialforsøg på. Jordarten er klassificeret ud fra kornstørrelsesfordelingen.

Forsøg nr.	Intakt-prøve nr.	Dybde [m u.t.]	Kote DVR90 [m]	Kammertryk $[kPa]$	Bagtryk $[kPa]$	Skemptons B [%]
130801	62	11,30	11,17	100	200	89,9
130802	62	11,23	11,24	200	200	84,7
130803	68	7,14	15,64	100	200	86,5
130807	71	10,22	12,56	50	300	81,4
130808	71	10,10	12,68	200	400	82,8
130809	56	5,27	17,20	50	400	89,6
130810	56	5,11	17,36	200	400	63,5
130811	56	5,19	17,28	100	400	93,0

Table 5: Oversigt over udførte forsøg. Koter og dybder er angivet for bunden af prøven, der er anvendt til triaxialforsøg

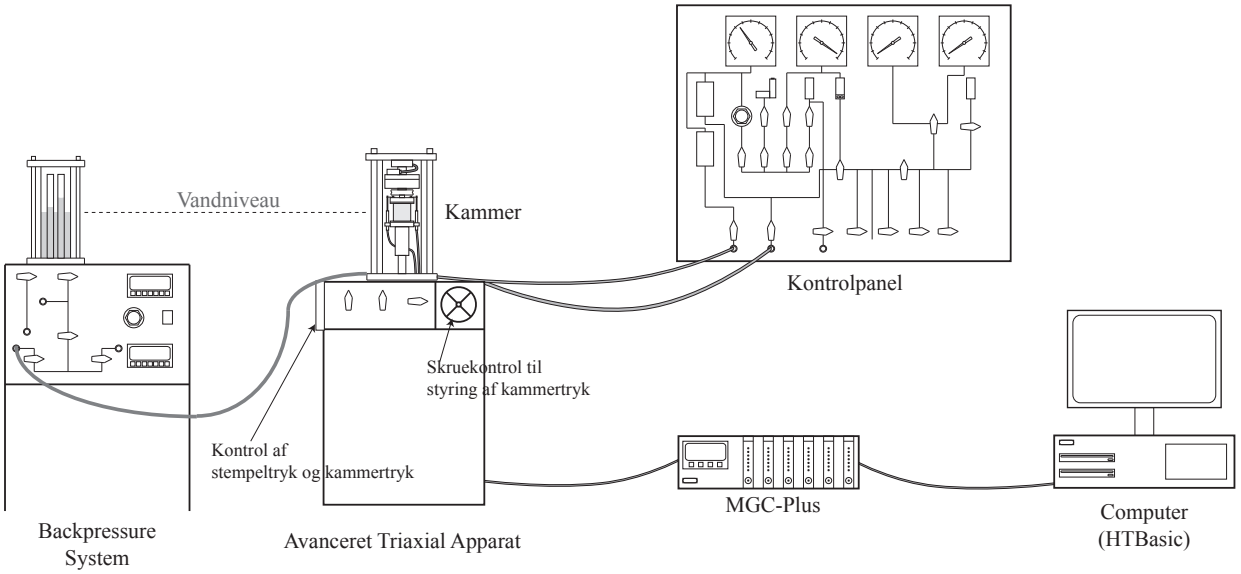


Figure 7: Forsøg setup af avancerede triaxialforsøg.

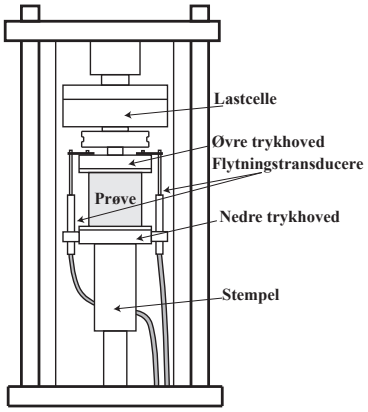


Figure 8: Triaxial apparat.

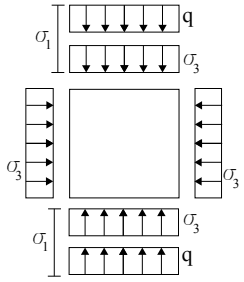


Figure 9: Spændingerne under triaxialforsøgene.

spændingstilstand. Dernæst blev prøverne belastet anisotropisk med en flytning på 0.5 % tøjning i timen i 1-retningen, og kammertrykket blev stadig holdt konstant. Spændingerne under forsøgene er vist på figur 9. Triaxialforsøgene er udført flytningsstyrede med en hastighed på $\varepsilon_1 = 0.5\%/time$, således er det muligt at undersøge om silten undergår softening. Prøverne er kørt indtil 12 $\%\varepsilon_1$. Hvis brud ikke kan observeres for prøverne, forventes det, at det kan defineres ved 10 $\%\varepsilon_1$.

I alle triaxialforsøg måles parameteren Skemptons B. Skemptons B bruges som mål for, hvor vandmættet en prøve er. Således vides det, om poretryk og effektive spændinger måles korrekt i udrænede forsøg. I drænede forsøg som disse har Skemptons B ikke nogen betydning for poretryk og effektive spændinger. Skemptons B har ingen betydning for måling af de effektive spændinger, da belastninger påføres drænet, det vil sige $\Delta u = 0$. Poretrykket styres med bagtrykket, og derved påvirkes poretryksmålinger ikke ved en utilstrækkelig vandmætning. I drænede forsøg kan vandmætningsgraden påvirke målinger af volumetøjninger, idet volumenændringerne måles ved det vand, der presses ud af prøven. En prøve, der er utilstrækkelig vandmættet, vil indeholde luft, og når dette presses ud, giver det støj i målingerne. Skemptons B på minimum 90 % svarer til en fuldstændig vandmættet prøve.

4 Tildannelse og prøveindbygning til triaxialforsøg

Det er vanskeligt, at tildanne siltprøver så de kan installeres i triaxial cellen. I våd tilstand er silt meget følsom overfor vibrationer, og kan derfor fremstå levende (B. N. Nielsen, 2014). De intaktprøver, der arbejdes med i disse forsøg, er beliggende under grundvandsspejlet og er derfor våde. Der findes endnu ikke en standard for,

hvordan en triaxial prøve af silt skal tildannes.
For at finde ud af hvordan silten skulle tildannes, blev det studeret, hvordan det tidligere er blevet gjort, og hvilke resultater de forskellige metoder for at tildanne silt giver. Det er i tidligere undersøgelser fundet, at rekonstruerede siltprøver har resulteret i en ændring af spændings- og tøjningshistorien, og den rekonstruerede silt opførte sig sprødt, mens intaktprøver opførte sig duktilt (Mortensen, 2014). Ud fra disse studier for tildannelse af siltprøver blev det besluttet at tildanne siltprøverne i apparatet i intakt tilstand. Det er i det følgende beskrevet, hvordan silten er installeret i triaxial apparatet i intakt tilstand.

En mere detaljeret forsøgsbeskrivelse findes i appendiks A.2, hvor der findes en udførelses manual for triaxialforsøgene.

De intaktprøver, der bruges til triaxialforsøg, har en diameter på 70 mm, og prøven tildannes således, at den får højden 70 mm. Det ønskes, at h=d således der ikke opstår forskydnings brudlinjer såkaldte shear bands i prøven.

For at få intaktprøverne ud af rørene benyttes en prøveudpresser, som vist på figur 10. Intaktrøret monteres lodret og prøven presses direkte op i en stålcylinder, som har den ønskede diameter på 70 mm. Under denne proces udsættes prøven for et tryk for at få den ud af intaktrøret. Derudover er det observeret, at der under nogle af prøveudpresningerne dissiperede vand bort fra prøven. Dette må antages, at påvirke prøven men i hvilken grad vides ikke. Dog vandmættes prøven senere hen i triaxial apparatet, og derfor må dette have en minimal betydning for prøvens vandmætning.
Dernæst presses prøven ud af stålcylinderen direkte over i triaxial apparatet ved hjælp af håndkraft som vist på figur 11. På figur 11 ses stålcylinder og stempel, som prøven trykkes ud i apparatet med. Indtil dræn og gummimembran er monteret, står prøven selv, som det også er vist.

Der monteres en lastramme omkring prøven, således prøven påvirkes mindst muligt, mens den installeres. Lastrammen er vist på figur 12. Der monteres dræn på prøven, og dernæst påsættes der en gummimembran ved hjælp af udstyret vist på figur 12.
Derefter smøres der silikone på gummimembranen, og udenpå monteres endnu en gummimembran for at øge tætheden. Under denne proces er der udvist stor forsigtighed, da det ønskes at bevare prøven intakt. Det må antages, at det påvirker prøven minimalt. For at prøven ikke skal stå selv under den videre installation og klargøring af forsøg, støttes prøven ved at påføre et vakuum i prøven på 40 kPa.

For yderligere forsøgsbeskrivelse henvises der til



Figure 10: Prøveudpresser.

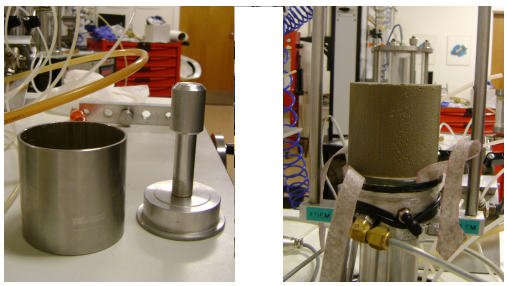


Figure 11: Stålcylinder som anvendes ved udpresning af intaktprøver. Siltprøven presset ud af stålcylinder.

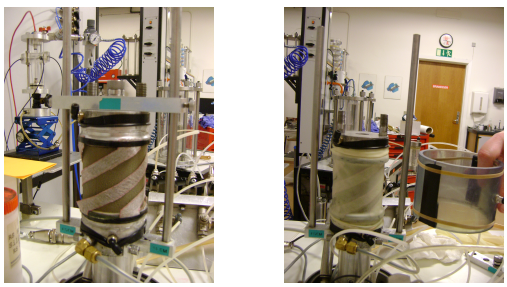


Figure 12: Dræn og gummimembran monteres på prøven.

forsøgsbeskrivelsen i appendiks A.2.

5 Resultater

5.1 Opførsel og styrkens afhængighed af spændingstilstand og lejringstæthed

Tidligere undersøgelser af sand viser, at den drænede styrke er afhængig af spændingstilstanden og den relative lejringstæthed, dette er illustreret ved figur 13. På figur 13 til ventre er kurverne for prøver med $I_D = 38\%$ ved forskellige kammertryk optegnet, og til højre ses kurverne for prøver med $I_D = 100\%$ ved forskellige kammertryk. Generelt kan det siges, at for lave relative lejringstætheder ses der ikke et peak i spændingskurven og prøven komprimeres, dette kaldes løse lejringer. Ved høje relative lejringstætheder ses der et peak i spændingskurven og prøven dilaterer, dette kaldes faste lejringer. Dog kan det ses på figur 13, at ved en høj relativ lejringstæthed og ved en høj spændingstilstand σ_3 har prøven opførsel som en løst aflejret prøve. Tilsvarende kan det ses, at ved en lav relativ lejringstæthed og ved en lav spændingstilstand opfører prøven sig som en fast aflejret prøve. (T.S. Tan, 2006). Derved kan det konkluderes at en jordarts opførsel er styret af både lejringstætheden og spændingstilstanden.

5.2 Spændings og tøjningsforløb

Figur 14 viser spændings- og tøjningsforløbet for de 8 forsøg, hvor der er udført af- og genbelastning ved 2 $\%\varepsilon_1$. Der er ikke fundet en tendens for spændings og tøjningsforløbet for Dronninglund silten, idet der ikke er observeret samme opførsel ved hvert forsøg. I tidligere studier hvor silts egenskaber er undersøgt, har silt udvist både hardening og softening samt plastisk opførsel (Mortensen, 2014).

På figur 14 ses det, at forsøg nr. 130801 viser et tydeligt peak i deviatorspændingen og derefter et fald i deviatorspændingen. Forsøg nr. 130803 og 130808 udviser også denne opførsel, dog er dette ikke så tydeligt på figur 14. Denne opførsel hvor der er et peak, og derefter et fald i deviatorspændingen indikerer softening i Dronninglund silten efter peaket. For forsøg nr. 130801, 130803 og 130808 der viser work-softning opførsel, kan det defineres, at brud sker hvor deviatorspændingen peaker ved hhv. ca. 6, 7 og 8 $\%\varepsilon_1$. Forsøg nr. 130807 og 130809, der er udført med det laveste kammertryk viser plastisk opførsel idet, at efter maksimal spænding er opnået, fortsætter tøjningerne uden nogen ændring i spændingen. For forsøg nr. 130802, 130810 og 130811 ses det, at spændingen øges marginalt under tøjning, hvilket kunne indikere work-hardening. Men da det er meget lidt spændingen øges, kan det diskuteres hvorvidt materialet udviser work-hardening, da tendensen ikke er overbevisende.

Figur 15 viser volumenændringen i Dronninglund silten, når den udsættes for forskydning. Det ses, at Dronninglund silten har tendens til først at komprimeres, hvorefter den dilaterer. I tidligere studier har silt også vist tendens til at dilatere (Mortensen, 2014).

På figur 15 er den relative lejringstæthed noteret for hver testet prøve på den pågældende kurve.

Dilation er styret af spændingstilstanden, som i dette tilfælde er kammertrykket σ_3. Derudover må det formodes, at dilation også er styret af den relative lejringstæthed I_D, men denne tendens ses ikke entydigt for disse forsøg. Generelt vil der være mindre dilation ved de højere spændingstilstande. Prøverne der er udsat for et højt kammertryk dilaterer mindre, sammenlignet med prøverne der er udsat for et mindre kammertryk. Generelt vil en prøve med høj lejringstæthed dilatere mere sammenlignet med en prøve med en lav lejringstæthed, og det var en forventning, at dette også kunne observeres for Dronninglund silten. For prøver med $\sigma_3 = 50$kPa (røde kurver) ses det som forventet, at prøven med den højeste relative lejringstæthed dilaterer mere sammenlignet med den prøve der har en lavere relativ lejringstæthed. For prøverne med $\sigma_3 = 100$kPa (sorte kurver) ses det, at prøven med den højeste relative lejringstæthed dilaterer mindre sammenlignet med de andre prøver, som har en lavere relativ lejringstæthed. For prøver med $\sigma_3 = 200$kPa (blå kurver) er der ikke fundet nogen sammenhæng mellem dilation og relativ lejringstæthed. Derved kan det konkluderes, at hvis sammenhængen mellem dilation og lejringstætheden skulle dokumenteres, ville dette kræve flere forsøg.

I tabel 6 er slut volumetøjningen, den relative lejringstæthed, ler- og sandindhold samt kammertryk vist.

Der er fundet en sammenhæng mellem dilation og indhold af ler. På figur 16 er slut volumetøjningen ε_v vist som en funktion af lerindholdet for alle 8 triaxialforsøg. Ved stigende lerindhold ses der mindre dilation. Dette er i modsætning til hvad der tidligere er observeret af Nocilla (2006) (Mortensen, 2014). Studierne af Nocilla (2006) er lavet ud fra triaxialforsøg udført på rekonstruerede prøver, hvilket kan have en indflydelse.

På figur 15 ses det, at kurven for nogle forsøg ikke er jævn, idet der observeres støj indtil en tøjning på ε_1 på 6% for forsøg nr. 130810 og ligeledes i starten for forsøg 130807. De ujævne kurver er hovedsagelig i det stadie hvor silten komprimeres, og det vurderes, at skyldes utilstrækkelig vandmætning af prøven. I forsøg nr. 130810 og 130807 er Skemptons B fundet til henholdsvis 63,5% og 81,4%. Dette betyder, at prøverne ikke har været fuldstændig vandmættende, og der har derfor været noget luft inde i prøven. Når prøven udsættes for tryk og kom-

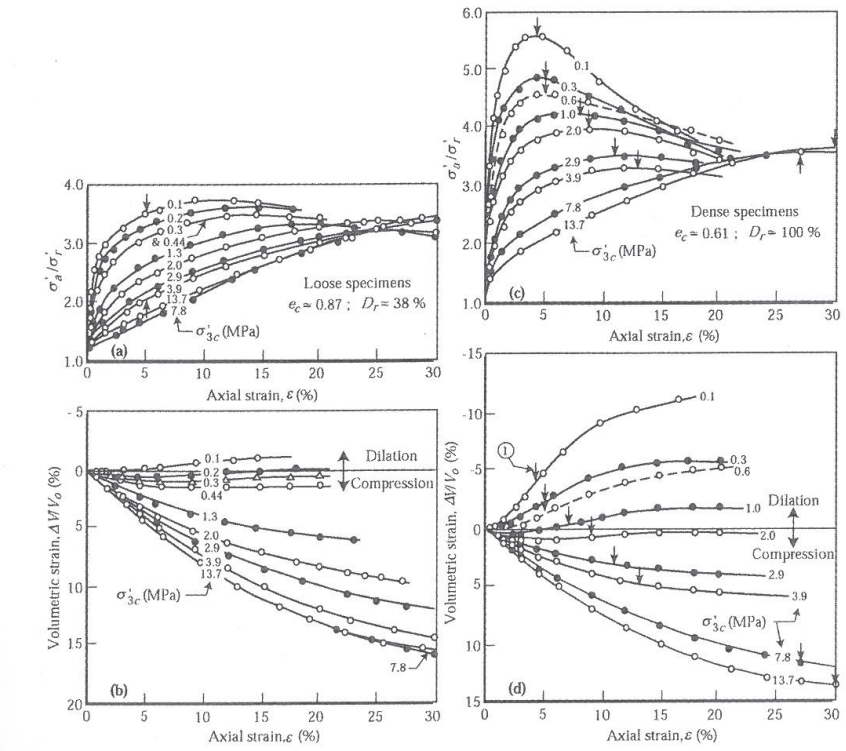


Figure 13: Illustration af at den drænede opførsel afhænger af spændingstilstanden σ_3 og den relative lejringstæthed I_D. (T.S. Tan, 2006)

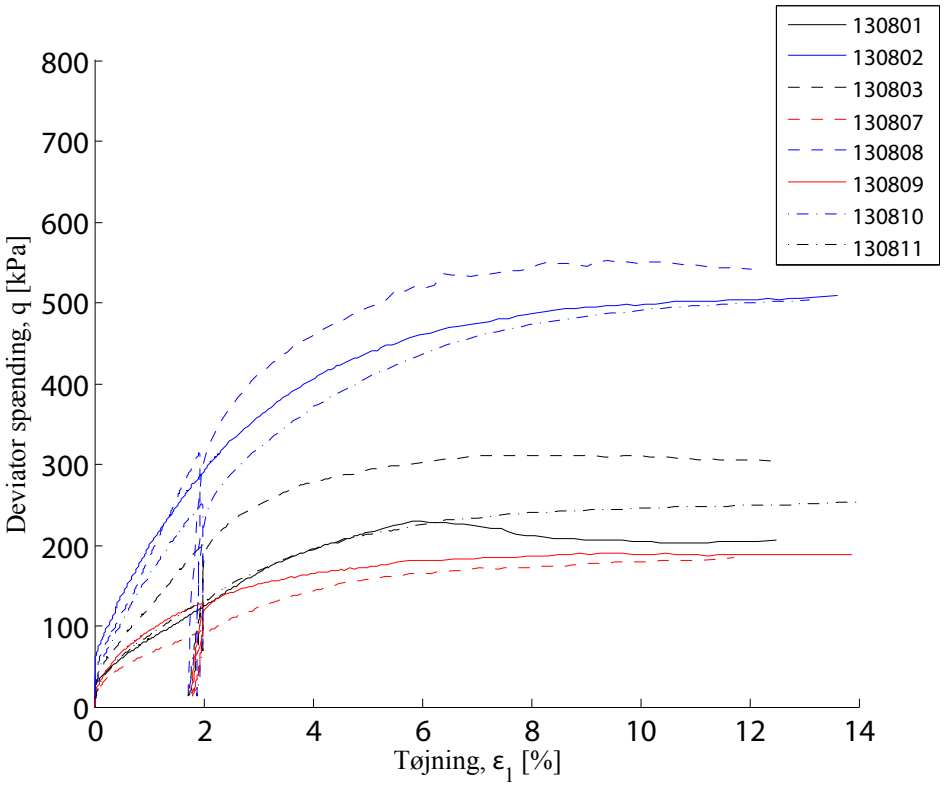


Figure 14: Spændings- og tøjningsforløb fra de 8 triaxialforsøg.

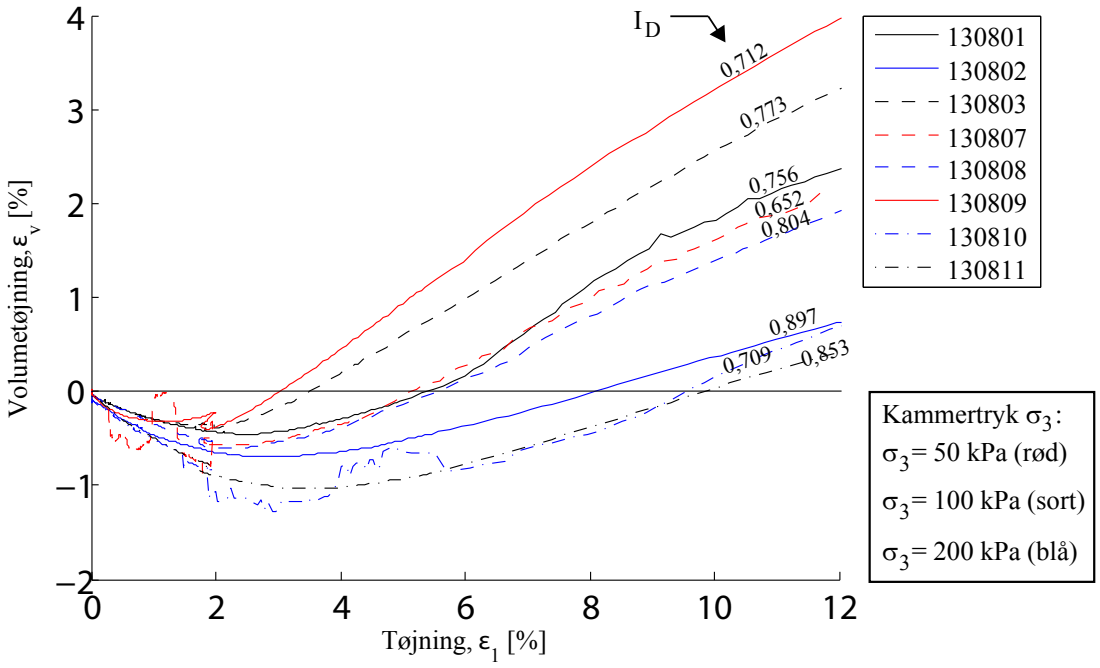


Figure 15: Volumenændringer for prøverne fra de 8 triaxialforsøg. Den relative lejringstæthed for de 8 prøver er noteret på kurverne.

Kammertryk σ_3 kPa	Forsøg nr.	Ler-indhold [%]	Sand-indhold [%]	Relativ lejrings-tæthed I_D [%]	Slut tøjning ε_v [%]
50	130807	8	43	65,2	2,1
	130809	6	50	71,2	4,0
100	130801	10	21	75,6	2,4
	130803	5	56	77,3	3,2
	130811	9	46	85,3	0,4
200	130802	13	13	89,7	0,8
	130808	8	42	80,4	1,9
	130810	16	32	70,9	0,8

Table 6: Sammenhæng mellem dilation og spændingstilstand, relativ lejringstæthed samt ler- og sandindhold

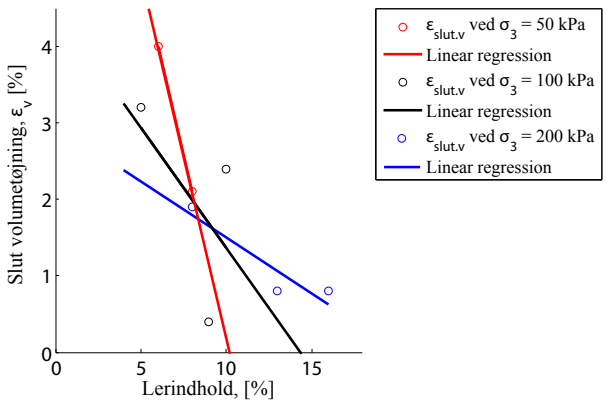


Figure 16: Illustration af at dilation er afhængig af lerindhold.

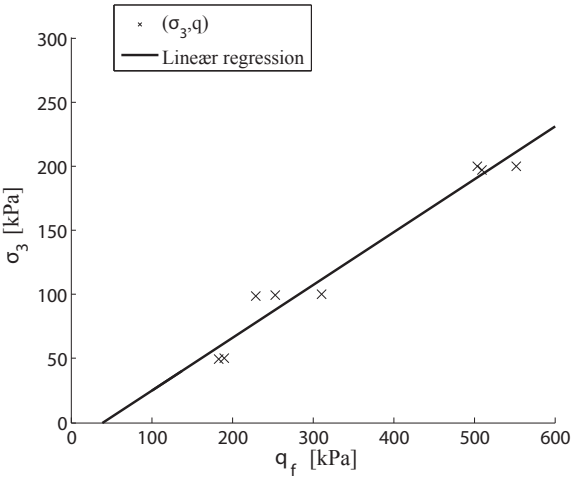


Figure 18: Brudbetingelsen i σ_3,q diagram.

primeres, trykkes jord, vand og eventuel luft sammen og det er når luften trykkes ud af prøven, der opstår støj i målingerne.

Skemptons B har ingen betydning for poretrykket og de effektive spændinger ved drænede forsøg som disse, da poretrykket holdes konstant med bagtryk systemet og de effektive spændinger styres med kammertrykket.

5.3 Friktionsvinkel og kohæsion

Den effektive friktionsvinkel og kohæsionen er fundet ved forskellige metoder. Metoderne tager udgangspunkt i Mohr-Coulombs brudkriterie. For at finde styrken af Dronninglund silten er den maksimale spænding for σ_1 anvendt, og det er dermed den der valgt til at definere styrken og brud.

På figur 17 er Mohrs cirkel plottet for de 8 forsøg, og Mohr-Coulomb brudkriteriet er optegnet ved brug af Mohrs cirkler. Brudkriteriet findes ved at fitte en ret linje til tangenten på Mohrs cirkel i punktet (σ_{ff}, τ_{ff}) (R. D. Holtz, 1981). Friktionsvinklen φ tolket ud fra Mohr-Coulombs brudkriterie giver 32°, og kohæsionen c' giver 12 kPa.

Ved tolkning af Mohr-Coulombs brudkriterie er Mohr brudkriteriet tilnærmet ved en ret linje. Men realiteten er, at Mohrs brudkriterie er af en højere ordre, hvilket betyder, at friktionsvinklen er spændingsafhængig (R. D. Holtz, 1981).

Istedet for at bruge Mohrs cirkler til at beskrive spændingstilstandene kan brudbetingelsen udtrykkes som sammenhængen mellem den mindste hovedspænding σ_3 og deviatorspændingen q (N. K. Ovesen, 2007). Brudbetingelsen, optegnet i koordinatsystem med σ_3 som den vertikale akse og q som den horisontale akse, er vist på figur 18.

Ved brug af figur 18 kan friktionsvinklen og kohæsionen tolkes. Dette gøres ved brug af hældningen på kurven og skæring med q aksen. Friktionsvinklen er fundet φ til 32° og kohæsion c' til 14 kPa.

Friktionsvinklen og kohæsionen er tolket ved brug af metoden udviklet af R.L. Handy (Handy, 1981). Denne metode blev udviklet, da det menes at lineær regression af p-q diagrammer, skulle give en overestimering af friktionsvinklen, fordi det menes at variationen ligger 45° fra y aksen når kammertrykket σ_3 er konstant, dette er illustreret på figur 19 (Handy, 1981).

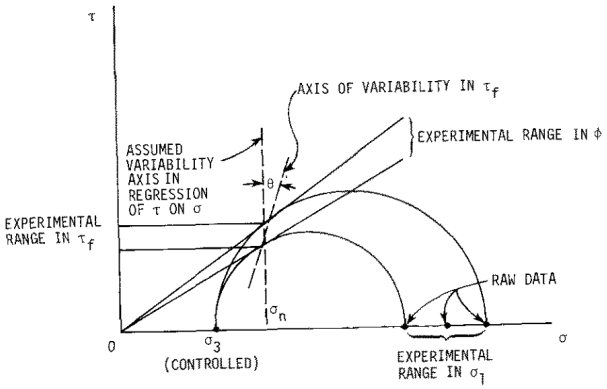


Figure 19: Den ukorrekte regression af τ_f på σ_n når kammertrykket σ_3 er konstant, ifølge Handy (Handy, 1981).

Handy bruger MIT til at beskrive spændingstilstanden og derved tager metoden højde for 2-dimensionelle spændingstilstande idet $p = \frac{\sigma_1+\sigma_3}{2}$. Regressionen findes ved, at konvertere p-q data til polære koordinater og dreje koordinatsystemet 45° og konvertere tilbage til rektangulære koordinater og orginale akser. Beregninger og yderligere beskrivelse er vist i appendiks A.8.2.

På figur 20 er der lavet en linearisering af de 8 triaxialforsøg brud cirkler ved Handy metoden.

Ved brug af Handys metode findes friktionsvinklen φ til 32° og kohæsion c' til 34 kPa.

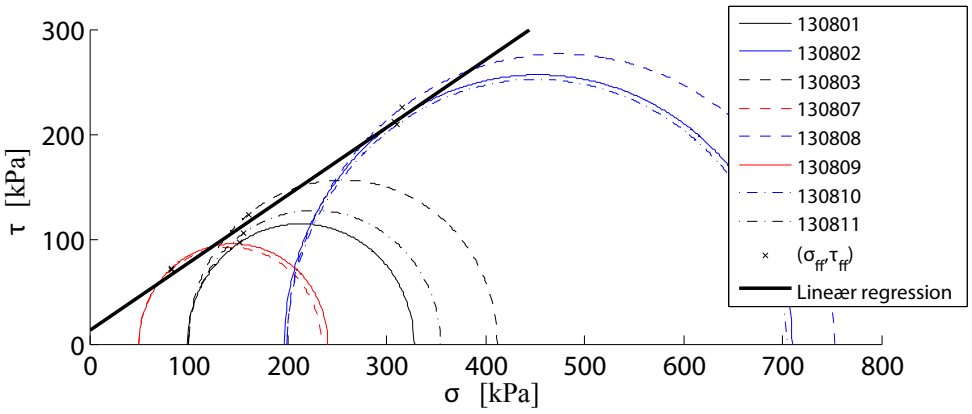


Figure 17: Mohrs cirkler og Mohr-Coulomb brudkriterie.

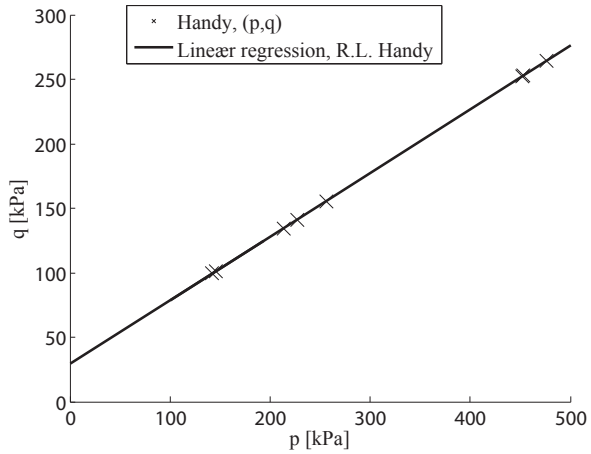


Figure 20: Linearisering af alle triaxialforsøg ved Handy.

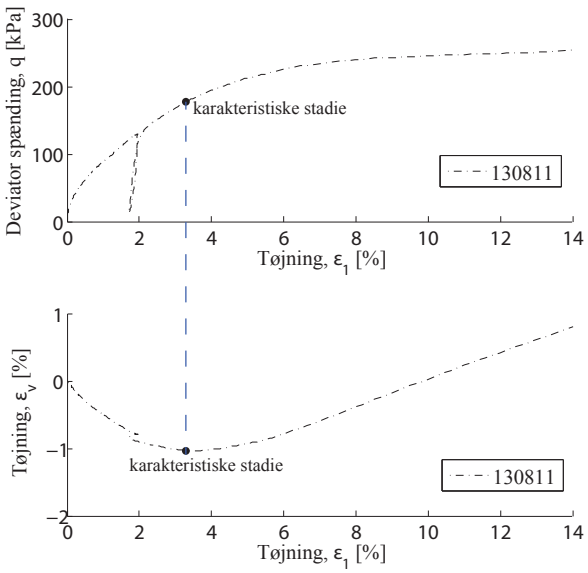


Figure 22: Illustration af det karakteristiske stadie for triaxialforsøg nr. 130811. Det karakteristiske stadie anvendes til at finde den karakteristiske friktionsvinkel.

5.3.1 Den karakteristiske friktionsvinkel

Ved forskellige densiteter vil spændingskurven give forskellige peak, dette er vist på figur 21 (T.S. Tan, 2006). Det karakteristiske stadie er det stadie lige inden prøven dilaterer, dette er illustreret på figur 22. Ud fra den karakteristiske linje kan den karakteristiske friktionsvinkel findes. Den karakteristiske friktionsvinkel består af ren friktion mellem kornene. Styrken og dermed friktionsvinklen for drænede prøver der dilaterer består af den karakteristiske friktionsvinkel og dilationsvinklen. Ved dilation skal der energi til at flytte kornene, og dilation er således afhængig af den relative lejringstæthed. Den karakteristiske friktionsvinkel er den laveste friktionsvinkel der kan opnåes for et materiale.

Den karakteristiske linje er fundet ved brug af q-p data for det karakteristiske stadie for alle 8 triaxialforsøg. Det karakteristiske stadie for triaxialforsøg nr. 130811 er vist på figur 22.
Ved brug af de karakteristiske værdier for q og p, som illustreret på figur 22 for forsøg nr. 130811, kan

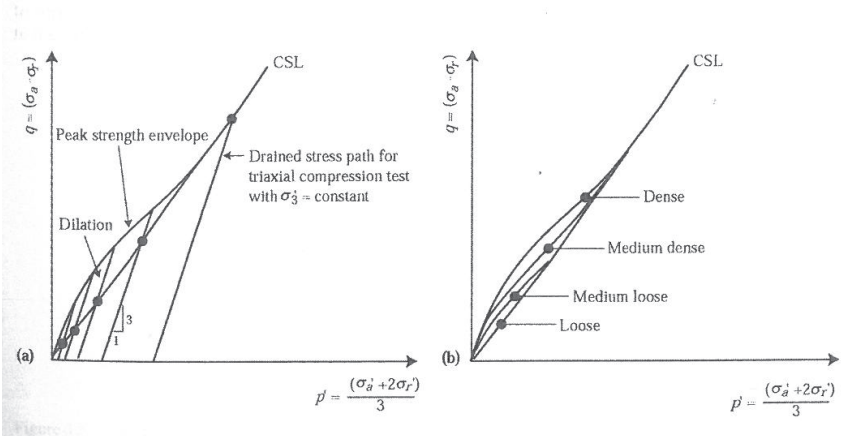


Figure 21: Den karakteristiske linje og illutration af at dilation er afhængig af lejringstætheden. (T.S. Tan, 2006)

den karakteristiske friktionsvinkel φ_{cl} findes. Ved brug af hvor brudkriteriet optegnet i σ_3-q diagram findes den karakteristiske friktionsvinkel φ_{cl} til 25°.

Ved brug af metoden Handy er den karakteristiske friktionsvinkel fundet til $\varphi_{cl} = 26°$.

Ved brug af den karakteristiske friktionsvinkel på 25° kan dilationsvinklen ψ findes til 7°, ved følgende udtryk.

$$\psi = \varphi_{tr}^{'} - \varphi_{cl} \tag{1}$$

5.3.2 Sekant friktionsvinkler samt indflydelse af ler- og sandindhold

Det vurderes, at i en designsituation vil kohæsionen c' give et urealistisk bidrag til bæreevnen for silten. Det vurderes ikke, at det er muligt i en designsituation, at opnå kohæsion i drænet tilstand. Derfor er sekant friktionsvinklen undersøgt. Ved bestemmelse af sekant friktionsvinklen antages det, at c'=0 og sekant friktionsvinklen findes ved optegning af brudkriteriet for hvert triaxialforsøg ved brug af Mohrs cirkel for hvert enkelt forsøg som vist på figur 23.

Sekant friktionsvinklen for hver testet prøve er vist i tabel 7. I tabel 7 ses sekantfriktionsvinklerne samt ler- og sandindholdet for prøverne inddelt efter σ_3 idet styrken er spændingsafhængig. Det ses i tabel 7 at friktionsvinklen er spændingsafhængig.
Det er undersøgt, hvilken indflydelse ler- og sand indholdet i Dronninglund silten har på friktionsvinklen. Dette er gjort ved at sammenligne sekant friktionsvinklen med ler- og sandindholdet for hvert forsøg.

På figur 24 og 25 er friktionsvinklen for hvert triaxialforsøg plottet afhængig af henholdsvis ler- og sandindholdet i prøverne. Der er derefter lavet lineær regression for sekant friktionsvinklen afhængig af henholdsvis ler- og sandindhold for hvert spændingsinterval.

På figur 24 og 25 ses det, at friktionsvinklen er afhængig af spændingstilstanden. Det ses også at

Kammer-tryk σ_3 kPa	Forsøg nr.	Sekant friktions-vinkel φ_s [°]	Ler-indhold [%]	Sand-indhold [%]
50	130807	40	8	43
	130809	41	6	50
100	130801	32	10	21
	130803	37	5	56
	130811	34	9	46
200	130802	34	13	13
	130808	35	8	42
	130810	33	16	32

Table 7: Sammenhæng mellem friktionsvinkel, spændingstilstand samt ler- og sandindhold

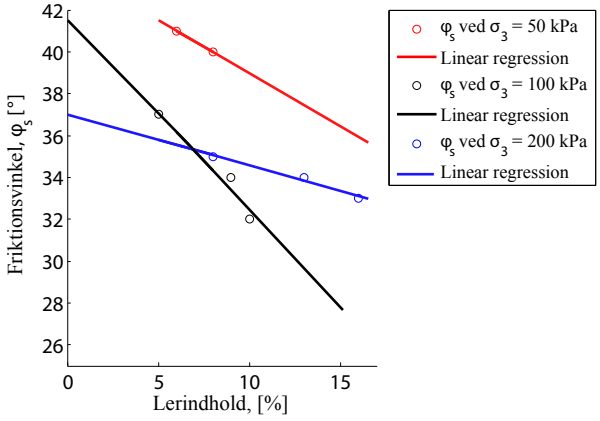


Figure 24: Friktionsvinklen afhængig af lerindholdet.

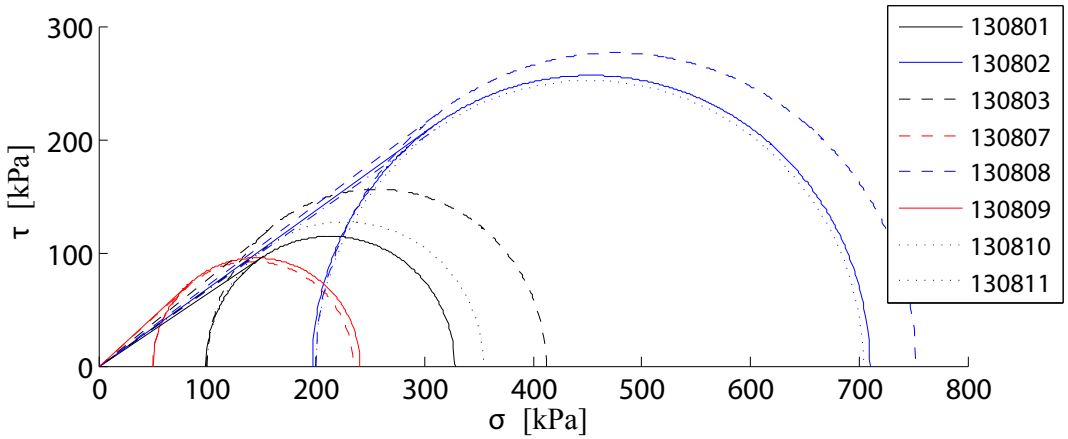


Figure 23: Mohrs cirkler. Sekant friktionsvinkel tolket for hvert enkelt triaxialforsøg ved antagelse af c=0.

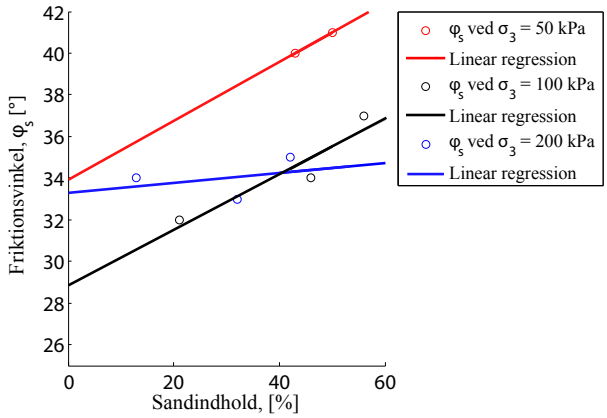


Figure 25: Friktionsvinklen afhængig af sandindholdet.

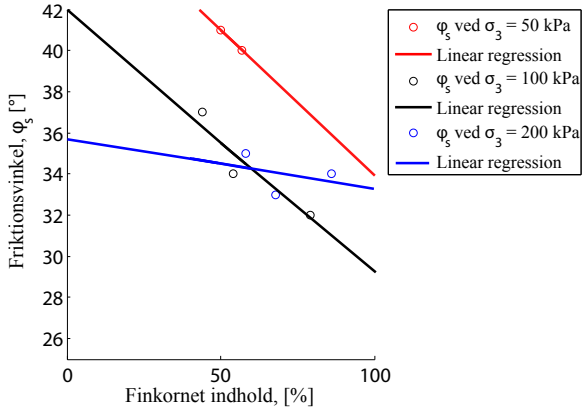


Figure 26: Friktionsvinklen afhængig af indhold af kornstørrelser mindre end 0,063 mm, benævnt finkornet materiale.

friktionsvinklen for Dronninglund silten vokser ved mindre lerindhold og større sandindhold. Tillige ses det, at friktionsvinklen for Dronninglund silten bliver mindre ved et voksende indhold af ler og mindre sandindhold.

Friktionsvinklen kan også beskrives ved silt- og lerindhold samlet, det vil sige indhold af kornstørrelse mindre end 0,063 mm, dette benævnes finkornet indhold i det følgende. På figur 26 ses sekant friktionsvinklen som funktion af finkornet indhold for hver spændingstilstand, der er udført forsøg for.

5.3.3 Den relative lejringstætheds indflydelse på friktionsvinklen

Det er nu fastslået, at friktionsvinklen for Dronninglund silt er styret af spændingstilstanden. Det formodes, at friktionsvinklen også er styret af lejringstætheden. Ved undersøgelse af sammenhæng mellem friktionsvinkel og den relative lejringstæthed er der ikke fundet en overbevisende tendens. Det formodes dog stadig, at friktionsvinklen er afhængig af lejringstætheden, men for at bevise dette for silt vil det kræve flere forsøg.

Undersøgelse af sammenhæng mellem friktionsvinklen og lejringstætheden er vist i appendiks A.9.

5.4 Undersøgelse af kohæsionens indflydelse på friktionsvinklen

Ved tolkning af triaxialforsøgene findes der kohæsion på 12 kPa, 14 kPa og 34 kPa men det vurderes, at i en designsituation vil det ikke være retvisende, at kohæsion bidrager til den drænede styrke. Hvis kohæsionen c'=0 ville dette betyde en stejlere kurve i pq diagrammet som vist på figur 20, og dette ville betyde, at der ville opnås en højere friktionsvinkel. Derfor er friktionsvinklen ved c'=0 undersøgt ved at tvinge skæring med q-aksen i 0. Dette gøres som et studie og er således ikke en del af nogen gense metoder. På figur 27 ses brudkriteriet fundet ved Handy hvor brudkriteriet er tvunget igennem punkt $(0, 0)$. Friktionsvinklen er fundet til 40° ud fra brudkriteriet vist på figur 27.

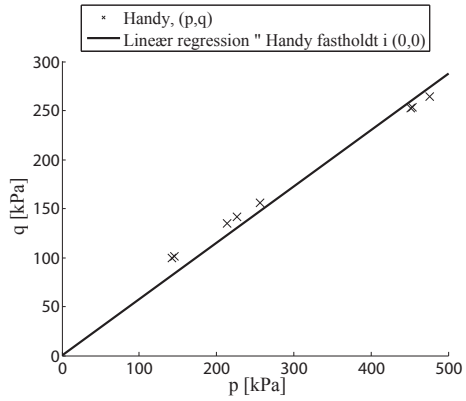


Figure 27: Studie hvor brudkriteriet fundet ved Handy er tvunget til skæring med q-aksen i 0

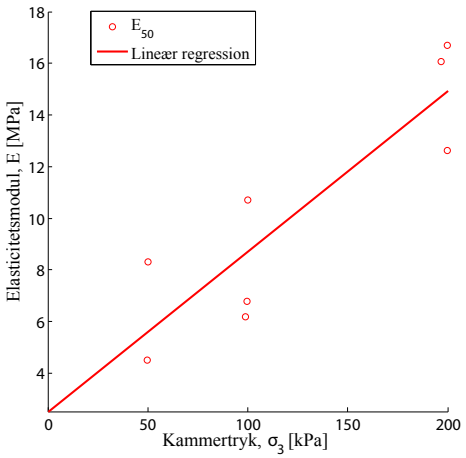


Figure 28: Elasticitetsmodulet E_{50} afhængig af kammertrykket σ_3.

5.5 Elasticitetsmodul

Elasticitetsmodulet er estimeret ved brug af figur 14. E_{50} er fundet ved at tage 50% af den maksimale værdi for deviatorspændingen q og den tilhørende tøjning ε_1 samt startværdierne og således lave en ret linje. Elasticitetsmodulet for af- og genbelastning, E_{ur}, er fundet ved brug af figur 14 for de forsøg, hvor der er udført af- og genbelastning. E_{50} og E_{ur} for de respektive kammertryk er vist i tabel 8.

Forsøg nr. nr.	Kammer-tryk [kPa]	E_{50} [MPa]	E_{ur} [MPa]
130801	100	6	-
130802	200	16	-
130803	100	10	-
130807	50	4	40
130808	200	16	119
130809	50	8	42
130810	200	12	173
130811	100	6	45

Table 8: Elasticitetsmoduler

På figur 28 er elasticitetsmodulet afbildet afhængig af kammertrykket. Ved stigende kammertryk vil jorden komprimeres og derved få en større stivhed. Elasticitetsmodulet E_{50} øges ved voksende kammertryk som vist på figur 28. Elasticitetsmodulet er spændingsafhængig og det er derfor nødvendigt, at kende spændingstilstanden hvis det ønskes at finde elasticitetsmodulet.

6 Konklusion

Ved tolkning konsolideringsforsøg på Dronninglund silten fandtes en arbejdskurve der ikke var retlinjet i logaritmisk afbildning. Arbejdskurven for Dronninglund silten er således ikke som den for normalkonsolideret ler, hvor kurven bliver retlinjet, efter in situ spændingen er opnået. Arbejdskurven for Dronninglund silten mindede om sands, da der opstod store tøjninger ved nybelastning (Jacobsen, 1993).

Spændings- og tøjningsforløbet viser ikke en tendens til en specifik opførsel. Tre triaxialforsøg viste, at Dronninglund silten udviste work-softening. For de to triaxialforsøg udført med det laveste kammertryk ses det, at efter maksimal spænding er opnået fortsætter tøjningerne uden nogen ændring i spændingen, og udviser således plastisk opførsel. For de resterende tre triaxialforsøg ses der en marginal stigning i spændingen under tøjning, hvilket kunne indikere work-hardening, men da stigningen er marginal tolkes det, at Dronninglund silten ikke udviser work-hardening opførsel men, at disse prøver viser plastisk opførsel.

Dronninglund silten viste en tydelig tendens i tøjningsforløbet, idet den først komprimerede sig og dernæst dilaterede. Vandmætningen af prøven har en betydning for volumeændringen af prøven, idet to prøver med utilstrækkelig vandmætning viser støj på kurven. Det skyldes at det ikke kun er jord og vand der komprimeres men også luft, og det er luften, der giver støj i målingerne. Dilation er generelt styret af spændingstilstanden σ_3 og lejringstætheden. Ved høje spændingstilstande ses der mindre dilation sammenlignet med prøver der er udsat for en lavere spændingstilstand. Ved sammenligning af den relative lejringstæthed og dilation er der ikke fundet en entydig sammenhæng. For prøver med $\sigma_3 = 50$ kPa er det som forventet, prøven med den højeste relative lejringstæthed der dilaterer mest sammenlignet med den prøve der har en lavere relativ lejringstæthed. For prøverne med $\sigma_3 = 100$ kPa er det prøven med den højeste relativ lejringstæthed der dilatere mindst sammenlignet med de andre prøver der har en lavere lejringstæthed. For prøver med $\sigma_3 = 200$ kPa er der

ikke fundet nogen sammenhæng mellem dilation og relativ lejringstæthed. Det er fundet, at dilation også er styret af ler- og sandindhold, idet der ved stigende lerindhold sås mindre dilation.

Ved brug af forskellige beregningsmetoder er friktionsvinklen for Dronninglund silten fundet til 32°. Ved brug af disse beregningsmetoder hvor $\varphi_{tr}^{'} = 32°$ fås der et kohæsionbidrag til styrken.

Ved brug af forskellige tolkningsmetoder er der fundet kohæsion c' på 12 kPa, 14 kPa og 34 kPa. I en designsituation vil kohæsionen give et urealistisk stort bidrag til bæreevnen. Det vurderes ikke muligt at opnå kohæsion i Dronninglund silten i en designsituation i drænet tilstand. Derfor er der kigget sekant friktionsvinklen for de forskellige testede prøver. Sekantfriktionsvinklerne varierer mellem 32° - 40°. Ved undersøgelse af sekant friktionsvinklerne ses det, at friktionsvinklen for Dronninglund silten er afhængig af spændingstilstand samt indhold af ler og sand. Det formodes, at friktionsvinklen er afhængig af lejringstæthed således, at ved høj lejringstæthed skulle der ses en større friktionsvinkel sammenlignet med en prøve med lavere lejringstæthed og samme σ_3. Friktionsvinklen er afhængig af ler og sandindhold, for prøver med lavt lerindhold og højt sandindhold sås en høj friktionsvinkel. Ved prøver med højt lerindhold og lavt sandindhold sås en mindre friktionsvinkel. Ved fastsættelse af friktionsvinklen for silt skal der således tages højde for spændingstilstand samt ler- og sandindhold. Det formodes at lejringstætheden også påvirker friktionsvinklen, men for at påvise dette skal der udføre flere forsøg.

I nutidens praksis fastsættes silts styrkeparametre oftest ved at antage en friktionsvinkel som lers på 30° og en kohæsion lig 0 som sands, dette vil i nogle tilfælde være konservativt. Ved udførelse og tolkning af triaxialforsøg på Dronninglund silt er der fundet en friktionsvinkel på minimum $\varphi_{tr}^{'} = 32°$. Derfor tyder det på, at friktionsvinklen for silt kunne hæves over de 30°, hvis der blev udført triaxialforsøg til at fastlægge silten styrke.

Friktionsvinklen er fundet til minimum $\varphi_{tr}' = 32°$ og regnes der i den plane tilstand, tilskrives der i Danmark oftest lidt større modstandsevne mod brud. Dette gøres fordi der i den plane tilstand er en begrænsning på tøjninger ε_2, som i gennemsnit skal være nul. I dansk praksis tages der højde for dette ved, at indføre begrebet den plane friktionsvinklen φ_{pl}', som findes ved at ligge 10% til den triaxialt målte friktionsvinkel φ_{tr}' (N. K. Ovesen, 2007). Dette forhold ville betyde en yderligere øgning af friktionsvinklen i forhold til de oftest konservativt fastsatte 30°.

References

B. N. Nielsen, **2014**. F. S. Eriksen og N. Okkels B. N. Nielsen. *Bulletin 16. Silt.* Dansk Geoteknisk Forening, 2014.

DS, **2004**. Dansk Standard DS. *DS/CEN ISO/TS 17892-4. Geoteknisk undersøgelse og prøvning - Laboratorieprøvning af jord - Del 4: Bestemmelse af fordelingen af partikelstørrelser.* 1 udgave. Dansk Standard, 2004.

G. Larsen, **1995**. mf. G. Larsen. *Bulletin 1. Vejledning i Ingeniørgeologisk prøvebeskrivelse.* Revison 3. februar 2009. Dansk Geoteknisk Forening, 1995.

Handy, **1981**. R.L. Handy. *Linearizing Triaxial Test Failure Envelopes*, 1981.

Jacobsen, **1993**. M. Jacobsen. *Lærebog i Videregående Geoteknik 2. Sætninger i jord.* 1. Edition. Aalborg Universitet, 1993.

Mortensen, **2014**. M. K. Mortensen. *Undersøgelser for fastlæggelse af silt's opførsel og styrkeparametre.* 2014.

N. K. Ovesen, L. Fuglsang, **2007**. G. Bagge N. K. Ovesen, L. Fuglsang. *Lærebog i Geoteknik.* 1 udgave, 1 oplag 2007. Polyteknisk Forlag, 2007.

R. D. Holtz, **1981**. W. D. Kovacs og T. C. Sheahan R. D. Holtz. *An introduction to geotechnical engineering.* ISBN-10: 0-13-701132-6, 2. Edition. PEARSON, 1981.

R. Poulsen, L. B. Ibsen, **2012**. B. N. Nielsen R. Poulsen, L. B. Ibsen. *Difficulties Regarding Determination of Plasticity Index of Silty Soils by use of Casagrande and Fall Cone Methods.* Dansk Geoteknisk Forening, Copenhagen, Denmark, Vol. 1, 199–206, 2012.

T.S. Tan, K.K. Phoon, **2006**. D.W. Hight S. Leroueil T.S. Tan, K.K. Phoon. *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils.* ISBN: 978-90-5809-538-1, volume 1. Taylor and Francis Balkema, 2006.

Tolkning af friktionsvinklen ved CPT i Dronninglung silt og friktionsvinklen for Dronninglund silt fundet ved triaxialforsøg

Maria Krogh Mortensen[1]

Department of Civil Engineering, Aalborg University

Abstract

Der er udført og tolket drænede triaxialforsøg på Dronninglund silt. Resultaterne fra triaxialforsøgene udført på intaktprøver sammenlignes med faktiske in situ forsøg, CPT forsøg. Det undersøges, hvorvidt styrkeparametrene fundet ved triaxialforsøg kan understøtte de styrkeparametre, der kan findes ved tolkning af CPT forsøg.
CPT forsøgene i Dronninglund silten er udført med en standard nedtrængningshastighed på 20 mm/s±5, og denne nedtrængningshastighed ville i sand eller ler svare til henholdsvis fuld drænet eller udrænet tilstand. CPT foretaget i silt med en standard nedtrængningshastighed giver en delvis udrænet tilstand (T. Lunne and Powell, 1997). Friktionsvinklen der tolkes ud fra CPT med en nedtrængningshastighed på 20 mm/s±5 sammenlignes med den drænede friktionsvinkel fundet ved triaxialforsøg. Der er tolket friktionsvinkler ved brug af Schmertmanns diagram og Sennest.

Schmertmanns tolkning af CPT er baseret på CPT i sand, og er derfor en teori der dækker den drænede tilstand. Denne tolkning gav en generel overestimering af friktionsvinklen for Dronninglund silten som formodet. Det er ved tidligere undersøgelser af Dronninglund silten konstateret, at sænkes nedtrængningshastigheden således nedtrængningen foregår drænet, stiger spidsmodstanden (R. Poulsen, 2013). Med en øgning af spidsmodstanden ville, der kunne tolkes større friktionsvinkler, og derved ville Schmertmanns teori overestimere friktionsvinklen yderligere.

Sennest angiver nogle friktionsvinkler afhængigt af spidsmodstanden for silt, der kan bruges som vejledende værdier. Ved at sammenholde spidsmodstanden fra CPT og friktionsvinklen tolket fra triaxialforsøg i Dronninglund silt, kan tolkning af friktionsvinkler i Dronninglund silt sammenlignes med de vejledende friktionsvinkler Sennest angiver. De friktionsvinkler der tolkes for Dronninglund silten fra triaxialforsøg ligger tæt på de friktionsvinkler Sennest angiver. Det vurderes, at de vejledende værdier Sennest angiver, giver et fornuftigt estimat for tolkning af friktionsvinklen i Dronninglund silt.

1 CPT og triaxialforsøg

Der er udført CPT ved forskellige nedtrængningshastigheder for at undersøge, hvornår silten opfører sig drænet og udrænet. I dette projekt fokuseres der på CPT fortaget med standard nedtrængningshastighed på 20 $mm/s \pm 5$. Der er foretaget 3 CPT forsøg med standard nedtrængningshastighed, og disse er benævnt CPTs2a2, CPTs2b4 og CPTs2c2, hvilket refererer til serieområde 2 og række a, b og c (R. Poulsen, December 2011). Alle koter refererer til Dansk Vertikal Reference, DVR90.



Figure 1: Situationsplan over jordbundsundersøgelser.

På figur 1 ses en situationsplan for de boringer og CPT forsøg der er anvendt. I serieområdet S2 er der både udtaget intaktprøver og foretaget CPT, som vist på figur 1. I serieområde 4 i boring S4B2 er der også udtaget intaktprøver, som er brugt i projektet. Da de to serieområder er beliggende tæt på hinanden, vurderes det, at CPT forsøgene er repræsentative for alle boringer.

Resultaterne fra CPTs2b4 er vist på figur 2. På figur 2 ses den korrigerede spidsmodstand, overflademodstanden, poretryk og friktionsforhold afhængig af koten. Spidsmodstanden er korrigeret for ulige areal effekter på spidsen ved følgende (T. Lunne and Powell, 1997):

$$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - a) \tag{1}$$

hvor q_c er den målte spidsmodstand, u_2 er poretrykket bag spidsen, og a er spidsens arealforhold som for disse tests er 0,68 (R. Poulsen, December 2011).

Det ses på figur 2, at det er svært at tolke en

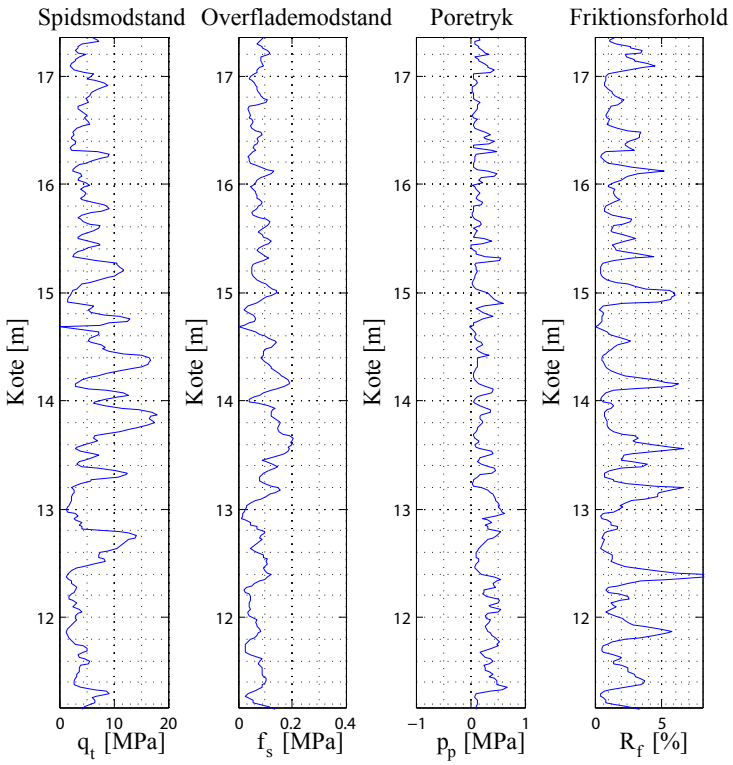


Figure 2: Spidsmodstand, overflademodstanden, poretryk og friktionsforhold for CPTs2b4.

lagdeling ved hjælp af CPT forsøget, idet værdierne varierer meget i dybden, hvilket er en typisk tendens, når der udføres CPT i silt. Når der træffes silt er den sjældent i ren tilstand, og der vil ofte være mindre sand og lerlag i et siltlag, derfor fås der meget varierende værdier i dybden for CPT forsøg i silt.

Der er udført konsoliderede drænede, CD, triaxialforsøg på intaktprøver af Dronninglund silt fra nærtliggende boringer (M. K. Mortensen, 2014). De intaktprøver der er anvendt til triaxialforsøg og de respektive dybder, er vist i tabel 1.

Triaxial-test nr.	Intakt-prøve nr.	Dybde [m u.t.]	Kote DVR90 [m]
130801	62	11,30	11,17
130802	62	11,23	11,24
130803	68	7,14	15,64
130807	71	10,22	12,56
130808	71	10,10	12,68
130809	56	5,27	17,20
130810	56	5,11	17,36
130811	56	5,19	17,28

Table 1: Intaktprøver der benyttes til triaxialforsøg. Koter er angivet for bunden af prøven der er anvendt til triaxialforsøg

I den nærmeste boring, S2B2, hvis intaktprøver er anvendt til triaxialforsøg, er der truffet silt fra kote 19,6 m til 11,0 m. Der er udført triaxialforsøg på intaktprøver i intervallet fra kote 17,36 til 11,17 m, hvorfor der fokuseres på dette interval i denne artikel.

2 Friktionsvinkler fundet ved brug af tolkning af CPT med Schmertmanns diagram

Schmertmanns tolkning af CPT er baseret på sand. CPT udført i sand opfører sig generelt drænet, og derfor ønskes tolkningsmetoden sammenlignet med den friktionsvinkel der tolkes ved de drænede triaxialforsøg.

For at tolke friktionsvinklen med Schmertmanns diagram skal den relative lejringstæthed anvendes. Ud fra CPT forsøgene er den relative lejringstæthed fundet ved brug af Baldi et al. (1986). Ved brug af Schmertmanns teori er der valgt "Well-graded gravel-sand-silt" for at finde friktionsvinklen. På figur 3 ses friktionsvinklen tolket med Schmertmanns diagram som funktion af koten. Der er, for samme lagdeling som den der er tolket for spidsmodstanden, tolket minimums og maksimums værdier for friktionsvinklen i lagene. Der er tolket samlet minimums og maksimums værdier for friktionsvinklen tolket ved de tre CPT forsøg ved at udelukke værdier fra CPT forsøg der er anderledes end de andre. Der opnås således minimums og maksi-

mums værdier af friktionsvinklen fra de tre CPT forsøg samlet. Ved brug af minimum og maksimums værdier for friktionsvinklen i hvert lag er der fundet en middelværdi for friktionsvinklen i de respektive lag som vist på figur 3.

For at sammenligne friktionsvinkler tolket fra CPT med friktionsvinkler tolket ved triaxialforsøg er friktionsvinklen optegnet som funktion af koten på figur 4. På figur 4 kan friktionsvinklen tolket fra CPT forsøg og friktionsvinklen fra triaxialforsøg sammenlignes på forskellige måder. Sekant friktionsvinklerne φ_s fundet for hvert triaxialforsøg ved antagelse af c'=0, er optegnet på figur 4. Sekant friktionsvinklerne kan sammenlignes med den middelværdi for friktionsvinklen tolket med Schmertmann for hvert tolket jordlag. Det ses, at for spændinger på $\sigma_3 = 100$ kPa - 200 kPa overestimeres friktionsvinklen ved brug af Schmertmanns tolkning af friktionsvinklen.

For at sammenholde friktionsvinklen fra CPT med den friktionsvinkel der er tolket fra alle triaxialforsøg, φ_t, er friktionsvinklen fra CPT optegnet for hele dybden, hvor der er udført triaxialforsøg. På figur 4 er middelværdien for friktionsvinklen fra CPT, optegnet over hele dybden ud fra de middelværdier af friktionsvinklen for den tolkede lagdeling. Punkterne markeret med et kryds er friktionsvinklen fundet ud fra triaxialforsøg, der er kørt på Dronninglund silt fra samme intaktrør, og er tolket med Handy (Handy, 1981). Punkterne repræsenterer således 2 til 3 forsøg ved forskellige σ_3, som er anvendt til optegning af et brudkriterie. Friktionsvinklen tolket med metoden Handy for alle 8 triaxialforsøg er optegnet for det interval, der er kørt triaxialforsøg på nemlig fra kote 17,36 m til kote 11,17 m.

Den optegnede friktionsvinkel fra CPT fundet med Schmertmanns diagram har intet kohæsionsbidrag, idet Schmertmanns teori er baseret på sand. Friktionsvinklerne fundet ved triaxialforsøg med metoden Handy, φ_t, har i teorien et kohæsionsbidrag. Idet friktionsvinklen, φ_t, ved triaxialforsøg i teorien har et kohæsionsbidrag, og friktionsvinklen tolket med Schmertmanns diagram foreskriver c'=0, er en egentlig sammenligning svær. Den optegnede friktionsvinkel fra alle triaxialforsøg kan derfor måske være større, idet c'=0 kunne give en stejlere kurve for brudkriteriet. Ved en simpel sammenligning af friktionsvinklen fra triaxialforsøg, $\varphi_t^{'}$, og CPT ses det på figur 4, at Schmertmanns tolkning af friktionsvinklen giver en overestimering af friktionsvinklen. Ved denne simple sammenligning kan følgende modificering af friktionsvinklen fundet ved CPT med Schmertmanns teori, $\varphi_{CPT\ Schmertmann}^{'}$, opstilles for Dronninglund silt.

$$\varphi_{tr}^{'} = \varphi_{CPT\ Schmertmann}^{'} - \theta \qquad [^\circ] \quad (2)$$

θ er for Dronninglund silt 6°.

Ved definering af styrken ved $\varphi_t^{'}$ indeholder styrken i teorien et kohæsionsbidrag, hvorfor modificeringen i ligning (2) af den tolkede friktionsvinkel fra CPT ved Schmertmann må være på den sikre side. Grunden, til at det er på den sikre side, er at ved c'=0 vil brudkriteriet blive stejlere og dermed ville $\varphi_t^{'}$ blive større. I stedet for at sammenligne φ_t med den tolkede friktionsvinkel fra CPT kan sekant friktionsvinklerne, φ_s, anvendes.

Ud fra sekant friktionsvinklerne hvor c'=0 som også er optegnet på figur 4, kan det også ses, at ved tolkning af friktionsvinklen fra CPT ved Schmertmann bliver friktionsvinklen overestimeret.

Der er for alle de prøver, der er anvendt til triaxialforsøg udført bestemmelse af den relative lejringstæthed. Der er ikke fundet en tydelig sammenhæng mellem friktionsvinklen og den relative lejringstæthed. For at finde en egentlig sammenhæng mellem lejringstæthed og friktionsvinklen skal der udføres flere forsøg. Men for at undersøge Schmertmanns teori nærmere er sekant friktionsvinklen for hver triaxialforsøg plottet afhængig af lejringstætheden i Schmertmanns diagram. Schmertmann opdeler i 4 jordtyper, der har hver deres grænsekurve som vist på figur 5. På figur 5 ses Schmertmanns diagram hvorpå værdierne for Dronninglund silten er plottet på.

På figur 5 ses det, at Schmertmanns diagram ikke egner sig til tolkning af friktionsvinkler for silt, idet friktionsvinklen overestimeres for spændinger σ_3 større end 100 kPa.

Schmertmanns teori for tolkning af CPT er udviklet ud fra CPT foretaget i sand, hvorfor det også må forventes, at teorien giver en overestimering af friktionsvinklen for silt. Yderligere må det formodes, at være en teori der dækker det drænede tilfælde, da sand oftest opfører sig drænet. Dette er grunden til, at teorien anvendes til en sammenligning med drænede triaxialforsøg på Dronninglund silt.

CPT forsøgene i Dronninglund silt udført med en nedtrængningshastighed på 20 mm/s±5 er udført under delvist udrænede forhold, idet dræningen først sker ved en nedtrængningshastighed på 1 mm/s (R. Poulsen, 2011). Sænkes nedtrængningshastigheden således nedtrængningen foregår drænet, stiger spidsmodstanden. For Dronninglund silt er der i tidligere studier formuleret en modificering af den korrigerede spidsmodstand målt ved 20 mm/s±5, således denne svarer til det drænede tilfælde. Derved fås der en forøgning af spidsmodstanden målt ved 20 mm/s±5, således den svarer til det drænede tilfælde (R. Poulsen, 2013). Ved en øget spidsmodstand, som der ville opnås ved lavere nedtrængningshastighed og derved drænet tilstand, ville der tolkes større friktionsvinkler ved brug af Schmertmann og derved fås en yderligere overestimering af friktionsvinklen.

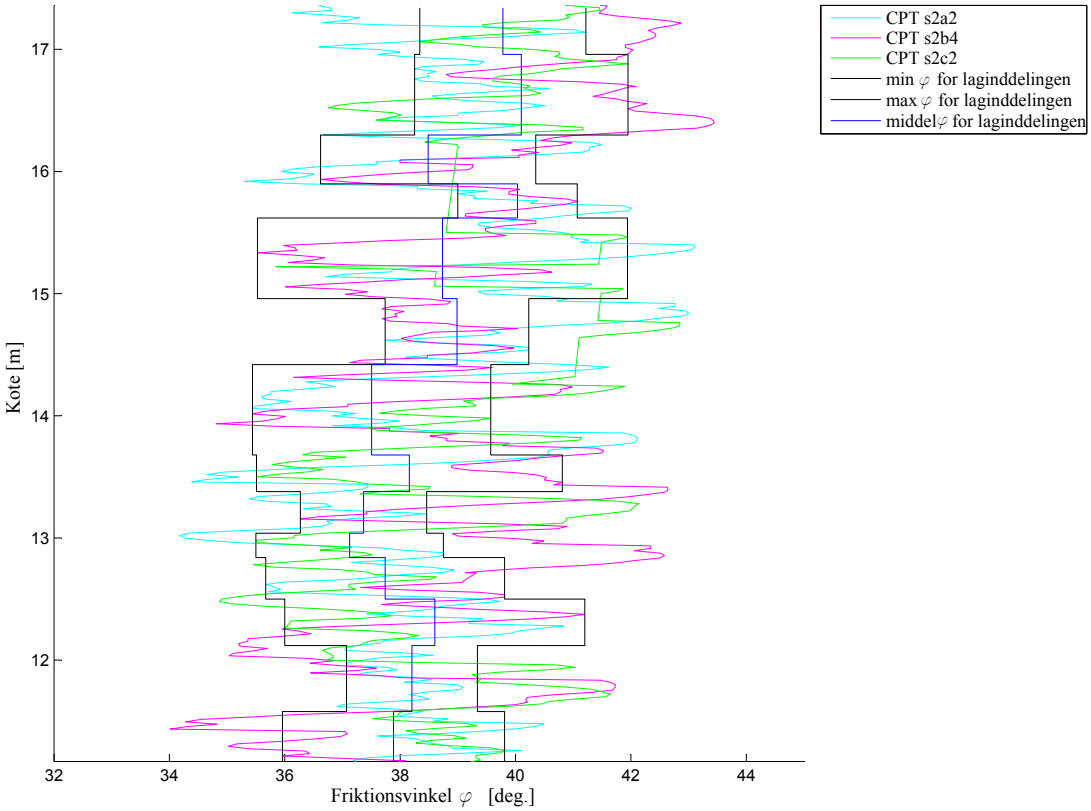


Figure 3: Friktionsvinkel tolket med Schmertmann som funktion af koten. Tolkning af minimum og maksimale friktionsvinkler for den tolkede lagdelling.

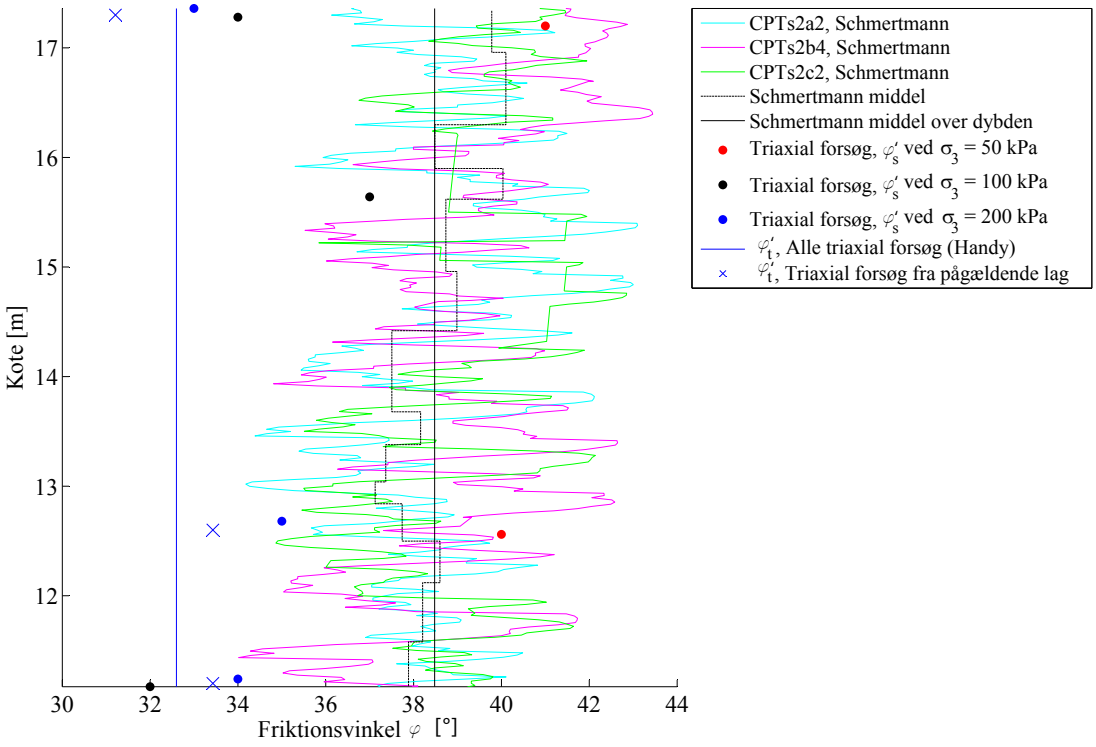


Figure 4: Friktionsvinkel som funktion af koten.

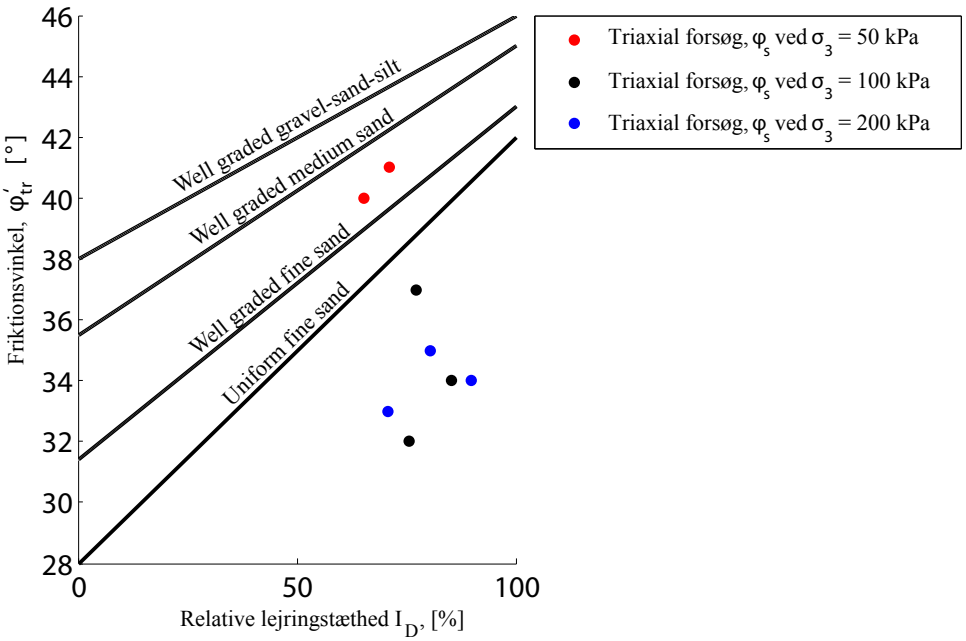


Figure 5: Friktionsvinkler og relative lejringstætheder optegnet i Schmertmanns diagram

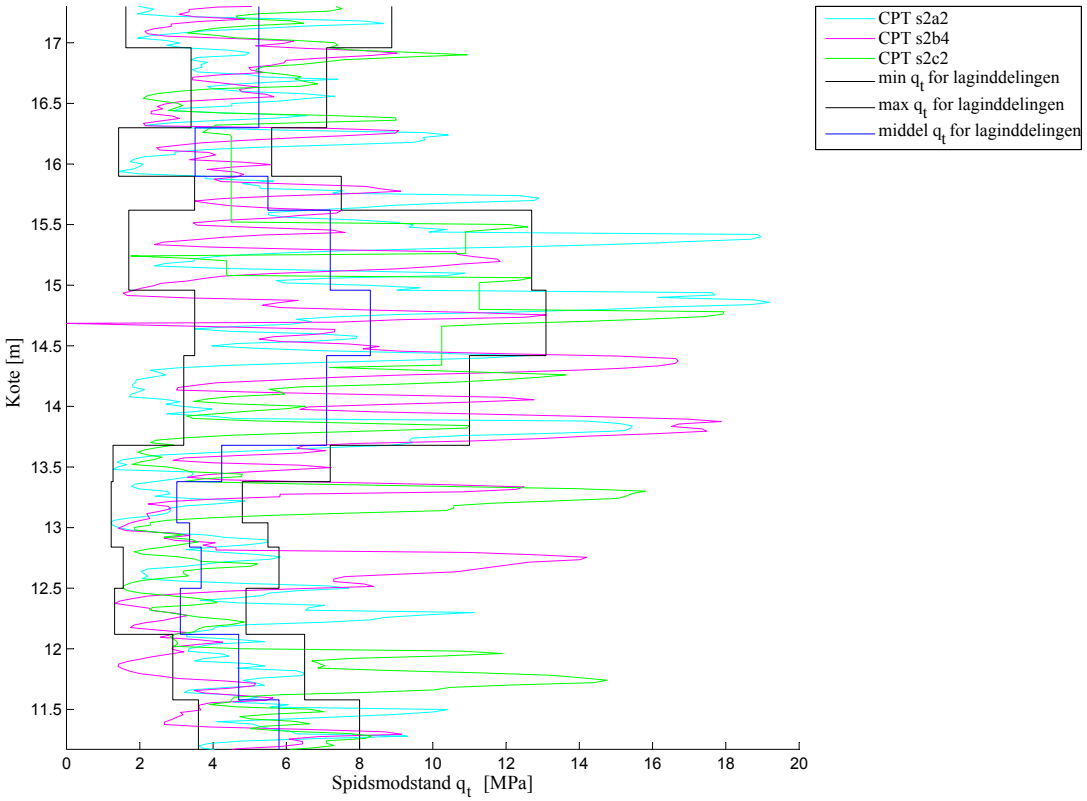


Figure 6: Spidsmodstand målt ved CPT samt tolkning minimum og maksimum for spidsmodstanden.

3 Tolkning af CPT i Dronninglund silt og for silt generelt

3.1 Tolkning af spidsmodstanden og laginddeling i CPT

På figur 6 er spidsmodstanden for de tre CPT forsøg optegnet. Endvidere er der ud fra spidsmodstanden lavet en tolkning af laginddelingen styrkemæssigt for silten. Ud fra laginddelingen er der tolket en minimums og maksimum værdi for spidsmodstanden således, der kan findes en middelværdi for spidsmodstanden i de respektive lag. Værdierne for maksimum og minimum er tolket ved, at udelukke værdier der er anderledes end de andre.

3.2 Tolkning af friktionsvinklen i CPT på Dronninglund silt og ved generel brug af Sennest teori

Sennest et al. (1988) har for silt angivet nogle vejledende værdier for friktionsvinklen afhængig af spidsmodstanden. Sennest inddeler silt i intervaller der hedder silt soft, silt medium og silt stiff. De grænsekurver som Sennest angiver for friktionsvinklen er optegnet i figur 8.

Det ønskes, at sammenholde spidsmodstanden fra CPT med friktionsvinklen fundet ved triaxialforsøg. På figur 6 kan middelværdien for spidsmodstanden, q_t, findes for de dybder, hvorfra intaktprøverne, der er anvendt til triaxialforsøgene, er udtaget. Således kan et udtryk for friktionsvinklen afhængig af spidsmodstanden findes for Dronninglund silten.

For at finde friktionsvinklen for en given dybde kræver dette mindst to triaxialforsøg fra omtrentligt samme dybde, idet disse bruges til optegning af brudkriteriet. I tabel 2 er triaxialforsøgene inddelt ud fra den dybde prøven er udtaget i. I tabel 2 ses endvidere den tolkede middelværdi for spidsmodstanden i de pågældende dybder fra figur 6.

Triaxial-forsøg nr.	Intakt-prøve nr.	Kote DVR90 [m]	Spids-modstand q_t [MPa]
130801 - 02	62	11,2	5,80
130807 - 08	71	12,6	3,67
130809 - 11	56	17,3	5,25

Table 2: Spidsmodstanden for de intaktprøver der er brugt til triaxialforsøg. Koten for triaxialforsøgene er omtrentlig, idet forsøgene selvsagt ikke er udført på jord fra samme dybde.

På figur 7 er brudkriteriet optegnet med metoden Handy for de tre triaxialforsøg der er udført på silt som er udtaget omkring kote 17. Ud fra dette kan friktionsvinklen findes for netop denne dybde. Brudkriteriet er også optegnet for de to triaxialforsøg der er udført på silt fra kote 11 m og de to fra kote 12 m, og således er friktionsvinklen fundet for de respektive dybder.

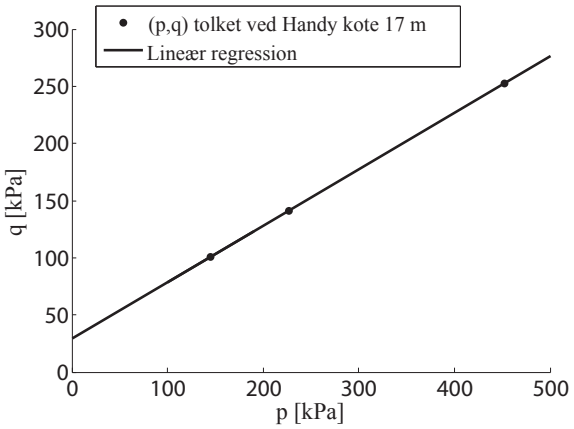


Figure 7: Brudkriteriet optegnet ud fra de tre triaxialforsøg der er udført på Dronninglund silt fra kote 17 m.

For de tre dybder angivet i tabel 2 er triaxialforsøgene tolket med Handy. Der er anvendt 2 til 3 triaxialforsøg for hver dybde til optegning af brudkriteriet. Friktionsvinklen fundet ved Handy ved brug af alle 8 triaxialforsøg er 32°.

Friktionsvinklen sammenholdt med spidsmodstanden for de respektive dybder kan give et udtryk for, hvordan friktionsvinklen kan tolkes i Dronninglund silt ud fra CPT. Dette er vist i figur 8.

På figur 8 kan tolkning af CPT i Dronninglund silt, sammenlignes med den tolkning Sennest angiver. Friktionsvinkler for Dronninglund silt fundet ved tolkning af triaxialforsøg, ligger tæt på de grænsekurver for friktionsvinklen som Sennest foreslår. Det vurderes, at Sennests vejledende værdier for silt giver et fornuftigt estimat af friktionsvinklen for Dronninglund silten.

CPT forsøgene udført med standard nedtrængningshastighed i Dronninglund silten er som tidligere nævnt delvist drænede. Modificeres spidsmodstanden målt ved 20 mm/s±5, således den svarer til den, der ville være målt ved en drænet tilstand, ville spidsmodstanden blive større (R. Poulsen, 2013). Friktionsvinklerne der er fundet og vist i figur 8, ville således tilhøre højere spidsmodstande end dem, der er optegnet i figur 8

4 Konklusion

CPT udført med standard nedtrængningshastighed i Dronninglund silt giver en delvist drænet tilstand. Dette er problematisk for tolkningen af styrkeparametre herunder friktionsvinklen, idet tolkningsmetoderne foreskriver enten drænet eller udrænet tilstand. Det er forsøgt, at tolke

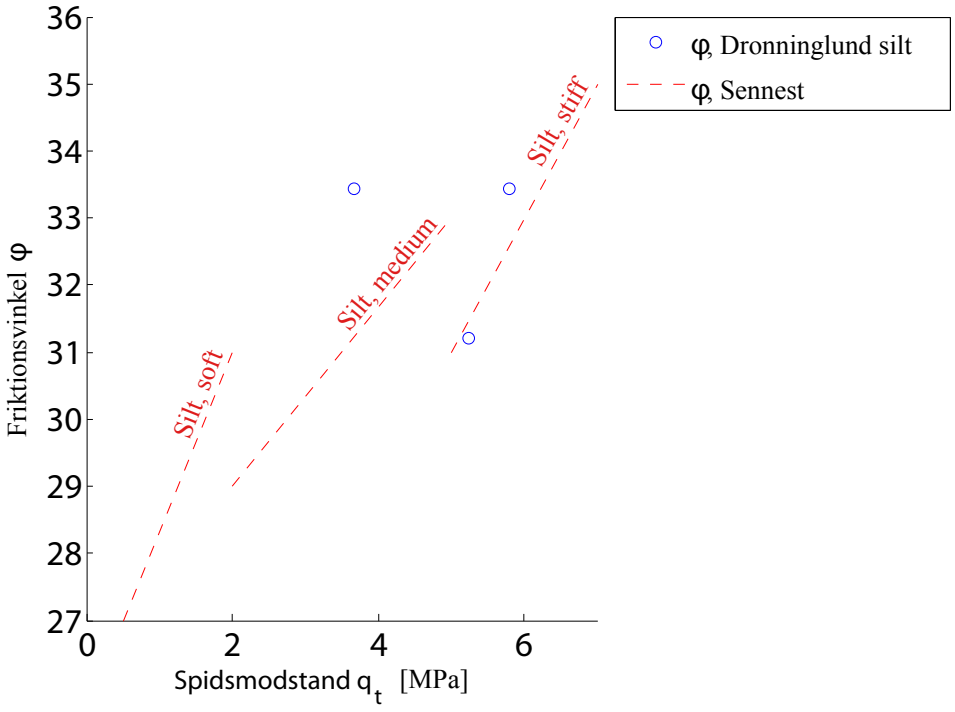


Figure 8: Friktionsvinkel som funktion af spidsmodstanden.

CPT forsøgene som er foretaget med standard nedtrængningshastighed ved forskellige metoder. Dette er gjort for, at undersøge hvilke metoder der eventuelt kan anvendes til tolkning af friktionsvinklen fra CPT i Dronninglund silt. Dette undersøges ved, at sammenligne med de friktionsvinkler der er fundet ved drænede triaxialforsøg.

Ved tolkning af CPT i Dronninglund silt med Schmertmanns diagram som er baseret på det drænede tilfælde, bliver friktionsvinklen generelt overestimeret. For at finde den effektive friktionsvinkel fra triaxialforsøg er der formuleret en modificering af den friktionsvinkel, der kan tolkes i CPT med Schmertmanns diagram, dette er vist i ligning (2).

Friktionsvinklen fundet ved triaxialforsøg er ved drænede forhold. Ved udførelse af CPT i Dronninglund silten med en nedtrængningshastighed på 20 mm/s±5 er der fundet delvist drænede forhold, idet dræningen først sker ved en nedtrængningshastighed på 1 mm/s (R. Poulsen, 2011). Det er ved tidligere undersøgelser af Dronninglund silten konstateret, at sænkes nedtrængningshastigheden således nedtrængningen foregår drænet, stiger spidsmodstanden. For Dronninglund silten er der ved tidligere studier, formuleret en modificering af den korrigerede spidsmodstand målt ved 20 mm/s±5 således denne svarer til det drænede tilfælde. Derved fås der en øgning af spidsmodstanden målt ved 20 mm/s±5, således den svarer til det drænede tilfælde (R. Poulsen, 2013). Tolkes friktionsvinklen fra CPT ved Schmertmann med en øget spidsmodstand ville det resultere i højere friktionsvinkler, i forhold til dem der er fundet ud fra spidsmodstanden, der er målt ved en nedtrængningshastighed på 20 mm/s±5. Hvilket betyder, at Schmertmanns tolkning af CPT i realiteten overestimerer friktionsvinklen mere, end hvad der er vist på figur 4 og 5.

Sennests vejledende værdier for friktionsvinklen afhængig af spidsmodstanden er sammenlignet med de friktionsvinkler og spidsmodstande, der er fundet for Dronninglund silt på figur 8. Ved tolkning af triaxialforsøg fås der friktionsvinkler der ligger tæt på, de værdier Sennest angiver. Det er derved vurderet, at de friktionsvinkler Sennest angiver, giver et godt estimat af friktionsvinklen for Dronninglund silt.

Ved tolkning af friktionsvinklen med Sennest ville en modificeret og øget spidsmodstand svarende til drænet tilstand betyde, at de friktionsvinkler der er fundet, ville tilhøre højere spidsmodstande. Derved vil der for større spidsmodstande, kunne aflæses de samme friktionsvinkler som er vist i figur 8.

References

Handy, **1981**. R.L. Handy. *Linearizing Triaxial Test Failure Envelopes*, 1981.

M. K. Mortensen, L. B. Ibsen, **2014**. B. N. Nielsen M. K. Mortensen, L. B. Ibsen. *Undersøgelse af Dronninglund silts egenskaber og styrkeparametre ved triaxialforsøg.* 2014.

R. Poulsen, **2011**. B. N. Nielsen og L. B. Ibsen R. Poulsen. *Effect of drainage conditions on cone penetration testing in silty soils.* 2011.

R. Poulsen, **2013**. B. N. Nielsen og L. B. Ibsen R. Poulsen. *Correlation between cone penetration rate and measured cone penetration parameters in silty soils.* (18), 603–606, 2013.

R. Poulsen, **December 2011**. B. N. Nielsen og L. B. Ibsen R. Poulsen. *Field Cone Penetration Tests with Various Penetration Rates – Test Results*, December 2011.

T. Lunne and Powell, **1997**. P.K. Robertson T. Lunne and J.J.M. Powell. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice.* ISBN: 0 751 40393 8, 1. Edition. Blackie Academic and Professional, 1997.

DEL IV:

Konklusion

Konklusion

Ved udførelse af triaxialforsøg blev silten tildannet i intakt tilstand i triaxial apparatet. Det forventes, at være mest retvisende at forsøge at beholde silten i intakt tilstand frem for at tildanne en rekonstrueret siltprøve. Det er ved tidligere studier fundet at rekonstruerede siltprøver opfører sig sprødt mens intaktprøver opfører sig duktilt (K. Hoeg, 2000). Endvidere resulterer en rekonstrueret siltprøve i en ændring af spændings- og tøjningshistorien. Der er udarbejdet en manual for tildannelse af intakt siltprøver i triaxial apparat. Ved tildannelse af siltprøverne er der lagt vægt på, at påvirke prøven mindst muligt ved installationen i triaxial apparatet.

Der er tolket tidligere udførte konsolideringsforsøg for, at undersøge om det var muligt at anvende forbelastningsspændingen til fastsættelse af kammertrykket i triaxialforsøgene. Ved tolkning af konsolideringsforsøgene var det ikke muligt at finde en forbelastningsspænding, idet arbejdskurven ikke blev retlinjet i logaritmisk afbildning. Arbejdskurven for Dronninglund silten er således ikke som lers, hvor kurven bliver retlinjet, når in situ spændingen er opnået. Arbejdskurven for Dronninglund silten mindede om sands, hvor der opstår store tøjninger ved nye belastninger.

Spændings- og tøjningshistorien for Dronninglund silten viser ingen tendens, idet der observeres plastisk opførsel og work-softening.
Tøjningsforløbet for Dronninglund silten viser en tydelig tendens, idet den først komprimeres og derefter dilaterer. Det er fundet, at dilation for Dronninglund silten er afhængig af spændingstilstanden σ_3 og lerindholdet. For prøver med et højt lerindhold ses der mindre dilation, sammenlignet med prøver der har et lavere lerindhold. Det formodes, at dilation også er styret af lejringstætheden, men dette er ikke påvist, idet sammenhængen mellem dilation og relativ lejringstæthed ikke viser nogen tendens. For at påvise dette skal, der udføres flere triaxialforsøg og bestemmelse af den relative lejringstæthed.

Friktionsvinklen er tolket ved brug af flere metoder. Ved tolkning med Mohr-Coulomb, Handy og med en metode hvor σ_3-q diagrammet anvendes, findes friktionsvinklen til 32°. Ved disse metoder findes der et kohæsionsbidrag til styrken på hhv. 12 kPa, 14 kPa og 34 kPa. Det vurderes, at i en designsituation vil disse kohæsionsbidrag give et urealistisk bidrag til bæreevnen, og derfor er sekant friktionsvinklerne undersøgt. Sekant friktionsvinklerne er fundet for hvert enkelt triaxialforsøg ved antagelse af c' = 0. Sekant friktionsvinklerne varierer mellem 32°-41°. Det er ved undersøgelse af sekant friktionsvinklerne fundet, at friktionsvinklen for Dronninglund silten er afhængig af spændingstilstanden, ler- og sandindhold. Prøver med et lavt lerindhold og et højt sandindhold har en høj friktionsvinkel, hvorimod prøver med et højt lerindhold og lavt sandindhold har en lavere friktionsvinkel. Det formodes, at friktionsvinklen også er styret af den relative lejringstæthed, men for at påvise dette skal der udføres flere forsøg.

De tolkede friktionsvinkler fra triaxialforsøgene er sammenlignet med forskellige tolkningsmetoder af CPT, idet friktionsvinklerne fundet ved triaxialforsøgene må kunne danne grundlag for tolkning af styrkeparametre fra CPT.
CPT forsøgene der er anvendt i dette projekt, er udført ved standard nedtrængningshastighed på 20 mm/s±5. Nedtrængningshastigheden har betydning for hvilken tilstand jorden bryder i, og for silt svarer en standard nedtrængningshastighed til en delvist udrænet tilstand (T. Lunne, 1997). Dette er problematisk, idet tolkningsmetoderne for CPT forskriver enten drænet eller udrænet tilstand, fordi disse er udviklet ud fra henholdsvis sand og ler.

Ved tolkning af friktionsvinklen for Dronninglund silten fra CPT forsøg ved Schmertmanns diagram bliver friktionsvinklen overestimeret. Ved tidligere undersøgelser af CPT forsøgene er det fundet, at dræningen først finder sted ved en nedtrængningshastighed på 1 mm/s (R. Poulsen B. N., 2011). For Dronninglund silten er det ved tidligere undersøgelser fundet, at ved sænkning af nedtrængningshastigheden stiger spidsmodstanden, hvilket er udtrykt ved en formel for modificering af spidsmodstanden (R. Poulsen B. N., 2013). Modificeres spidsmodstanden således nedtrængningen for CPT svarer til det drænede tilfælde, fås der en øget spidsmodstand i forhold til den der er målt ved standard nedtrængningshastighed. Den øgede spidsmodstand der svarer til det drænede tilfælde betyder, at Schmertmanns teori overestimerer friktionsvinklen yderligere, end hvad der er vist ved brug af CPT forsøg udført ved standard nedtrængningshastighed.

Sennest angiver nogle vejledende værdier for tolkning af CPT i silt. Ved brug af CPT forsøgene og triaxialforsøgene er det undersøgt, hvorvidt friktionsvinklen for Dronninglund silten kan tolkes ved Sennest. Det er fundet, at Sennest vejledende værdier for friktionsvinklen giver et godt estimat for tolkning af friktionsvinklen fra CPT forsøg udført ved standard nedtrængningshastighed i Dronninglund silt.

Perspektivering

Der er i Danmark tradition for at fastsætte de drænede styrkeparametre for silt ved, at antage en friktionsvinkel som lers på $\varphi' = 30^{o}$ og en kohæsion som lers på $c' = 0$. Dette vil i nogle tilfælde være konservativt. Det er ved triaxialforsøg fundet, at for Dronninglund silten er det muligt at hæve friktionsvinklen over de 30°.

For situationen kaldet plane strain, som ofte bruges ved dimensionering af geotekniske konstruktioner, skal tøjninger ud af planet være tilnærmelsesvis lig med nul. Tøjningerne er således begrænset i retningen ud af planet. Derfor kan der i dansk praksis tilskrives lidt større modstandsevne mod brud i den plane tilstand. Dette gøres ved, at bruge begrebet den plane friktionsvinkel φ_{pl} som findes ved, at tillægge 10 % til den triaxialt målte friktionsvinkel (N. K. Ovesen, 2007). Dette ville betyde en yderligere øgning af friktionsvinklen i forhold til de oftest fastsatte 30°.

Det tyder på, at ved udførelse af triaxialforsøg på silt vil det være muligt at hæve friktionsvinklen over de 30°.

Litteraturliste

Handy, R. L. (1981). Linearizing Triaxial Test Failure Envelopes.

Jensen, B. C. (2009). *Teknisk Ståbi.* Nyt Teknisk Forlag.

K. Hoeg, R. D. (2000). Strength of undisturbed versus reconstituted silt og silty sand specimens. *J. Geotech. Geoen-viron. Eng.* , s. 606,617.

N. K. Ovesen, L. F. (2007). *Lærebog i Geoteknik.* Polyteknisk Forlag.

R. D. Holtz, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering.* PEARSON.

R. Poulsen, B. N. (2013). Correlation between cone penetration rate and measured cone penetration parameters in silty soils. *Challenges And Innovations In Geotechnics : Proccedings of the 18th International conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* , s. 603-606.

R. Poulsen, B. N. (2011). Effekt of drainge conditions on cone penetration testing in silty soils. *Symposium Proceedings : 64th Canadian Geotechnical Conference and 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Engineering, 5th Pan-American Conference on Teaching and Learning of Geotechnical Engineering* .

R. Poulsen, B. N. (2012). Field Test Evaluation of Effect on Cone Resistance Caused by Change in Penetration Rate. *NGM 2012 Proceedings :Proceedings of the 16th Nordic Geotechnical Meeting. Vol. 1 Dansk Geoteknisk Forening* , s. 191-198.

R. Poulsen, B. N. (2011). *Field Cone Penetration Tests with Various Penetration Rates - Test Results.* Aalborg University, DCE Technical Reports.

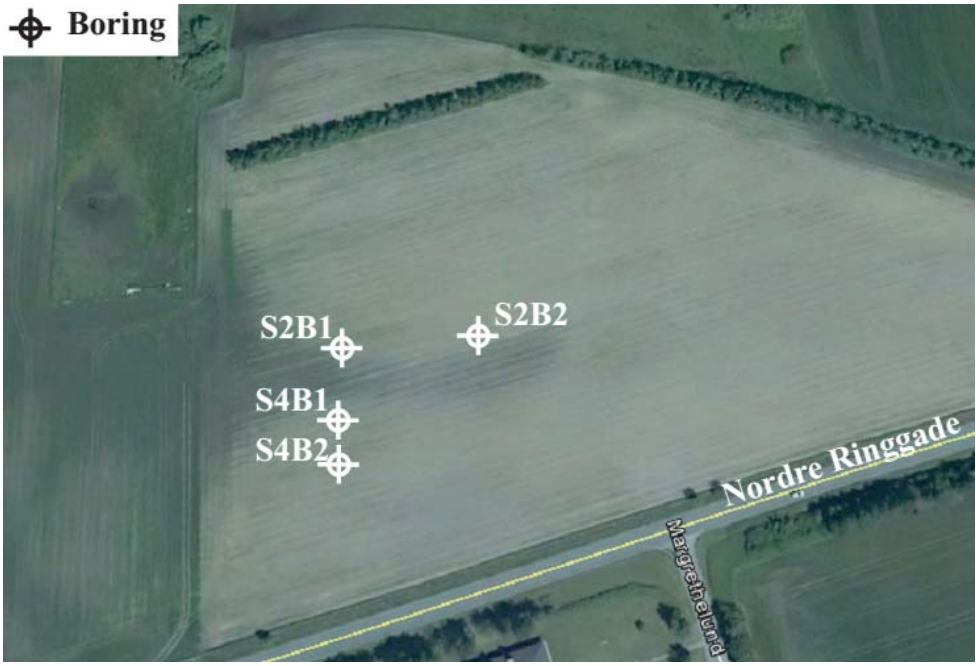
T. Lunne, P. R. (1997). *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice.* Blackie Academic and Professional.

DEL V:

Appendiks

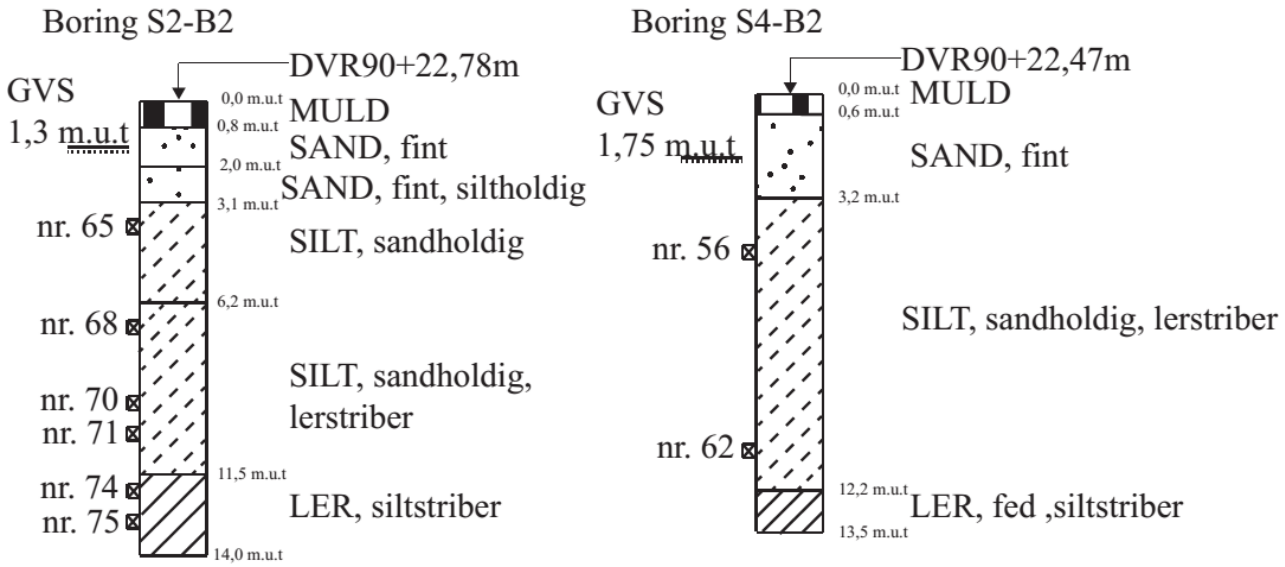
A.1: Boreprofiler

Der er udført 4 boringer benævnt S2B1, S2B2, S4B1 og S4B2. Boringerne er placeret som vist på situationsplanen på Figur 1.



Figur 1: Situationsplan over boringer

I boringerne S2B2 og S4B2 er der udtaget intaktprøver, som er anvendt til triaxialforsøg. Det er derfor disse boringer, der fokuseres på i dette projekt. Boringerne er optegnet på Figur 2.



Figur 2: Boreprofiler. S2B2 og S4B2.

Der er i boring S2B2 truffet silt fra kote 19,68 m til kote 11,28 m. Der er i boring S4B2 truffet silt fra kote 19,27 m til kote 10,27 m. Der er derfor fokuseret på intervallet kote 19,68 m til kote 10,27 m.

A.2: Manual for udførelse af konsoliderede drænede, CD, triaxialforsøg på silt.

Manual for udførelse af konsoliderede drænede, CD, triaxialforsøg på silt

Maria Krogh Mortensen

28-02-2014

Denne manual beskriver hvordan et drænet triaxialforsøg på silt kan udføres. Manualen gennemgår endvidere generelle fremgangsmetoder for triaxialforsøg på AAU, som er anvendt under udførelse af triaxialforsøg på silt.

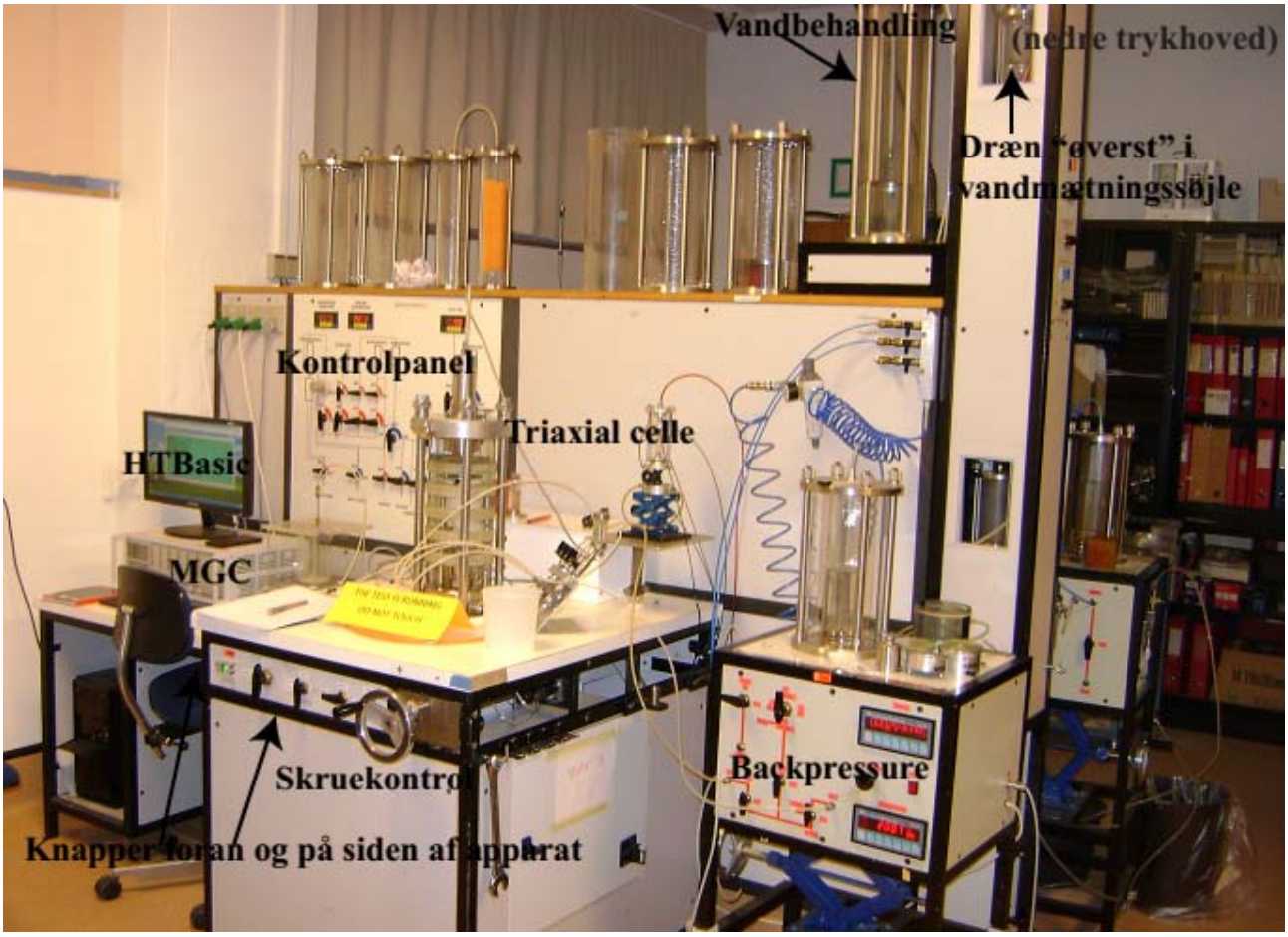
Indhold

1.0 Udførelse af triaxialforsøg på silt 3
1.1 Introduktion 3
1.2 Generelt 4
1.3 Elektronisk udstyr og software 4
1.3.1 MGC 5
1.3.2 HTBasic 5
2.0 Forberedelse af prøve og apparat 6
2.1 Vand koges 6
2.2 Forberedelse af trykhoveder 7
2.3 Tildannelse af prøve 9
2.3.1 Tilslutning af slanger 13
2.3.2 Påførelse af vakuum 14
2.4 Kabel tilslutninger 15
2.5 Flytningstransducere monteres 16
2.6 Montering af glas og kraftramme (stempeltryk) 16
2.7 Indstille nulpunkt for kammertrykket og bagtryk systemet 17
2.8 Vandmætning 19
2.8.1 Prøven vandmættes 19
2.8.2 Systemet vandmættes 19
2.8.3 Etablering af bagtryk 21
2.8.4 Skempton's B 21
3.0 Køre test 22
3.1 Konsolideret drænet forsøg - CD 23
3.1.1 Isotropisk 23
3.1.2 Anisotropisk til brud 24
4.0 Afslutte forsøget 26
4.1 Tømning af celle 26
4.2 Prøven 26
4.3 Rengøring og klargøring til næste test 26

1.0 Udførelse af triaxialforsøg på silt

1.1 Introduktion

Et overblik over triaxial apparatet kan ses på Figur 1.

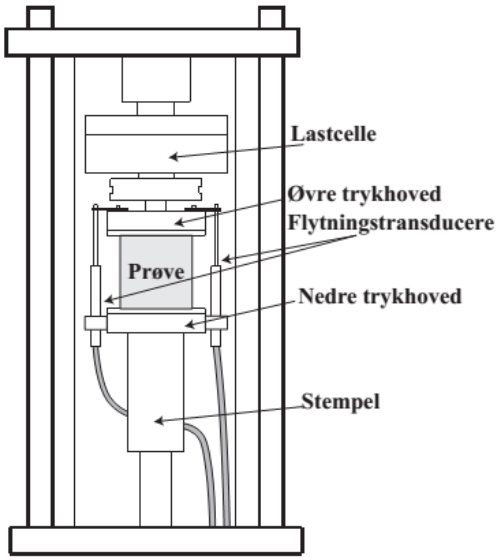


Figur 1: Overblik over triaxial apparatet

Triaxial apparatet består af flere styringsenheder, en opsamlingsenhed og computeren med programmet HTBasic som gemmer alle data. Kontrolpanelet bruges både under tildannelsen af prøven og under selve forsøget. På kontrolpanelet kan både vakuum og vand til cellen styres. Under tildannelsen bruges vakuum til, at hjælpe prøven med at stå og senere hen bruges kontrolpanelet i forbindelse med vandmætning af prøven og systemet. Vandmætningen sker ved at tage vand fra drænet øverst i vandmætningenssøjlen. Det øverste dræn er tilkoblet det nedre trykhoved, og således vandmættes prøven nedefra og op. Under selve forsøget styres vandet til cellen/skruekontrollen via kontrolpanelet.
Bagtryk systemet tilføjer et tryk inde i prøven ved at presse vand ind i prøven og ind i alle hulrum, og på den måde sikres vandmætningen. Bagtryk virker således som et tryk modsat kammertrykket. Bagtryk systemet måler det vand der dissiperer væk fra prøven eller det vand prøven optager, og således måles volumenændringerne i prøven. Vandstanden i det store glas samt det glas der bruges til forsøget i bagtryk systemet skal være i niveau med midten af prøvens højde, således der ikke tilføjes en geometrisk trykdifference til bagtryk systemet.
Kammertrykket tændes på siden af apparatet. Kammertrykket kan styres på skruekontrollen, og denne kan

styres ved brug af programmet HTBasic, således kammertrykket automatisk holdes konstant. Stempeltrykket tændes, og styres med knapper, som sidder på siden af triaxial apparatet.

Triaxial kammeret lukkes med pleksiglas, så det kan fyldes med vand for at opbygge et kammertryk. En tegning af triaxial kammeret er vist på Figur 2.



Figur 2: Triaxial kammer

Den aksiale flytning af prøven måles med to flytningstransducere, som er monteret på hver sin side af prøven. I forsøgets første fase belastes prøven isotropisk med et kammertryk, der holdes konstant. I forsøgets anden fase køres stemplet, således prøven undergår tryk, og lastcellen måler stempeltrykket. I det nedre trykhoved sidder en poretryksmåler, men denne benyttes ikke, da poretrykket i disse CD triaxialforsøg er styret af backpressure systemet.

I det følgende er der givet en udførlig beskrivelse af triaxialforsøgene, som er udført på silt.

1.2 Generelt

Poretryksmåler (poretrykstransducer) har maksimal på 700 kPa. Og der må derfor ikke påføres større tryk, da poretrykstransduceren i så fald vil gå i stykker.

1.3 Elektronisk udstyr og software

Den elektroniske opsamling består af transducere, opsamlingsenheder og en computer.

MGC benyttes som opsamlingsenhed (kan også benyttes som styreenhed).

Styre- og opsamlingsprogrammet HTBasic benyttes på computeren.

Et styre- og opsamlingsprogram som ”Triamenu” ligger bånd på nogle af computerens registre, som også kan kaldes for computerens kommunikationskanaler.

Der kontrolleres, at vægten er tændt og at den ikke står på 0. Vægten bruges ikke i forsøget, men den skal være tilsluttet, for at forsøgene kan køres korrekt.

1.3.1 MGC

Når MGC'en har været slukket/startes op, skal den indstilles på kanalen. Dette gøres ved at åbne MGC på computeren og vælge:

- Name: MGC, Interface: GRIB, adresse: 4

I MGC Channel setup vælges:

- Load setup → triax2 (eller det apparat som man benytter)
- Det kontrolleres at indstillingerne på kanal 1 + 3 + 5 + 7 + 9 + 11 er indstillet korrekt. De korrekte indstillinger findes i Triaxial Manual. (hvidt ringbind ved triaxial apparaterne.)

1.3.2 HTBasic

HTBasic benyttes til at styre forsøget og til at opsamle og gemme data fra MGC'en.

På computeren åbnes programmet HTMBasic. Når programmet er klar til brug gøres følgende:

- Skriv: load "triamenu" → Enter → Skriv: run → Enter (Systemet tjekkes og testes og når dette er slut kan der fortsættes til næste trin)
- Tryk F2 (hvis dette ikke virker, prøv da Alt+F2)

Programmet stiller nu en række spørgsmål:

- Ønsker du at bruge vægt i umiddelbar forlængelse af vandmætning: Ja
- Ønsker du at benytte topstykke med indbygget vejecelle: Nej
- Ønsker du at sætte alle grænser på MGC'en ud af funktion: Ja (kun ved opstart), ved genopstart af forsøg altid NEJ
- Skriv: triamenu → OK (afvent)
- Er navne på flytningsmålere rigtige: Ja
- Er navne på kraftmålere rigtige: Ja
- Navn på person: initialer

Triamenu vises nu og der skal opstartes et nyt forsøg:

- Opstart → Start et forsøg
- Åben ind til cellen på kontrolpanelet.
- Find kal fil: fx Triax3.kal eller Triax2.kal → Ok
- Forsøg fx: 130801 (sagsnummer: 1308 og forsøg: 01)
- Påført undertryk: Normalt 20 kPa → OK (Ved silt tildannes der ved 40 kPa)
- Prøvens vægt → OK
- Prøvens højde, 70 mm → OK
- Prøvens diameter (diameter på tildannelsesrør) 70 mm → OK
- Vægten af øvre trykhoved **[kg]** → OK
- Procedure for aflæsning af nulpunkter for kammertryk og flytningstransducere → OK

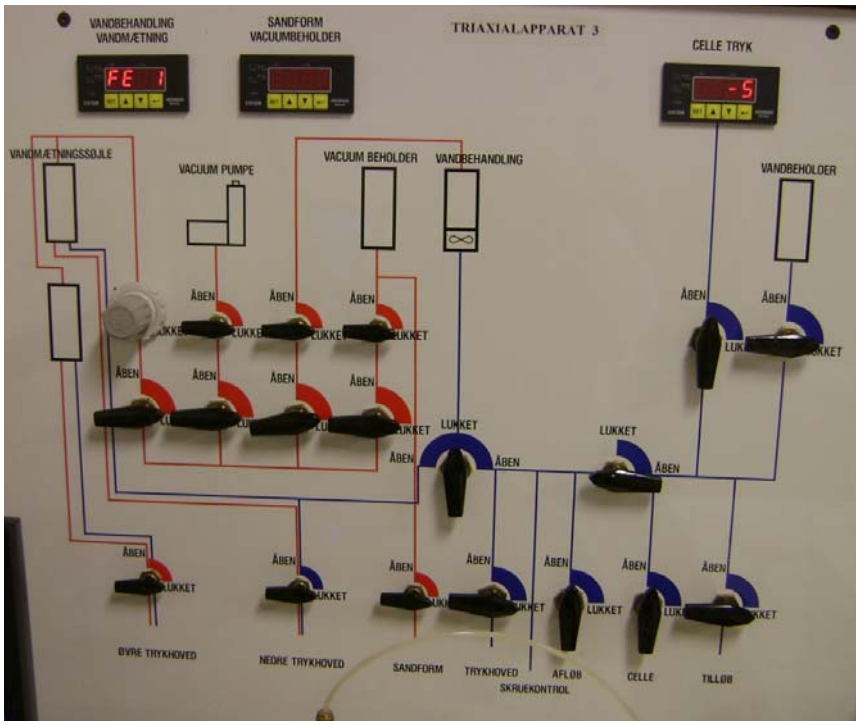
- Flytningsmålernes nulpunkt (gennemføres, dvs. indstilles til yderst i måleområde, og accepteres når de er monteret) → OK
- Skriv nulpunktsaflæsninger ned i skema på side 3 → OK
- Cellen fyldes herefter halvt med vand → OK
- Notér nulpunkts målinger for kammertryk → OK
- Øvre grænse for kammertryk: 2000 kPa (der kan vælges mellem 200 kPa og 2000 kPa) → OK
- Fuldskalaværdi i stempel: 10 V → OK
- Fyld nu cellen helt med vand → OK
- Skal data ændres: Nej
- Skal data gemmes: Ja
- Skal data udskrives: Nej (Der er ingen printer tilknyttet og der kan derfor ikke printes)
- Opstart af forsøg er nu færdigt: OK

2.0 Forberedelse af prøve og apparat

2.1 Vand koges

Der skal være nok vand i vandbehandlingen, og hvis der ikke er dette, fyldes der vand i vandbehandlingen. Vand fyldes i vandbehandlingen ved brug af kontrolpanelet, hvor vandbehandling åbnes til tilløb. NB: Der skal være lukket til vakuum.

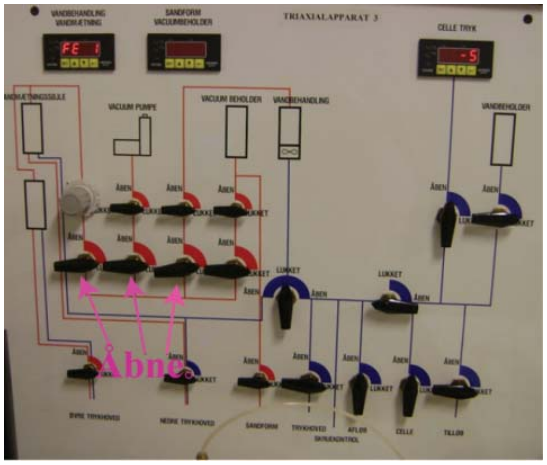
Vand i vandbehandlingen koges med vakuum. Dette gøres ved brug af kontrolpanelet, hvor vaccum pumpe åbnes til vandbehandling.



Figur 3: Kontrolpanel

Vandet skal koges i ca. 1 time.

Vandmætningssøjlen der består af nedre trykhoved (øverste dræn) og øvre trykhoved (nederste dræn). I det øverste dræn skal der være vand i, idet dette bruges til at vandmætte prøven og systemet med. Dette kan fyldes ved, at åbne fra vandbehandlingen til vandmætningsøjlen til nedre trykhoved, vakuum pumpen tændes for at få vandet til at løbe opad. Det nederste dræn skal være tomt, dette tømmes ved at åbne for øvre trykhoved, og vandet kan således løbe fra vandmætningssøjlen og ud i øvre trykhoved (slangen fra "hvid box"). Vakuum er slukket, men på kontrolpanelet er de nederste ventiler til vakuum, åbnes således der tillades luft i systemet som vist på figuren:



2.2 Forberedelse af trykhoveder

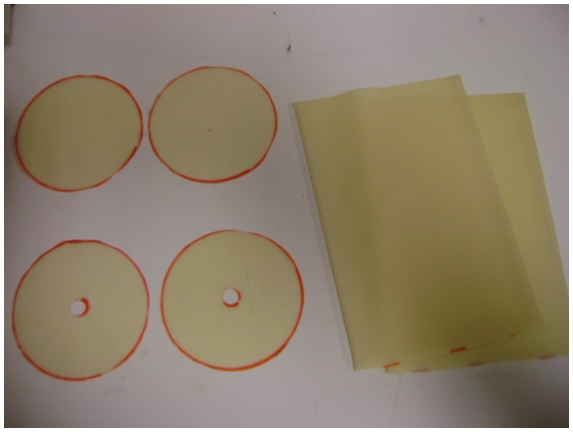
- Filtersten Ø 7 mm i nedre trykhoved
- 4 stk. dræn klippes af fibertex
- 2 stk. gummimembraner på 15 cm klippes
- 2 stk. gummimembraner til nedre trykhoved klippes (cirkel med hul i midten Ø 8 mm)
- 2 stk. gummimembraner til øvre trykhoved klippes (cirkel)

Filterstenen til det nedre trykhoved hamres ud med en 7 mm dorn som vist på Figur 5 og der klippes 4 dræn i filterdug efter skabelonen som vist på Figur 4.



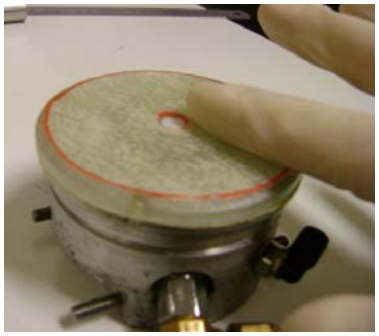
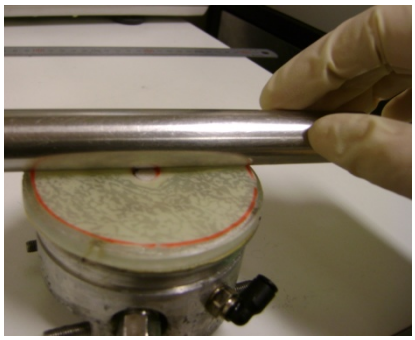
Figur 4: Filtersten og dræn i filtdug

Der klippes 2 membraner af 15 cm til prøven og der klippes 2 membraner til både nedre og øvre trykhoved. I membranen til nedre trykhoved slås et 8 mm hul i midten med en 8 mm dorn, dette hul laves for at blotlægge filterstenen.

Figur 5: Membraner forberedes

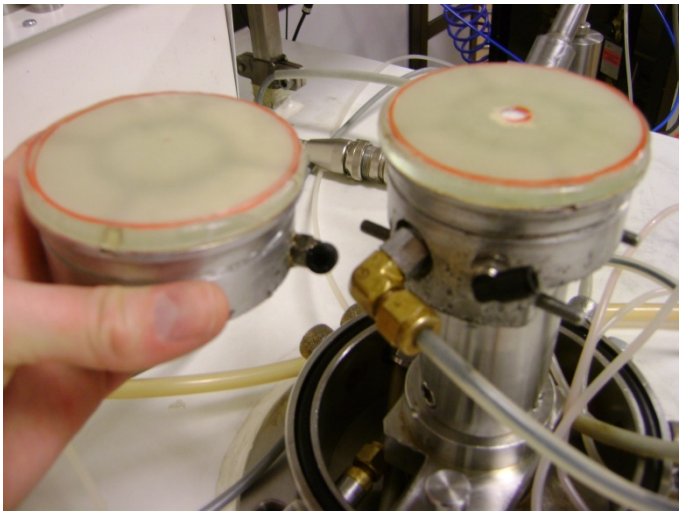
I det nedre trykhoved sættes filterstenen i, hvis filterstenen er for høj skæres den til med en kniv. Det er vigtigt, at filterstenen udfylder hele hullet.

Figur 6: Forberedelse af nedre trykhoved

Der påføres vakuum grease på øvre og nedre trykhoved som vist på Figur 6 og dette smøres forsigtigt jævnt ud over trykhovedet, det er dog vigtigt, at vakuum greasen aldrig kommer i kontakt med filterstenen, da dette vil blokere for vandet. Når vakuum greasen er jævnt fordelt, duppes den med en finger og den første membran påsættes, herefter duppes membranen ned i vakuum greasen med en finger, inde fra midten og ud til kanten. Der bruges en metal rulle til, at rulle alt luften ud af vakuum greasen, således al luften under membranen fjernes. Der rulles fra midten og ud til kanten, således der ikke kommer vakuum grease på filterstenen. Til sidst er det vigtigt, at tørre overskydende vakuum grease væk således trykhovedet holdes rent. Den næste membran påsættes ved samme teknik ovenpå den allerede påsatte membran.

Membranerne på øvre trykhoved påsættes ved hjælp af samme teknik som beskrevet for det nedre trykhoved.



Figur 7: Klargjorte trykhoveder med membraner

Membranerne på trykhovederne sikrer en friktionsløs flade.

2.3 Tildannelse af prøve

Det øvre trykhoved vejes. Der skal tages vandindhold af prøven både inden og efter triaxialforsøget er kørt.

Intaktrøret monteres i den lodrette prøveudpresser, og det vurderes, om det er silt i toppen af intaktrøret. Der presses ca. 1 cm prøvemateriale op. En stålcylinder, med en højde og diameter på 70 mm, sættes hen over prøven og prøven presses på i stålcylinderen.

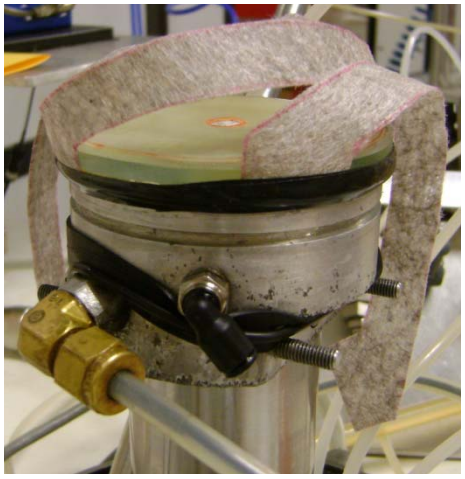


Figur 8: Prøveudpresser

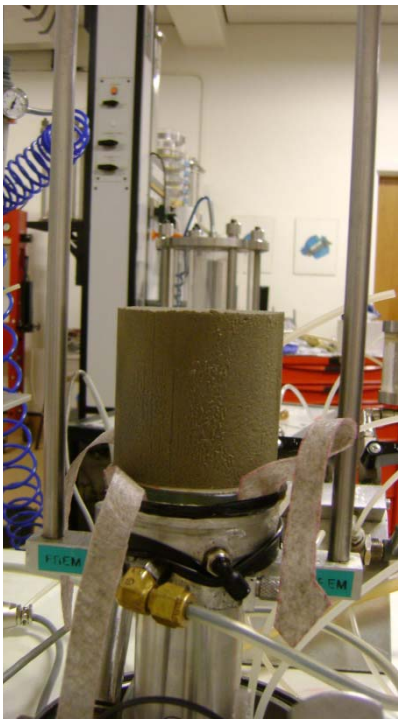
Der holdes øje med at prøven ikke revner og bevarer sig i intakt tilstand fra toppen af stålcylinderen.

Knallertslange og o-ring sættes klar på det nedre trykhoved og filterdræn monteres ved hjælp af et stykke tyndt tape som klippes. Filterdræn monteres således de sidder i hullerne og følger samme retning rundt om prøven. Tapen kan ikke klæbe på trykhovedet og det skal derfor hæfte på sig selv.





For at holde det øvre trykhoved monteres lastramme på det nedre trykhoved, og prøven kan nu placeres på det nedre trykhoved ved brug af en hånddreven udpresser som vist på Figur 9.





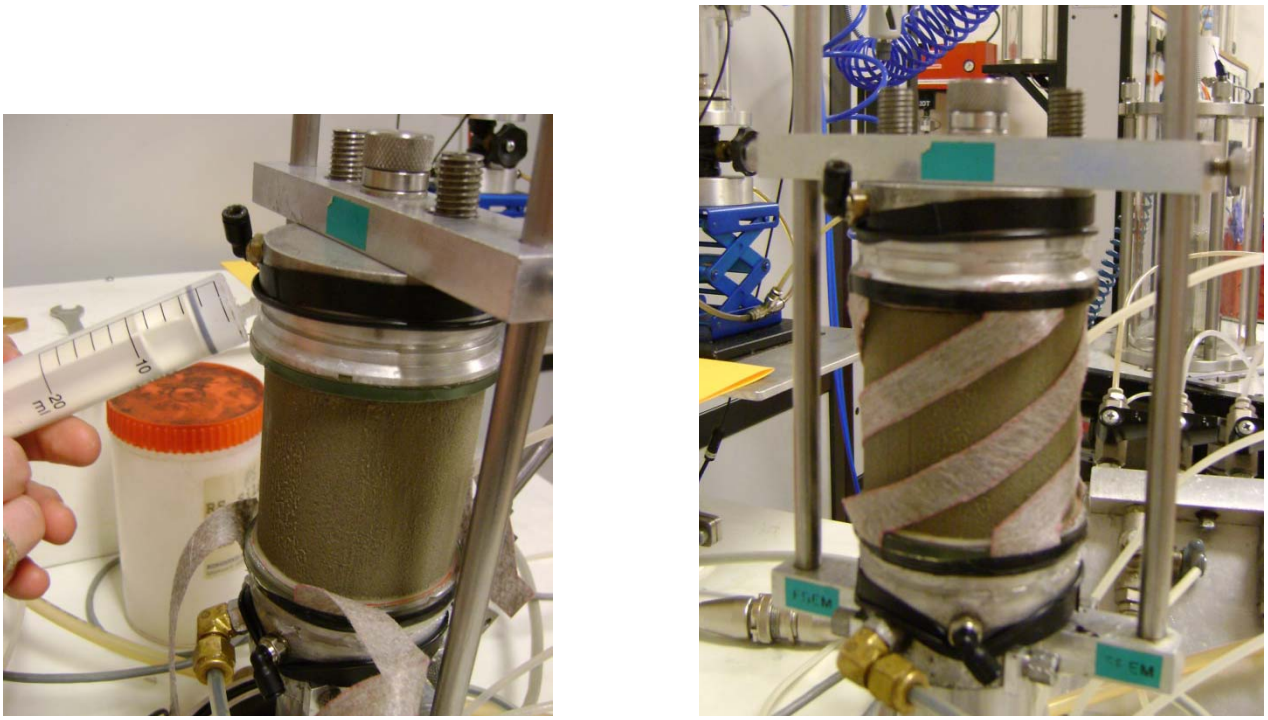
Figur 9: Prøven på nedre trykhoved og hånddreven prøve udpresser

Knallertslange og o-ring sættes nu klar på det øvre trykhoved, og topstykket på lastrammen monteres. Herefter kan det øvre trykhoved monteres på lastrammen som vist på figur Figur 10.



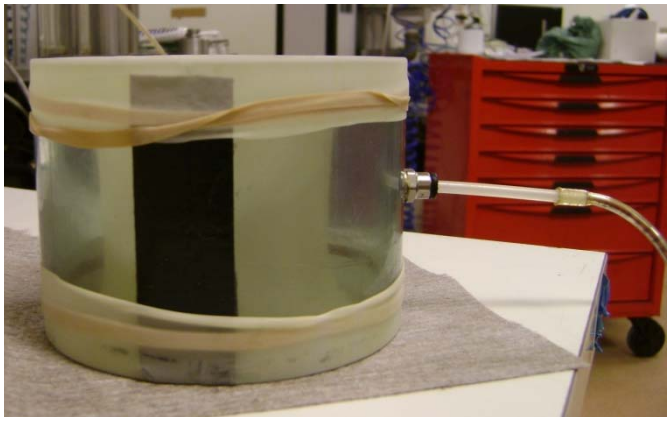
Figur 10: Lastramme

Det øvre trykhoved monteres, således det er lige over prøven, men det må ikke belaste prøven. Herefter puttes der vakuum grease i o-rings sporet på nedre – og øvre trykhoved som vist på Figur 11. Filterdræn monteres på det øvre trykhoved på samme måde som på det nedre trykhoved.



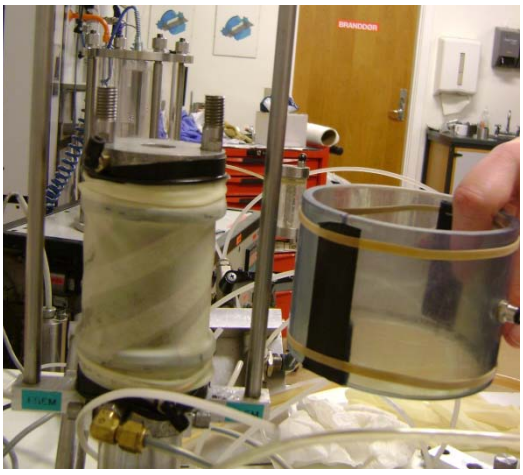
Figur 11: Vakuum grease i o-ringsspor og dræn monteret.

Det øverste af lastrammen tages midlertidigt af, således den første gummimembran kan påsættes. Gummimembranen påsættes ved hjælp af plastrør, hvor gummimembranen suges fast, således den påsættes glat. Gummimembranen er påsat plastrør ved benyttelse af 2 stk. gummibånd foroven og forneden. Gummibåndene anvendes under og over membranen.



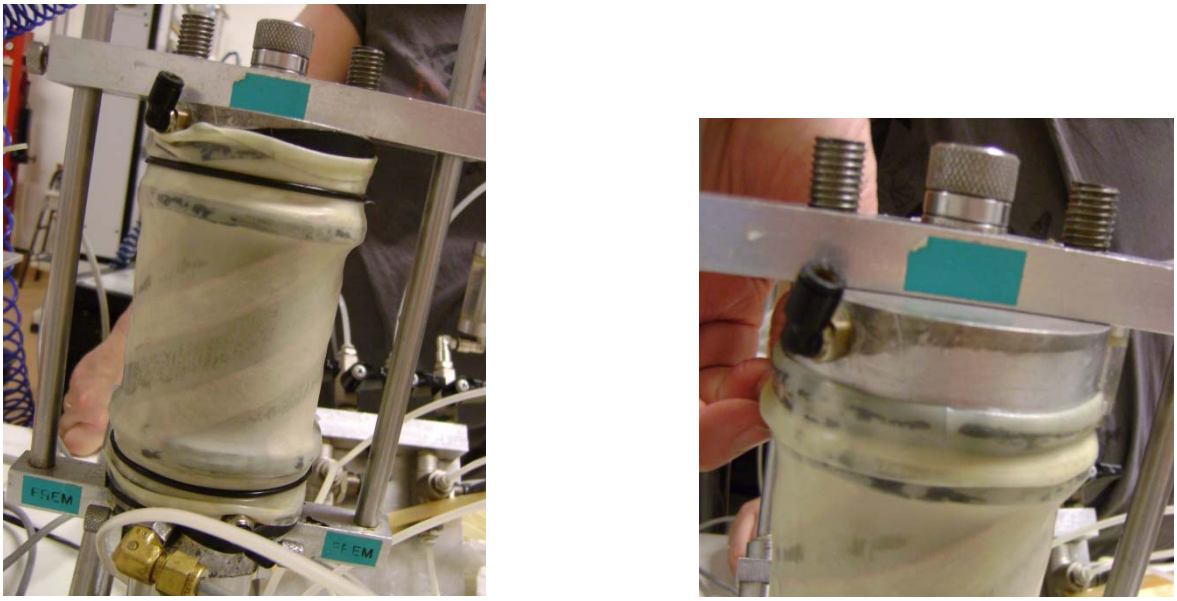
Figur 12: Gummimembran på plastrør

Plastrøret med gummimembranen suget fast til holdes der hvor den ønskes placeret, og der pustes i slangen, mens gummimembranen tages af plastrøret og sættes på prøven.



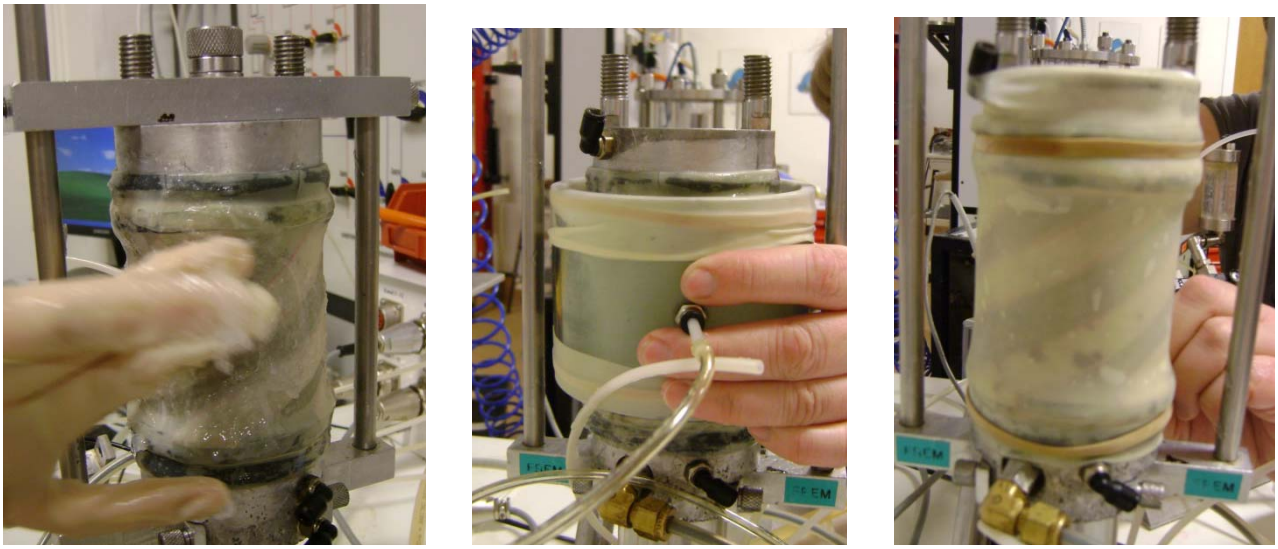
Figur 13: Første gummimembran påsat prøven ved brug af plastrøret

Den øvre del af lastrammen monteres nu igen for at aflaste prøven. Gummimembranen foldes op og o-ringene sættes ved o-ringsspor over membranen som vist på Figur 14, ovenpå o-ringen sættes knallertslangen. Gummimembranen foldes ned over o-ring og knallertslangen som vist på Figur 14.



Figur 14: O-ring påsat. Derefter knallertslange udenpå og gummimembranen foldet ned over

Der puttes silikone på hele gummimembranen.



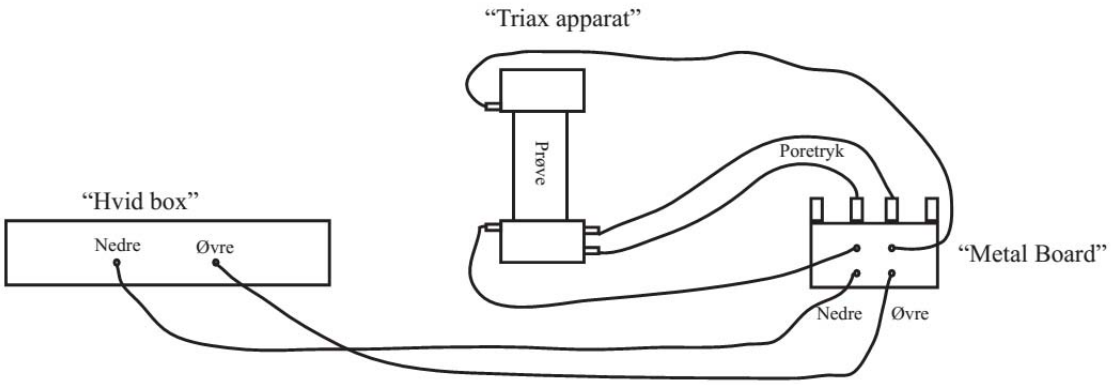
Figur 15: Silikone puttes på den første gummimembran og den anden gummimembran påsættes

Gummimembran nr. 2 påsættes nu ved hjælp af samme måde, som den første gummimembran blev påsat, dog påsættes der et gummibånd både foroven og forneden. Gummimembranen glattes/foldes udover, der fortages et lille klip ved udtag til slangerne på trykhovederne.

2.3.1 Tilslutning af slanger

Det nedre trykhoved fastgøres med skruer på triaxial apparatet. Slangen til nedre tømmes for vand ved at puste i slangen.

Slangerne til øvre- og nedre trykhoved samt til poretryk tilsluttes som vist på Figur 16:

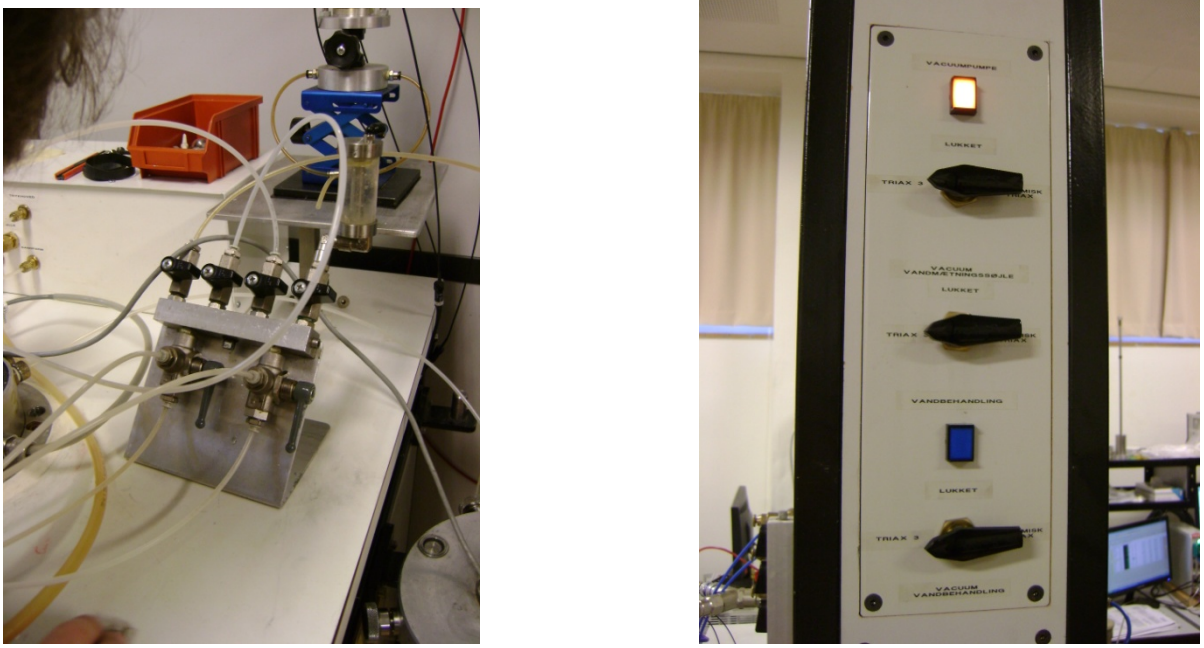


Figur 16: Tilslutning af slanger

Vandet pustes ud af slangerne inden de tilsluttes.

2.3.2 Påførelse af vakuum

Der ønskes et vakuum i prøven på 40 kPa. På "søjle" tændes vaccum til det triaxial apparat man benytter. På kontrol panelet åbnes vakuum pumpe til -40 kPa.



Figur 17: Metalboard med tilsluttede slanger og søjle hvor vakuum kan tændes

Tester om det er tæt

Slangen fra øvre i den "hvide box" og slangen fra nedre i "metal board" samt slangen fra øvre i "metal board" sættes ned i en bobbelfælde.



Figur 18: Venstre: Bobbelfælde.

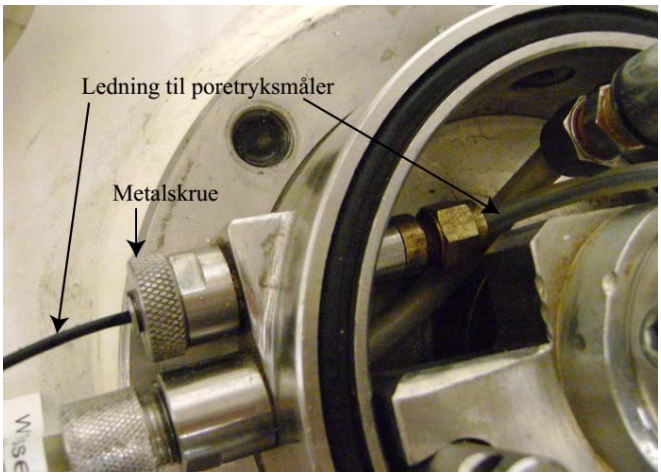
På kontrolpanelet åbnes der for vakuum på 40 kPa (normal 20 kPa men 40 kPa pga. silt) til øvre trykhoved.

Det kan ses hvornår prøven er tæt i bobbelfælden, ved at stikke de to slanger fra ”metal board” ned i vandet. Efter det er tjekket tages slangerne op af vandet.

Hvis ikke det er tæt kan der eventuelt klippes lidt af slangerne for at sikre tæthed. Slangerne kan tages af bobbelfælden når system er tæt.

2.4 Kabel tilslutninger

Stikket til poretryksmåleren tages igennem udtaget i apparatet (hiv ikke i stikket men i ledningen) og monteres i den ”hvide box”. En metalskrue skrues fast på ydersiden af udtaget som vist på Figur 19.



Figur 19: Ledning til poretryksmåleren føres ud af cellen

Der er ikke meget plads inde i apparatet og derfor skal ledningen til poretryksmåleren ligge over ledningen til flytningstransduceren, således apparatet kan lukkes til sidst. Dette er vist på Figur 19.

Det er vigtigt at alle ledninger og slanger ikke er helt stramme, da prøven skal kunne give sig opad i løbet af testen.

2.5 Flytningstransducere monteres

Flytningstranducerne monteres som vist på Figur 20.



Figur 20: Flytningstransducere monteres

Når flytningstransducerne monteres er det vigtigt ikke at trykke på prøven.

På computeren, i HTBasic under ”Opstart af forsøg” er man nu nået til at nulstille flytningstransducerne.

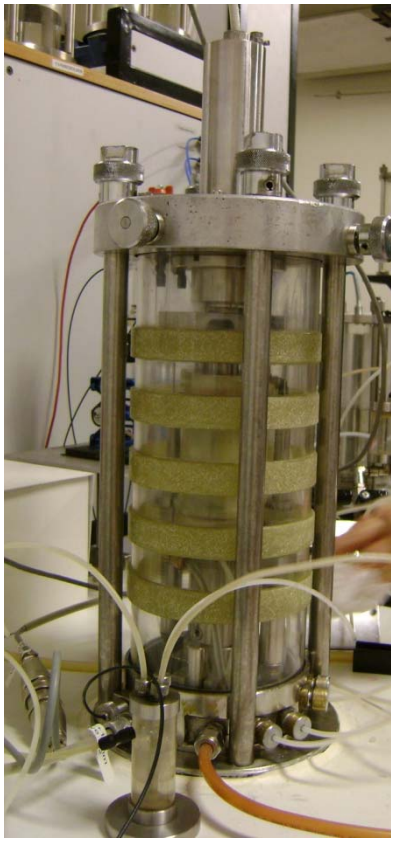
På MGC’en indstilles der nu på kanal 7 og 9, som er flytningstransducerne, disse skal stå på minimum af deres måleområde (eks. -10 V). Flytningstranducerne flyttes op eller ned indtil kanalerne står på deres min. måleområde.

2.6 Montering af glas og kraftramme (stempeltryk).

Det tjekkes, at prøven er tæt med bobbelfælden, og det er vigtigt, at vakuum ikke driver, da dette indikerer en utæt prøve.

Pleksiglasset påsættes og topcellen påsættes (møtrikkerne på topcellen skal vende udad mod en selv). Topcellen spændes fast, og under denne fase tjekkes det, at man ikke laster prøven. Der spændes over kryds og disse skal ikke spændes så stramt, at man ødelægger gevindet, da dette er skrøbeligt.

Poretryksledningen sættes i stikket i den ”hvide box”.



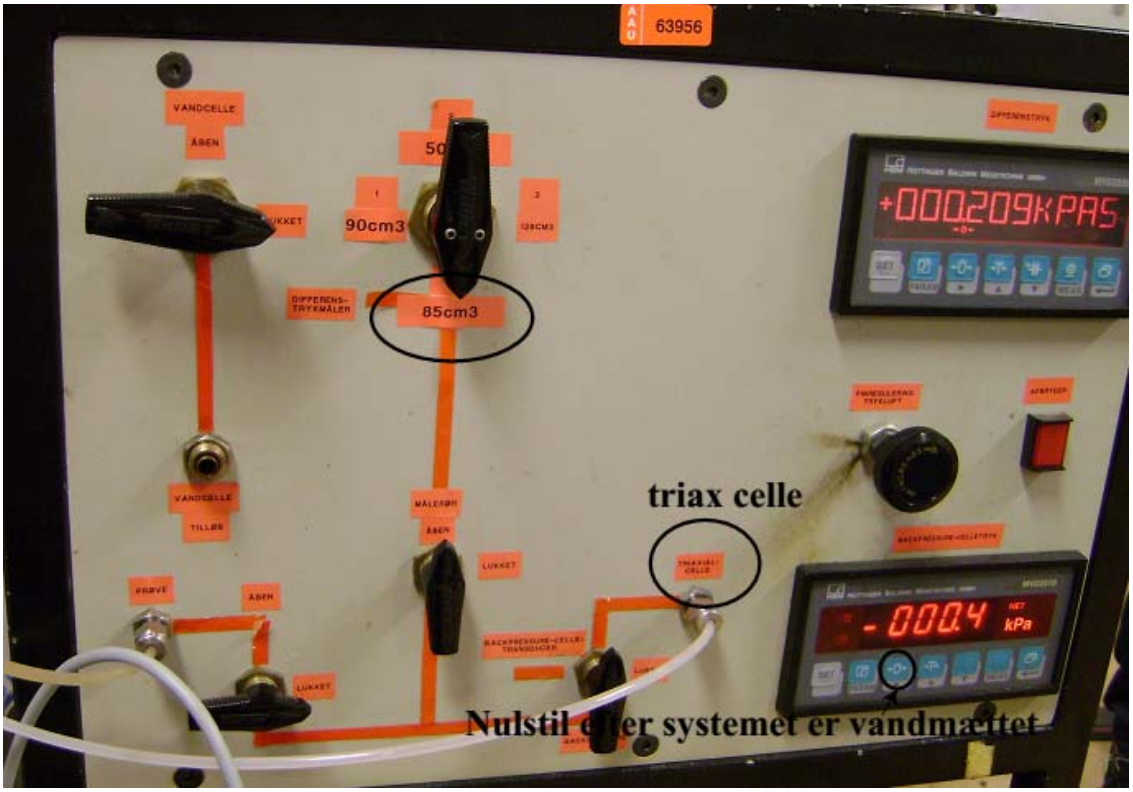
Figur 21: Topcellen monteret og bobbelfælden tjekkes.

2.7 Indstille nulpunkt for kammertrykket og bagtryk systemet

På computeren i HTBasic under ”Opstart af forsøg” er man nu nået til at indstille nulpunkt for kammertrykket. Dette gøres ved at fylde vand halvt op i cellen.

Vandet i vandbehandlingen er kogt. Vand fyldes halvt op i cellen, ved at åbne for vandbehandlingen ind til cellen på kontrolpanelet. Husk at lukke for ”tømning” foran på apparatet. Når vandet er fyldt halvt op i cellen trykkes OK og værdierne for nulpunktet noteres.

Bagtrykket skal stå på triaxcelle for at måle trykket i triaxial cellen som vist på Figur 22. På bagtryk system anvendes røret 85 cm^3 til, at køre testen med som vist på Figur 22. Vand til bagtryk systemet kan tages fra udtag i væggen ved triax2.



Figur 22: Indstilling af bagtryk system

Bagtryk systemet nulstilles på knappen, som vist på Figur 22, og dette gøres når systemet er vandmættet.

Vandet i cellen fyldes helt op, der holdes øje med vandet og så snart der kommer vand op igennem topcellen skrues skruen i, med den special fremstillede skruetrækker, som vist på Figur 23. Der lukkes for vandet på kontrolpanelet når skruen er stram.



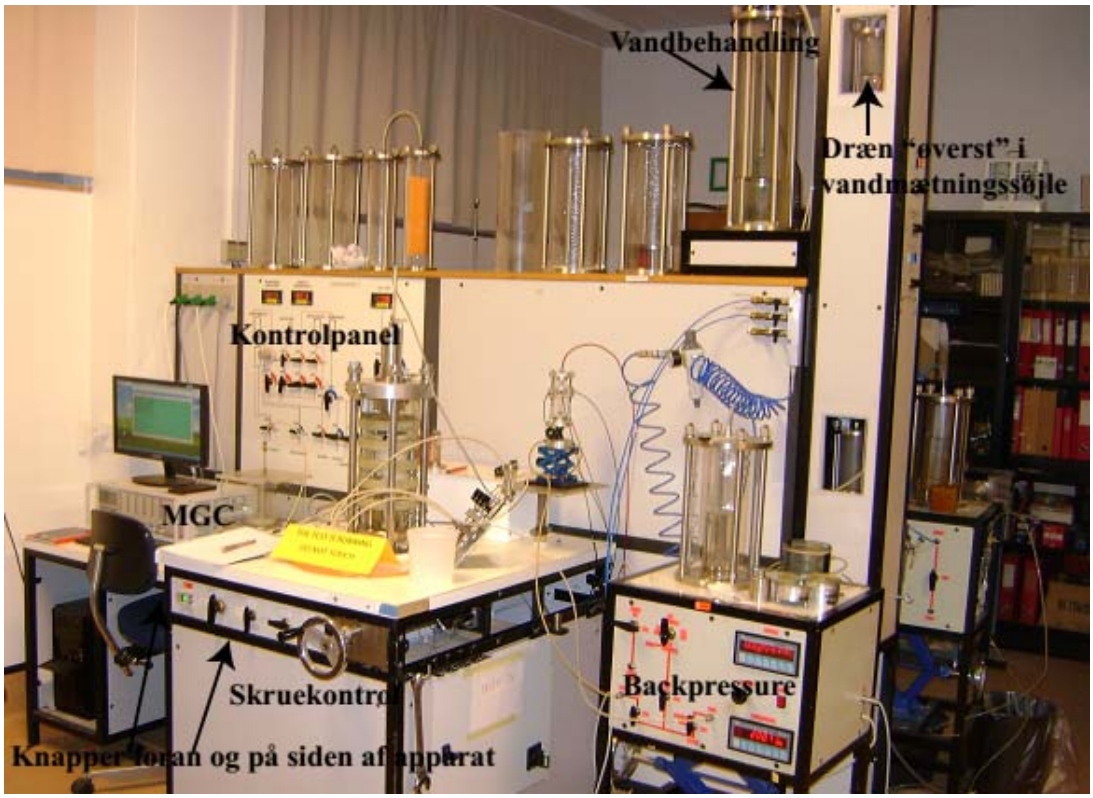
Figur 23: Der lukkes indtil cellen med skrue når vandet kommer ud af topcellen.

2.8 Vandmætning

2.8.1 Prøven vandmættes

Det kontrolleres, at det øverste dræn (nedre trykhoved) i søjlen er fyldt min. halvt op med vand. Der fyldes vand i det øverste dræn ved, at åbne vandbehandlingen til vandmætningssøjlen på kontrolpanelet. Det nederste dræn i vandmætningssøjlen skal være tomt.

I HTBasic vælges der Opstart → Vandmætning.



Prøven vandmættes, ved at åbne vandmætningssøjle til nedre trykhoved på kontrolpanelet.

Vakuum i prøven på de 40 kPa som prøven er tildannet ved udlignes med celletryk, i steps af 10 kPa således prøven hele tiden støttes med et tryk på 40 kPa. Således fås et celletryk på 40 kPa, ved brug af skruekontrollen. På siden af apparatet skal kammertrykket indstilles på manuel.

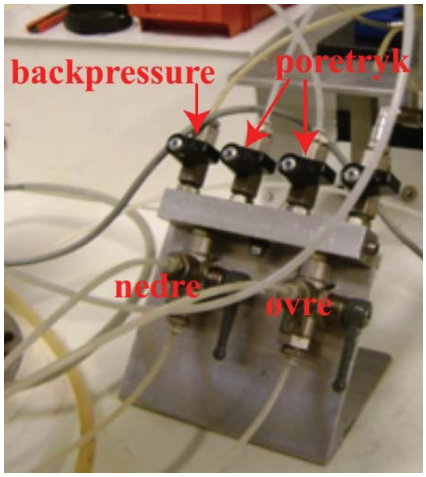
Tjek at der stadig er vand i drænet øverst (nedre trykhoved) i vandmætningssøjlen.

Bobbelfælden tages fra og slangerne sættes i den "hvide box".

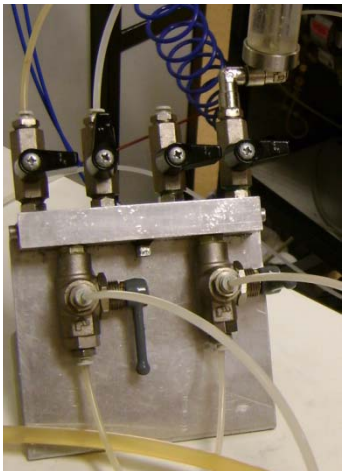
2.8.2 Systemet vandmættes

De ydre dræn vandmættes ved at tænde for vandmætningssøjlen til nedre trykhoved på kontrolpanelet. Vandet løber således fra nedre trykhoved gennem filterdræn og ud i slangerne.

Dræn vandmættes ved at åbne for nedre trykhoved på "metal board". Slangen til øvre trykhoved tages af og vand samt luft opsamles. Vandet løber således fra nedre trykhoved ind igennem prøven og ud igennem øvre trykhoved. Inden øvre slange sættes i igen, åbnes øvre på "metal board", således vand løber ud af "metal board", og slangen kan nu sættes i. Dette princip gælder også de andre slanger.

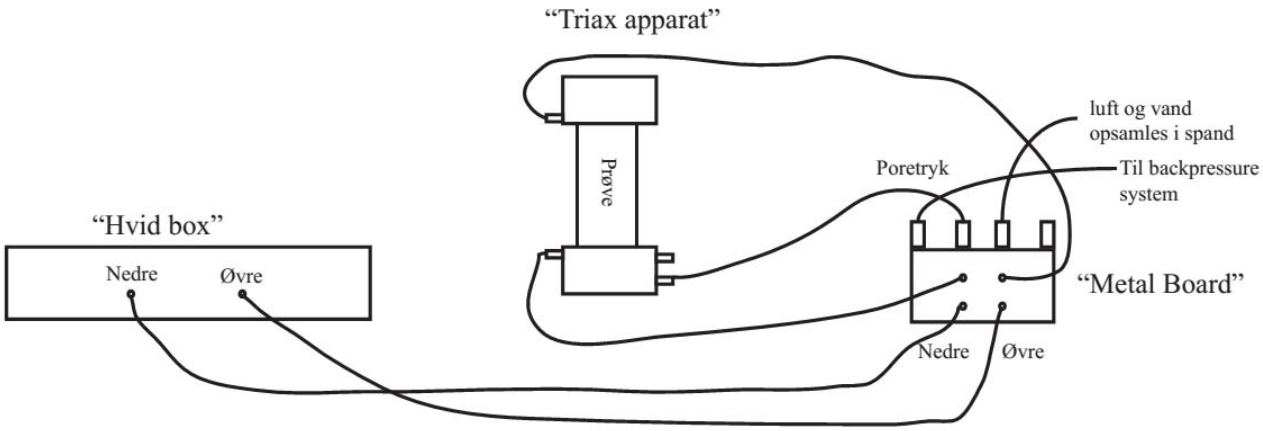


Figur 24: Metalboard



Figur 25: Vandmætning af poretryk

Poretryk vandmættes ved at åbne for nedre trykhoved på ”metal board” og nedre poretryk på ”metal board”. Slangen til øvre poretryk fra triax apparat tages af og vandet og de luft bobler der er i system opsamles i en spand. Vandmætningen er færdig når der ikke er mere luft i slangen.



Figur 26: Illustration af vandmætning af slange til nedre poretryk.

"Metal board" vandmættes ved at åbne for slangen yderst til venstre (til bagtryk system). På bagtryk systemmet sættes måleröret til det rør der er 90 cm^3 eller 120 cm^3. Der skal være vand i røret, hvis ikke der er vand i rørene, fyldes der op med vand fra en hane som sidder ved triax apparat nr. 2. Slangen fra hanen sættes på slangen fra bagtrykket som sidder i "metal board".

Der gøres nu klar til at køre testen og derfor åbnes der til poretryk på "Metal board". Poretryk skal være åbne fordi der køres drænede forsøg og derfor skal vandet i prøven kunne dissipere væk.

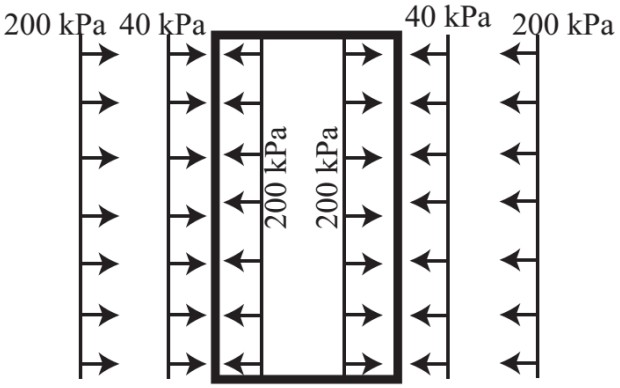
2.8.3 Etablering af bagtryk

I HTBasic vælges Opstart → Etablering af backpressure.

Bagtryk systemet tændes ved at sætte slangen til og åbne ventilen på bagsiden og på forsiden åbnes der indtil cellen.

Når der køres drænet forsøg skal poretryk og bagtryk være åbne på metalboardet.

Der skrues op for bagtrykket (NB: skruen er meget følsom!) samtidig med, at der skrues op for celletrykket på skruekontrollen. Det er vigtigt, at man hele tiden sørger for, at der er til totalt tryk der svarer til et celletryk på 40 kPa. Dvs. $celletryk - bagtryk = 40\ kPa$, således opnås en situation der kan illustreres som vist på Figur 27.



Figur 27: Illutration af hvordan bagtryk systemet fungerer ved bagtryk på eks. 200 kPa.

Bagtryk system sikrer som vist på figuren, fuldstændig vandmætning af prøven ved, at presse vand ind i prøven. Derved vandmættes eventuelle hulrum i prøven.

Denne tilstand skal stå i ca. 2 døgn over for at sikre fuldstændig vandmætning. Celletrykket skal derfor reguleres automatisk ved skruekontrollen, således celletrykket holdes konstant. Derfor er det vigtigt, at skruekontrollen har "noget at give af". På kontrolpanelet lukkes der ind til cellen, der åbnes til vandbehandlingen til skruekontrollen og skruekontrollen køres næsten helt ind, hvorefter der lukkes for vandbehandlingen. Skruekontrollen sættes til at opnå et celletryk på 240 kPa og der åbnes til cellen på kontrolpanelet.

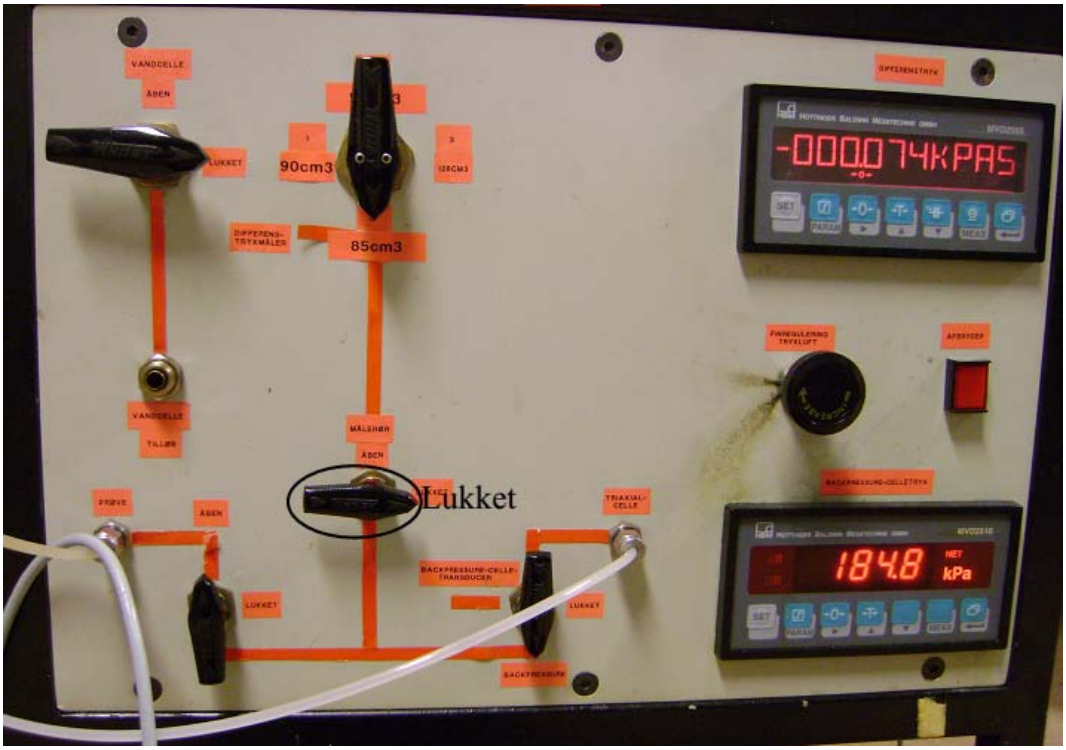
2.8.4 Skempton's B

Skempton's B er en konstant, der benyttes til, at tjekke om prøven er vandmættet. Når man tilføjer celletryk, vil poretrykket øges. Denne øgning af poretryk kan udtrykkes som en enhedsløs paramter:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$$

På "metalboard" lukkes der for poretrykket og σ_3 samt u aflæses på bagtryk systemet.
Der lukkes nu for vandet til prøven på bagtryk systemmet, som vist på Figur 28, således prøven opfører sig udrænet. Dette gøres fordi Skempton's B er en udrænet parameter.

I HTBasic vælges Opstart → Skemptons B-værdi. Således kan celletrykket øges nu fra 240 kPa til 260 kPa, efter 2 min aflæses celletrykket og poretrykket på bagtryk systemet. (celletrykket øges altid med 20 kPa ved måling af Skemptons B)



Figur 28: Skempton's B. Når en udrænet tilstand ønskes lukkes der for vandet til prøven.

Skempton's B tjekkes nu og hvis denne er acceptabel afsluttes trinet på computeren og når celletrykket er tilbage ved startværdien åbnes der for vandet indtil prøven igen.

Hvis Skempton's B ikke er over 90 % er den ikke acceptabel og der afventes yderligere 10 min for at tage en ny måling ved samme celletryk til bestemmelse Skempton's B. Er Skempton's B stadig ikke tilfredsstillende kan der udføres en måling af Skempton's B, efter den isotropiske konsolidering er udført.

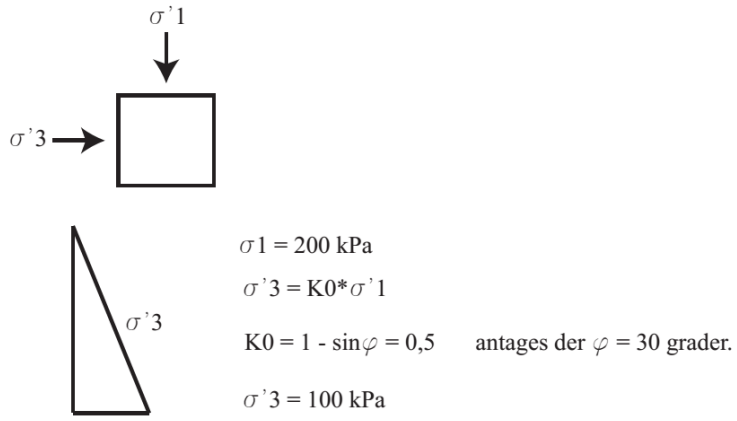
3.0 Køre test

Testene udføres flytningsstyrede, fordi så kan det undersøges om silten undergår softening.

3.1 Konsolideret drænet forsøg - CD

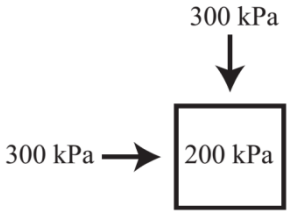
3.1.1 Isotropisk

Der ønskes eks. et kammertryk på $\sigma_1 = 200\ kPa$. Som det ses på Figur 29 bliver kammertrykket $\sigma'_3 = 100\ kPa$.



Figur 29: Kammertryk

Da der allerede er 200 kPa i bagtryk inde i prøven påføres der et celletryk på 300 kPa, som vist på Figur 30.



Figur 30: Påførelse af celletryk i forhold til bagtrykket.

Stemplet indstilles/centreres.

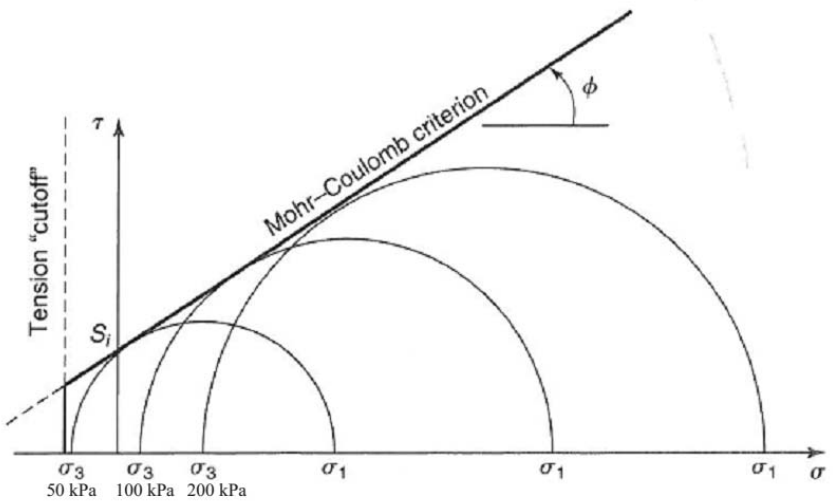
På bagtryk systemet åbnes der for vandet indtil prøven, og der anvendes målerør 85 cm^3.

På siden af apparatet sættes kammertrykket til 0, efter steps på computeren er fulgt sættes det på automatisk. I HTBasic vælges der "Konsolidering – isotropisk". Og trinene i programmet følges, ved brug af ovenstående information. Den isotropiske tilstand skal stå natten over for at følge udviklingen i prøven.

Spændinger og tøjninger notes ved start og løbende i forsøget på skema til traixialforsøg på side 2.1.

Forsøgsserier

Det er ønskeligt, at der køres mindst 3 forsøg med hvert intaktrør ved forskellige kammertryk for at finde friktionsvinklen for materialet.



Figur 31: Illustrering af nødvendige forsøgsserier til bestemmelse af friktionsvinklen (An introduktion to geotechnical engineering, Holtz, side 526)

Prøverne er udtaget i spændingstilstande svarende til omtrentlig $\gamma \cdot d = 50\ kPa - 100\ kPa$. Ud fra dette udføres der forsøg ved kammertryk som vist i tabellen herunder.

Forsøg nr.	**Back pressure [kPa]**	**Kammertryk/Celletryk σ_3 [kPa]**	**σ_1 [kPa]**
1	200-400	50	100
2	200-400	100	200
3	200-400	200	400

3.1.2 Anisotropisk til brud

Stemplet skal være centreret, og det køres til kontakt ved følgende procedure. Stempel indstilles på manuel på siden af apparatet. Knappen "stempeltryk" på siden af apparatet tændes ved at holde den inde i 1 sek. Stempelhastigheden skrues op til maksimale hastighed og der holdes øje med stemplet, både for at se om det kører den rigtige vej, dvs. til kontakt, og for at slukke når kontakten er opnået. Når der næsten er opnået kontakt slukkes der for stemplet ved at sætte hastigheden til 0.



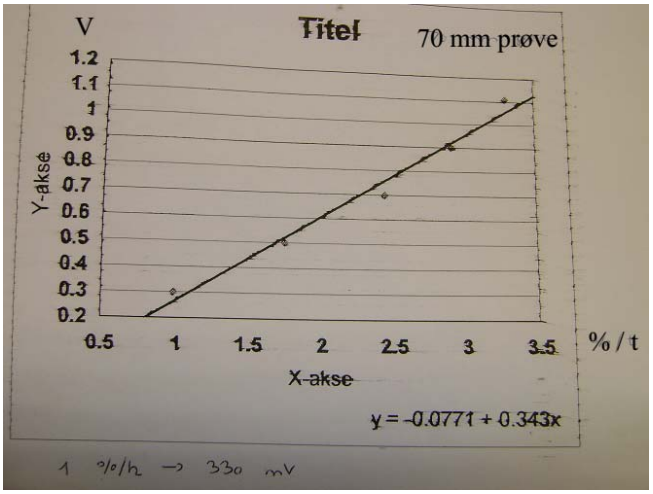
I HTBasic afsluttes trinet "Konsolidering – isotropisk". Der vælges nu "Brud" → "Konstant kammertryk, drænet". Trinene på computeren følges. Startværdien for den aksiale spænding sættes til 1 og kammertryk til det pågældende kammertryk. Transducerne nulstilles ikke.

Stemplet sættes på manual igen og der køres med maksimal hastighed, når kontakten er fuldt opnået skrues hastigheden ned til det ønskede. Det kan ses, at der er kontakt ved at kigge på computeren på værdien for deviatorspændingen ($q = \sigma_3 - \sigma_1$).

Spændinger og tøjninger notes ved start og løbende i forsøget på skema til triaxialforsøg på side 2.1.

Der lastes med 1 % ε i timen og der lastes til 12 %. Normalt hvis man ikke kan observere et brud i prøven defineres brud til 10 % tøjningen, og af disse årsager, samt erfaring køres der til 12 % tøjning. Lasten påføres i volt og regnes derfor om til volt, V, ved brug af grafen på Figur 32.

$$1\%\ \varepsilon\ /\ t = 330\ mV = 0{,}330\ V$$



Figur 32: Omsætning af %/t til volt, V.

Der skal således slukkes for apparatet efter 12 timer. Der kan af praktiske årsager lastes med 0,5 % tøjning i timen således, at man har 24 timer til der skal slukkes for apparatet. Men hvis der køres med 0,5 % tøjning

skal det bemærkes, at der er en nedre grænse for påførelse af volt på ca. 0,200 V, og derfor skal der køres med dette hvis der lastes med 0,5 % tøjning i timen.

Tøjning i 1-retningen noteres, fra HTBasic, og forsøget afsluttes, når der er opnået en tøjning i 1-retning på starttøjningen plus 12 %. På siden af apparatet sættes stempeltrykket til 0 og der afsluttes på computeren ved ”Afslut trin”.

4.0 Afslutte forsøget

Der skrues helt ned for bagtrykket og der lukkes for bagtryk på ”metal board”. Og der skrues helt ned for celletrykket.
Alt på ”Metalboard” lukkes.

4.1 Tømning af celle

På kontrolpanelet åbnes der for afløbet. Det er vigtigt, at der ikke er åbent til vandbehandlingen eller til vakuum pumpen.
Foran på apparatet åbnes der for ventilen tømning af celle.
På topcellen løsnes skruen ved brug af den special fremstillede skruetrækker.

4.2 Prøven

Efter hvert forsøg skal:

- Prøvens diameter måles
- Prøvens højde måles
- Hele prøven vejes
- Delprøve udtages til vandindholdsbestemmelse
- Ingeniørgeologisk beskrivelse foretages.

4.3 Rengøring og klargøring til næste test

Bundstykket og trykhoveder rengøres.

Når der køres til brud køres soklen opad mod stemplet og derfor skal soklen skrues ned igen. Hvis prøvehøjden er 70 mm skal apparat 2 indstilles på 5 cm på soklen og apparat 3 indstilles på 5,50 cm på soklen, se Figur 33. Soklen kan sænkes ved at løsne de to ”skruer” der fastholder soklen og derefter kan soklen skrues både op og ned.



Figur 33: Indstilles på hhv. 5,0 cm og 5,5 cm

A.3: Dronninglund silt

A.3.1 Den relative densitet

Den relative densitet er tidligere undersøgt ved kornvægtsfyldeforsøg. Ved disse tidligere undersøgelser blev der fundet relative densiteter for Dronninglund silten mellem 2,67 - 2,69 (R. Poulsen B. N., 2012) og ud fra det er det besluttet at fastsætte den relative densitet til $d_s = 2{,}68$.

A.3.2 Rumvægt

Rumvægten for Dronninglund silten er skønnet til $\gamma/\gamma' = 19/9$ kN/m^3.

A.4 Hydrometer- og sigteanalyse

A.4.1 Forsøg nr. 130801

VANDINDHOLD

Skål, Sk	nr.	836
Sk	g	3,11
Sk+W	g	57,85
Sk+W_s	g	47,38
w	%	23,65

VASKEREST TIL SIGTNING

Skål	nr.	1017
Sk	g	286,73
Sk+W_{rest}	g	301,31

MATERIALE ANVENDT, TOTAL

Bøtte, B	nr.	34
B	g	17,45
B+W	g	70,65
W	g	53,20

HYDROMETER

Hydrometer	nr.	85715
Cylinderglas	nr.	85715
Meniske, overside	-	1,0
Meniske, underside	-	1,8

HYDROMETERAFLÆSNINGER

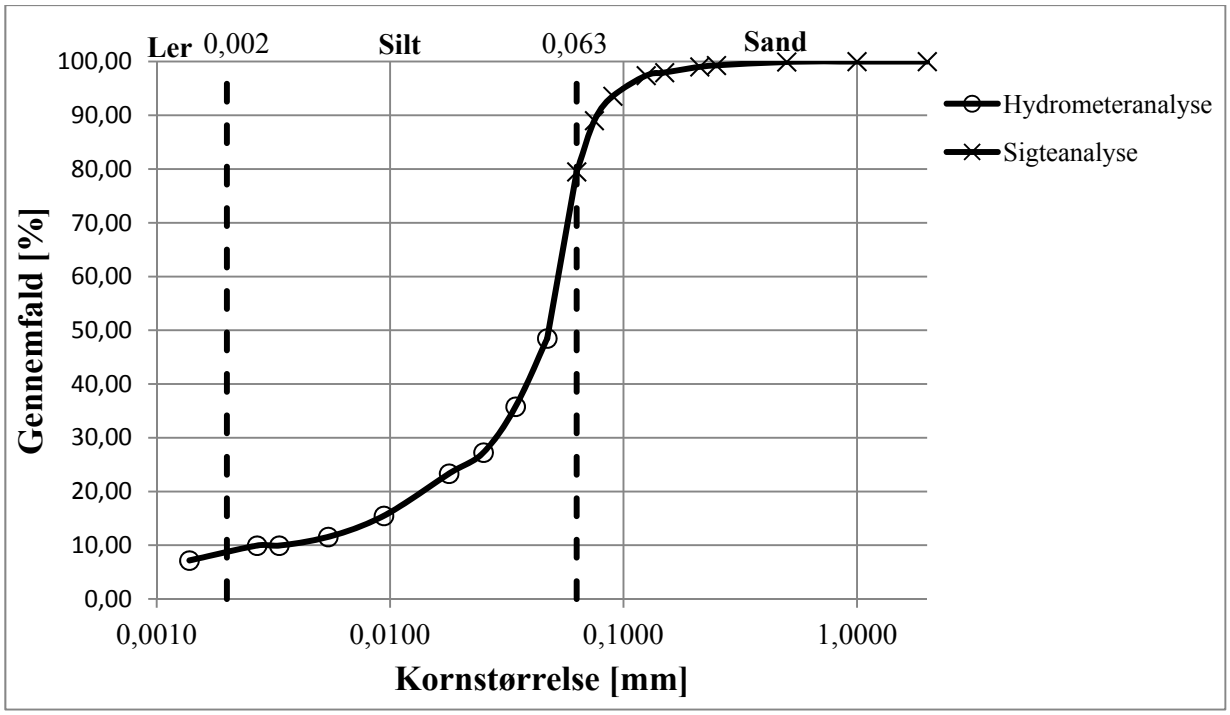
Faldtid, min	0,25	0,5	1	2	Temp. °C	Temp. (ref) °C
Hydro.afl 1	-	25,0	21,9	16,1	21,3	20,5
Hydro.afl 2	-	25,0	22,0	16,5	-	-
Hydro.afl 3	-	-	-	-	-	-

Faldtid, min	min	0,5	1	2	4	8	30	90	240	376	1428
Hydro.afl. R'_h	g/l	25	22	16,5	12,8	11,1	7,7	6	5,3	5,0	4,1
Temp.	°C	21,3	21,3	21,3	20,6	20,6	20,8	21,4	21,3	20,9	21,4
Korr. men. Hydro R_h	g/l	25,8	22,8	17,3	13,6	11,9	8,5	6,8	6,1	6,1	4,9
Korr. For temp og pep. R_0	g/l	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Korr. hydro R_d	g/l	24	21	15,5	11,8	10,1	6,7	5	4,3	4,3	3,1
fac. d_s. k_{ds}	-	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Hydro korr. Y	g/l	23,84	20,86	15,40	11,72	10,03	6,65	4,97	4,27	4,27	3,08
Gennemfald, P	%	83,81	73,33	54,12	41,20	35,27	23,40	17,46	15,02	15,02	10,82
Gennemfald af A	%	55,41	48,48	35,78	27,24	23,32	15,47	11,54	9,93	9,93	7,16
Faldhøjde [cm]	cm	12,2	12,7	13,6	14,25	14,45	15	15,2	15,4	15,4	15,6
Koefficient K [-]	-	13,22	13,22	13,22	13,31	13,31	13,3	13,21	13,22	13,3	13,21
Kornstørrelse	mm	0,0653	0,0471	0,0345	0,0251	0,0179	0,0094	0,0054	0,0033	0,0027	0,0014

FINSIGTNING

Sigte [mm]	Skål nr.	Skål [g]	Skål + sigterest [g]	Sigterest [g]	Materiale [%]	Gennemfald [%]
2,000	904	3,09	3,09	0,00	0	100
1,000	726	3,05	3,05	0,00	0	100
0,500	503	3,04	3,07	0,03	0,070	99,93
0,250	819	3,14	3,42	0,28	0,651	99,28
0,212	991	3,05	3,16	0,11	0,256	99,02
0,150	858	3,08	3,54	0,46	1,069	97,95
0,125	970	3,05	3,29	0,24	0,558	97,40
0,090	577	3,06	4,71	1,65	3,835	93,56
0,075	821	3,10	5,06	1,96	4,556	89,01
0,063	594	3,12	7,22	4,10	9,529	79,48
Bund	993	3,05	5,11	2,06	4,788	74,69

KORNKURVE



A.4.2 Forsøg nr. 130802

VANDINDHOLD

Skål, Sk	nr.	871
Sk	g	3,13
Sk+W	g	68,15
Sk+W_s	g	57,10
w	%	20,47

VASKEREST TIL SIGTNING

Skål	nr.	1022
Sk	g	299,31
Sk+W_{rest}	g	310,71

MATERIALE ANVENDT, TOTAL

Bøtte, B	nr.	43
B	g	17,25
B+W	g	72,87
W	g	55,62

HYDROMETER

Hydrometer	nr.	548
Cylinderglas	nr.	548
Meniske, overside	-	1,7
Meniske, underside	-	2,2

HYDROMETERAFLÆSNINGER

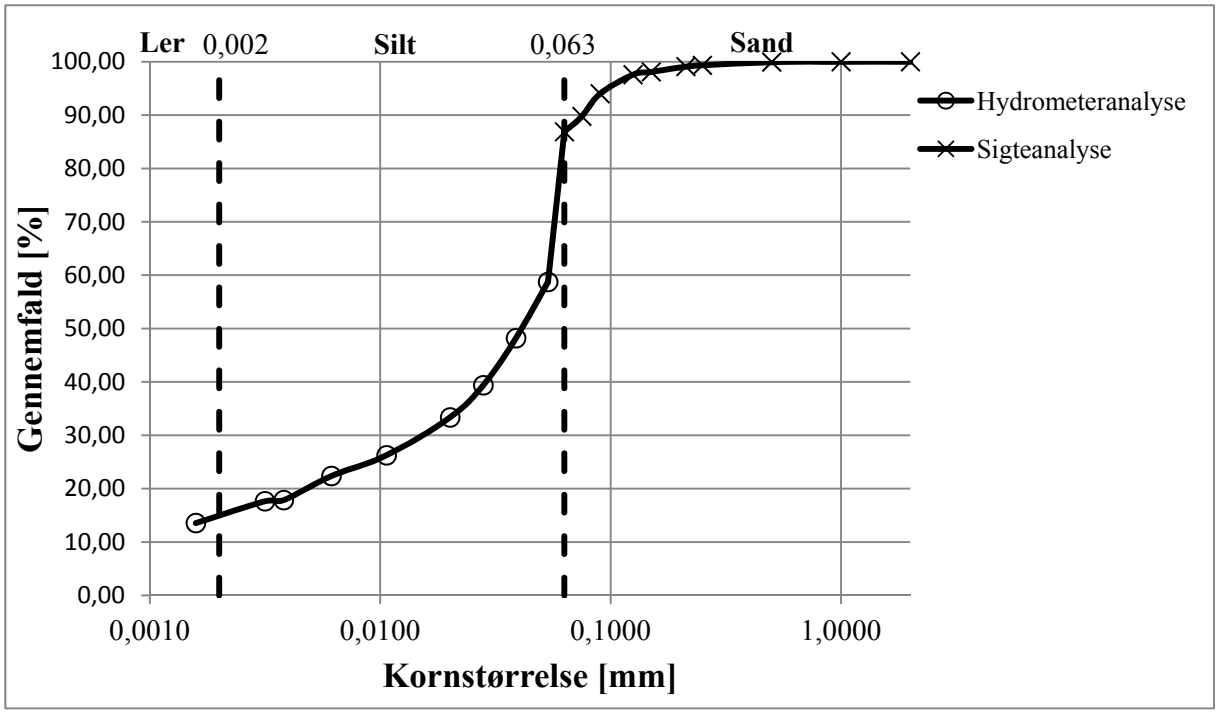
Faldtid, min	0,25	0,5	1	2	Temp. °C	Temp. (ref) °C
Hydro.afl 1	-	31,0	29,2	25,1	20,0	20,1
Hydro.afl 2	-	30,9	28,2	24,1	21,0	-
Hydro.afl 3	-	30,5	29,0	24,1	20,2	-

Faldtid, min	min	0,5	1	2	4	8	30	90	240	354	1408
Hydro.afl. R'_h	g/l	30,9	29	24,1	20	17,2	13,9	12,1	10	9,9	8
Temp.	°C	20,2	20,2	20,2	21	20,9	19,9	21,4	21,3	21,1	21,4
Korr. men. Hydro R_h	g/l	31,4	29,5	24,6	20,5	17,7	14,4	12,6	10,5	10,4	8,5
Korr. For temp og pep. R_0	g/l	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Korr. hydro R_d	g/l	29,2	27,3	22,4	18,3	15,5	12,2	10,4	8,3	8,2	6,3
fac. d_s. k_{ds}	-	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Hydro korr. Y	g/l	29,00	27,12	22,25	18,18	15,40	12,12	10,33	8,24	8,14	6,26
Gennemfald, P	%	83,42	77,99	63,99	52,28	44,28	34,85	29,71	23,71	23,43	18,00
Gennemfald af A	%	62,82	58,73	48,19	39,37	33,35	26,25	22,37	17,86	17,64	13,55
Faldhøjde [cm]	cm	15,7	15,95	16,8	17,75	18,25	18,9	19,4	19,85	19,9	20,2
Koefficient K [-]	-	13,4	13,4	13,4	13,3	13,31	13,42	13,22	13,25	13,32	13,22
Kornstørrelse	mm	0,0751	0,0535	0,0388	0,0280	0,0201	0,0107	0,0061	0,0038	0,0032	0,0016

FINSIGTNING

Sigte [mm]	Skål nr.	Skål [g]	Skål + sigterest [g]	Sigterest [g]	Materiale [%]	Gennemfald [%]
2,000	904	3,09	3,09	0,00	0	100
1,000	726	3,05	3,05	0,00	0	100
0,500	503	3,04	3,07	0,03	0,065	99,94
0,250	819	3,14	3,42	0,28	0,606	99,33
0,212	991	3,05	3,16	0,11	0,238	99,09
0,150	858	3,08	3,54	0,46	0,996	98,09
0,125	970	3,05	3,29	0,24	0,520	97,57
0,090	577	3,06	4,71	1,65	3,574	94,00
0,075	821	3,10	5,06	1,96	4,245	89,75
0,063	594	3,12	7,22	4,10	8,881	86,87
Bund	993	3,05	5,11	2,06	4,462	76,41

KORNKURVE



A.4.3 Forsøg nr. 130803

VANDINDHOLD

Skål, Sk	nr.	845
Sk	g	3,11
Sk+W	g	56,95
Sk+W_s	g	47,83
w	%	20,39

VASKEREST TIL SIGTNING

Skål	nr.	551
Sk	g	381,17
Sk+W_{rest}	g	409,49

MATERIALE ANVENDT, TOTAL

Bøtte, B	nr.	31
B	g	17,48
B+W	g	72,75
W	g	55,27

HYDROMETER

Hydrometer	nr.	542
Cylinderglas	nr.	542
Meniske, overside	-	0
Meniske, underside	-	0,8

HYDROMETERAFLÆSNINGER

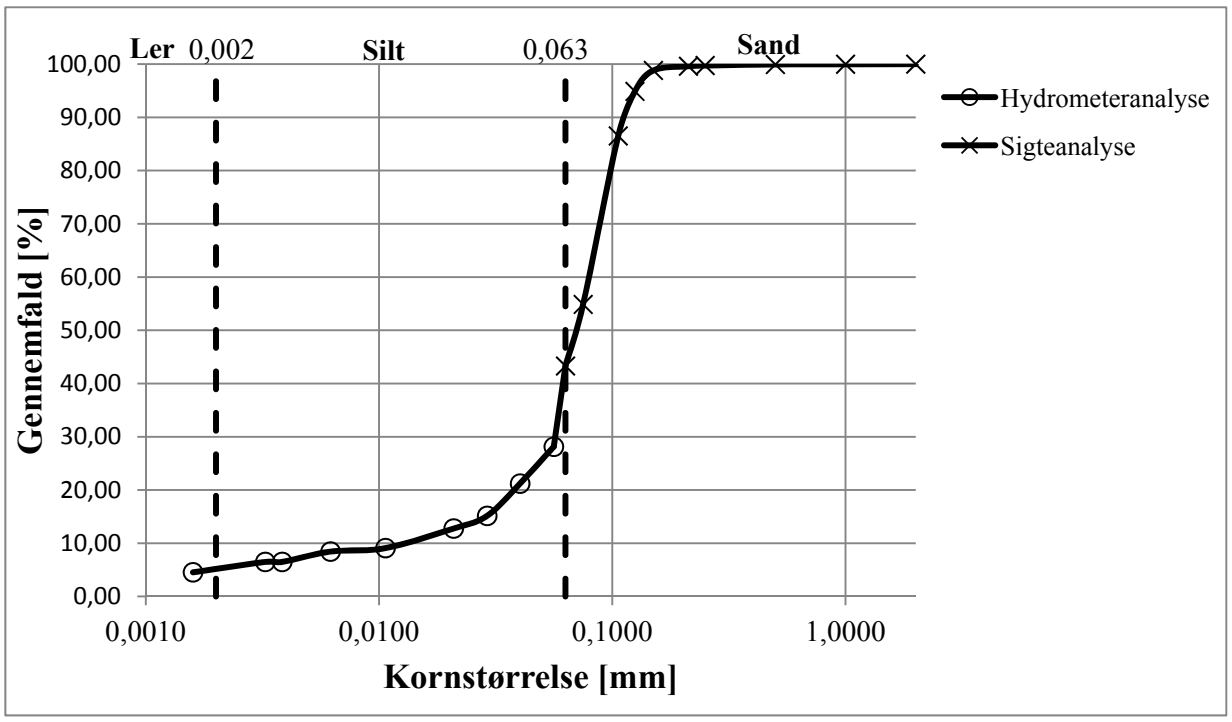
Faldtid, min	0,25	0,5	1	2	Temp. °C	Temp. (ref) °C
Hydro.afl 1	-	13,5	13,0	9,8	20,6	20,6
Hydro.afl 2	-	13,5	12,1	9,7	21,4	-
Hydro.afl 3	-	-	-	-	-	-

Faldtid, min	min	0,5	1	2	4	8	30	90	240	334	1389
Hydro.afl. R'_h	g/l	13,5	13	9,8	7	5,9	4,2	3,9	3	3	2,1
Temp.	°C	21,4	21,4	21,4	21,3	20,4	21,7	21,6	20,6	21,1	21,4
Korr. men. Hydro R_h	g/l	14,3	13,8	10,6	7,8	6,7	5	4,7	3,8	3,8	2,9
Korr. For temp og pep. R_0	g/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Korr. hydro R_d	g/l	13,5	13	9,8	7	5,9	4,2	3,9	3	3	2,1
fac. d_s. k_{ds}	-	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Hydro korr. Y	g/l	13,41	12,91	9,73	6,95	5,86	4,17	3,87	2,98	2,98	2,09
Gennemfald, P	%	76,24	73,42	55,35	39,53	33,32	23,72	22,03	16,94	16,94	11,86
Gennemfald af A	%	29,21	28,13	21,20	15,15	12,77	9,09	8,44	6,49	6,49	4,54
Faldhøjde [cm]	cm	17,7	18	18,5	19,2	19,4	19,6	19,8	20	20	20,15
Koefficient K [-]	-	13,23	13,23	13,23	13,27	13,41	13,18	13,205	13,315	13,29	13,23
Kornstørrelse	mm	0,0787	0,0561	0,0402	0,0291	0,0209	0,0107	0,0062	0,0038	0,0033	0,0016

FINSIGTNING

Sigte [mm]	Skål nr.	Skål [g]	Skål + sigterest [g]	Sigterest [g]	Materiale [%]	Gennemfald [%]
2,000	904	3,09	3,09	0,00	0	100
1,000	726	3,05	3,06	0,01	0,022	99,98
0,500	503	3,04	3,06	0,02	0,044	99,93
0,250	819	3,14	3,23	0,09	0,196	99,74
0,212	991	3,05	3,11	0,06	0,131	99,61
0,150	858	3,08	3,44	0,36	0,784	98,82
0,125	970	3,05	4,86	1,81	3,943	94,88
0,106	577	3,06	6,9	3,84	8,365	86,52
0,075	821	3,10	17,63	14,53	31,650	54,87
0,063	594	3,12	8,43	5,31	11,567	43,30
Bund	993	3,05	4,6	1,55	3,376	39,92

KORNKURVE



A.4.4 Forsøg nr. 130807

VANDINDHOLD

Skål, Sk	nr.	957
Sk	g	3,09
Sk+W	g	62,92
Sk+W_s	g	51,85
w	%	22,70

VASKEREST TIL SIGTNING

Skål	nr.	1013
Sk	g	246,70
Sk+W_{rest}	g	266,35

MATERIALE ANVENDT, TOTAL

Bøtte, B	nr.	34
B	g	17,41
B+W	g	70,49
W	g	53,08

HYDROMETER

Hydrometer	nr.	85715
Cylinderglas	nr.	85715
Meniske, overside	-	1,2
Meniske, underside	-	1,7

HYDROMETERAFLÆSNINGER

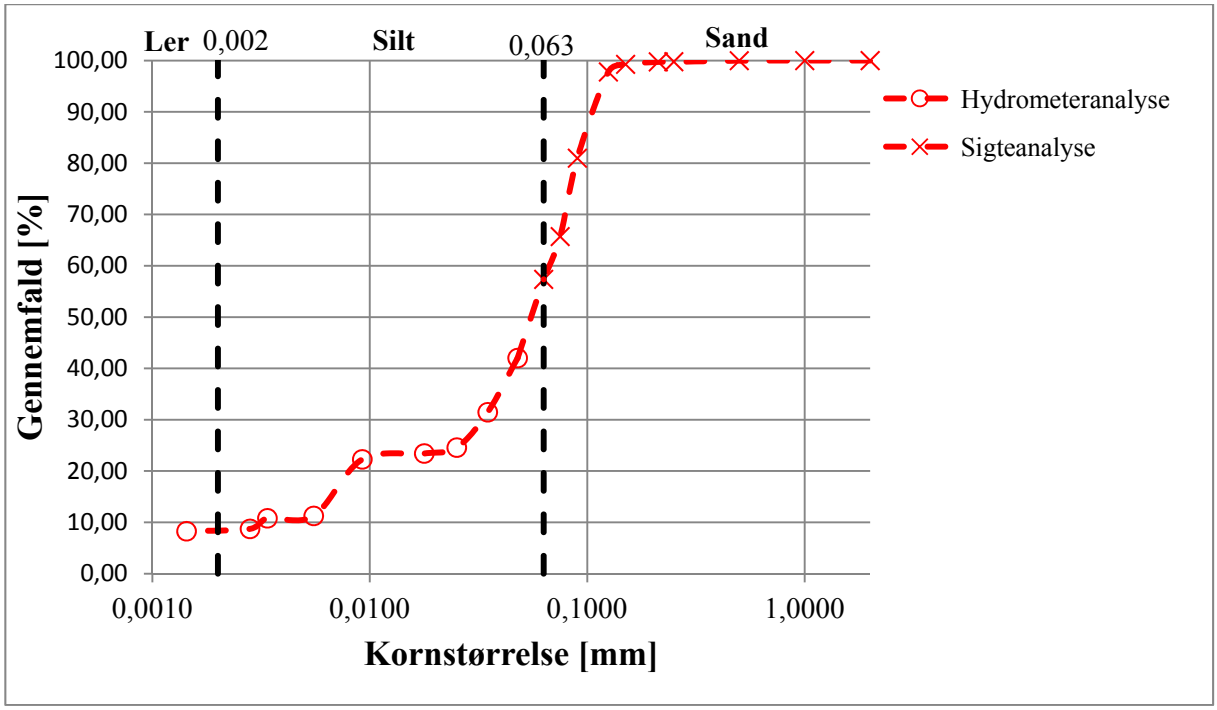
Faldtid, min	0,25	0,5	1	2	Temp. °C	Temp. (ref) °C
Hydro.afl 1	-	22,1	19,8	15,0	21,4	21,3
Hydro.afl 2	-	21,9	19,5	14,9	21,4	-
Hydro.afl 3	-	-	-	-	-	-

Faldtid, min	min	0,5	1	2	4	8	30	90	240	360	1398
Hydro.afl. R'_h	g/l	21,9	19,5	14,9	11,9	11,4	10,9	6,1	5,9	5	4,8
Temp.	°C	21,4	21,4	21,4	21,5	21,4	21,5	19,9	21,7	21,2	21,3
Korr. men. Hydro R_h	g/l	22,4	20	15,4	12,4	11,9	11,4	6,6	6,4	5,5	5,3
Korr. For temp og pep. R_0	g/l	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Korr. hydro R_d	g/l	20,7	18,3	13,7	10,7	10,2	9,7	4,9	4,7	3,8	3,6
fac. d_s. k_{ds}	-	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Hydro korr. Y	g/l	20,56	18,18	13,61	10,63	10,13	9,63	4,87	4,67	3,77	3,58
Gennemfald, P	%	83,89	74,16	55,52	43,36	41,34	39,31	19,86	19,05	15,40	14,59
Gennemfald af A	%	47,53	42,02	31,46	24,57	23,42	22,27	11,25	10,79	8,73	8,27
Faldhøjde [cm]	cm	12,85	13,1	13,9	14,45	14,5	14,65	15,2	15,3	15,7	15,8
Koefficient K [-]	-	13,21	13,21	13,21	13,2	13,21	13,2	13,42	13,38	13,45	13,49
Kornstørrelse	mm	0,0670	0,0478	0,0348	0,0251	0,0178	0,0092	0,0055	0,0034	0,0028	0,0014

FINSIGTNING

Sigte [mm]	Skål nr.	Skål [g]	Skål + sigterest [g]	Sigterest [g]	Materiale [%]	Gennemfald [%]
2,000	904	3,09	3,09	0,00	0	100
1,000	726	3,05	3,05	0,00	0	100
0,500	503	3,04	3,05	0,01	0,023	99,98
0,250	819	3,14	3,23	0,09	0,208	99,77
0,212	991	3,05	3,06	0,01	0,023	99,75
0,150	858	3,08	3,29	0,21	0,485	99,26
0,125	970	3,05	3,69	0,64	1,479	97,78
0,090	577	3,06	10,33	7,27	16,806	80,98
0,075	821	3,10	9,71	6,61	15,280	65,69
0,063	594	3,12	6,73	3,61	8,345	57,35
Bund	860	3,09	3,99	0,90	2,080	55,27

KORNKURVE



A.4.5 Forsøg nr. 130808

VANDINDHOLD

Skål, Sk	nr.	646
Sk	g	3,06
Sk+W	g	82,88
Sk+W_s	g	63,73
w	%	21,55

VASKEREST TIL SIGTNING

Skål	nr.	1022
Sk	g	299,26
Sk+W_{rest}	g	323,64

MATERIALE ANVENDT, TOTAL

Bøtte, B	nr.	31
B	g	17,48
B+W	g	76,87
W	g	59,39

HYDROMETER

Hydrometer	nr.	548
Cylinderglas	nr.	548
Meniske, overside	-	1,0
Meniske, underside	-	1,8

HYDROMETERAFLÆSNINGER

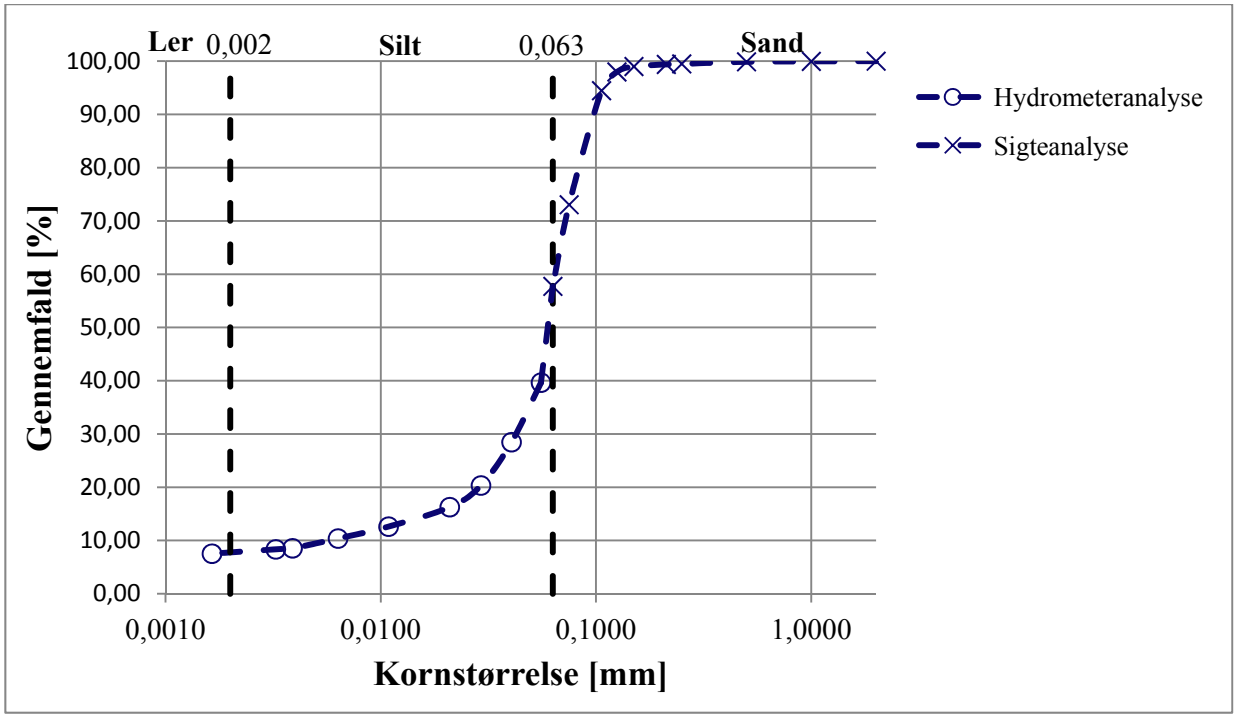
Faldtid, min	0,25	0,5	1	2	Temp. °C	Temp. (ref) °C
Hydro.afl 1	-	24,0	21,2	15,0	21,4	21,2
Hydro.afl 2	-	23,0	20,5	15,0	21,6	-
Hydro.afl 3	-	-	-	-	-	-

Faldtid, min	min	0,5	1	2	4	8	30	90	240	350	1386
Hydro.afl. R'_h	g/l	23	20,5	15	11	9	7,2	6,1	5,2	5,1	4,7
Temp.	°C	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,7	21,5	21,7	21,1	20,8
Korr. men. Hydro R_h	g/l	23,8	21,3	15,8	11,8	9,8	8	6,9	6	5,9	5,5
Korr. For temp og pep. R_0	g/l	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Korr. hydro R_d	g/l	22	19,5	14	10	8	6,2	5,1	4,2	4,1	3,7
fac. d_s. k_{ds}	-	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Hydro korr. Y	g/l	21,85	19,37	13,91	9,93	7,95	6,16	5,07	4,17	4,07	3,68
Gennemfald, P	%	78,54	69,62	49,98	35,70	28,56	22,13	18,21	14,99	14,64	13,21
Gennemfald af A	%	44,72	39,64	28,46	20,33	16,26	12,60	10,37	8,54	8,33	7,52
Faldhøjde [cm]	cm	15,1	17,7	18,85	19,6	20,1	20,4	20,7	20,9	20,99	21,15
Koefficient K [-]	-	13,19	13,19	13,19	13,19	13,19	13,18	13,2	13,18	13,28	13,3
Kornstørrelse	mm	0,0725	0,0555	0,0405	0,0292	0,0209	0,0109	0,0063	0,0039	0,0033	0,0016

FINSIGTNING

Sigte [mm]	Skål nr.	Skål [g]	Skål + sigterest [g]	Sigterest [g]	Materiale [%]	Gennemfald [%]
2,000	904	3,09	3,09	0,00	0	100
1,000	726	3,05	3,07	0,02	0,041	99,96
0,500	503	3,04	3,08	0,04	0,082	99,88
0,250	819	3,14	3,33	0,19	0,389	99,49
0,212	991	3,05	3,1	0,05	0,102	99,39
0,150	858	3,08	3,27	0,19	0,389	99,00
0,125	970	3,05	3,55	0,50	1,023	97,97
0,106	577	3,06	4,78	1,72	3,520	94,45
0,075	821	3,10	13,56	10,46	21,407	73,05
0,063	594	3,12	10,61	7,49	15,329	57,72
Bund	718	3,10	6,44	3,34	6,836	50,88

KORNKURVE



A.4.6 Forsøg nr. 130809

VANDINDHOLD

Skål, Sk	nr.	815
Sk	g	3,11
Sk+W	g	94,35
Sk+W_s	g	77,21
w	%	23,13

VASKEREST TIL SIGTNING

Skål	nr.	1017
Sk	g	286,70
Sk+W_{rest}	g	311,39

MATERIALE ANVENDT, TOTAL

Bøtte, B	nr.	29
B	g	17,33
B+W	g	71,18
W	g	53,85

HYDROMETER

Hydrometer	nr.	542
Cylinderglas	nr.	542
Meniske, overside	-	0,0
Meniske, underside	-	0,7

HYDROMETERAFLÆSNINGER

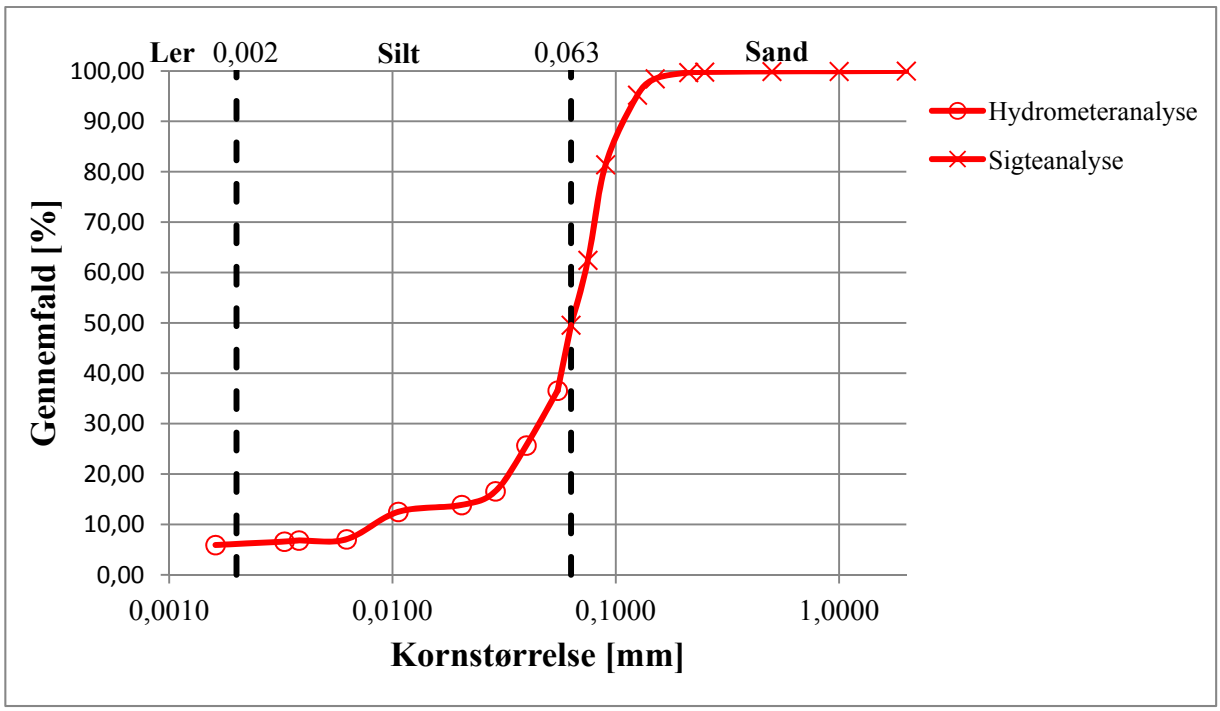
Faldtid, min	0,25	0,5	1	2	Temp. °C	Temp. (ref) °C
Hydro.afl 1	-	19,0	16,1	11,3	21,7	21,3
Hydro.afl 2	-	18,0	16,0	11,0	22,0	-
Hydro.afl 3	-	-	-	-	-	-

Faldtid, min	min	0,5	1	2	4	8	30	90	240	330	1366
Hydro.afl. R'_h	g/l	19	16,1	11,3	7,3	6,1	5,5	3,1	3	2,9	2,6
Temp.	°C	21,7	21,7	21,7	21,4	21,9	21,8	21,4	21,7	21	21,1
Korr. men. Hydro R_h	g/l	19,7	16,8	12	8	6,8	6,2	3,8	3,7	3,6	3,3
Korr. For temp og pep. R_0	g/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Korr. hydro R_d	g/l	19	16,1	11,3	7,3	6,1	5,5	3,1	3	2,9	2,6
fac. d_s. k_{ds}	-	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Hydro korr. Y	g/l	18,87	15,99	11,22	7,25	6,06	5,46	3,08	2,98	2,88	2,58
Gennemfald, P	%	88,21	74,75	52,46	33,89	28,32	25,53	14,39	13,93	13,46	12,07
Gennemfald af A	%	43,15	36,57	25,66	16,58	13,85	12,49	7,04	6,81	6,59	5,90
Faldhøjde [cm]	cm	16,8	17,35	18,2	19,15	19,25	19,5	20	20,05	20,1	20,2
Koefficient K [-]	-	13,18	13,18	13,18	13,21	13,15	13,16	13,21	13,18	13,28	13,25
Kornstørrelse	mm	0,0764	0,0549	0,0398	0,0289	0,0204	0,0106	0,0062	0,0038	0,0033	0,0016

FINSIGTNING

Sigte [mm]	Skål nr.	Skål [g]	Skål + sigterest [g]	Sigterest [g]	Materiale [%]	Gennemfald [%]
2,000	904	3,09	3,09	0,00	0	100
1,000	726	3,05	3,08	0,03	0,069	99,93
0,500	503	3,04	3,05	0,01	0,023	99,91
0,250	819	3,14	3,19	0,05	0,114	99,79
0,212	991	3,05	3,09	0,04	0,091	99,70
0,150	858	3,08	3,62	0,54	1,235	98,47
0,125	970	3,05	4,47	1,42	3,247	95,22
0,090	577	3,06	9,1	6,04	13,811	81,41
0,075	821	3,10	11,4	8,30	18,978	62,43
0,063	594	3,12	8,75	5,63	12,873	49,56
Bund	877	3,10	5,45	2,35	5,373	44,19

KORNKURVE



A.4.7 Forsøg nr. 130810

VANDINDHOLD

Skål, Sk	nr.	792
Sk	g	3,10
Sk+W	g	88,08
Sk+W_s	g	74,29
w	%	19,37

VASKEREST TIL SIGTNING

Skål	nr.	1017
Sk	g	286,72
Sk+W_{rest}	g	303,51

MATERIALE ANVENDT, TOTAL

Bøtte, B	nr.	34
B	g	17,41
B+W	g	74,04
W	g	56,63

HYDROMETER

Hydrometer	nr.	548
Cylinderglas	nr.	85715
Meniske, overside	-	1,2
Meniske, underside	-	1,8

HYDROMETERAFLÆSNINGER

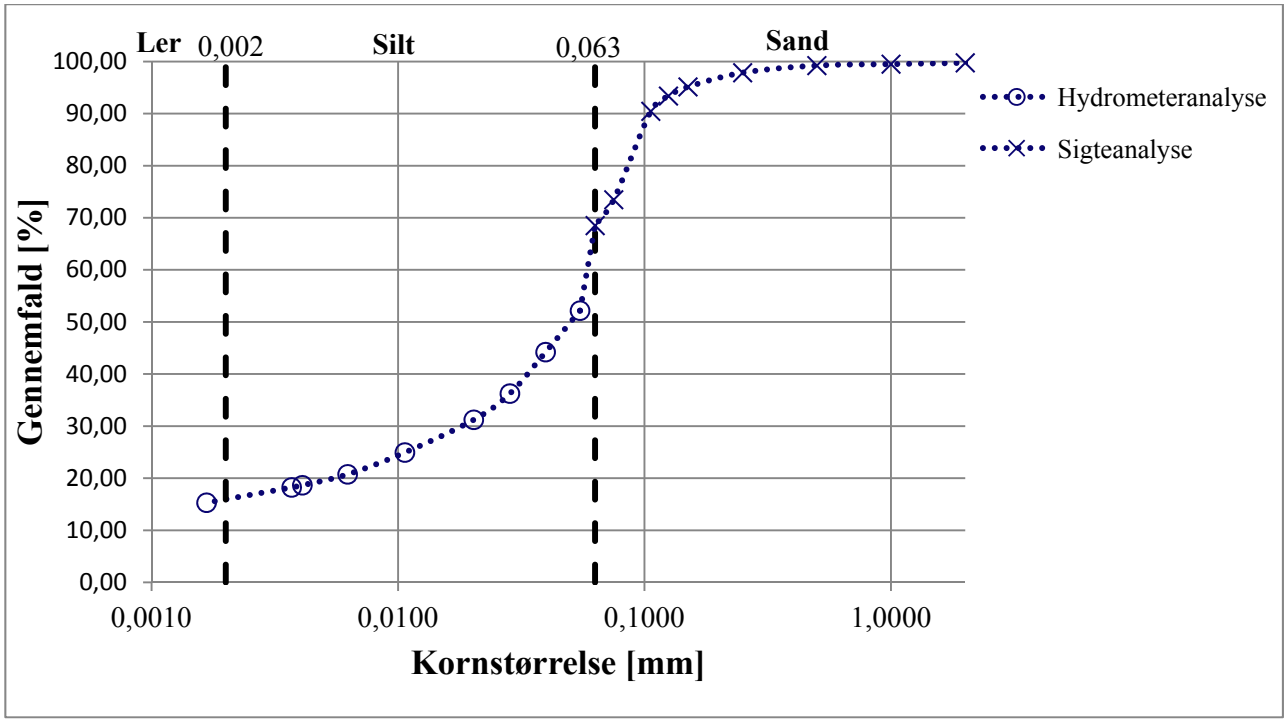
Faldtid, min	0,25	0,5	1	2	Temp. °C	Temp. (ref) °C
Hydro.afl 1	-	28	25,8	22,1	20,4	20,3
Hydro.afl 2	-	27,9	25,8	21,2	20,5	20,3
Hydro.afl 3	-	28,0	26,1	22,3	19,7	19,7

Faldtid, min	min	0,5	1	2	4	8	30	90	210	263	1317
Hydro.afl. R'_h	g/l	28	26,1	22,3	18,5	16,1	13,1	11,1	10,1	9,9	8,5
Temp.	°C	19,7	19,7	19,7	20,5	20,8	20,6	20,5	20,8	19,7	19,6
Korr. men. Hydro R_h	g/l	28,6	26,7	22,9	19,1	16,7	13,7	11,7	10,7	10,5	9,1
Korr. For temp og pep. R_0	g/l	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Korr. hydro R_d	g/l	26,8	24,9	21,1	17,3	14,9	11,9	9,9	8,9	8,7	7,3
fac. d_s. k_{ds}	-	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Hydro korr. Y	g/l	26,62	24,73	20,96	17,18	14,80	11,82	9,83	8,84	8,64	7,25
Gennemfald, P	%	83,38	77,47	65,64	53,82	46,35	37,02	30,80	27,69	27,07	22,71
Gennemfald af A	%	56,15	52,17	44,21	36,25	31,22	24,93	20,74	18,65	18,23	15,29
Faldhøjde [cm]	cm	16,1	16,55	17,4	18,15	18,6	19,2	19,7	19,85	19,9	20,2
Koefficient K [-]	-	13,45	13,45	13,45	13,34	13,3	13,32	13,34	13,3	13,45	13,49
Kornstørrelse	mm	0,0763	0,0547	0,0397	0,0284	0,0203	0,0107	0,0062	0,0041	0,0037	0,0017

FINSIGTNING

Sigte [mm]	Skål nr.	Skål [g]	Skål + sigterest [g]	Sigterest [g]	Materiale [%]	Gennemfald [%]
4,000	904	3,09	3,09	0,00	0	100
2,000	726	3,05	3,17	0,12	0,253	99,75
1,000	503	3,04	3,16	0,12	0,253	99,49
0,500	819	3,14	3,27	0,13	0,274	99,22
0,250	991	3,05	3,7	0,65	1,371	97,85
0,150	858	3,08	4,37	1,29	2,721	95,13
0,125	970	3,05	3,88	0,83	1,751	93,38
0,106	577	3,06	4,45	1,39	2,932	90,44
0,075	821	3,10	11,15	8,05	16,981	73,46
0,063	594	3,12	5,47	2,35	4,957	68,51
Bund	877	3,11	4,42	1,31	2,763	65,74

KORNKURVE



A.4.8 Forsøg nr. 130811

VANDINDHOLD

Skål, Sk	nr.	756
Sk	g	3,11
Sk+W	g	84,14
Sk+W_s	g	70,22
w	%	20,74

VASKEREST TIL SIGTNING

Skål	nr.	1022
Sk	g	299,36
Sk+W_{rest}	g	321,79

MATERIALE ANVENDT, TOTAL

Bøtte, B	nr.	29
B	g	17,34
B+W	g	70,25
W	g	52,91

HYDROMETER

Hydrometer	nr.	542
Cylinderglas	nr.	542
Meniske, overside	-	0,0
Meniske, underside	-	0,8

HYDROMETERAFLÆSNINGER

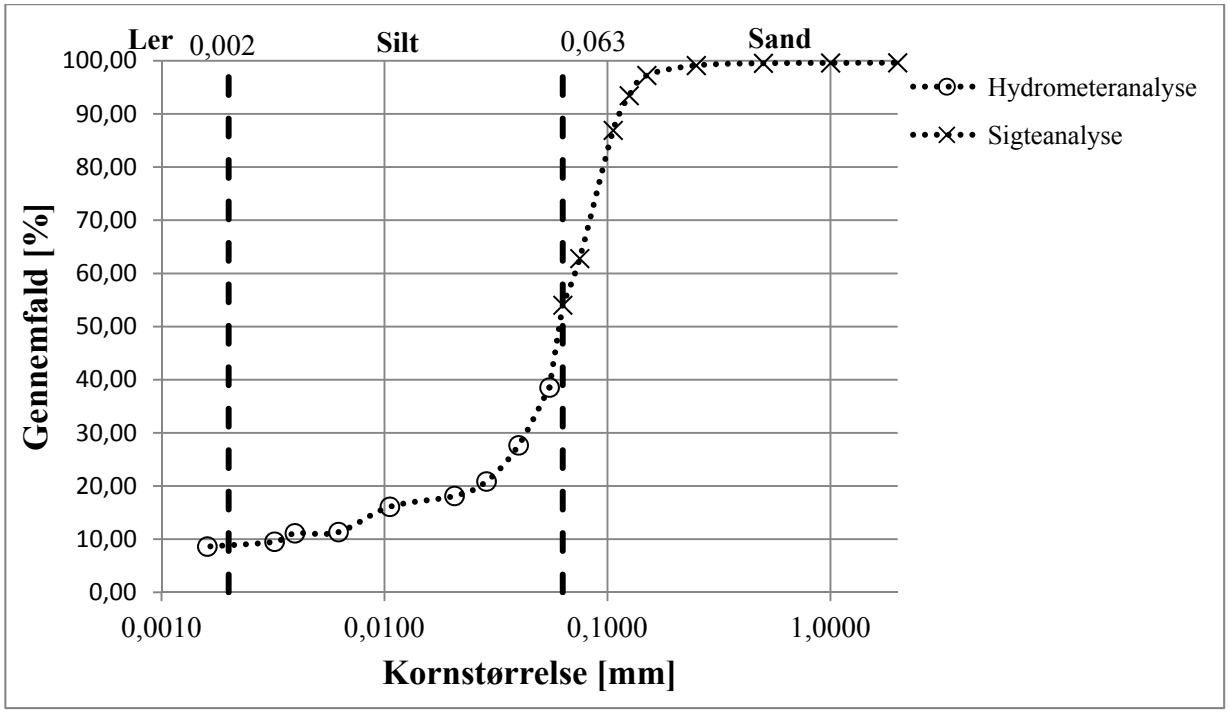
Faldtid, min	0,25	0,5	1	2	Temp. °C	Temp. (ref) °C
Hydro.afl 1	-	18,9	16,8	12,3	20,8	20,5
Hydro.afl 2	-	19,0	17,0	12,2	21,0	20,5
Hydro.afl 3	-	-	-	-	-	-

Faldtid, min	min	0,5	1	2	4	8	30	90	226	342	1395
Hydro.afl. R'_h	g/l	19	17	12,2	9,2	8	7,1	5	4,9	4,2	3,8
Temp.	°C	21	21	21	21	20,3	21,2	20,7	20	20,6	20,1
Korr. men. Hydro R_h	g/l	19,8	17,8	13	10	8,8	7,9	5,8	5,7	5	4,6
Korr. For temp og pep. R_0	g/l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Korr. hydro R_d	g/l	19	17	12,2	9,2	8	7,1	5	4,9	4,2	3,8
fac. d_s. k_{ds}	-	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Hydro korr. Y	g/l	18,87	16,89	12,12	9,14	7,95	7,05	4,97	4,87	4,17	3,77
Gennemfald, P	%	81,94	73,32	52,62	39,68	34,50	30,62	21,56	21,13	18,11	16,39
Gennemfald af A	%	43,07	38,53	27,65	20,85	18,13	16,09	11,33	11,11	9,52	8,61
Faldhøjde [cm]	cm	16,7	17,1	18,05	18,6	18,9	19,1	19,6	19,7	19,85	19,95
Koefficient K [-]	-	13,28	13,28	13,28	13,28	13,39	13,23	13,31	13,41	13,32	13,405
Kornstørrelse	mm	0,0767	0,0549	0,0399	0,0286	0,0206	0,0106	0,0062	0,0040	0,0032	0,0016

FINSIGTNING

Sigte [mm]	Skål nr.	Skål [g]	Skål + sigterest [g]	Sigterest [g]	Materiale [%]	Gennemfald [%]
4,000	904	3,09	3,26	0,17	0,388	99,61
2,000	726	3,05	3,05	0,00	0,000	99,61
1,000	503	3,04	3,05	0,01	0,023	99,59
0,500	819	3,14	3,17	0,03	0,068	99,52
0,250	991	3,05	3,23	0,18	0,411	99,11
0,150	858	3,08	3,9	0,82	1,871	97,24
0,125	970	3,05	4,72	1,67	3,811	93,43
0,106	577	3,06	5,92	2,86	6,527	86,90
0,075	821	3,10	13,67	10,57	24,121	62,78
0,063	594	3,12	6,96	3,84	8,763	54,02
Bund	770	3,15	4,79	1,64	3,743	50,27

KORNKURVE



A.5 Bestemmelse af den relative lejringstæthed

Ved bestemmelse af den relative lejringstæthed er der udført forsøg, hvor den mest løse og faste aflejring er bestemt. Den relative lejringstæthed er et forsøg der som udgangspunkt bruges til sand og grus.

Der er udført en udvaskning af Dronninglund silten for at skille kornene fra hinanden. Derefter er prøven tørret i ovn ved 50 °C. Efter tørring fik silten en skorpe, og det er forsøgt at skille denne skorpe mest muligt ved brug af fingrene og en morter. Ved brug af en morter kan der ske knusning af korn, men det vurderes, acceptabelt at bruge morteren fordi det ikke var muligt at skille kornene ad med fingrene alene.





Ved bestemmelse af den løseste og fasteste lejring er der udført 3 forsøg for hver prøve og de givne værdier i tabellen herunder angiver gennemsnittet fra de 3 forsøg for hver prøve.

Løs lejring – Gennemsnittet af tre forsøg for hver prøve

Forsøg	nr.	130801	130802	130803	130807	130808	130809	130810	130811
A (10,0/ 38,48)	cm^2	10	10	10	10	10	10	10	10
h (7,0/14,4)	cm	7	7	7	7	7	7	7	7
V (70,0/554,0)	cm^3	70	70	70	70	70	70	70	70
Cyl. + W_s	g	328,54	321,49	331,82	334,06	328,35	331,78	336,66	325,48
Cyl.	g	241,92	241,94	241,94	241,95	241,94	241,95	241,95	241,92
W_s	g	86,62	79,56	89,88	92,11	86,41	89,83	94,71	83,56
$e_{max} = \frac{d_s \cdot \rho_w \cdot V}{W_s} - 1$		1,166	1,358	1,087	1,037	1,171	1,088	0,981	1,245

Fast lejring – Gennemsnittet af tre forsøg for hver prøve

Forsøg	nr.	130801	130802	130803	130807	130808	130809	130810	130811
A (10,0/38,48)	cm^2	10	10	10	10	10	10	10	10
h	cm	5,46	5,41	5,53	5,79	5,65	5,55	5,66	5,35
V	cm^3	54,62	54,10	55,34	57,99	56,51	55,52	56,67	53,54
Cyl. + W_s	g	332,94	331,22	335,56	341,09	336,39	335,23	339,66	331,05
Cyl.	g	241,93	241,93	241,93	241,95	241,93	241,94	241,95	241,93
W_s	g	91,02	89,29	93,63	92,11	94,46	93,29	97,71	89,12
$e_{min} = \frac{d_s \cdot \rho_w \cdot V}{W_s} - 1$		0,608	0,624	0,584	0,652	0,603	0,595	0,554	0,610

$$e_{\text{in situ}} = (1+w)\cdot\frac{d_s}{\gamma}\gamma_w - 1$$

$$I_D = \frac{e_{\max} - e_{\text{in situ}}}{e_{\max} - e_{\min}}$$

Forsøg nr.	130801	130802	130803	130807	130808	130809	130810	130811
e_{insitu}	0,744	0,699	0,698	0,731	0,715	0,737	0,679	0,703
I_D	0,756	0,897	0,773	0,876	0,804	0,712	0,709	0,853

A.6 CPT Forsøg

A.6.1 Teori og Beregninger

Der er udført CPT forsøg i Dronninglund silten (R. Poulsen B. N., 2011) ved forskellige nedtrængningshastigheder for, at undersøge hvornår silten opfører sig udrænet og drænet. I dette projekt fokuseres der udelukkende på CPT forsøg udført med standard nedtræningshastighed på 20 mm/s±5. Der er udført 3 CPT forsøg ved standard nedtrængningshastighed, og disse er benævnt CPTs2a2, CPTs2b4 og CPTs2c2. CPT forsøgene er placeret som vist på situationsplanen på Figur 3.



Figur 3: Situationsplan over boringer og CPT forsøg

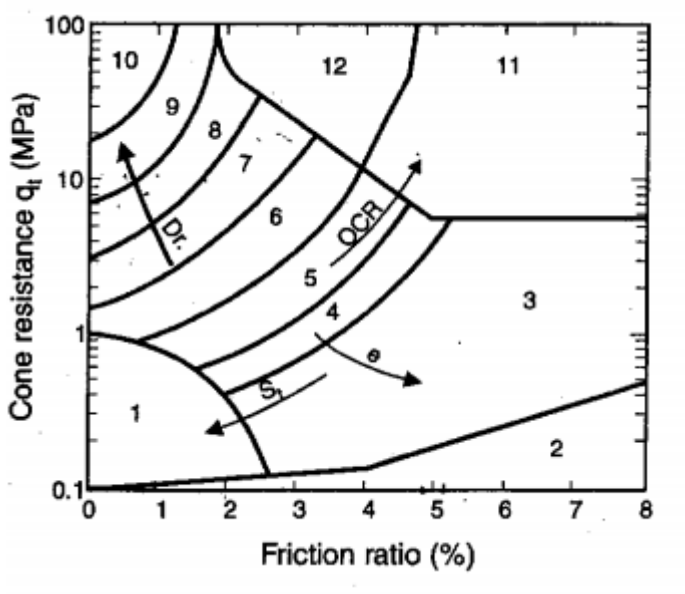
Alle koter er angivet i systemet DVR90.

Den målte spidsmodstand q_c er korrigeret for ulige arealeffekter på spidsen (T. Lunne, 1997).

$$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - a)$$

Hvor u_2 er poretrykket bag spidsen og a er spidsens arealforhold som for disse tests er 0,68 (R. Poulsen B. N., 2011).

For intaktprøverne i boring S2B2 er jordarten forsøgt tolket ved Robertson et al. (1986). Diagrammet er vist på Figur 4.



Zone:	Soil Behaviour Type:				
1.	Sensitive fine grained	5.	Clayey silt to silty clay	9.	Sand
2.	Organic material	6.	Sandy silt to clayey silt	10.	Gravelly sand to sand
3.	Clay	7.	Silty sand to sandy silt	11.	Very stiff fine grained*
4.	Silty clay to clay	8.	Sand to silty sand	12.	Sand to clayey sand*

* *Overconsolidated or cemented.*

Figur 4: Jordart tolket ud fra CPT ved Robertson et al. (1986) (T. Lunne, 1997)

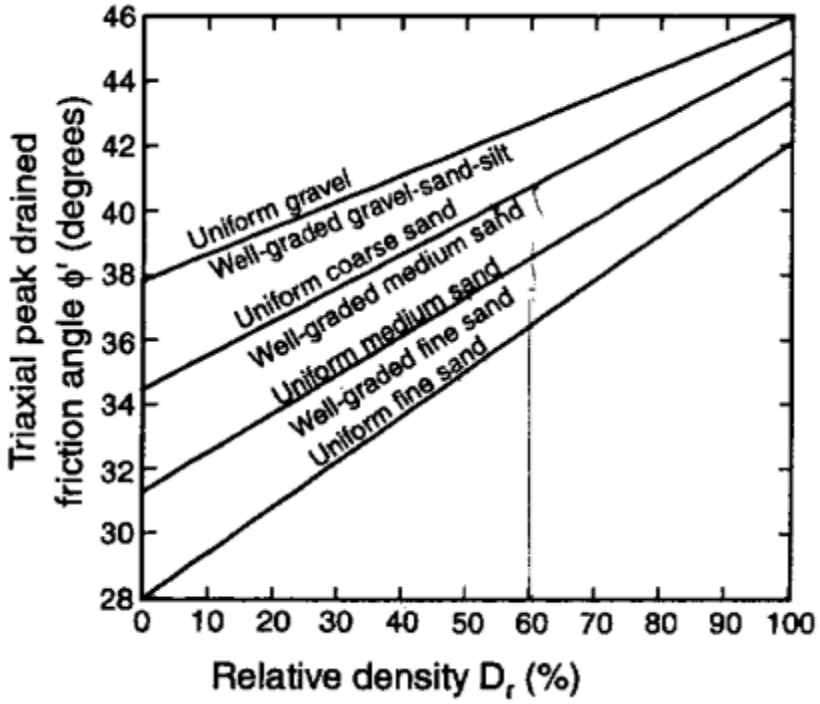
Den relative lejringstæthed er tolket ved Baldi et al. (1986).

$$D_r = \frac{1}{C_2} \cdot ln \frac{q_t}{C_0 \cdot \sigma'^{C1}_{v0}}$$

Hvor kontanterne C_0, C_1 og C_2 er valgt ud fra normal og overkonsolideret sand:

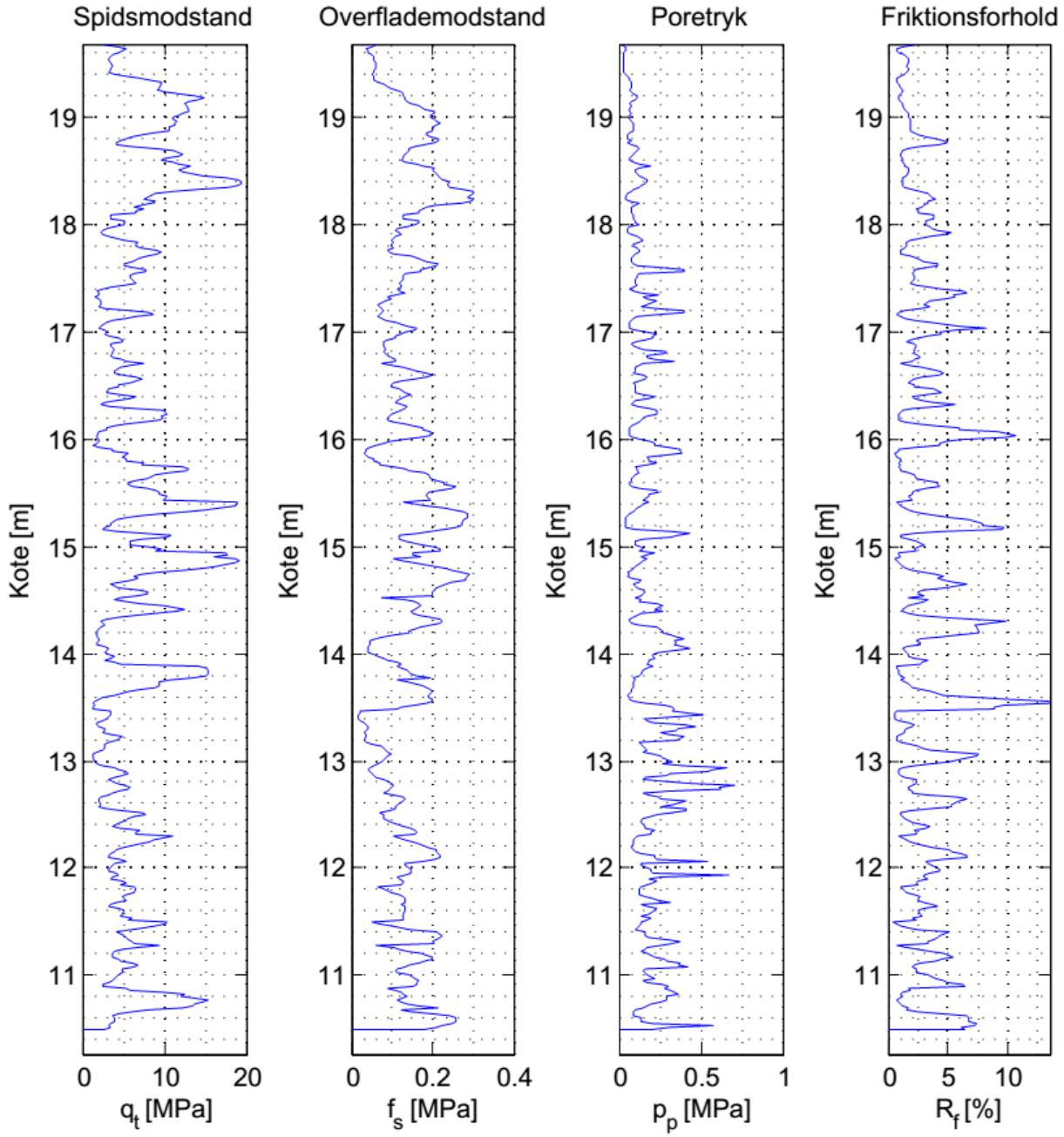
$$C_0 = 181 \ , \ C_1 = 0{,}55 \ , \ C_2 = 2{,}61$$

Den effektive friktionsvinkel er tolket ved Schmertmann (1978) som vist på Figur 5. Ved brug af Schmertmanns diagram er der valgt ”well-graded gravel-sand-silt”.

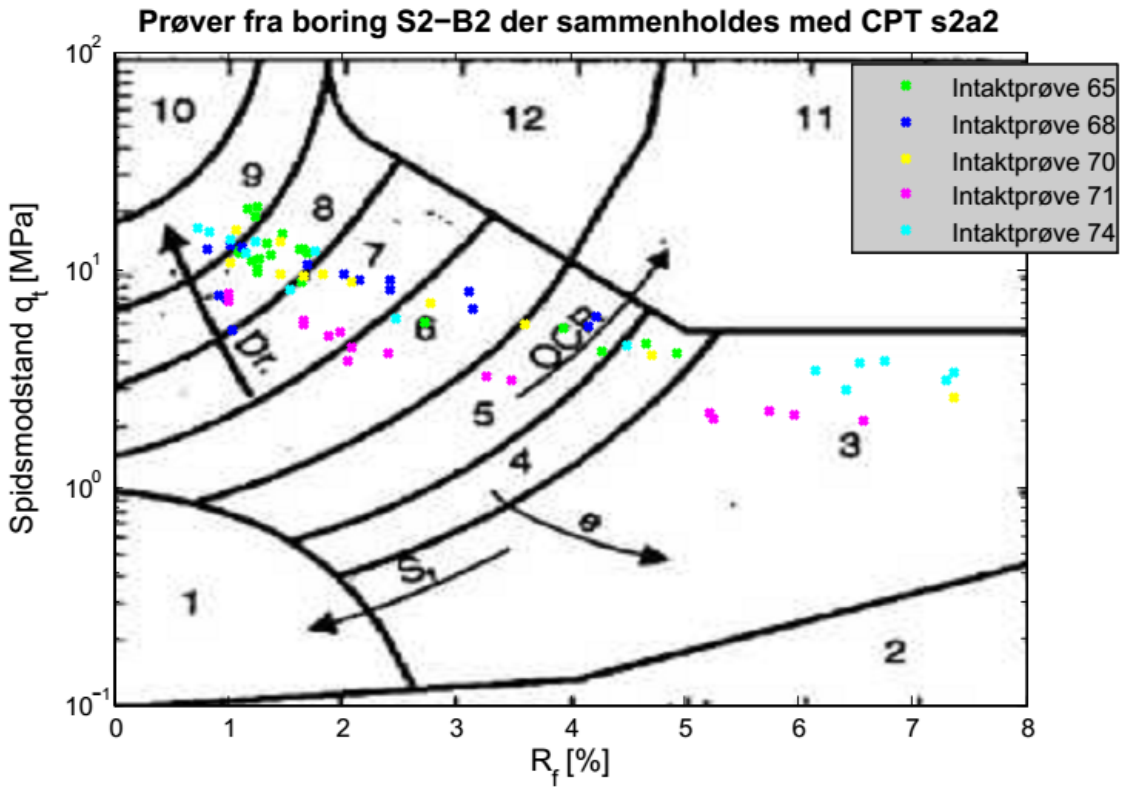


Figur 5: Tolkning af friktionsvinklen ved brug af Schmertmanns diagram (T. Lunne, 1997)

A.6.2 CPTs2a2

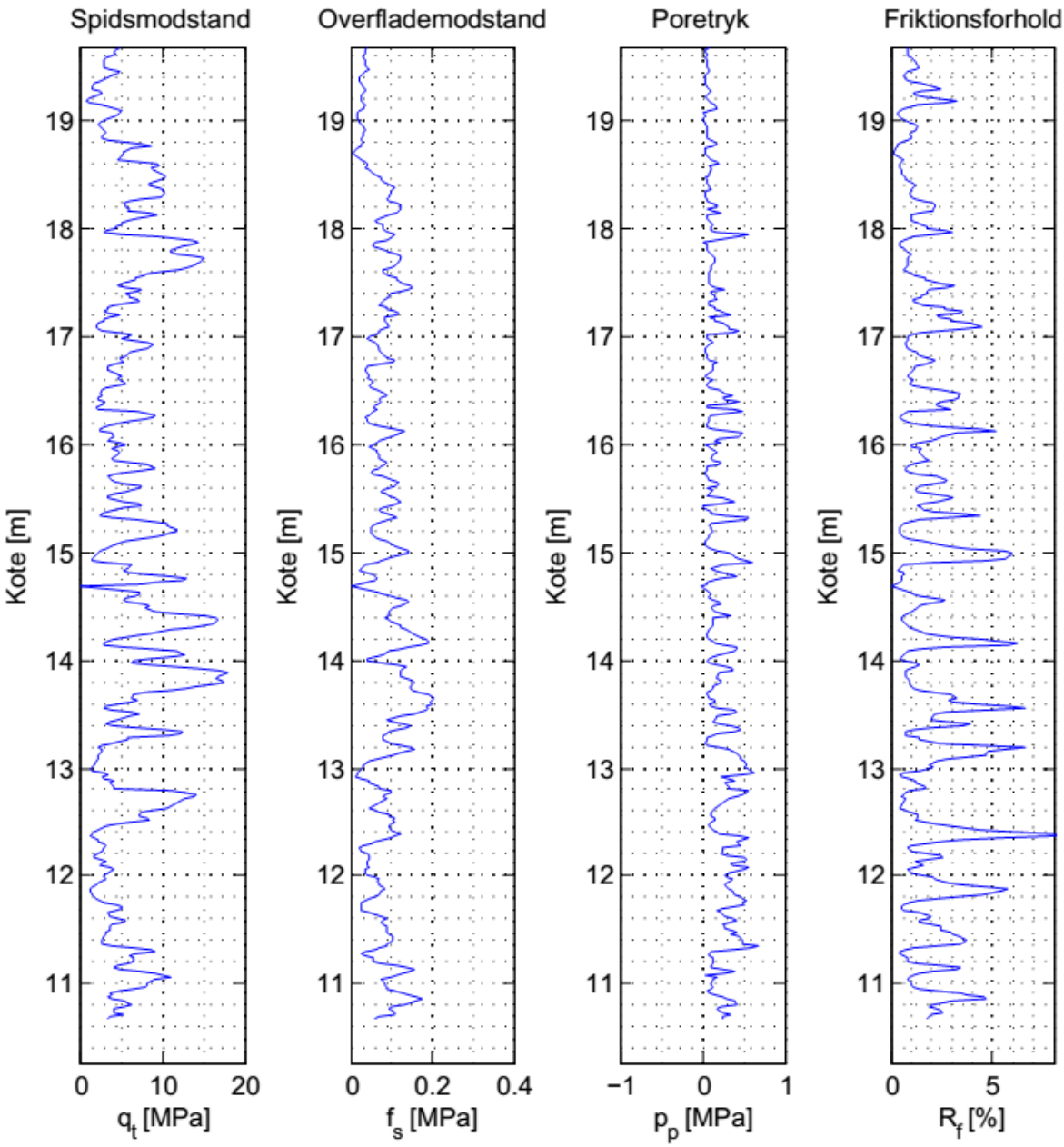

Spidsmodstand
Overflademodstand
Poretryk
Friktionsforhold
Kote [m]
19
18
17
16
15
14
13
12
11
0
10
20
q_t [MPa]
0.2
0.4
f_s [MPa]
0.5
1
p_p [MPa]
5
R_f [%]

Jordarten er forsøgt tolket ved Robertson et al. (1986). De dybder hvor der er udtaget intaktprøver i boring S2B2 er sammenholdt med de respektive dybder i CPT forsøget:

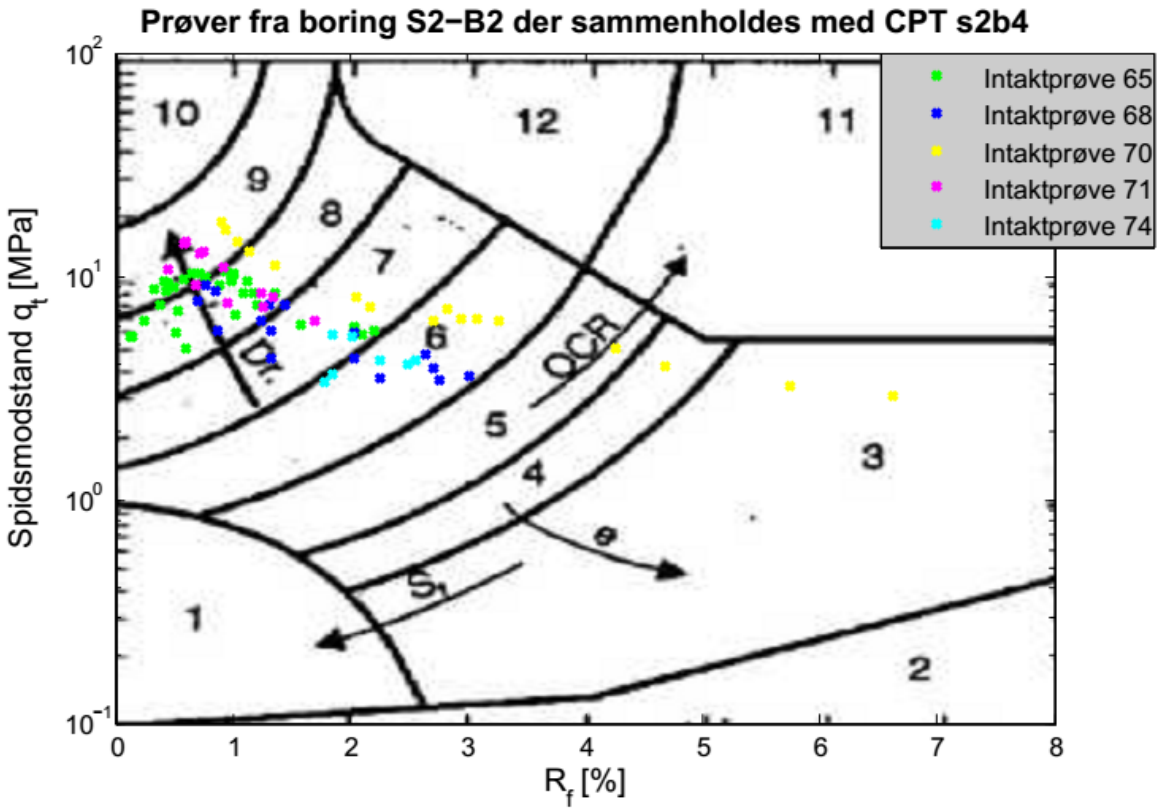


Figur 6: Prøver fra boring S2B2 sammenholdes med CPT s2a2 i Robersons diagram for tolkning af jordart (T. Lunne, 1997)

A.6.3 CPTs2b4

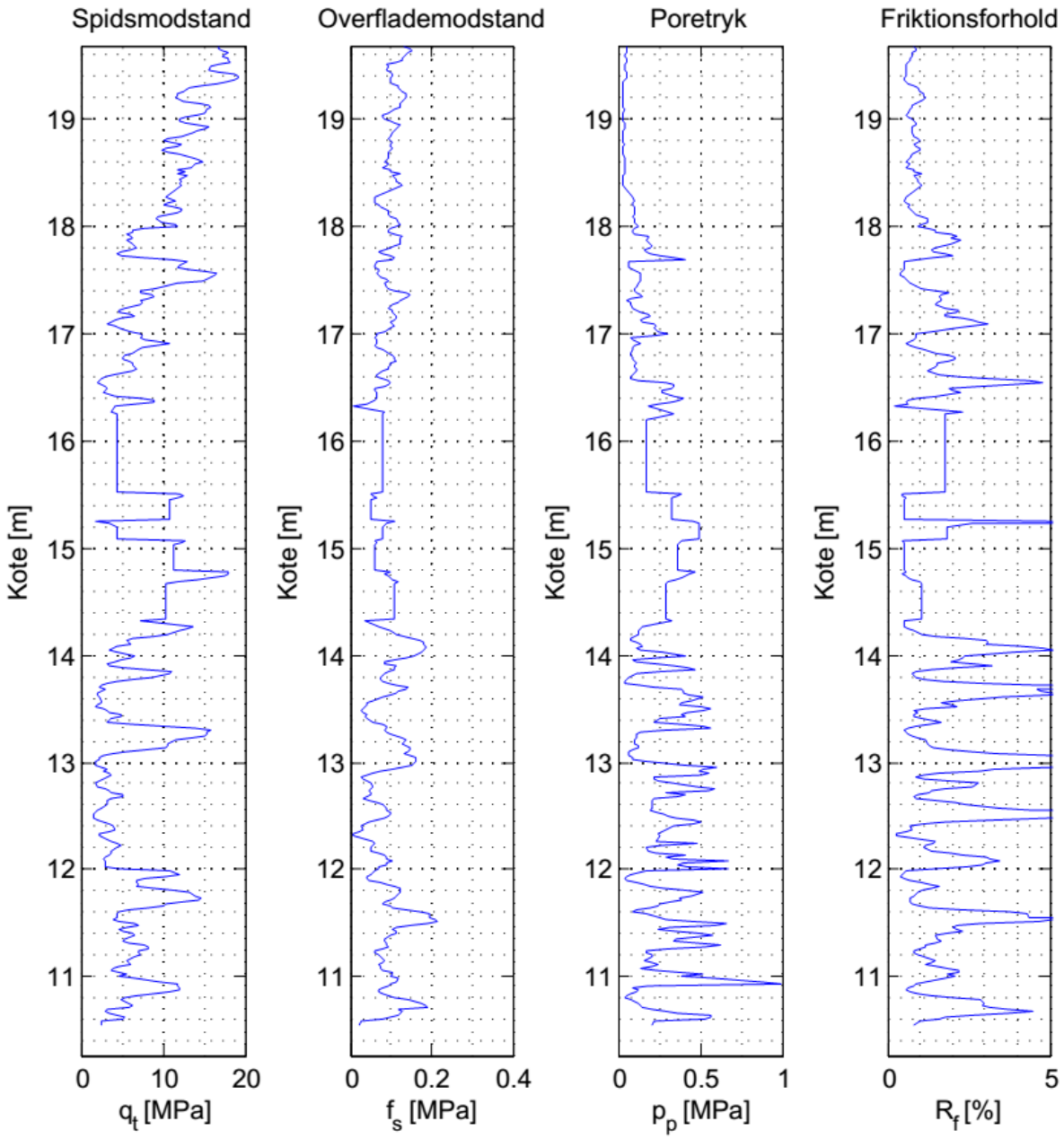

Spidsmodstand
Overflademodstand
Poretryk
Friktionsforhold
Kote [m]
19
18
17
16
15
14
13
12
11
0
10
20
q_t [MPa]
0
0.2
0.4
f_s [MPa]
−1
0
1
p_p [MPa]
0
5
R_f [%]

Jordarten er forsøgt tolket ved Robertson et al. (1986). De dybder hvor der er udtaget intaktprøver i boring S2B2 er sammenholdt med de respektive dybder i CPT forsøget:

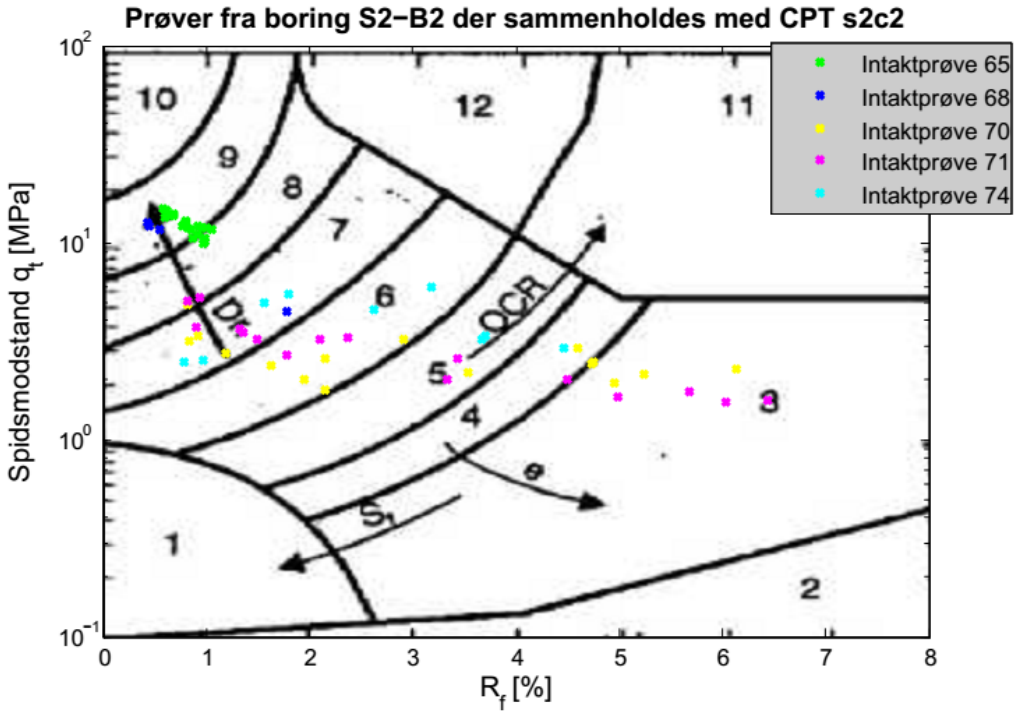


Figur 7: Prøver fra boring S2B2 sammenholdes med CPT s2b4 i Robersons diagram for tolkning af jordart (T. Lunne, 1997)

A.6.4 CPTs2c2


Spidsmodstand
Overflademodstand
Poretryk
Friktionsforhold
Kote [m]
19
18
17
16
15
14
13
12
11
0
10
20
q_t [MPa]
0
0.2
0.4
f_s [MPa]
0
0.5
1
p_p [MPa]
0
5
R_f [%]

Jordarten er forsøgt tolket ved Robertson et al. (1986). De dybder hvor der er udtaget intaktprøver i boring S2B2 er sammenholdt med de respektive dyder i CPT forsøget:



Figur 8: Prøver fra boring S2B2 sammenholdes med CPT s2c2 i Robersons diagram for tolkning af jordart (T. Lunne, 1997)

Det ses, at Robersons diagram for tolkning af jordarten ikke er anvendeligt for silt, idet værdierne ikke giver et enstemmigt svar på hvilken jordart der er tale om.

A.6.5 Vurdering af prøver til triaxialforsøg

Ved udførelse af triaxialforsøg undersøges den testede jord først efter udført forsøg, og derfor var det vigtigt, at få et indblik i hvilke intaktprøver der sandsynligvis indeholdte silt. Derfor blev det forsøgt at tolket jordarten for intaktprøverne i boring B2S2 ved Robersons diagram som vist på Figur 6 - Figur 8. Tolkningen af hver enkelt intaktprøve ses i tabellen herunder.

Intakt prøver nr.	Beskrivelse ifl. boreformand	Beskrivelse ifl. CPT s2a2	Beskrivelse ifl. CPT s2b4	Beskrivelse ifl. CPT s2c2
65	Meget sandet silt/sand	Sand til siltet sand (zone 8) + Leret siltet til siltet ler (zone 5)	Sandet silt til Sand (zone 8-9)	Sandet silt til Sand (zone 8-9)
68	Silt, sandholdig m. lerstriber	Leret silt/siltet ler/Sandet silt/Siltet sand (zone 5 - 8)	Sandet silt/Leret silt + Sand til siltet sand (mest zone 6+8)	Siltet sand til sandet silt + Sand (zone 7+9)
70	Meget sandet silt/sand	Mest Siltet sand til sandet silt (zone 7 - 8)	Sandet silt/Leret silt + Sand (mest zone 6+9)	Leret silt/siltet ler/Sandet silt/Siltet sand eller Ler (zone 3-8)
71	Silt, sandholdig m. lerstriber	Leret silt/siltet ler/Sandet silt/Siltet sand eller Ler (zone 5 - 8 og 3)	Sandet silt til Sand (zone 8-9)	Leret silt/siltet ler/Sandet silt/Siltet sand eller Ler (zone 3-8)
74	Ler med siltstriber	Ler (3) + Sandet silt til Sand (zone 8-9)	Sandet silt til leret silt (zone 6)	Sandet silt/Leret silt/Siltet sand (mest 6-7)

Tolkning af jordarten med Robertsons diagram giver ikke en ensartet beskrivelse når der er tale om silt og derfor blev beskrivelsen ikke lavet for intaktprøverne i boring S4B2. I stedet blev boreformandens vurdering af jorden anvendt og inden triaxialforsøgene blev jorden undersøgt i toppen og i bunden af prøven.

A.7 Konsolideringsforsøg

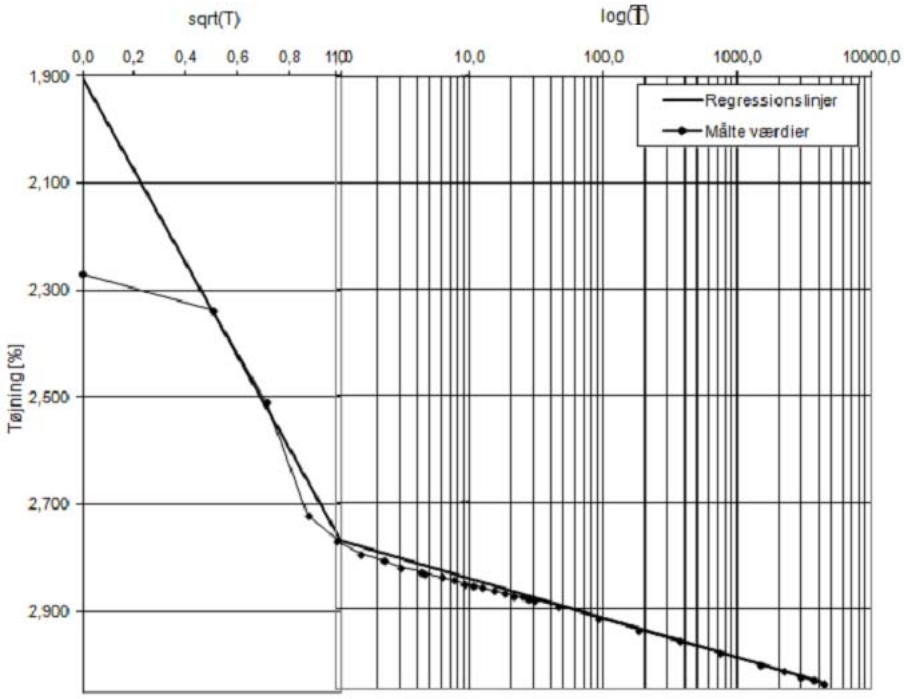
Der er tidligere udført konsolideringsforsøg på Dronninglund silten. Disse konsolideringsforsøg er tolket for, at undersøge om det var muligt at finde forbelastningsspændingen. Forbelastningsspændingen kunne, således anvendes til fastsættelse af kammertrykket. Men da arbejdskurven i logaritmisk afbildning ikke blev retlinjet, var det ikke muligt at fastsætte forbelastningsspændingen.

Lastprogrammet for alle konsolideringsforsøg er vist i nedenstående tabel.

Trin	Last [kg]	Last [kPa]
1	1	26,9
2	2	52,4
3	4	103,4
4	8	205,5
5	15,5	396,9
6	31	792,4
7	62	1583,4
8	125	3191,9
9	250	6380,6

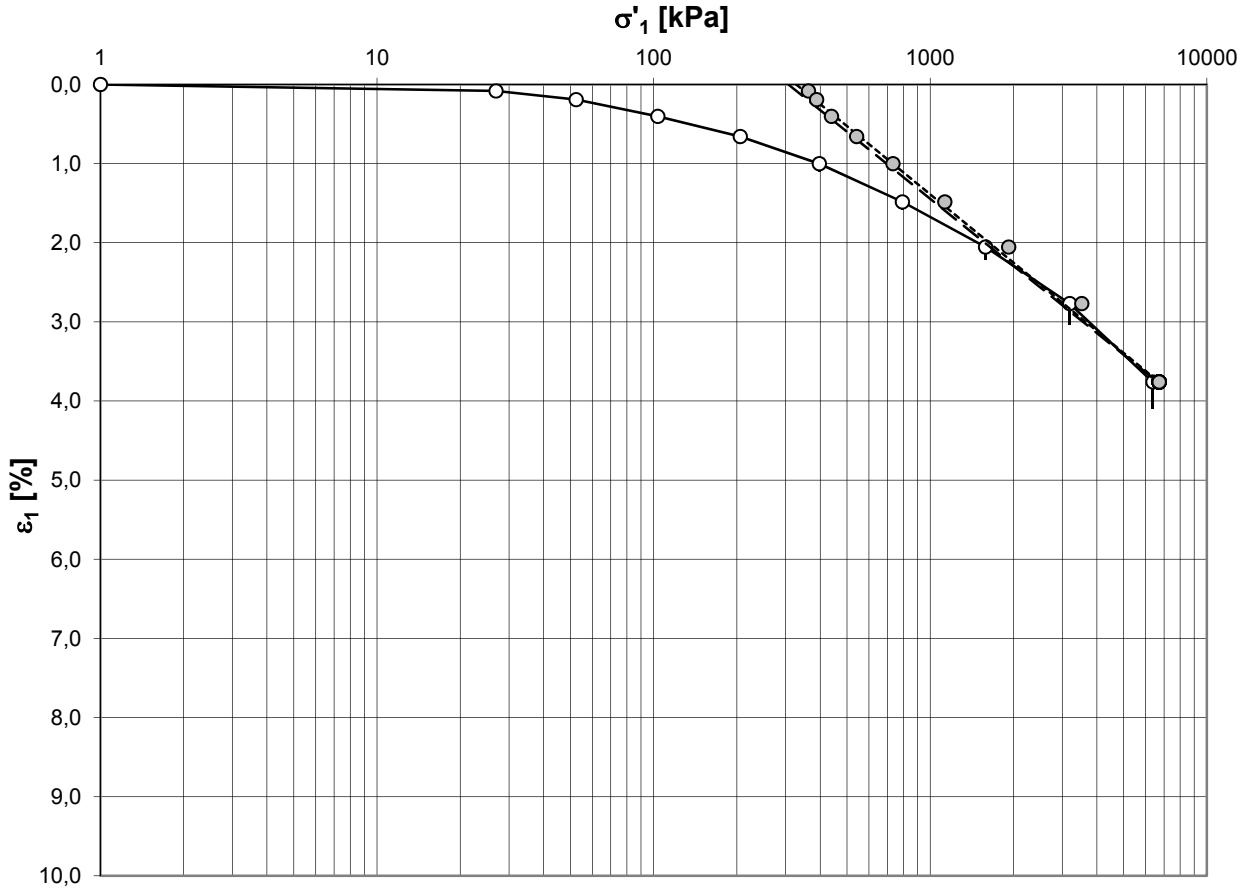
A.7.1 Intaktprøve 70, boring S2B2

For hver belastningstrin er hver tidskurve afbildet i $\sqrt{t} - logt$ med sammentrykning på den vertikale akse. For hvert belastningstrin fittes der til udvalgte datapunkter for at opnå rette linjer for den primære konsolidering og krybningen. På Figur 9 ses tidskurven for belastningstrin 8:



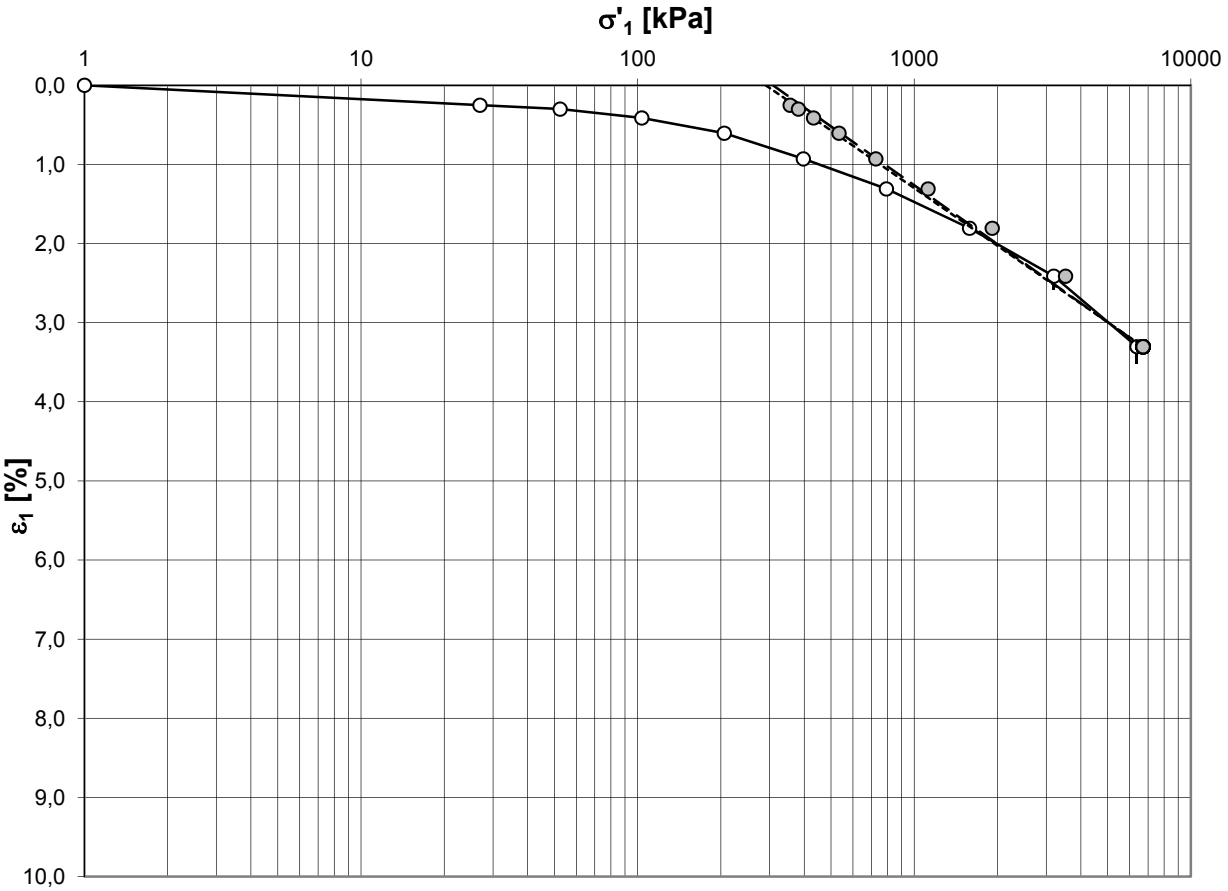
Figur 9: Eksempel på tidskurve for prøve 70, belastningstrin 8.

Arbejdskurven:



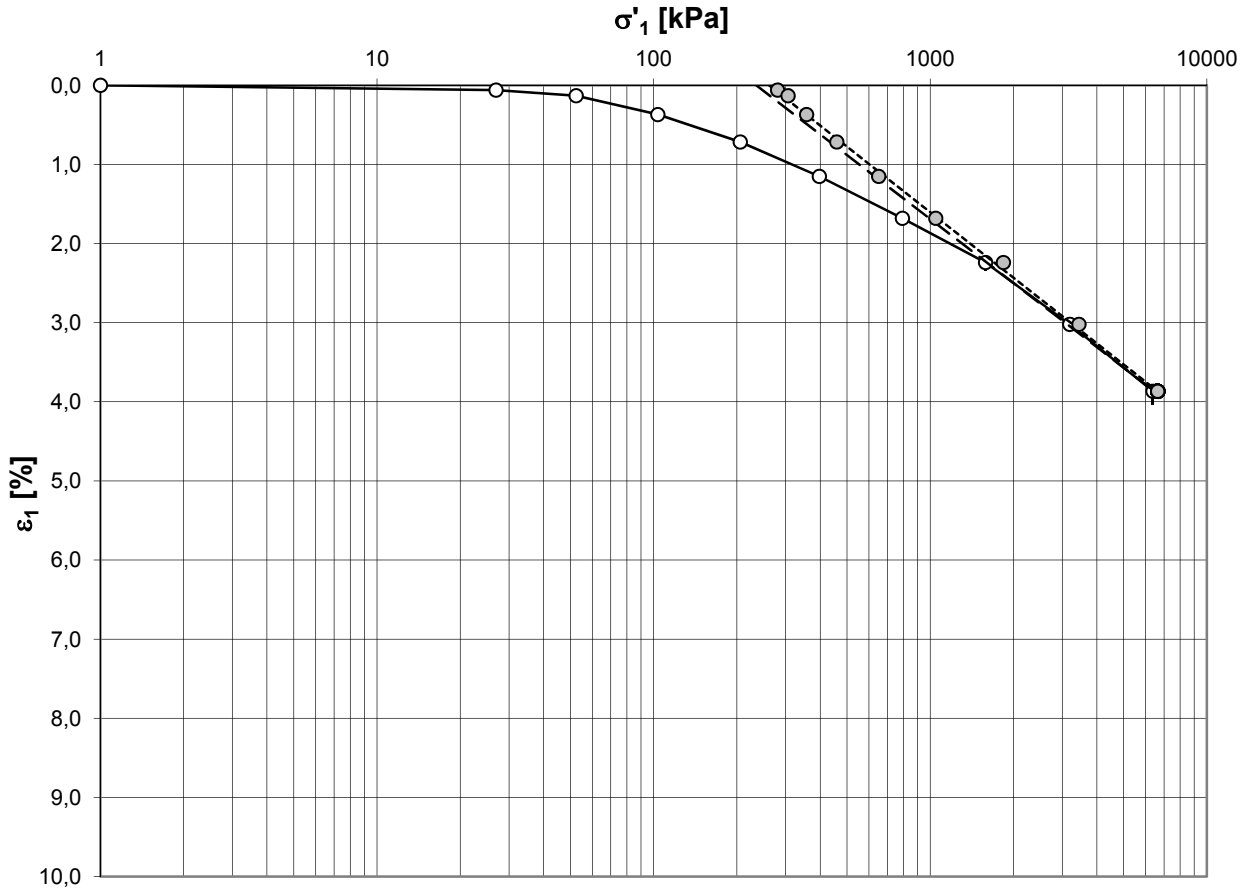
A.7.2 Intaktprøve 59, boring S4B2

Arbejdskurven:



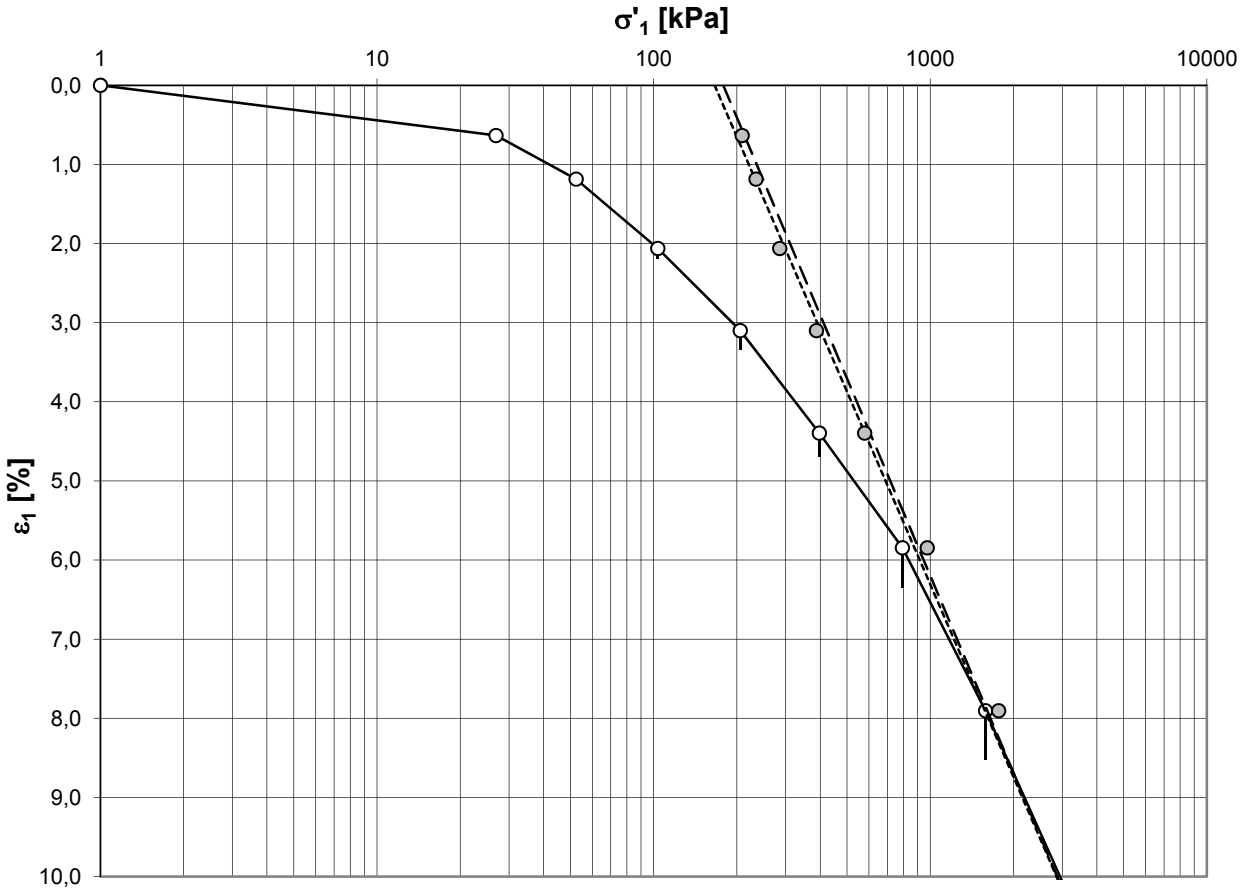
A.7.3 Intaktprøve 68, boring S2B2

Arbejdskurven:



A.7.4 Intaktprøve 71, boring S2B2

Arbejdskurven:



A.8 Resultater fra drænede triaxialforsøg

A.8.1 Beregninger og tolkning af triaxialforsøg

Ved triaxialforsøgene er der brugt en cylindrisk jordprøve hvor h = d. Prøven udsættes for en spændingstilstand med en lodret hovedspænding σ_1 som den største spænding og vandrette hovedspændinger $\sigma_2 = \sigma_3$ som mindste spændinger.

Deviator spændingen er defineret som:

$$q' = \sigma_1' - \sigma_3'$$

Middelspændingen er ved brug af Cambridge defineret som:

$$p' = \frac{\sigma_1' + 2 \cdot \sigma_3'}{3}$$

Ved brug af MIT, tages der højde for 2 dimensionelle spændinger idet:

$$p' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2}$$

Under forsøget måles den aksiale last, stempeltrykket, og den aksiale flytning, volumenændringerne og kammertryk. Poretrykket bestemmes som bagtrykket, og idet der udføres drænede forsøg vurderes dette acceptabelt.

Beregninger af geometri

Under forsøget ændres højden, diameteren og volumen.

Ændringen af højden bestemmes for hvert step:

$\Delta H = \frac{(f_{1.i+1} - f_{1.i}) + (f_{2.i+1} - f_{2.i})}{2} = [m]$ hvor f_1 og f_2 er de målte aksiale flytninger.

Ændring af volumen bestemmes for hvert step:
Differenstrykket er et udtryk for volumenændringen.

$\Delta V_i = \sigma_{diff.\ i+1} - \sigma_{diff.\ i} = [m^3]$ hvor σ_{diff} er det målte differenstryk.

Højden, volumen og arealet bestemmes for hvert step ved følgende ligninger:

$H_i = H_0 - \Delta H_i = [m]$

$V_i = V_0 - \Delta V_i = [m^3]$

$A = \frac{V_i}{H_i} = [m^2]$

Diameteren og ændringen af diameteren for hvert step findes:

$$D_i = 2 \cdot \sqrt{\frac{V_0 - \Delta V_i}{\pi \cdot H_i}} = [m]$$

$$\Delta D_i = D_{i+1} - D_i = [m]$$

Beregninger af de effektive spændinger

$$\sigma_3' = \sigma_3 - u = [kPa]$$

$$q = \frac{F}{A} = \frac{Stempeltryk + vægt, øvretrykhoved \cdot g}{A} = [kPa]$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + q = [kPa]$$

Beregninger af tøjninger

Tøjninger i 1-retningen bestemmes:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta H_i}{H_0} = [\%]$$

Volumetøjningerne bestemmes:

$$\varepsilon_v = \frac{-\Delta V_i}{V_0} = [\%]$$

Brudspændinger:

Brud er defineret hvor σ_1 er maksimal. For σ_3 er middelspændingen brugt til bestemmelse af styrken.

Sekant friktionsvinklen er bestemt, ved at antage c' = 0 (R. D. Holtz, 1981):

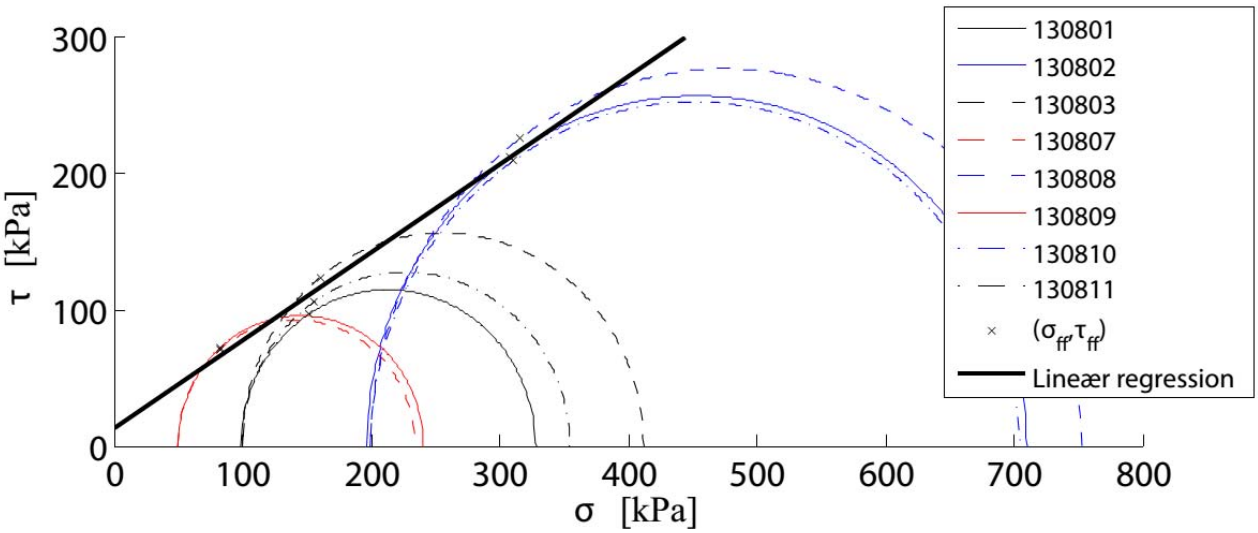
$$\varphi_s = \sin^{-1}\left(\frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}\right)$$

For at finde brudkriteriet Mohr-Coulomb er tangenten (σ_{ff}, τ_{ff}) på Mohrs cirkel bestemt:

$$\sigma_{ff} = \frac{\sigma_{1f} + \sigma_{3f}}{2} - \frac{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}}{2} \cdot \sin\varphi$$

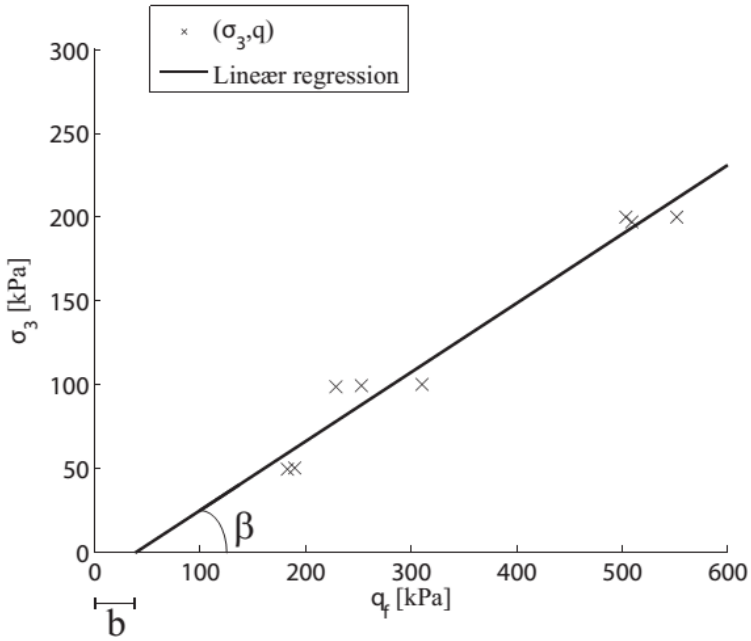
$$\tau_{ff} = \sigma_{ff} \cdot \tan\varphi$$

Friktionsvinklen for alle forsøg er tolket ud fra Mohr Coulomb ved at lave lineær regression til punkterne (σ_{ff}, τ_{ff}).



Friktionsvinklen er fundet ved tan α, hvor α er hældningen på brudkriteriet. Kohæsionen c' er fundet som skærring med den vertikale akse.

I stedet for at tolket friktionsvinklen og kohæsionen med Mohrs cirkler kan disse tolkes i q-σ_3 diagrammet ved følgende (N. K. Ovesen, 2007):



$$\sin \varphi' = \frac{1}{1 + 2 \cdot \tan \beta}$$

$$c' = b \cdot \tan \beta \cdot \tan \varphi'$$

Friktionsvinklen er også tolket ved brug af metoden Handy som er beskrevet særskilt i A.8.2.

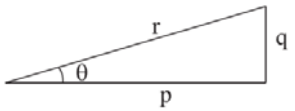
A.8.2 Beregninger og beskrivelse af Handys metode til bestemmelse af φ og c'

Linearisering med Handy (Handy, 1981) er beskrevet trinvis i det følgende. Handy bruger MIT til at beskrive spændingstilstanden som tager højde for 2 dimensionelle spændingstilstande.

Først findes punkterne for p og q:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \qquad q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Punkterne konverteres til polære koordinater:

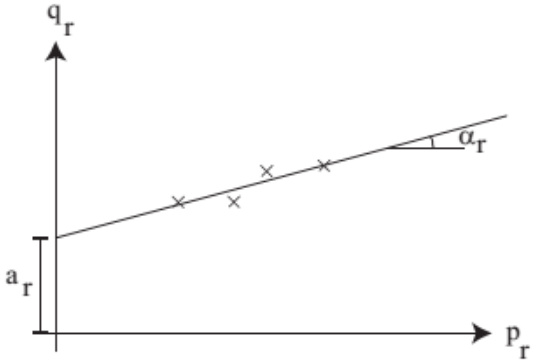


$$r = \sqrt{q^2 + p^2} \qquad \theta = tan^{-1}\left(\frac{q}{p}\right)$$

Det ligges 45° til θ:

$$\theta_r = \theta + 45°$$

Der konverteres tilbage til rektangulære koordinater:



$$p_r = r \cdot cos(\theta_r) \qquad q_r = r \cdot sin(\theta_r)$$

Der laves linear regression på p_r og q_r. Ud fra dette kan friktionsvinklen og kohæsionen tolkes ved følgende ligninger. Der er følgende sammenhæng mellem de roterede koordinater og de opfindelige.

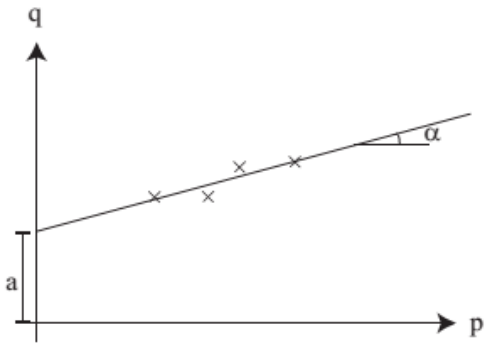
$$\alpha_r = tan^{-1}\left(\frac{hældning}{1}\right)$$

$$\alpha = \alpha_r - 45^0$$

$$a = a_r \cdot [sin90 - \Delta\theta - \alpha/cos\alpha] \qquad \text{hvor } \Delta\theta = 45°$$

$$\varphi = sin^{-1}(\tan\alpha)$$

$$c' = \frac{a}{cos\varphi}$$



A.8.3 Forsøgsprocedure

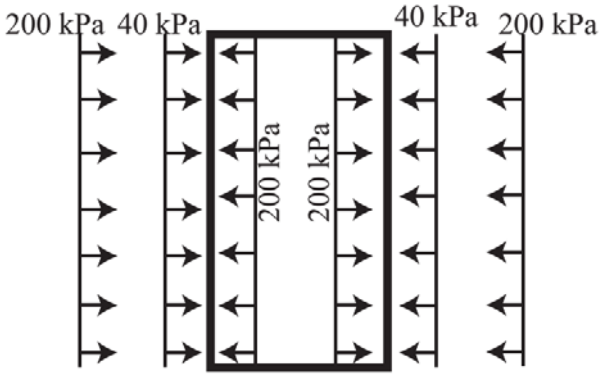
I det følgende er spændingerne, der er anvendt ved de forskellige stadier beskrevet, for yderligere beskrivelse af forsøgene henvises der til udførelsesmanualen i A.2.

Installation

Under installationen er prøverne støttet med vakuum på 40 kPa, således prøverne ikke skulle stå selv.

Vandmætning

For at vandmætte prøverne er bagtryk systemet anvendt. Bagtrykket genererer et tryk inde i prøven, således alle hulrum i prøven fyldes med vand. Bagtrykket er for de første forsøg 200 kPa, da det var svært at opnå en fuld vandmættet prøve, ifølge Skemptons B, blev bagtrykket hævet til 300 kPa og for nogle forsøg 400 kPa. Vandmætningsproceduren forløb således, at kammertrykket var 40 kPa højere end bagtrykket, således prøverne stadig blev støttet. Princippet er vist på Figur 10 med et bagtryk på 200 kPa.



Figur 10: Vandmætning med bagtryk systemet. Spændingerne er optegnet horisontalt, men virker i realiteten både horisontalt og vertikalt.

Vandmætningsproceduren stod i 24 timer, således prøverne blev fuldt vandmættet. Efter et døgn blev Skemptons B målt og således blev det vurderet om vandmætningen var acceptabel.

Isotropisk belastning

Prøverne blev isotropisk belastet med kammertryk på henholdsvis 50 kPa, 100 kPa og 200 kPa, svarede til omtrentligt oprindelig spændingstilstand $\gamma \cdot d$.

Den isotropiske spændingstilstand stod i ca. et døgn.

Anisotropisk belastning til brud med konstant kammertryk

Ved brug af stempeltryk belastes prøven med en flytning på ε_1 = 0,5 % /time samtidig med, at kammertrykket blev holdt konstant. Flytningen påføres indtil ε_1 = 12 %.

A.8.4 Oversigt over udførte forsøg

Forsøg nr.	Intaktprøve nr.	Dybde [m u.t.]	Kote DVR90 [m]	Kammertryk [kPa]	Bagtryk [kPa]
130801	62	11,30	11,17	100	200
130802	62	11,23	11,24	200	200
130803	68	7,14	15,64	100	200
130807	71	10,22	12,56	50	300
130808	71	10,10	12,68	200	400
130809	56	5,27	17,20	50	400
130810	56	5,11	17,36	200	400
130811	56	5,19	17,28	100	400

A.8.5 Forsøg nr. 130801

Jordart: Dronninglund silt	Dato: 06.12.2013	Før forsøg	Efter forsøg
Forsøg nr.: 130801	Vandindhold: [%]	21,64	21,26
Kalibreringsfil	Dimensioner:		
Triax3.kal	H[mm]	70,00	63,04
Triaxial	D[mm]	71,80	73,50
apparat: 3	V[cm^3]	283,4	300,6

Forsøgs program	
Type: Konsolideret drænet, CD.	Isotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 100 kPa
Bagtryk 200kPa	Anisotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 100 kPa
Skemptons B 0,8994	Flytning på ε_1 = 0,5 % / time. Flytningen påføres indtil $\varepsilon_1 \approx$ 12 %.

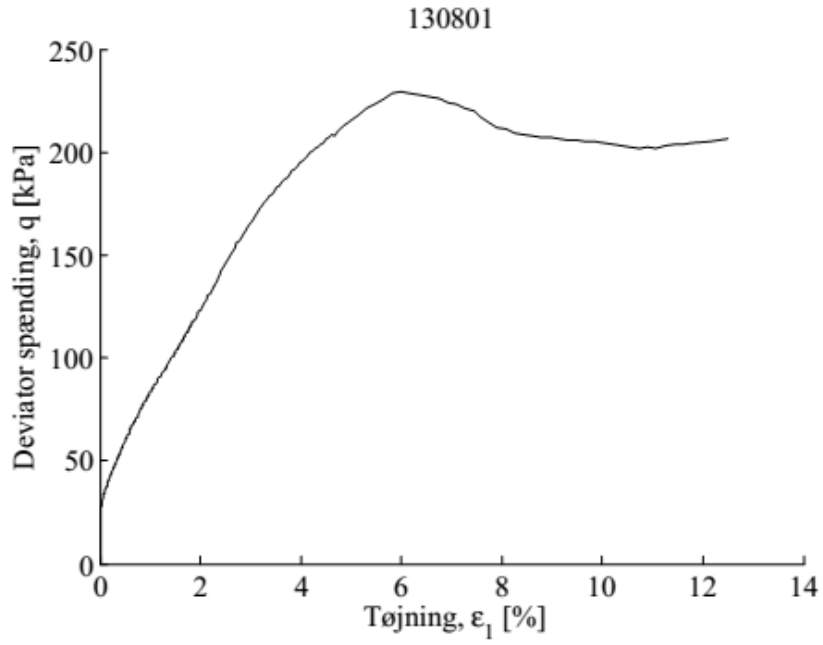
	Værdier ved brud	Startværdier
Deviator spænding, q [kPa]	229,2	0
Middel spænding, p' [kPa]	173,2	100,3
Kammertryk, σ_3 [kPa]	96,8	100,3
Aksial tøjning , ε_1 [%]	5,993	0
Volumetøjning, ε_v [%]	0,165	0

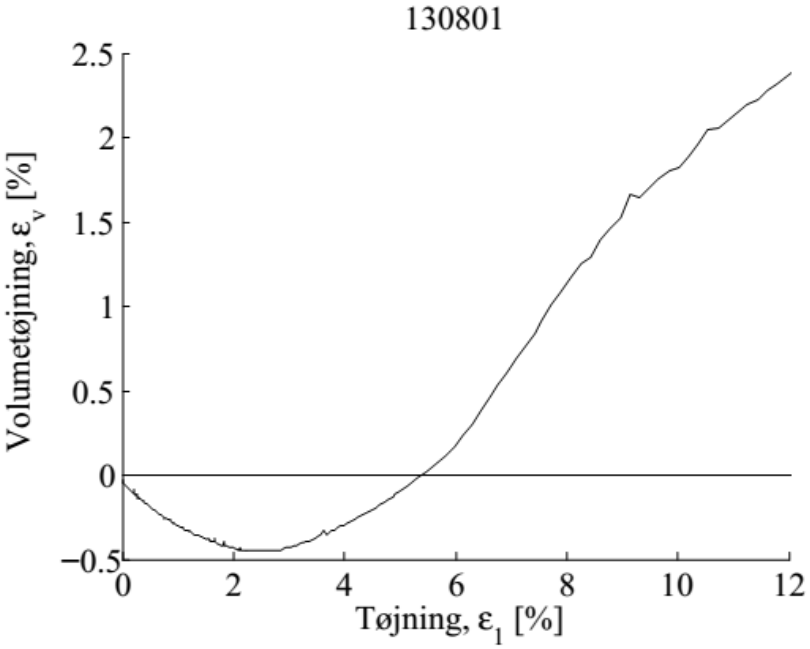
Isotropisk belastning		
p' [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
45,6	0,175	0,000
101,3	0,199	-0,237
101,3	0,208	-0,266
101,1	0,210	-0,230
101,0	0,211	-0,194
101,5	0,208	-0,101
101,9	0,215	-0,022
101,5	0,214	0,101

Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
0	100,3	100,3	0	0
10,5	103,6	100,1	-0,079	-0,007
28,2	109,5	100,1	0,027	-0,050
40,0	113,3	100	0,173	-0,101
52,8	117,6	100	0,380	-0,151
64,5	121,4	99,9	0,582	-0,208
70,3	123,3	99,9	0,705	-0,237
81,8	127,0	99,7	0,967	-0,288
93,1	131,0	100	1,257	-0,338
99,9	133,1	99,8	1,423	-0,367
105,5	135,1	99,9	1,580	-0,381
111,3	136,9	99,8	1,705	-0,403
117,3	139,0	99,9	1,848	-0,424
123,3	141,0	99,9	1,997	-0,431

Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
129,1	142,9	99,9	2,139	-0,446
139,3	146,2	99,8	2,353	-0,453
153,5	151,5	100,3	2,678	-0,453
162,1	154,3	100,3	2,897	-0,439
171,6	157,4	100,2	3,147	-0,417
178,8	160,0	100,4	3,378	-0,388
186,0	162,2	100,2	3,621	-0,331
194,9	165,3	100,3	3,982	-0,295
201,7	167,6	100,4	4,291	-0,244
207,4	169,2	100,1	4,563	-0,194
214,8	171,8	100,2	4,960	-0,101
221,0	173,8	100,1	5,306	-0,022
226,2	175,6	100,2	5,653	0,065
228,9	175,3	99	5,824	0,108
227,1	165,0	89,3	6,450	0,374
223,3	155,2	80,8	7,099	0,690
219,8	149,9	76,6	7,446	0,841
214,3	145,1	73,7	7,725	1,006
211,0	142,8	72,5	8,078	1,179
208,1	141,5	72,1	8,601	1,395
204,3	143,8	75,7	10,022	1,826
202,5	145,3	77,8	10,900	2,106
204,6	148,4	80,2	11,794	2,322
206,4	150,0	81,2	12,494	2,487

Prøven efter udført forsøg. Sorte sandsliere. 





A.8.6 Forsøg nr. 130802

Jordart: Dronninglund silt	Dato: 13.12.2013	Før forsøg	Efter forsøg
Forsøg nr.: 130802	Vandindhold: [%]	21,64	20,69
Kalibreringsfil	Dimensioner:		
Triax3.kal	H[mm]	70,00	53,00
Triaxial apparat: 3	D[mm]	71,80	75,74
	V[cm^3]	283,4	315,4

Forsøgs program	
Type: Konsolideret drænet, CD.	Isotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 200 kPa
Bagtryk 200kPa	Anisotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 200 kPa
Skemptons B 0,8469	Flytning på ε_1 = 0,5 % / time. Flytningen påføres indtil $\varepsilon_1 \approx$ 12 %.

	Værdier ved brud	Startværdier
Deviator spænding, q [kPa]	509,3	0,0
Middel spænding, p' [kPa]	370,3	199,5
Kammertryk, σ_3 [kPa]	200,5	199,5
Aksial tøjning , ε_1 [%]	13,612	0,000
Volumetøjning, ε_v [%]	1,006	0,000

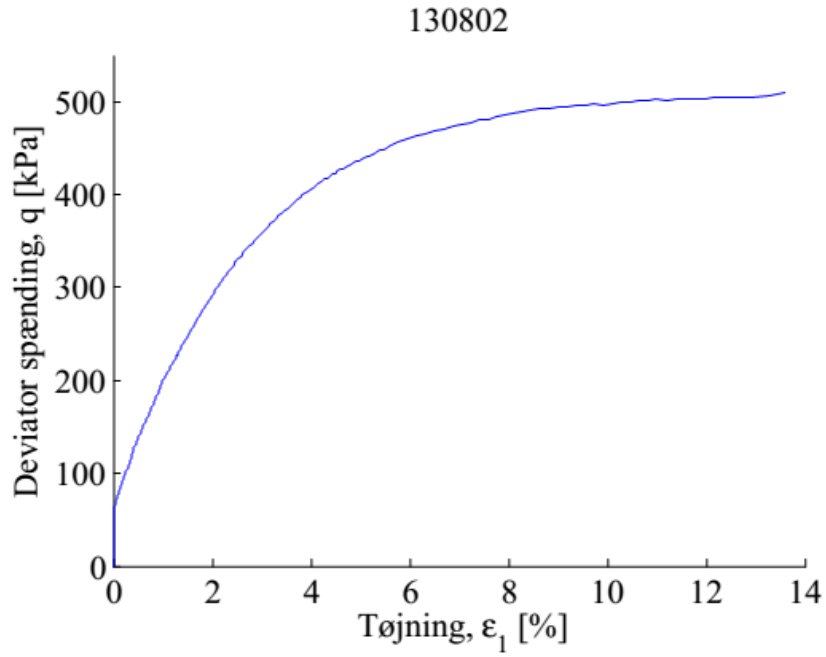
Isotropisk belastning		
p' [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
200,4	0,000	0,000
199,9	-0,070	-1,459
199,9	-0,070	-1,467
200,1	-0,067	-1,488
199,8	-0,066	-1,510
199,6	-0,060	-1,524
200,0	-0,052	-1,546
200,2	-0,048	-1,553

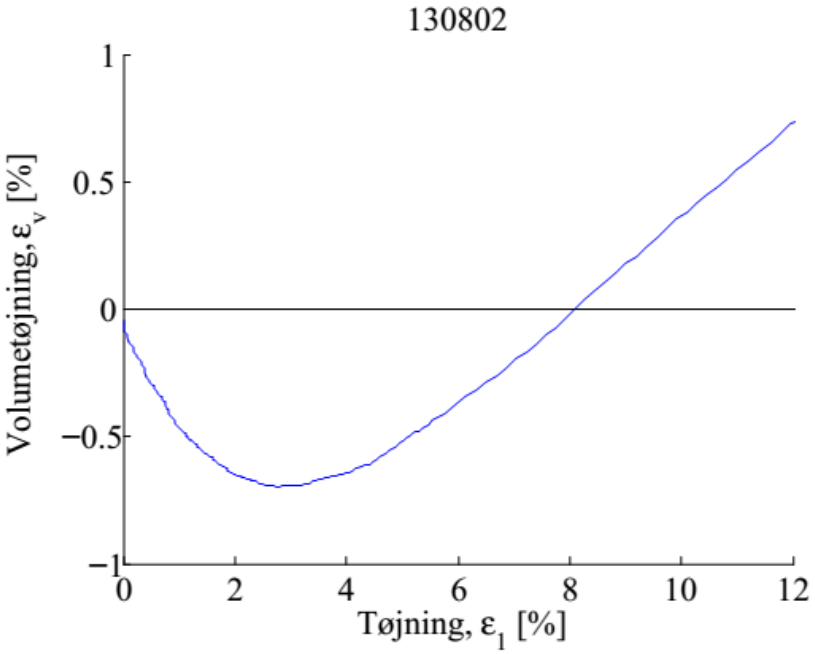
Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
0	199,5	199,5	0	0
11,7	204,5	200,6	-0,002	-0,007
20,0	207,2	200,5	-0,002	-0,014
40,1	213,0	199,6	-0,001	-0,043
60,2	219,5	199,4	0,019	-0,079
80,2	224,0	197,3	0,122	-0,129
100,2	228,9	195,5	0,242	-0,187
120,2	233,9	193,8	0,385	-0,237
140,0	238,3	191,6	0,519	-0,295
160,9	244,6	191	0,693	-0,352
180,5	256,7	196,5	0,859	-0,417
200,1	268,4	201,7	1,003	-0,460
220,6	273,2	199,7	1,225	-0,518
241,1	279,8	199,4	1,436	-0,554

Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
250,1	282,8	199,4	1,529	-0,575
260,2	286,3	199,6	1,635	-0,590
270,3	289,9	199,8	1,744	-0,611
281,0	293,3	199,6	1,881	-0,633
290,6	296,8	199,9	1,996	-0,647
300,3	300,0	199,9	2,106	-0,661
310,9	303,6	200	2,244	-0,669
320,0	307,0	200,3	2,370	-0,676
341,3	314,5	200,7	2,697	-0,690
359,3	320,5	200,7	3,025	-0,690
382,2	328,0	200,6	3,463	-0,676
401,2	334,2	200,5	3,884	-0,647
422,4	341,3	200,5	4,435	-0,611
440,1	347,3	200,6	5,077	-0,503
450,2	350,7	200,6	5,521	-0,439
463,0	354,9	200,6	6,136	-0,345
470,6	357,4	200,5	6,694	-0,259
480,0	360,2	200,2	7,409	-0,137
485,3	362,4	200,6	7,929	-0,036
488,8	363,4	200,5	8,271	0,036
496,8	366,0	200,4	9,918	0,352
501,3	367,7	200,6	10,636	0,482
505,3	369,1	200,7	12,912	0,877
506,8	369,7	200,8	13,272	0,942
509,3	370,3	200,5	13,612	1,006



Prøven efter udført forsøg. Organiske striber.





A.8.7 Forsøg nr. 130803

Jordart: Dronninglund silt	Dato: 17.12.2013	Før forsøg	Efter forsøg
Forsøg nr.: 130803	Vandindhold: [%]	20,26	20,38
Kalibreringsfil	Dimensioner:		
Triax3.kal	H[mm]	70,00	63,93
Triaxial apparat: 3	D[mm]	71,80	76,86
	V[cm^3]	283,4	324,8

Forsøgs program	
Type: Konsolideret drænet, CD.	Isotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 100 kPa
Bagtryk 200kPa	Anisotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 100 kPa
Skemptons B 0,865	Flytning på ε_1 = 0,5 % / time. Flytningen påføres indtil $\varepsilon_1 \approx$ 12 %.

	Værdier ved brud	Startværdier
Deviator spænding, q [kPa]	311,5	0,0
Middel spænding, p' [kPa]	204,2	99,3
Kammertryk, σ_3 [kPa]	100,4	99,3
Aksial tøjning , ε_1 [%]	8,815	0,000
Volumetøjning, ε_v [%]	2,114	0,000

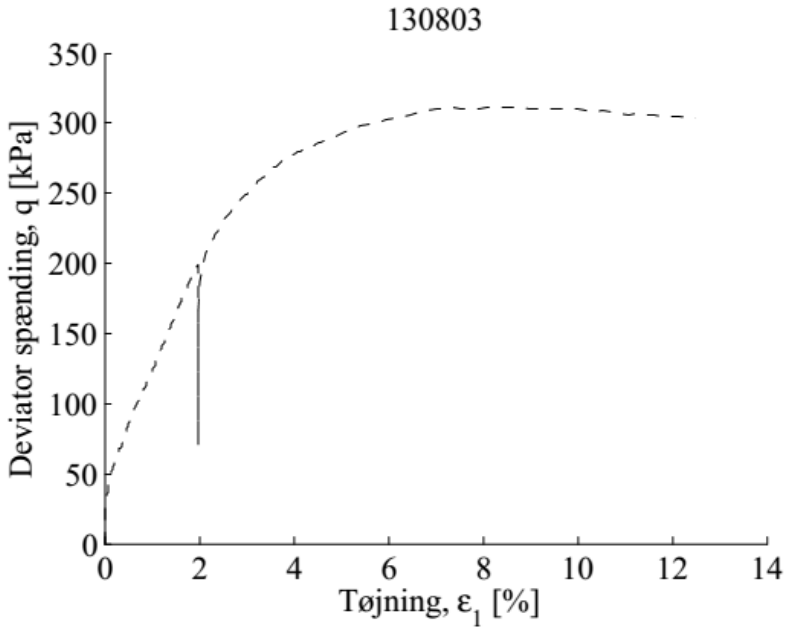
Isotropisk belastning		
p' [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
41,3	0,000	0,000
101,6	0,094	0,510
101,7	0,126	0,719
101,7	0,148	0,690
101,3	0,157	0,654
101,4	0,171	0,604
101,7	0,184	0,554
101,2	0,185	0,546

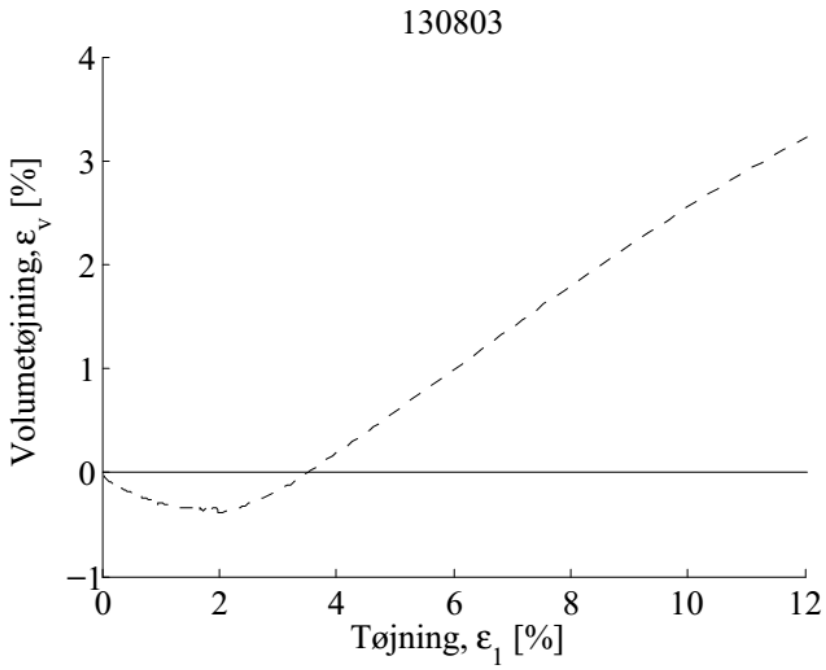
Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
0	99,3	99,3	0	0
10,6	104,1	100,6	0,008	-0,014
20,0	106,9	100,2	0,018	-0,022
40,1	113,0	99,6	0,079	-0,065
60,1	119,4	99,4	0,223	-0,122
79,9	126,2	99,6	0,464	-0,187
100,9	133,1	99,5	0,697	-0,237
110,1	136,4	99,7	0,831	-0,259
120,5	140,0	99,8	0,969	-0,288
130,8	143,3	99,7	1,101	-0,302
141,1	146,6	99,6	1,223	-0,316
150,2	149,6	99,5	1,344	-0,331
160,4	153,3	99,8	1,468	-0,345
170,5	156,8	100	1,586	-0,352

Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
181,1	160,3	99,9	1,724	-0,352
190,7	163,6	100	1,853	-0,352
199,1	166,6	100,2	1,975	-0,345
187,5	162,7	100,2	1,976	-0,338
168,8	156,5	100,2	1,977	-0,338
151,4	150,6	100,1	1,975	-0,345
126,9	142,3	100	1,976	-0,345
101,3	133,6	99,8	1,976	-0,352
69,8	123,0	99,7	1,976	-0,359
100,1	132,8	99,4	1,976	-0,374
166,3	155,1	99,7	1,979	-0,388
187,2	162,3	99,9	2,017	-0,388
203,3	168,2	100,4	2,114	-0,367
223,2	175,0	100,6	2,403	-0,324
240,3	180,8	100,7	2,759	-0,244
251,6	184,4	100,5	3,062	-0,158
261,7	187,9	100,7	3,352	-0,072
268,4	189,9	100,4	3,563	0,022
274,8	192,4	100,8	3,828	0,129
288,0	196,5	100,5	4,728	0,474
300,3	200,9	100,8	5,778	0,899
311,5	204,2	100,4	8,815	2,114
306,0	202,7	100,7	11,075	2,926
303,8	202,0	100,7	12,510	3,365
181,1	160,3	99,9	1,724	-0,352



Prøve efter udført forsøg. Prøven tørrer hvidt op.





A.8.8 Forsøg nr. 130807

Jordart: Dronninglund silt	Dato: 27.01.2014	Før forsøg	Efter forsøg
Forsøg nr.: 130807	Vandindhold: [%]	24,56	-
Kalibreringsfil	Dimensioner:		
Triax3.kal	H[mm]	70,00	62,17
Triaxial apparat: 3	D[mm]	71,80	73,68
	V[cm^3]	283,4	298,5

Forsøgs program	
Type: Konsolideret drænet, CD.	Isotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 50 kPa
Bagtryk 300kPa	Anisotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 50 kPa
Skemptons B 0,8141	Flytning på ε_1 = 0,5 % / time. Flytningen påføres indtil $\varepsilon_1 \approx$ 12 %.

	Værdier ved brud	Startværdier
Deviator spænding, q [kPa]	183,9	0,0
Middel spænding, p' [kPa]	111,9	50,6
Kammertryk, σ_3 [kPa]	50,6	50,6
Aksial tøjning , ε_1 [%]	11,721	0,000
Volumetøjning, ε_v [%]	2,114	0,000

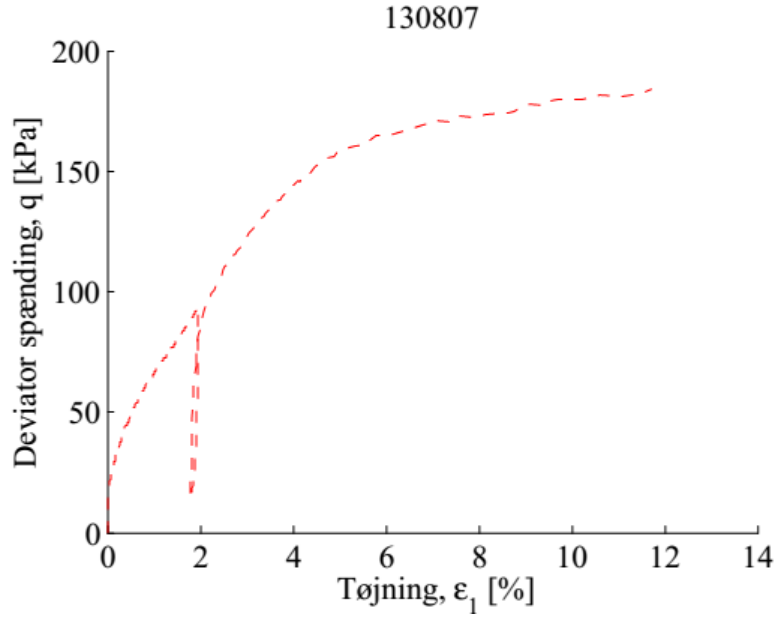
Isotropisk belastning		
p' [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
40,7	0,000	0,000
50,7	0,002	-0,050
50,8	0,006	-0,036
50,2	0,012	-0,043
50,3	0,016	-0,050
50,4	0,018	-0,043
50,0	0,035	0,014
50,3	0,032	0,094

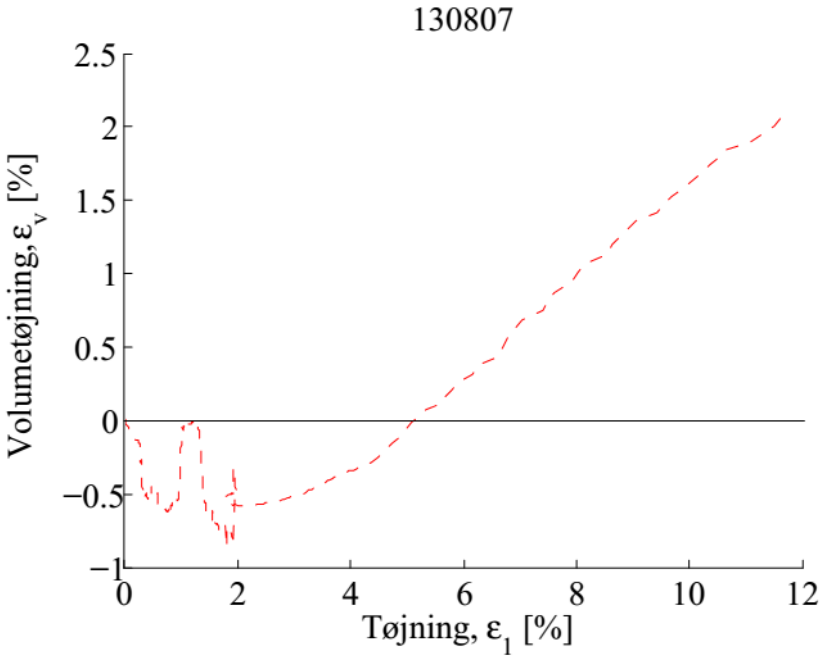
Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
0	50,6	50,6	0	0
11,8	54,4	50,5	0,001	-0,014
20,0	56,7	50	0,049	-0,043
30,7	59,7	49,5	0,170	-0,108
40,1	62,8	49,4	0,329	-0,460
50,7	66,4	49,5	0,549	-0,467
61,1	70,0	49,6	0,831	-0,575
70,3	73,2	49,8	1,144	-0,022
80,5	76,4	49,6	1,531	-0,683
94,0	81,1	49,8	1,958	-0,539
78,9	76,1	49,8	1,957	-0,374
67,3	72,0	49,6	1,948	-0,331
58,0	68,8	49,5	1,940	-0,324
46,4	65,3	49,8	1,923	-0,338

Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
33,7	61,0	49,8	1,902	-0,489
20,9	56,5	49,5	1,853	-0,503
13,9	54,1	49,5	1,796	-0,510
23,3	57,5	49,7	1,806	-0,532
36,1	61,7	49,7	1,820	-0,546
47,7	65,5	49,6	1,838	-0,554
62,8	70,6	49,7	1,867	-0,568
89,4	79,5	49,7	2,044	-0,575
100,5	83,4	49,9	2,291	-0,575
110,3	87,4	50,6	2,541	-0,561
120,9	90,9	50,6	2,957	-0,518
130,2	94,0	50,6	3,311	-0,467
140,1	97,2	50,5	3,806	-0,374
151,6	101,1	50,6	4,479	-0,252
160,0	103,9	50,6	5,224	0,029
170,7	107,4	50,5	7,409	0,748
180,5	110,6	50,4	10,371	1,740
183,9	111,9	50,6	11,721	2,114



Intaktprøve tildannet i triaxial apparat.





A.8.9 Forsøg nr. 130808

Jordart: Dronninglund silt	Dato: 03.02.2014	Før forsøg	Efter forsøg
Forsøg nr.: 130808	Vandindhold: [%]	17,44	21,04
Kalibreringsfil	Dimensioner:		
Triax3.kal	H[mm]	70,00	62,35
Triaxial	D[mm]	71,80	76,71
apparat: 3	V[cm^3]	283,4	323,5

Forsøgs program	
Type: Konsolideret drænet, CD.	Isotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 200 kPa
Bagtryk 400kPa	Anisotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 200 kPa
Skemptons B 0,8283	Flytning på ε_1 = 0,5 % / time. Flytningen påføres indtil $\varepsilon_1 \approx$ 12 %.

	Værdier ved brud	Startværdier
Deviator spænding, q [kPa]	550,3	0,0
Middel spænding, p' [kPa]	383,9	200,7
Kammertryk, σ_3 [kPa]	200,5	200,7
Aksial tøjning , ε_1 [%]	9,581	0,000
Volumetøjning, ε_v [%]	1,265	0,000

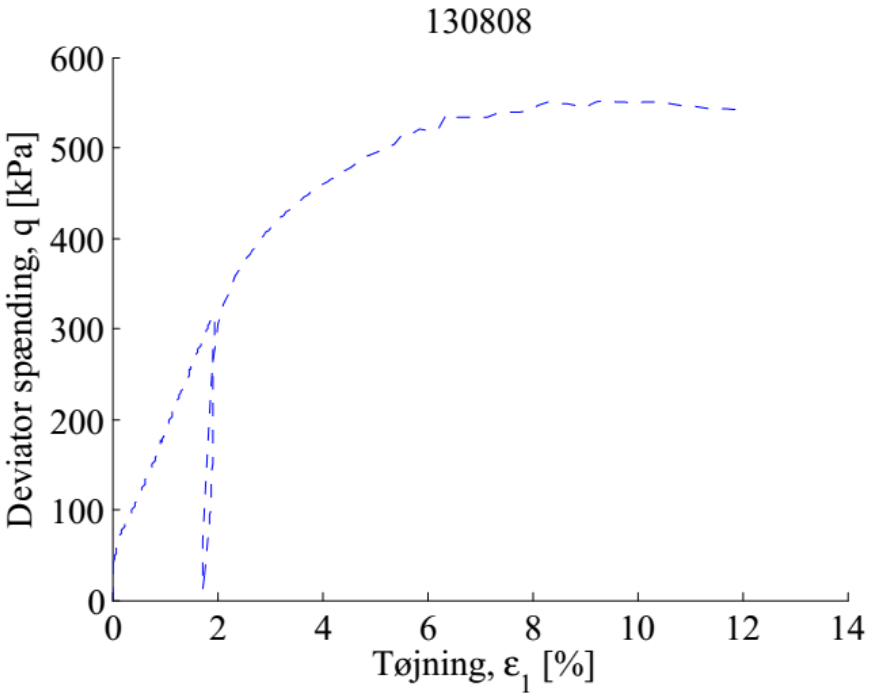
Isotropisk belastning		
p' [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
199,1	3,440	5,622
200,9	3,603	5,946
200,6	3,657	5,881
200,7	3,672	5,838
200,2	3,673	5,859
200,7	3,627	5,938
200,7	3,611	6,017
200,9	3,614	6,025

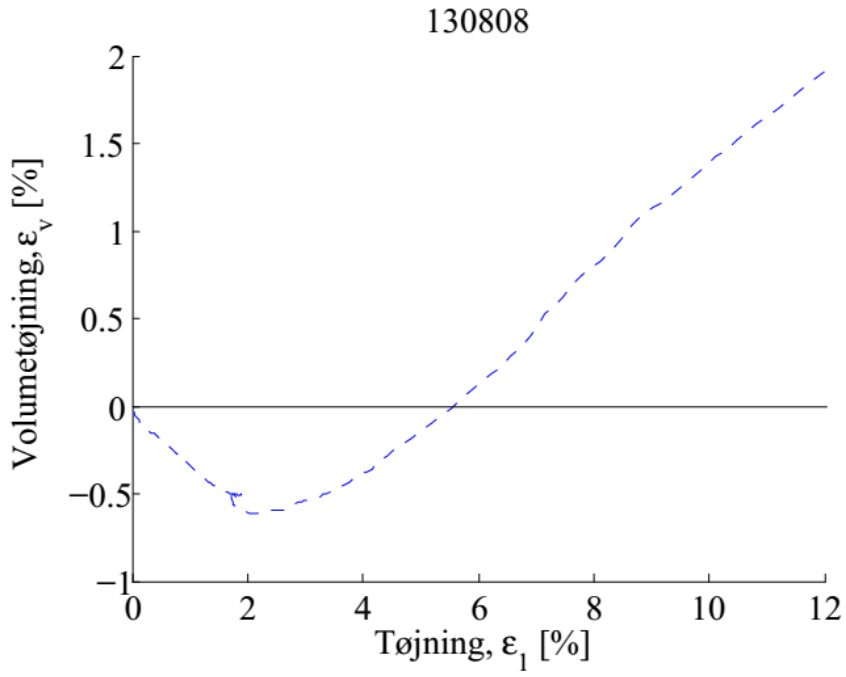
Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
0	200,7	200,7	0	0
10,6	204,2	200,7	-0,002	-0,007
50,7	216,5	199,6	0,066	-0,058
70,8	223,1	199,5	0,151	-0,093
90,7	230,0	199,8	0,312	-0,144
110,7	236,5	199,6	0,468	-0,180
130,5	243,0	199,5	0,625	-0,223
150,2	249,8	199,7	0,777	-0,266
190,7	263,3	199,7	1,042	-0,352
210,2	269,9	199,8	1,173	-0,395
230,8	276,7	199,8	1,316	-0,431
253,4	284,1	199,6	1,470	-0,460
273,8	291,1	199,8	1,616	-0,482
291,4	296,7	199,6	1,743	-0,503

Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
314,0	304,1	199,4	1,918	-0,525
301,3	299,8	199,4	1,937	-0,525
263,0	287,2	199,5	1,932	-0,518
206,1	268,3	199,6	1,920	-0,518
142,0	246,9	199,6	1,901	-0,503
67,5	222,0	199,5	1,835	-0,510
12,8	203,6	199,3	1,722	-0,510
66,2	221,5	199,4	1,738	-0,546
102,2	233,8	199,7	1,754	-0,561
171,7	256,7	199,5	1,814	-0,582
265,0	287,8	199,5	1,928	-0,604
305,0	301,6	199,9	2,022	-0,611
334,3	311,1	199,7	2,176	-0,611
363,9	320,9	199,6	2,407	-0,597
390,5	330,7	200,5	2,725	-0,568
431,5	344,3	200,5	3,373	-0,503
471,4	357,8	200,7	4,303	-0,302
515,5	372,4	200,6	5,524	-0,014
515,0	372,1	200,4	5,694	0,043
521,1	374,3	200,6	6,214	0,180
534,0	378,6	200,6	6,558	0,280
541,0	380,7	200,4	7,936	0,791
550,3	383,9	200,5	9,581	1,265
541,8	381,2	200,6	12,040	1,927
314,0	304,1	199,4	1,918	-0,525



Prøven efter udført forsøg. Øverst ses en tynd lerstribe.





A.8.10 Forsøg nr. 130809

Jordart: Dronninglund silt	Dato: 10.02.2014	Før forsøg	Efter forsøg
Forsøg nr.: 130809	Vandindhold: [%]	22,12	22,96
Kalibreringsfil	Dimensioner:		
Triax3.kal	H[mm]	70,00	60,01
Triaxial	D[mm]	71,80	78,17
apparat: 3	V[cm^3]	283,4	335,9

Forsøgs program	
Type: Konsolideret drænet, CD.	Isotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 50 kPa
Bagtryk 400kPa	Anisotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 50 kPa
Skemptons B 0,8959	Flytning på ε_1 = 0,5 % / time. Flytningen påføres indtil $\varepsilon_1 \approx$ 12 %.

	Værdier ved brud	Startværdier
Deviator spænding, q [kPa]	190,1	0,0
Middel spænding, p' [kPa]	114,1	50,4
Kammertryk, σ_3 [kPa]	50,7	50,4
Aksial tøjning , ε_1 [%]	9,473	0,000
Volumetøjning, ε_v [%]	2,998	0,000

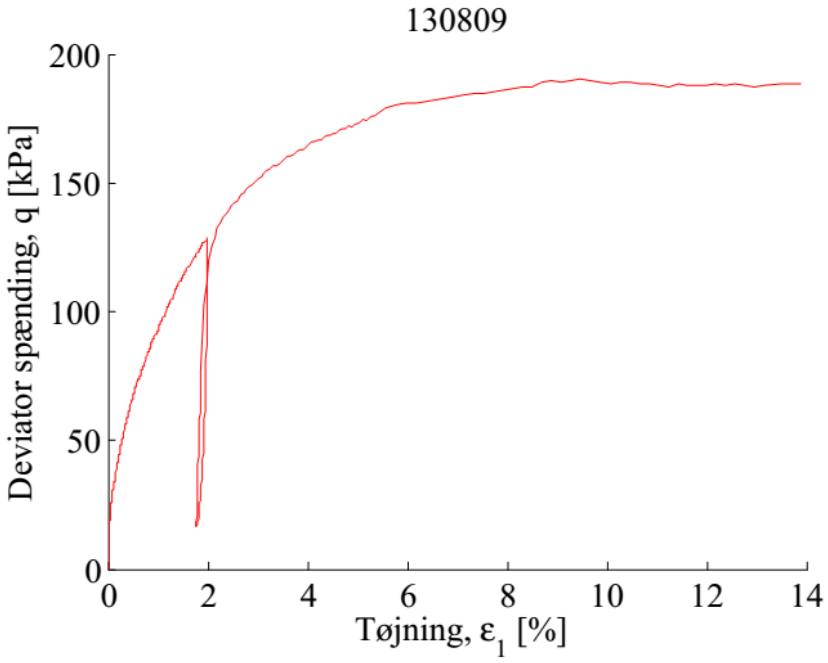
Isotropisk belastning		
p' [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
53,6	0,205	2,833
52,4	0,270	2,876
52,6	0,213	2,883
51,8	0,230	2,919
52,1	0,234	2,948
52,4	0,225	2,962
52,5	0,225	2,962
52,8	0,226	2,962

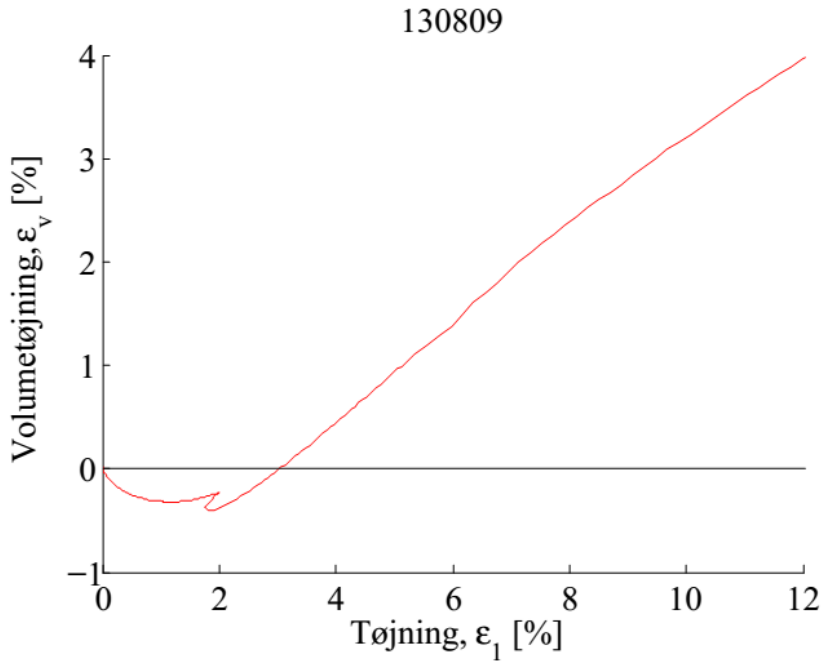
Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
0	50,4	50,4	0	0
10,6	53,9	50,4	0,006	-0,036
30,7	59,7	49,5	0,096	-0,079
50,7	66,4	49,5	0,285	-0,180
70,6	73,1	49,6	0,547	-0,259
90,4	79,6	49,5	0,942	-0,309
110,9	87,7	50,7	1,423	-0,309
128,8	93,5	50,6	1,984	-0,230
104,4	85,3	50,5	1,982	-0,230
81,2	77,2	50,1	1,964	-0,237
58,0	68,8	49,5	1,934	-0,252
32,5	60,3	49,5	1,867	-0,302
16,3	54,9	49,5	1,770	-0,359
36,1	61,6	49,6	1,799	-0,388

Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
60,5	69,8	49,6	1,840	-0,403
102,4	83,9	49,8	1,932	-0,395
134,5	95,5	50,7	2,251	-0,309
152,5	101,4	50,6	3,066	0,014
170,2	107,4	50,7	4,631	0,755
180,2	110,9	50,8	5,781	1,294
185,5	112,5	50,7	7,732	2,265
190,1	114,1	50,7	9,473	2,998
188,9	113,6	50,6	10,266	3,314
188,8	113,5	50,6	13,889	4,615
60,5	69,8	49,6	1,840	-0,403
102,4	83,9	49,8	1,932	-0,395
134,5	95,5	50,7	2,251	-0,309
152,5	101,4	50,6	3,066	0,014
170,2	107,4	50,7	4,631	0,755
180,2	110,9	50,8	5,781	1,294
185,5	112,5	50,7	7,732	2,265
190,1	114,1	50,7	9,473	2,998
188,9	113,6	50,6	10,266	3,314
188,8	113,5	50,6	13,889	4,615



Intaktprøve tildannet i triaxial apparatet





A.8.11 Forsøg nr. 130810

Jordart: Dronninglund silt	Dato: 17.02.2014	Før forsøg	Efter forsøg
Forsøg nr.: 130810	Vandindhold: [%]	20,65	19,86
Kalibreringsfil	Dimensioner:		
Triax3.kal	H[mm]	70,00	59,35
Triaxial	D[mm]	71,80	76,62
apparat: 3	V[cm^3]	283,4	322,8

Forsøgs program	
Type: Konsolideret drænet, CD.	Isotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 200 kPa
Bagtryk 400kPa	Anisotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 200 kPa
Skemptons B 0,635	Flytning på ε_1 = 0,5 % / time. Flytningen påføres indtil $\varepsilon_1 \approx$ 12 %.

	Værdier ved brud	Startværdier
Deviator spænding, q [kPa]	503,5	0,0
Middel spænding, p' [kPa]	368,3	200,5
Kammertryk, σ_3 [kPa]	200,5	200,5
Aksial tøjning , ε_1 [%]	13,109	0,000
Volumetøjning, ε_v [%]	0,963	0,000

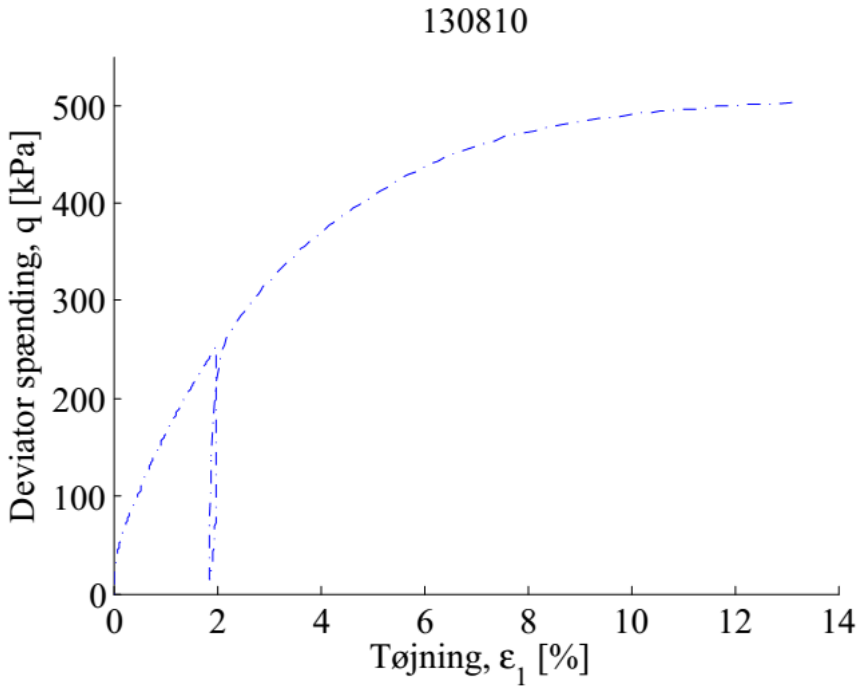
Isotropisk belastning		
p' [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
195,9	0,133	-0,848
200,3	0,476	-0,374
200,4	0,489	-0,403
200,3	0,505	-0,460
200,0	0,520	-0,518
200,5	0,461	-0,582
200,1	0,590	-0,302
200,3	0,526	-0,273

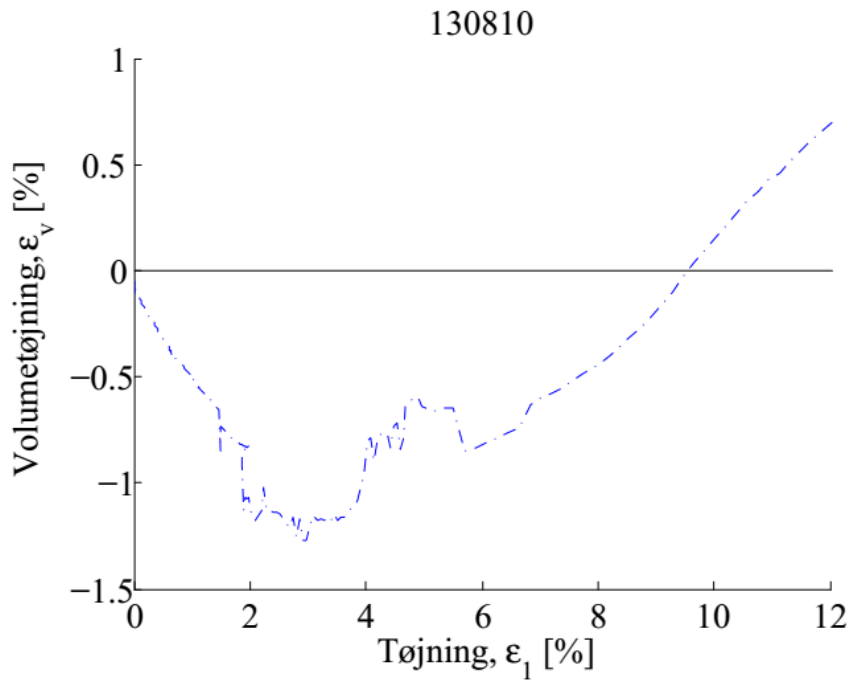
Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
0	200,5	200,5	0	0
10,6	203,9	200,4	0,013	-0,079
30,7	210,0	199,8	0,047	-0,101
50,7	216,2	199,3	0,117	-0,144
70,8	223,1	199,5	0,233	-0,201
90,8	230,1	199,8	0,391	-0,273
110,7	236,4	199,5	0,547	-0,338
130,5	243,2	199,7	0,702	-0,403
150,2	250,0	199,9	0,877	-0,460
171,0	256,7	199,7	1,082	-0,532
190,5	263,1	199,6	1,266	-0,590
211,0	269,8	199,5	1,497	-0,733
230,2	276,1	199,4	1,707	-0,791
251,9	283,4	199,4	1,976	-0,834

Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
156,9	252,1	199,8	1,982	-0,834
119,7	239,6	199,7	1,980	-0,834
68,6	222,5	199,6	1,966	-0,834
30,2	209,6	199,5	1,908	-0,841
13,9	204,3	199,7	1,871	-0,848
31,4	210,3	199,8	1,870	-0,856
110,5	236,3	199,5	1,876	-0,920
169,8	255,9	199,3	1,917	-1,071
217,2	272,1	199,7	1,988	-1,071
255,0	284,7	199,7	2,136	-1,150
271,7	290,3	199,7	2,299	-1,129
292,5	296,8	199,3	2,571	-1,172
310,8	303,4	199,8	2,845	-1,172
332,8	310,7	199,8	3,240	-1,172
350,3	316,8	200	3,577	-1,157
373,3	325,1	200,7	4,082	-0,784
392,4	331,5	200,7	4,582	-0,841
412,8	338,2	200,6	5,153	-0,661
432,8	344,7	200,4	5,897	-0,834
455,3	352,3	200,5	6,830	-0,633
474,3	358,8	200,7	8,138	-0,417
488,2	363,0	200,3	9,653	0,036
500,2	367,4	200,7	12,031	0,697
503,5	368,3	200,5	13,109	0,963



Prøven efter udført forsøg. Lerstribe kan ses (blanke flade).





A.8.12 Forsøg nr. 130811

Jordart: Dronninglund silt	Dato: 24.02.2014	Før forsøg	Efter forsøg
Forsøg nr.: 130811	Vandindhold: [%]	19,04	20,85
Kalibreringsfil	Dimensioner:		
Triax3.kal	H[mm]	70,00	60,72
Triaxial	D[mm]	71,80	74,99
apparat: 3	V[cm^3]	283,4	309,2

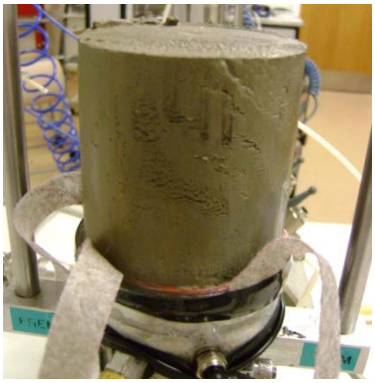
Forsøgs program	
Type: Konsolideret drænet, CD.	Isotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 100 kPa
Bagtryk 400kPa	Anisotropisk konsolidering: Konstant kammertryk på 100 kPa
Skemptons B 0,93	Flytning på ε_1 = 0,5 % / time. Flytningen påføres indtil $\varepsilon_1 \approx$ 12 %.

	Værdier ved brud	Startværdier
Deviator spænding, q [kPa]	253,7	0,0
Middel spænding, p' [kPa]	185,3	99,7
Kammertryk, σ_3 [kPa]	100,7	99,7
Aksial tøjning , ε_1 [%]	14,007	0,000
Volumetøjning, ε_v [%]	0,798	0,000

Isotropisk belastning		
p' [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
94,4	0,247	3,767
100,6	0,381	3,199
100,2	0,425	3,099
100,3	0,445	3,034
100,3	0,444	3,020
100,6	0,455	2,991
100,0	0,480	2,919
100,3	0,495	2,912

Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
0	99,7	99,7	0	0
10,6	103,9	100,4	0,021	-0,022
30,7	109,7	99,5	0,123	-0,079
50,7	116,6	99,7	0,338	-0,208
70,7	122,9	99,3	0,636	-0,352
90,4	129,4	99,3	1,059	-0,510
111,1	136,5	99,5	1,492	-0,661
130,4	143,1	99,6	1,950	-0,791
95,4	131,3	99,5	1,926	-0,784
55,7	118,2	99,6	1,866	-0,798
12,7	103,8	99,6	1,719	-0,820
38,3	112,9	100,1	1,762	-0,841
90,7	129,7	99,5	1,870	-0,877
130,4	143,0	99,5	2,064	-0,913

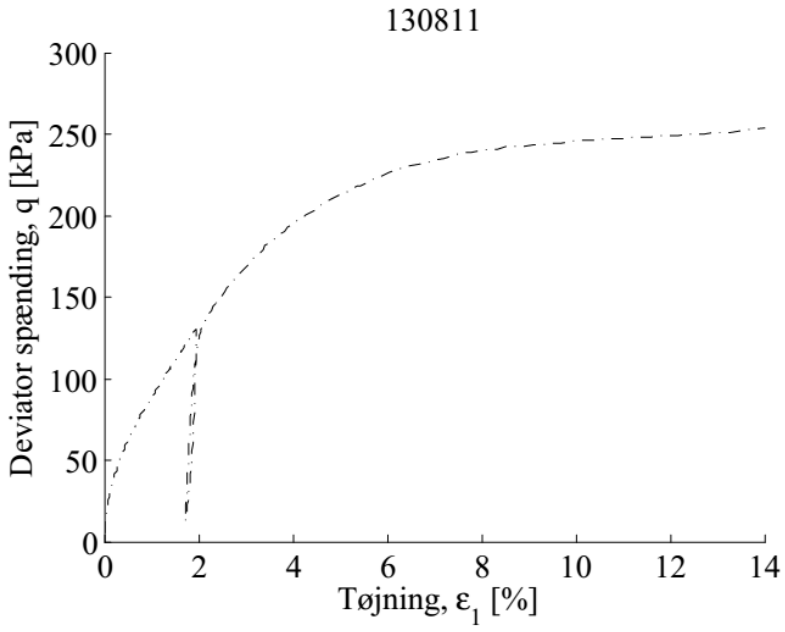
Anisotropisk belastning til brud med konstant σ_3				
q [kPa]	p' [kPa]	σ_3 [kPa]	ε_1 [%]	ε_v [%]
151,1	150,1	99,7	2,491	-0,971
170,7	157,1	100,2	3,067	-1,021
190,5	164,1	100,6	3,824	-1,028
210,0	170,7	100,7	4,799	-0,949
230,7	177,5	100,6	6,449	-0,697
250,0	183,9	100,6	12,546	0,532
253,7	185,3	100,7	14,007	0,798
151,1	150,1	99,7	2,491	-0,971
170,7	157,1	100,2	3,067	-1,021
190,5	164,1	100,6	3,824	-1,028
210,0	170,7	100,7	4,799	-0,949
230,7	177,5	100,6	6,449	-0,697
250,0	183,9	100,6	12,546	0,532
253,7	185,3	100,7	14,007	0,798

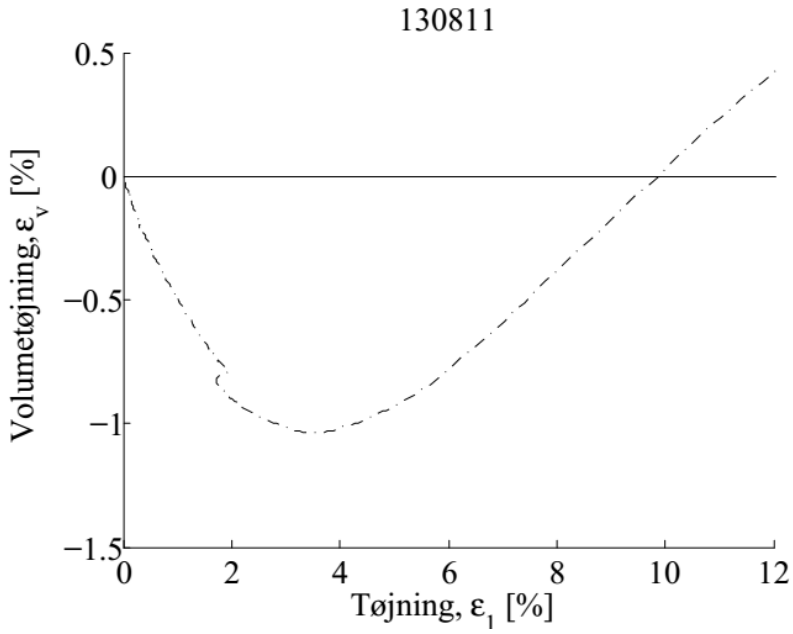


Intaktprøve tildannet i triaxial apparat



Prøven efter forsøg. Lerstykker i hjørnerne.

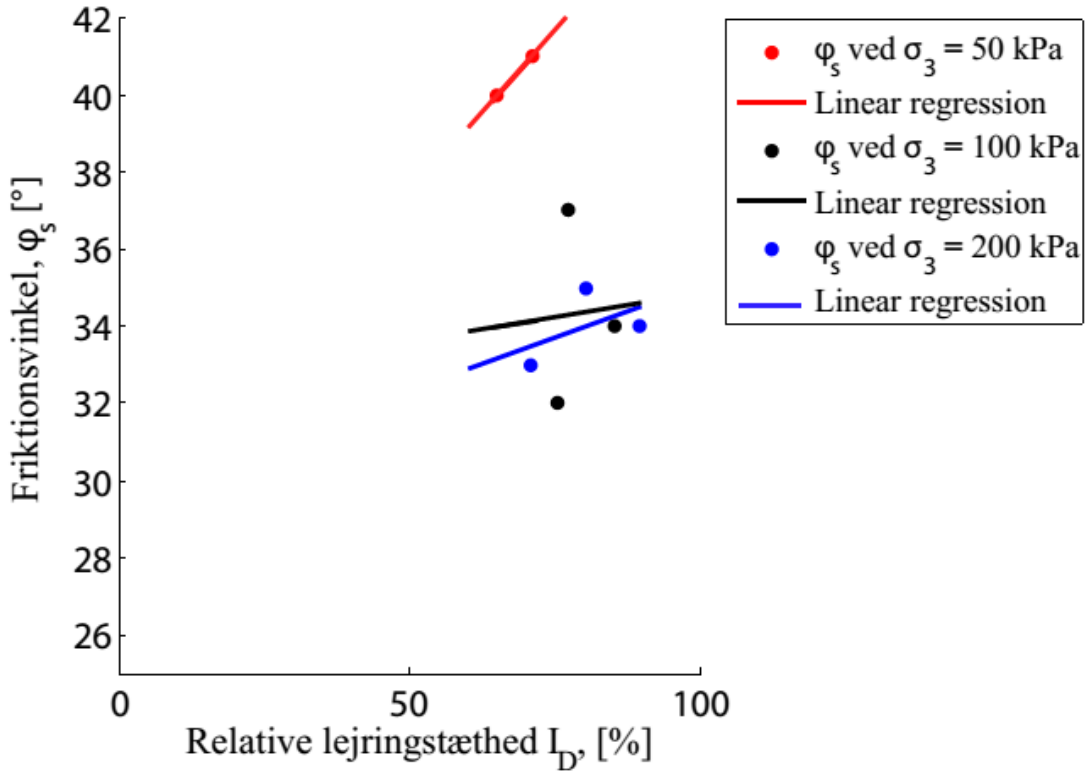




A.9 Undersøgelse af sammenhæng mellem friktionsvinkel og lejringstæthed.

I nedenstående tabel ses sekant friktionsvinklen og den relative lejringstæthed for hvert triaxialforsøg. Forsøgene er inddelt efter kammertryk, idet friktionsvinklen er spændingsafhængig.

Kammertryk [kPa]	Forsøg nr.	Sekant friktionsvinkel [^{0}]	Den relative lejringstæthed [%]
50	130807	40	65,2
	130809	41	71,2
100	130801	32	75,6
	130803	37	77,3
	130811	34	85,3
200	130802	34	89,7
	130808	35	80,4
	130810	33	70,9



Figur 11: Friktionsvinklen som funktion af den relative lejringstæthed.

På Figur 11 ses friktionsvinklen som en funktion af den relative lejringstæthed. Ud fra de forsøg der er lavet og vist på Figur 11, kan sammenhængen mellem friktionsvinklen og den relative lejringstæthed ikke beskrives. For at finde sammenhæng mellem friktionsvinklen og lejringstætheden skal der udføres flere forsøg. Men det formodes, at friktionsvinklen er højere for prøver med en høj lejringstæthed sammenlignet med prøver, der har en lavere lejringstæthed.

A.10 Undersøgelsel af skønsformel for friktionsvinkel

For at skønne friktionsvinklen for sand kan skønsformelen som er vist her anvendes.(Jensen, 2009)

$$\varphi'_{pl} = \varphi'_{crit} + 5° \cdot I_R - 5° \cdot I_D - \Delta\varphi_1$$

Hvor:

φ'_{crit} er den karakteristiske friktionsvinkel, som for Dronninglund silten er fundet til 25°.

I_D er den relative lejringstæthed.

$$I_R = I_D \left(Q_{min} - ln \frac{p'}{1kPa} \right) - 1$$

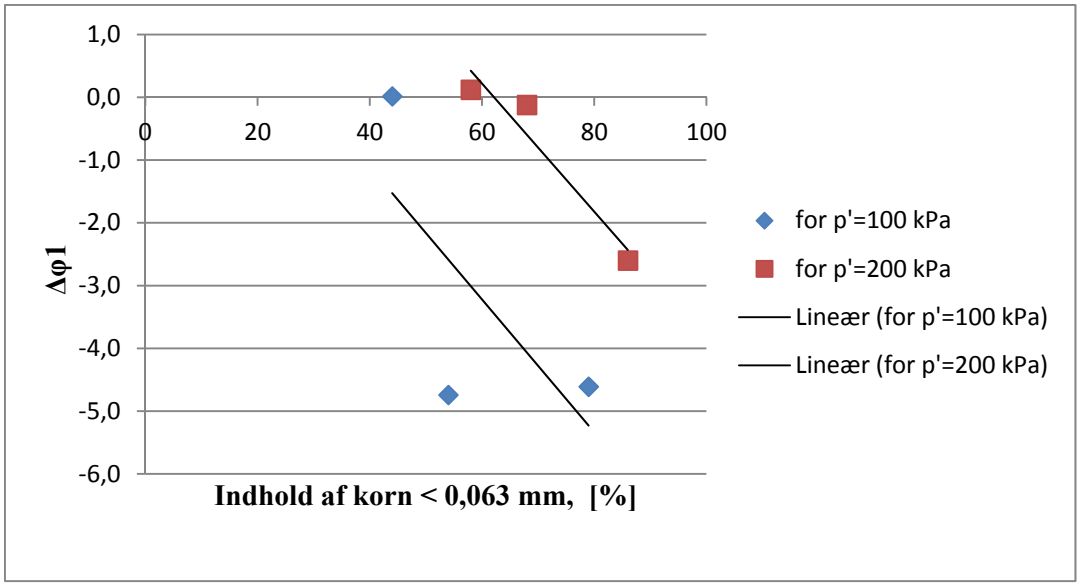
p' er en repræsentativ værdi af middelspændingen, i dette tilfælde anvendes kammertrykket.

Q_{min} er sat til 10 for kvarts og feldspat.

$\Delta\varphi_1$ er afhængig af siltindholdet i sandet og kan sættes til 2° ved 5 - 10% siltindhold og 5° ved 10 - 20% siltindhold. Ved første beregning af φ'_{pl} sættes $\Delta\varphi_1 = 0$. I denne undersøgelse af skønsformlen undersøges det, hvilken værdi $\Delta\varphi_1$ kan sættes til når der er tale om siltindhold langt over de 20 %, det vil sige, når der er tale om en jordart der har hovedbetegnelsen silt. For at finde $\Delta\varphi_1$ sættes den først lig 0 og φ'_{pl} bestemmes. Sekant friktionsvinklen φ'_s fundet ved tolkning af triaxialforsøg sammenlignes med φ'_{pl}. $\Delta\varphi_1$ bestemmes for hvert forsøg.

Kammer-tryk	Forsøg	Silt-indhold	Sand-indhold	Ler-indhold	Indhold af korn < 0,063mm	φ'_{pl}	φ'_s	$\Delta\varphi_1 = \varphi'_{pl} - \varphi'_s$
[kPa]	nr.	[%]	[%]	[%]	[%]	[°]	[°]	[°]
50	130807	49	43	8	57	36,6	40	-3,4
	130809	44	50	6	50	38,1	41	-2,9
100	130801	69	21	10	79	36,6	32	4,6
	130803	39	56	5	44	37,0	37	0,0
	130811	45	46	9	54	38,7	34	4,7
200	130802	73	13	13	86	36,6	34	2,6
	130808	50	42	8	58	34,9	35	-0,1
	130810	52	32	16	68	33,1	33	0,1

$\Delta\varphi_1$ angiver hvor mange grader man skal trække fra pga. siltindhold i en sand. For silt kunne der laves et fradrag afhængig af ler og silt indhold, idet det må formodes at give en lavere friktionsvinkel. Ler og silt er i Danmark defineret som kornstørrelse mindre end 0,063 mm og kaldes i det følgende finkornet indhold. Sammenhængen mellem $\Delta\varphi_1$ og finkornet indhold er undersøgt ved at plotte $\Delta\varphi_1$ afhængig af det finkornede indhold, og dette er vist på Figur 12 for spændingstilstande på 100 kPa og 200 kPa. For spændingstilstanden 50 kPa ligner det, at der kunne ligges et bidrag til friktionsvinklen, men dette skulle i så fald undersøges ved mere end de to forsøg der er udført i dette projekt.



Figur 12: $\Delta\varphi_1$ som funktion af det finkornede indhold, det vil sige indhold af kornstørrelser < 0,063 mm.

Det vurderes, at de 3 punkter for hver spændingstilstand for sammenhængen mellem $\Delta\varphi_1$ og det finkornede indhold ikke er nok til at angive en tendens for bestemmelse af $\Delta\varphi_1$. Det formodes, at en eventuel modificering af skønformlen kunne laves ved udførelse af flere triaxialforsøg, bestemmelse af kornkurven og bestemmelse af den relative lejringstæthed.