

Parametrestudie af kalkstabiliseringseffekten for aalborgler og moræneler.

$$K_t = K_{t0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$$

$$c'_{tr} = a \tan(\alpha) \tan(\varphi'_{tr})$$



$$\sin(\varphi'_{tr}) = \frac{3}{1 + 6 \tan(\alpha)}$$

$$\tau = c' + \sigma' \tan(\varphi')$$

Kåre Kjær Lysdahl
M.Sc. in Civil Engineering
Master's thesis
Aalborg Universitet
Juni 2011

Titel:

Parametrestudie af kalkstabiliseringseffekten for aalborgler og moræneler.

Tema:

Speciale projekt, 4. semester

Udarbejdet af:

Kåre Kjær Lysdahl

Vejledere:

Benjaminn Nordahl Nielsen.

Opslag: 3

Sideantal: 59

Afsluttet: 16. Juni 2011.

Kåre Kjær Lysdahl

Forord.

Denne rapport "Parametrestudie af kalkstabiliseringseffekten for aalborgler og moræneler" er et produkt af et kandidatprojekt udarbejdet i foråret 2011 på 10. semester under studieretningen i Vej- og Trafikteknik på Aalborg Universitet

Dette paper indeholder to artikler, og en række relaterende appendiks. De anvendte programmer som anvendes til analyser af de forsøg som er udført. Programmerne er vedlagt den tilhørende CD.

Under udarbejdelser af denne rapport skal der rettes en tak til Finn Andersen fra Faxe Kalk A/S for levering af brændt kalk og anden nødvendig litteratur. Derudover vil jeg gerne takke professor Lars B. Ibsen, Ph. D studerende Gitte Lyng Grønbech og konstruktør Anette N. Pedersen for deres hjælp med udførelse og til forståelse af de gennemførte forsøg. En tak skal også rettes til Civilingeniør Jepser Bolterup Madsen COWI A/S og Bent Frank, Musikkenshus for hjælpe til anskaffelse af hhv. moræneler og aalborgleret anvendt i dette paper.

Læsevejledning.

Harvardmetoden er anvendt til kildehenvisninger i denne rapport. Disse markeres i teksten med parenteser, hvori der står forfatterens navn og årstal for udgivelsen, (forfatter, årstal) Yderligere information vedrørende kilderne findes bagerest i rapporten under litteratur og er for den enkelte artikel angivet sidste i disse.

Står kilden før et punktum, henviser denne kun til den pågældende sætning. Står kilden derimod efter et punktum, henviser kilden til hele delafsnittet. Figurer og tabeller er nummereret i henhold til kapitlet, det vil sige, at den første figur i kapitel 3 har nummer 3.1. Figurer og tabeller, som ikke står angivet med kilde, er udarbejdet af den studerende.

Resume.

Dette projekt omhandler effekten ved kalkstabilisering af aalborgler og moræneler. Fokus på anvendelsen af kalkstabilisering er steget gennem de sidste ti år. Vejdirektoratet udarbejdede i 2010 en udbudsforskrift for anvendelsen af kalkstabilisering ved anlægsprojekter. I efteråret 2010 blev der udarbejdet et litteraturstudie af de erfaringer som tidligere er gjort ved anvendelsen af kalkstabilisering, både i Danmark og i udlandet. Tendenser herfra viser, at lerets stivhed og styrke vil øges ved kalkstabilisering. Det kan forventes at lerets stivhed øges fra en værdi på 45 MPa til en værdi liggende omkring 120 MPa. Lerets styrke forventes at øges mellem 100-250%, hvor den effektive friktionsvinkel vurderes til at ligge mellem 34-44 grader, og at den effektive kohæsion ligger på 35% af forskydningsstyrken. Den viden som findes i Danmark omkring effekten af kalkstabilisering er begrænset til få forsøg, nogle udarbejdet omkring lerets E-modul og et udarbejdet med det formål af finde kalkstabiliseret morænelers styrke. Det er derfor nødvendigt at få defineret stivheden og styrkeparametrene for forskellige lerarter i Danmark, således at kalkstabiliseret ler kan anvendes ved bygge og anlægsprojekter.

Der er blevet udarbejdet to artikler omkring effekten ved kalkstabilisering af hhv. moræneler og aalborgler. De to artikler omhandler samme problemstilling hvor eneste forskel er lerarten.

Et resume af de to artikler er beskrevet i det følgende.

Den første artikel omhandler kalkstabilisering af moræneler. Moræneler er interessant, da den er at finde i tre-fjerdedele af Danmark. Moræneler er en meget varierende ler, hvor lerindholdet kan varierer, gående fra en fed ler til en meget mager ler. Den moræneler der kalkstabiliseret i denne artikel er en mager moræneler, altså med et lavt lerindhold. Effekten af kalkstabilisering, er blevet undersøgt gennem et standard proctor-, et konsoliderings- og et triaxialforsøg. Disse forsøg giver hhv. lerets opti male vandindhold, tørdensitet, konsolideringsmodul og leretsstyrke beskrevet som den effektive kohæsion og den effektive friktionsvinkel. Det har ikke været muligt, at finde en lineær sammenhæng mellem kalkmængde og lerets optimale vandindhold, men det kan konkluderes at det optimale vandindhold stiger ved kalkstabilisering. Angående lerets tørdensitet, er der en tydeligere tendens til en lineær sammenhæng, og det kan konkluderes at tørdensiteten er faldende med øget mængde kalk. Konsolideringsmodulet øges fra en værdi liggende omkring 20 MPa til en værdi liggende mellem 75-100 MPa. Kalkstabiliseret moræneler med en kalkmængde på fire procent opnår en effektiv kohæsion mellem 0-1 kPa og en effektiv friktionsvinkel liggende mellem 30-31 grader.

Den anden artikel omhandler kalkstabilisering af aalborgler. Den anvendte aalborgler stammer fra området omkring Musikkenshus i Aalborg. Det karakteristiske ved aalborgler, er at den skiftende består af 1-2cm ler og 1-2mm silt. Der er som forundersøgelse til musikkenshus blevet udført både triaxial- og konsolideringsforsøg for aalborgleret i området, resultaterne benyttes her til klassifikation af aalborgleret. Der er som i første artikel blevet udført standard proctor-, konsoliderings- og triaxialforsøg for at undersøge effekten af kalkstabilisering. Hvad angår aalborglerets tørdensitet, så opleves der en tendens til at den øges ved øget kalkmængde, mens vandindholdet er faldende ved øget kalkmængde. Konsolideringsmodulet øges fra en værdi liggende mellem 20-30 MPa til en værdi liggende mellem 100-130 MPa, hvilket stemmer helt overens med forventningerne. Kalkstabiliseret aalborgler med en kalkmængde på fire procent, opnår en effektiv kohæsion på 1-10 kPa og en friktionsvinkel på 42-44 grader. Denne styrke er en forøgelse af aalborglerets intakte styrke som er blevet bestemt at have en effektiv kohæsion på 7-12 kPa og en friktionsvinkel på 24-30 grader.

Summary(Resumé på Engelsk)

This theses consists the effect of lime stabilization of moraine and aalborgclay. Focus on the use of lime stabilization has increased over the last decade. Vejdirektoratet prepared a regulation for the use of lime stabilization on construction projects in 2010. In the autumn of 2010 a literature of experience previously gained in the application of lime stabilization, both in Denmark and abroad was produced. A trend from here shows that the clay stiffness and strength will be increased by lime stabilization. It is likely that the clay stiffness increases from a value of 45 MPa to a value af approximately around 120 MPa. Clay strength is expected to increase between 100-250%, where the internal angle of friction is estimated to be between 34-44 degrees, and the effective cohesion is about 35% of the shear strength. The knowledge available in Denmark on the effect of lime stabilization is limited to a few tests, some based around the modulus of elasticity and some based on finding lime stabilized clay strength. It is therefore necessary to define the stiffness and strength parameters of various clays in Denmark, so that lime stabilized clay may be used in construction projects.

Here two articles have been composed concerning the effect of lime stabilizing in respectively moraine and aalborgclay. The two articles concern the same issue where the only difference is clays.

A summary of the two articles is given below.

The first article deals with lime stabilization of moraine. Moraine is a interesting clay, as it is found in three-quarters of Denmark. Moraine is a very variable clay, where the clay content can vary, ranging from a clay with high content of clay to at very sandy clay. The moraine lime stabilized in this article is a sandy clay, with a low clay content. The effect of lime stabilization was studied through a proctor compaction, an oedometer- and a triaxial-test. These tests will give the optimal moisture content, dry density, modules of elasticity and the effective cohesion and internal angle of friction. It has not been possible to find a linear relationship between clay content and optimum water content, but it can be concluded that the optimum moisture content increases. Regarding the dry density, it can be concluded that it will decrease with increasing lime content. The modules of elasticity increases from a value lying around 20 MPa to a value lying between 75-100 MPa. Lime stabilized moraine with a lime content of four percent gain an effective cohesion between 0-1 kPa and the internal angle of friction lying between 30-31 degrees.

The second article deals with lime stabilization of aalborgclay. The characteristic of aalborgclay is that it consists of alternating one or two centimeters clay and one and two millimeter silt. In connection to the building of Musikkens hus there has been performed both triaxial- and oedometer tests of aalborg clay in the area, the results are used here for the Classification of aalborgclay. There is, as in the first article performed proctor compaction, oedometer and triaxial test to investigate the effect of lime stabilization. Regarding aalborgclays dry density it tends to be increased by increasing lime content, while water content is decreasing by increasing lime content. Modules of elasticity increases from a value between 20-30 MPa to a value between 100-130 MPa, which is consistent with expectations. Lime Stabilized aalborgclay with a lime content of four per cent, achieves an effective cohesion of 1-10 kPa and an internal angle of friction of 42-44 degrees. This is an increase compared to intact aalborgclay, which was determined to have an effective cohesion of 7-12 kPa and an internal angle of 24-30 degrees

Indholdsfortegnelse.

1. Parametrestudie af kalkstabiliseringseffekten af moræner	6
---	---

2. Parametrestudie af kalkstabiliseringseffekten af aalborgler	24
--	----

APPENDIKS

A - Vejledning i kalkstabilisering	42
------------------------------------	----

B - Konsolideringsteori	46
-------------------------	----

C - Teorie som danner grundlag for traixailforsøg	51
---	----

Litteraturliste.

Parameterstudie af kalkstabiliseret mager moræneler.

Kåre K. Lysdahl

Institut for Byggeri og Anlæg

Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Vej- og trafikteknik

Parameterstudie af kalkstabilisering af mager moræneler

K.K. Lysdahl

Juni 2011

© Aalborg Universitet

Videnskabelige publikationer ved Institut for Byggeri og Anlæg

Technical Reports anvendes til endelig afrapportering af forskningsresultater og videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet. Serien giver mulighed for at fremlægge teori, forsøgsbeskrivelser og resultater i fuldstændig og uforkortet form, hvilket ofte ikke tillades i videnskabelige tidsskrifter.

Technical Memoranda udarbejdes til præliminær udgivelse af videnskabeligt arbejde udført af ansatte ved Institut for Byggeri og Anlæg, hvor det skønnes passende. Dokumenter af denne type kan være ufuldstændige, midlertidige versioner eller dele af et større arbejde. Dette skal holdes in mente, når publikationer i serien refereres.

Contract Reports benyttes til afrapportering af rekvireret videnskabeligt arbejde. Denne type publikationer rummer fortroligt materiale, som kun vil være tilgængeligt for rekvirenten og Institut for Byggeri og Anlæg. Derfor vil Contract Reports sædvanligvis ikke blive udgivet offentligt.

Lecture Notes indeholder undervisningsmateriale udarbejdet af undervisere ansat ved Institut for Byggeri og Anlæg. Dette kan være kursusnoter, lærebøger, opgavekompendier, forsøgsmanualer eller vejledninger til computerprogrammer udviklet ved Institut for Byggeri og Anlæg.

Theses er monografier eller artikelsamlinger publiceret til afrapportering af videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg som led i opnåelsen af en ph.d.- eller doktorgrad. Afhandlingerne er offentligt tilgængelige efter succesfuldt forsvar af den akademiske grad.

Latest News rummer nyheder om det videnskabelige arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg med henblik på at skabe dialog, information og kontakt om igangværende forskning. Dette inkluderer status af forskningsprojekter, udvikling i laboratorier, information om samarbejde og nyeste forskningsresultater.

Udgivet 2011 af
Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Sohngårdsholmsvej 57,
DK-9000 Aalborg, Danmark

Trykt i Aalborg på Aalborg Universitet

Parametrestudie af kalkstabiliseret mager moræneler.

K.K. Lysdahl

Aalborg Universitet, Januar 2011

Resumé

Den første artikel omhandler kalkstabilisering af moræneler. Moræneler er interessant, da den er at finde i tre-fjerdedele af Danmark. Moræneler er en meget varierende ler, hvor lerindholdet kan variere, gående fra en fed ler til en meget mager ler. Den moræneler der kalkstabiliseret i denne artikel er en mager moræneler, altså med et lavt lerindhold. Effekten af kalkstabilisering, er blevet undersøgt gennem et standard proctor-, et konsoliderings- og et triaxialforsøg. Disse forsøg giver hhv. lerets optimale vandindhold, tørdensitet, konsolideringsmodul og leretsstyrke beskrevet som den effektive kohæsion og den effektive friktionsvinkel. Det har ikke været muligt, at finde en lineær sammenhæng mellem kalkmængde og lerets optimale vandindhold, men det kan konkluderes at det optimale vandindhold stiger ved kalkstabilisering. Angående lerets tørdensitet, er der en tydeligere tendens til en lineær sammenhæng, og det kan konkluderes at tørdensiteten er faldende med øget mængde kalk. Konsolideringsmodulet øges fra en værdi liggende omkring 20 MPa til en værdi liggende mellem 75-100 MPa. Kalkstabiliseret moræneler med en kalkmængde på fire procent opnår en effektiv kohæsion mellem 0-1 kPa og en effektiv friktionsvinkel liggende mellem 30-31 grader.

Nøgleord: Forskydningsstyrke, forskydningspænding, kalkstabilisering, konsolideringsforsøg, triaxialforsøg.

1. Indledning.

Der er i Danmark kommet mere og mere fokus på anvendelsen af kalkstabilisering i ved bygge og anlægsprojekter igennem de sidste ti år. Særligt er der af vejdirektoratet blevet benyttet kalkstabilisering i forbindelse med flere projekter. Et af projekterne hvor kalkstabilisering er anvendt er, i forbindelsen med udvidelsen af motortrafikvejen mellem Ønslev og Sakskøbing i 2005 (Lysdahl, 2010b). Interessen for anvendelsen er siden steget, og i 2010 har vejdirektoratet udgivet en udbudsforskrift for anvendelsen af kalkstabilisering i Danmark (Vejdirektoratet, 2010).

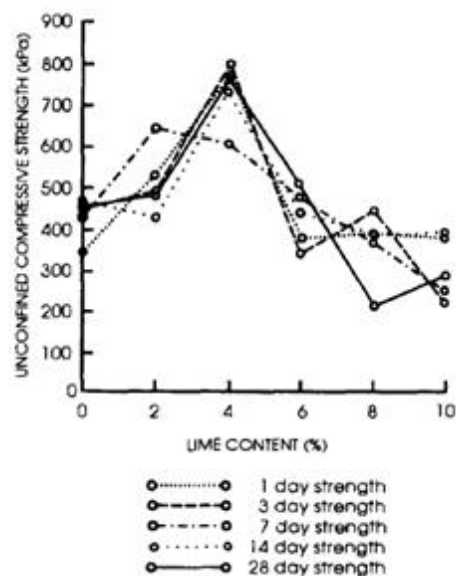
Denne artikel omhandler kalkstabilisering af moræneler, og vil gennemgå effekten ved kalkstabilisering. Der vil blive undersøgt for udviklingen af morænelerets optimale vandindhold, dens tørdensitet, konsolideringsmodul, effektive kohæsion og lerets friktionsvinkel. De to første kapitler i denne artikler vil gennemgå resultater fra tidligere forsøg, hvor der i kapitel 3,4 og 5 vil blive præsenteret resultater fra proctor-, konsoliderings- og triaxialforsøg udført på kalkstabiliseret og intakt moræneler.

Lysdahl (2010a) har i forbindelse med den stigende interesse udarbejdet et litteraturstudie, for at kortlægge hvilke erfaringer der tidligere og i andre lande, er gjort med anvendelsen af kalkstabilisering. Særligt er der et studie udarbejdet af Bell (1996) som viser en tendens til, at styrken af leret bliver øget ved kalkstabilisering. Undersøgelsen viste, at der ved kalkmængder på 4 %

skete et peak for udviklingen af styrken, hvilket fremgår af Figur 1.1.

Figur 1.1 viser udviklingen af lerarter med et højt indhold af lermineralet montmorillonite. Dette svarer til det lermineral der i Danmark benævnes Smectite, som der for nogen lerarter findes et højt indhold af i Danmark. Samme tendens ses for både quartz og kaolinite mineraler. (Lysdahl, 2010a)

Der er i Danmark ikke særlig stort kendskab til hvad kalkstabilisering har af betydning for udviklingen af lerets styrke og i nogen grad lerets



Figur 1.1 Styrkeudvikling af montmorillonites (Lysdahl, 2010a)

stivhed. Faxe Kalk A/S har udarbejdet et forsøg med det formål, at få bestemt udviklingen af lerets elasticitetsmodul ved kalkstabilisering (O vergaard, 2005). De udførte forsøg viste en forøgelse af E-modulet gående fra værdier liggende under 45 MPa til værdier på mellem 120-195 MPa, samt at stigende vandindhold giver mindre eller ingen forøgelse. Forsøgene udført af Faxe Kalk fremgår af Figur 1.2. (Lysdahl, 2010a).

På trods af, at Faxe Kalk A/S har udført forsøg med det formål at bestemme kalkstabiliseret lers E-modul, er der stadig manglende kendskab til hvordan danske lerarter udvikler deres stivhed og styrke ved kalkstabilisering. Det er nødvendigt, at få fastlagt stivheden og styrkeparametrene for kalkstabilisering af danske lerarter. Dette med det formål, at kalkstabiliseret ler kan benyttes som et byggemateriale der vurderes som et anvendeligt materiale, når bygge og anlægsprojekter projekteres.

Lysdahl (2010a) fandt gennem litteraturstudiet ud af, at tidligere studier af kalkstabilisering viser en tendens til, at lerets forskydningsstyrke opnår en forøgelse på mellem 100-250 %, at den effektive friktionsvinkel ligger mellem 34-44 grader og at den effektive kohæsion ligger omkring 35 procent af forskydningsstyrken.

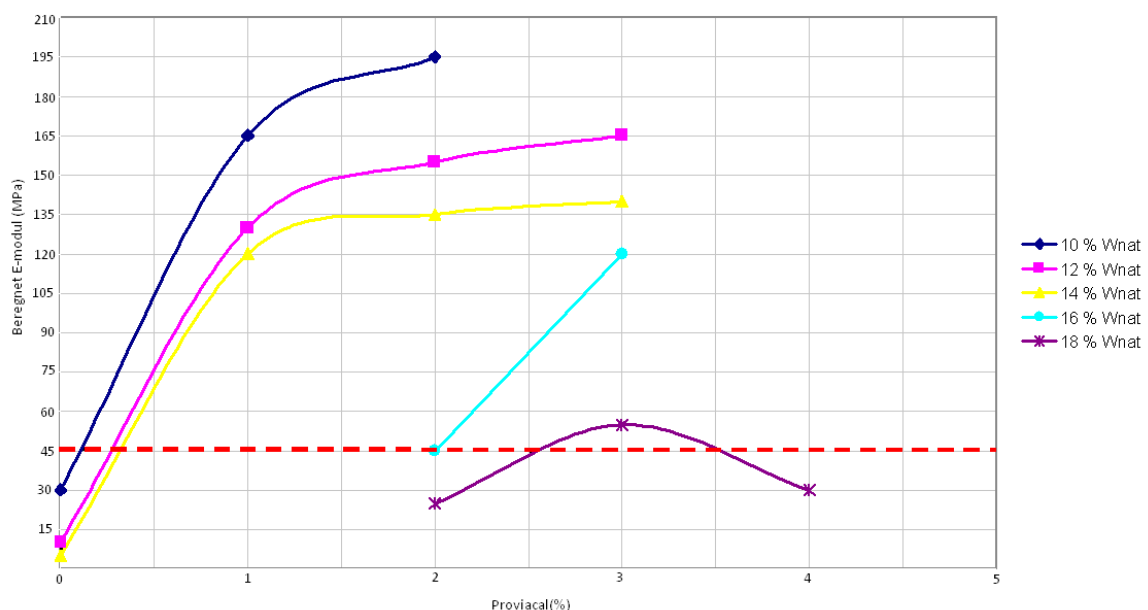
Der er i 2008 blevet udarbejdet et triaxialforsøg på en kalkstabiliseret moræneler for at undersøge effekten af kalkstabilisering. Der kendes i dette forsøg ikke noget til hvordan leret er blevet kalkstabiliseret samt mængden af kalk. Resultatet af forsøget viser at kalkstabilisering giver en forøgelse af morænelerets styrke. Resultatet fremgår af Tabel 1.1.

	Test 080701	Test 080702
c' [kPa]	0	0
ϕ' [°]	65,7	68,5
c_u [kPa]	413,3	542,6

Tabel 1.1 Resultat af triaxialforsøg udført på kalkstabiliseret moræneler i 2008 (Lysdahl, 2010b).

1.1. Beskrivelse af moræneler.

Moræneler er den mest forekomne ler i Danmark og dækker ca. tre fjerdedele af Danmarks overflade. Leret forekommer i mange forskellige former, hvor lerindholdet i moræneler er varierende, hvilket har betydning for morænelerets egenskaber. Moræne aflejringer stammer fra glacialtiden, hvilket betyder at denne lerart er



Figur 1.2 Udvikling af E-modul afhængig af vandindhold og kalkmængden (proviacal) for kalkstabiliseret ler. (Lysdahl, 2010b)

blevet dannet under istiden. Moræneler består af usortet jord, der af istiden er blevet ført ind over landet. Noget af det usortet jord er under smeltning blevet aflejret i bunden af gletsjeren, mens andet materiale er aflejret oven på gletsjeren. Aflejringer fra bunden af gletsjeren er blevet udsat for en høj belastning, mens aflejringer fra toppen af gletsjeren enten ikke er blevet udsat for belastning eller med en lav belastning. I mellem de to ydre punkter ligger der en masse nuancer. (Naturstyrelsen, 2011)

Den anvendte moræneler stammer fra midten af Himmerland, hvor der af COWI er blevet udført nogle borer i forbindelse med etablering af nye vindmøller. Placeringen fremgår af Figur 1.3 set i forhold til Aalborg og Aars som er en større by i Himmerland.

I området er der fundet planums nært moræne ler, hvilket har lettet arbejdet med anskaffelse af leret. Ifølge boreprofilen ligger der en stærkt sandet moræneler med enkelte grusfraktioner i området.



Figur 1.3 Placering af området hvor den benyttede moræneler forefindes fremgår af A, området er set i forhold til Aalborg og Aars

1. Klassifikation

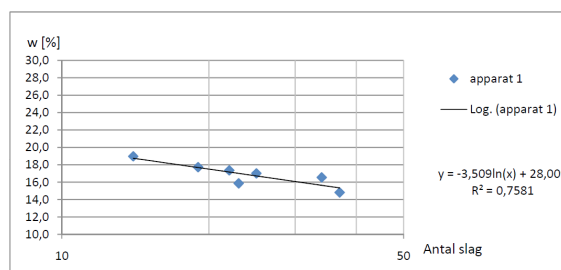
I dette afsnit vil konsistensgrænser, optimalt vandindhold og tørdensitet blive beskrevet som et led i klassifikationen af moræneleret.

Boringen udført i området hvor moræneleret stammer fra angiver, at vandindholdet for denne moræneler ligger mellem 12-15%. Dette stemmer overens med, at det naturlige vandindhold er blevet bestemt 13,3% ud fra intakt prøven.

2.2. Konsistensgrænser

For at bestemme plasticitets indekset for moræne leret, er der blevet udarbejdet casegrande og udrulning på moræneleret. Ved casagrandeforsøget sprækkede moræneleret under dannelse af den rille som leret skal lukke ved fald i casagrandeapparatet.

Grundet det lave indhold af ler, har det været vanskeligt at gennemføre forsøget. Som det fremgår af Figur 2.3, så er determinations-koefficient på 0,7581 for den tilnærmede rettelinje. Ud fra forsøget er moræne lerets flydsgrænse bestemt til et vandindhold på 16,7 %.



Figur 2.3 Resultat af flydegrænseforsøg på intakt moræneler.

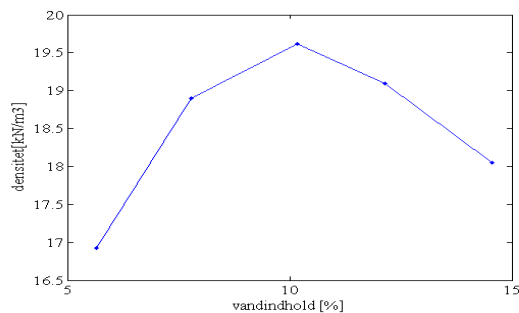
Plasticitetsindekset er defineret som:

$$I_p = w_l - w_p$$

Hvor w_l er flydegrænsen og w_p er plasticitetesgrænsen. w_p er defineret som det vandindhold leret indeholder når den netop uden at briste lader sig udrulle til tre millimeter tykke tråde. (Dansk Standard) Dette var ikke muligt at gennemføre, da leret bristede inden det var muligt at udrulle til tre millimeter tykke tråde. Hvilket betyder at det ikke er muligt at definere hvor når leret går fra fast til plastisk. Hvorfor denne moræneler bestemmes til at være ikke plastisk (nonplastic clay).

2.3. Optimalt vandindhold og tør densitet

Der er blevet udført standard proctor forsøg, med henblik på, at finde morænelers optimale vandindhold og lerets tørdensitet. Proctor forsøget er udført som et standard proctor forsøg jf. DS/EN 13286-2(2004). Hvor der er blevet benyttet 75 slag over tre lag. Resultatet er angivet i



Figur 2.4 Resultat af udført proctor på intakt moræneler.

Figur 2.4.

Som det fremgår af Figur 2.4, så fremkommer et klart defineret toppunkt på grafen i Figur 2.4. Toppunktet angiver punktet hvor det mest optimale vandindhold findes, ud fra den maksimale tør densitet. Af Tabel 2.1 fremgår det optimale vandhold og den optimale rumvægt for moræneleret

w_{opt} [%]	γ_d [kN/m ³]
10,2	19,69

Tabel 2.1 Bestemte værdier for det optimale vandindhold og tør densitet for intakt moræneler

Formålet med bestemmelsen af den intakte morænelers optimale vandindhold er, at denne benyttes ved blanding af kalk og ler. Metoden hvorefter kalkstabilisering foregår, betyder at den intakte ler skal have et vandindhold liggende to til fire procent under det optimale vandindhold inden blanding. Sådan at der tilføjes vand under blanding. Det ønskes at få undersøgt hvilken effekt kalkstabilisering har på det w_{opt} og γ_d .

Samlet set betyder dette at moræneleret har klassifikations parametre som beskrevet i Tabel 2.2.

W_{nat} [%]	W_{opt} [%]	γ_d [kN/m ³]	γ_m [kN/m ³]	w_l [%]
13,3	9,8	19,69	20	16,7

Tabel 2.2 Bestemte klassifikations parametre for intakt moræneler.

3. Proctorforsøg.

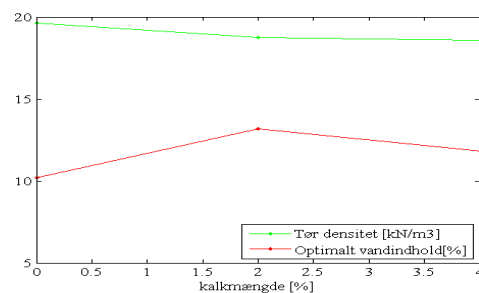
Det er som nævnt i Afsnit 2.3 ønsket, at undersøge hvordan kalkstabilisering påvirker morænelers tør densitet og dens optimale vandindhold. Der er derfor udført standard proctorforsøg for både intakt moræneler og kalkstabiliseret moræneler.

Det forventes at der som en konsekvens af kalkstabilisering vil ske en ændring af både det optimale vandindhold og lerets tør densitet. Det er forsøgt, at undersøge om der kan findes en sammenhæng mellem netop disse to parametre og mængden af kalk. De fundne værdier for de to parametre fremgår af Tabel 3.1.

Kalkindhold [%]	γ_d [kN/m ³]	w_{opt} [%]
0	19,62	10,2
2	18,73	13,2
4	18,59	11,8

Tabel 3.1 Bestemte værdier for optimal vandindhold og tør densitet.

Samt en grafisk afbildning af sammenhængen fremgår af Figur 3.1.



Figur 3.1 Grafisk afbildning af det optimale vandindhold og tør densitets ændring med øget mængde kalk.

Som det er illustreret i Figur 3.1, så er lerets tør densitet faldende med øget mængde kalk,

mens at det optimale vandindhold er varierende med øget mængde kalk.

Det optimale vandindhold er varierende med øget mængde kalk, og der kan derfor ikke konkluderes nogen decideret tendens for hvordan det optimale vandindhold vil ændre sig ved kalkstabilisering. Det skal her nævnes at datagrundlaget for denne undersøgelse ikke er stort nok til at kunne bestemme en tendens og derfor kan det være tilfældigt og grundet fejkilder at grafen og udviklingen ser ud som vist i Figur 3.1.

Proctorforsøget udføres over tre komprimeringsfaser af 25 slag fra faldloddet, hvor første fase er hvor cylinderen er en tredjedel fyldt. At fylde cylinderen en tredjedel kan medføre nogle fejkilder, da øjemålet ikke hvergang er lige præcist, sådan at cylinderen ikke bliver fyldt lige meget op i første fase.

4. Konsolidering af moræneler.

Konsolideringsmodulet er en af de parametre hvor der er usikkerhed omkring hvilken effekt kalkstabilisering har på moræneler. Forventningen er ud fra Lysdahl (2010a), at leret vil opnå et større konsolideringsmodul ved kalkstabilisering, denne forventning er blevet undersøgt gennem to konsolideringsforsøg, hvor der er

udført et forsøg på intakt moræneler og et på kalkstabiliseret moræneler behandlet med en kalkprocent på fire.

For at sikre at deformationerne kan sammenlignes, er begge prøver blevet udført med samme belastningsprogram, hvilket fremgår af Tabel 4.1.

Belastningsplanen er blevet bestemt løbende under konsolideringsforsøget, grundet manglende kendskab til forbelastningsspændingen. Grunden til at belastningsplanen er bestemt løbende skyldes at det ikke ønskes at belaste prøven over σ_{pc} , da dette vil betyde at prøven vil opføre sig som normalkonsolideret og arbejdskurven går over i en retlinje. (Ovesen et. al., 2006)

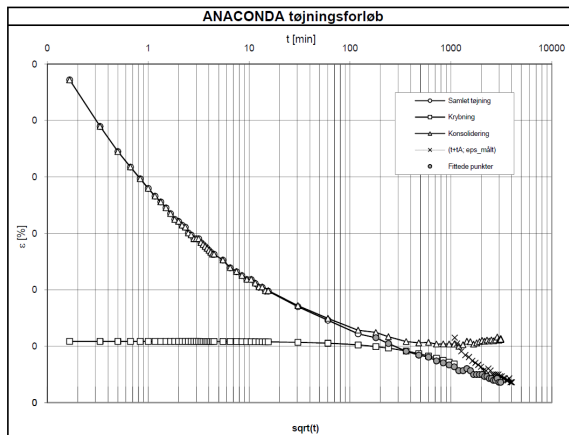
4.1. Analysemetode.

ANACONDA metoden som konsolideringsforsøget vil blive analyseret efter bygger på en teori om at konsolidering og krybning sker samtidigt. Dette betyder at det er nødvendigt at skelne mellem konsoliderings- og krybningstøjningerne, et eksempel på opdeling af krybning- og konsolideringsdeformationerne fremgår af Figur 4.1 (ANACONDA, 1992)

Måden de to deformationsprocesser dele op på, sker ved at betragte konsolideringsfasen

Belastningsplan					
Trin	lod [kg]	σ [kPa]	Trin	lod [kg]	σ [kPa]
1	0,25	7,77	14	15	384,14
2	0,5	14,15	15	10	256,56
3	1	26,91	16	6	154,49
4	2	52,43	17	12	307,59
5	4	103,46	18	17	435,18
6	9	231,04	19	24	613,80
7	14	358,63	20	19	486,21
8	11	282,08	21	14	358,63
9	8	205,53	22	9	231,04
10	5	128,98	23	14	358,63
11	10	256,56	24	19	486,21
12	15	384,14	25	24	613,80
13	19	486,21	26	29	741,38

Tabel 4.1 Belastningsplan for både intakt moræneler og kalkstabiliseret moræneler med en kalkprocent på fire

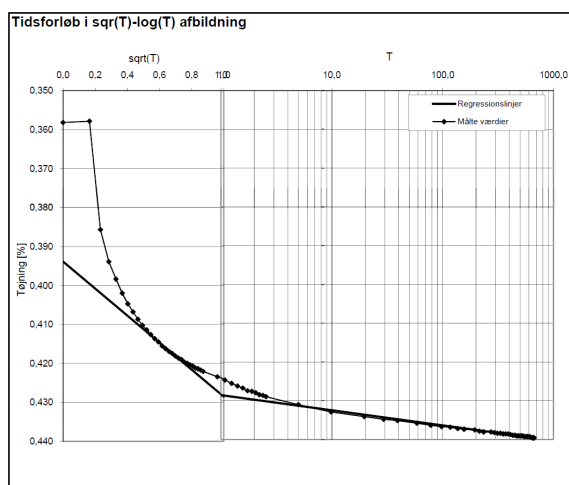


Figur 4.1 Separation af konsolideringsdeformationer og krybningsdeformationer ved belastningstrin seks for det kalkstabiliseret moræneler med en kalkmængde på 4%.

som et momentant forløb og derved ses der i førsteomgang bort fra vandudpresningsprocessen, og derved kan krydningstøjningerne findes. Efterfølgende kan konsolideringsdeformationerne bestemmes som en forsinkelse af sætningerne (ANACONDA, 1992).

Inden der påføres prøven ny belastning, skal det sikres at prøven i det nuværende belastningstrin er færdigkonsolideret. Metoden som benyttes til dette, er ved at betragte den traditionelle metode til at analysere konsolideringsforsøg på. Den traditionelle metode bygger på at konsolidering og krybning sker som to separate processer uafhængige af hinanden, hvor krybning først sker efter at konsolideringen er færdig. (Ovesen et. al., 2006)

Efter den traditionelle metode kan konsoli-



Figur 4.2 Tidsforløb i et $\sqrt{T}$ -log(T)-diagram for belastningstrin syv for det kalkstabiliseret moræneler med en kalkmængde på 4%.

deringstøjningerne beskrives som et retlinje i et $(\sqrt{T}, \epsilon)$ -diagram, mens krybning kan beskrives som en retlinje i et $(\log(T), \epsilon)$ -diagram. Kombinationen af de to digrammer benyttes til vurdering af om prøven er færdig konsolideret. Vurderingen af om der imellem de to rettelinjer er et knæk. Et eksempel på en $\sqrt{T}$ -log(T) fremgår af Figur 4.2 (Forening, Dansk Geoteknik, 2001)

4.2. Prøvetildannelse.

Tildannelsen af kalkstabiliseret moræneler er udført ved at anvende et standard proctor forsøg til komprimering, hvorefter der er udtaget en $\varnothing 70$ mm prøve, som kan tildannes til konsolideringsapparatet. Af Figur 4.3 fremgår metoden til hvordan den kalkstabiliseret prøve er udtaget af proctor cylinderen.

Konsolideringsforsøgene for både den intakte moræneler og det kalkstabiliseret ler er blevet udført med en prøvediameter på 70 mm og en højde på 35 mm.



Figur 4.3 Prøveudtagelsesmetoden for kalkstabiliseret ler.

4.3. Konsolideringsmodul.

Konsolideringsforsøgene er blevet udført med tre af- og genbelastninger. Dette skyldes at konsolideringsmodul er defineret som begyndelseshældningen af genbelastningsgrenen.

Ud fra begyndelseshældningen af de tre genbelastningsgrene og ud fra Formel (4.1), er det muligt at bestemme prøvens konsolideringsmodul.

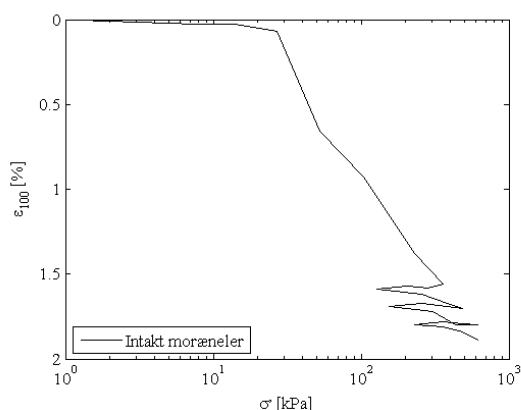
Det er valgt at finde begyndeshældningen ud fra de første punkter på hver genbelastningsgren (Forening, Dansk Geoteknik, 2001).

$$K_t = K_{t0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red} \quad (4.1)$$

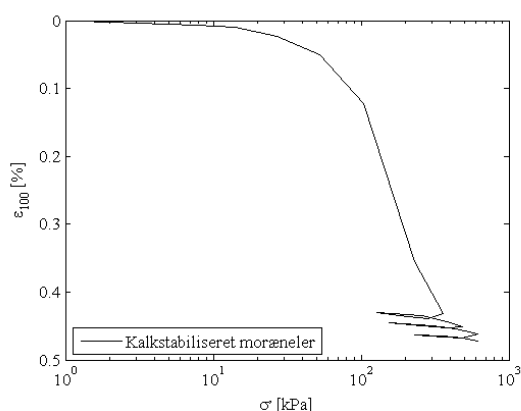
4.4. Konsolideringsarbejdskurve.

Arbejdskurven for konsolideringsforsøget kontrolleres for at sikre at leret ikke er blevet belastet over σ_{pc} , hvilket betyder at arbejdskurven går over i en ret linje. Arbejdskurverne for hhv. den intakte moræneler og den kalkstabiliseret moræneler fremgår af Figur 4.4 og Figur 4.5.

Den rette linje som opleves for den intaktes morænelers arbejdskurve vurderes at skyldes prøvetilpasning. Hvorfor den rette linje ikke er et



Figur 4.4 Arbejdskurve for intakt moræneler.

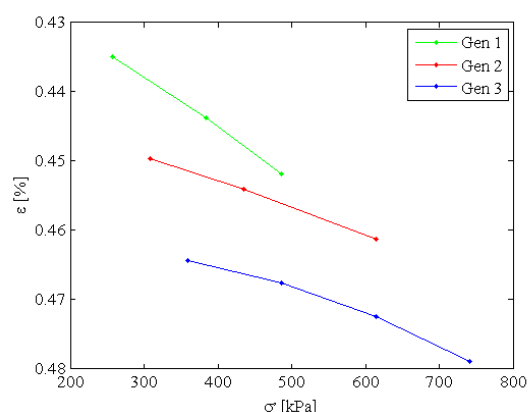


Figur 4.5 Arbejdskurve for kalkstabiliseret moræneler med en kalkmængde på 4 %.

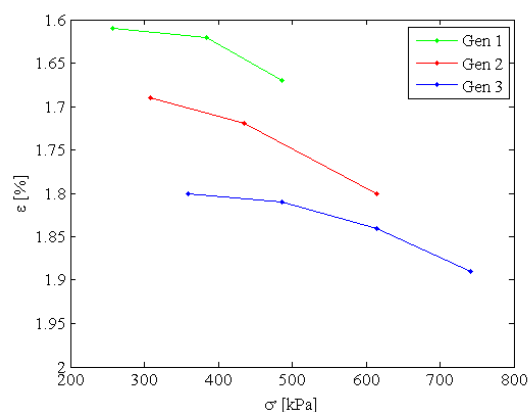
udtryk for at belastningen er større end forbelastningsspændingen.

4.5. Bestemmelse af konsolideringsmodulet.

Konsolideringsmodulet bestemmes ved at betragte genbelastningsgrenen for konsolideringsforsøget, og finde hældningen af hver genbelastningsgren ud fra de to første punkter. Genbelastningsgrenen for hhv. den intakte moræneler og den kalkstabiliseret moræneler fremgår af Figur 4.4 og 4.5



Figur 4.6 Genbelastningsgrene for kalkstabiliseret moræneler med en kalkmængde på 4%.



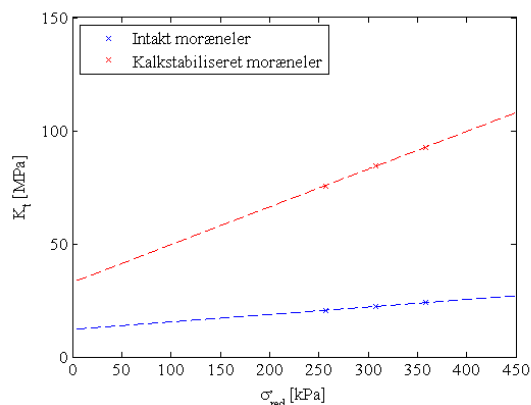
Figur 4.7 Genbelastningsgrene for intakt moræneler.

K_t bestemmes ved en lineær regression af hældningskoefficienten for de tre genbelastningsgrene og fremgår af Figur 4.8.

Ud fra Formel (4.1) er det muligt at bestemme værdierne for K_{t0} og ΔK_t , da de to andre værdier er givet ud fra start hældningen på genbelastningsgrene og den mindste værdi prøven er be-

Prøve	Genbelastningsgren	σ'_{red} [kPa]	K_t [Mpa]	K_{t0} [kPa]	ΔK_t [Mpa]
Intakt moræneler	1. gen	256,6	20,6		
	2. gen	307,6	22,4	12,2	32,9
	3. gen	358,6	23,9		
Kalkstabiliseret moræneler.	1. gen	256,6	75,6		
	2. gen	307,6	84,5	32,9	166,8
	3. gen	358,6	92,7		

Tabel 4.2 K_t og σ'_{red} er brugt til at bestemme K_{t0} og ΔK_t



Figur 4.8 K_t som funktion af σ'_{red} , hvor K_t er bestemt ud fra de første tre trin på genbelastningsgrenen.



Figur 4.9 Iu skåret prøve til kontrol af fejlkilder.

lastet med for hver gren. Resultatet fremgår af Tabel 4.2.

4.6. Fejlkilder

Prøverne er efter endt konsolidering, blevet undersøgt for eventuelle fejlkilder. Dette er blevet undersøgt ved at skære prøven op, for at kontrollere om der i prøven findes anden materiale end leret.

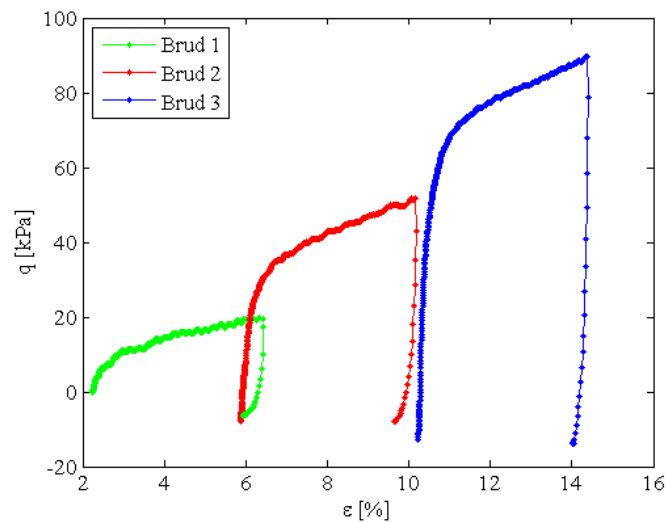
Den itu skåret intakt prøve fremgår af Figur 4.5, der ikke noget som indikerer en årsag til prøvetildannelsen som fremgår af arbejdskurven. Den kalkstabiliserede prøve er ikke blevet kontrolleret, da der her ikke har været muligt at der skulle være placeret sten eller anden materiale i prøven.

En anden fejlkilde, er hvis der er friktion mellem prøven og den ydre ring som prøven er placeret i, friktionen medfører at deformationerne bliver mindre, denne fejlkilde er ikke mulig at kontrollere.

5. Bestemmelse af kalkstabiliseret morænelers styrke.

Styrkeparametrene c' og ϕ' er blevet bestemt bestemt for det kalkstabiliserede moræneler med en kalkprocent på fire. Bestemmelsen af de to parametre er sket gennem et triaxialforsøg. Forsøget er blevet udført som et udrænet triaxialforsøg, $CU_{u=200}$, med et poretryk på 200kPa og en isotropisk konsolidering. Under brudfasen vil volumenet blive holdt konstant. Dette gøres gennem en fotocelle som måler ændringen af vægt ned til et μg . På den måde reguleres kammertrykket således at volumenet forbliver konstant under hele brudforsøget. En kontrol af data beviser at der igennem hele forsøget er blevet holdt et konstant volumen af prøven. Dette betyder at poretrykke holdes konstant gennem hele forsøget og dermed sikre at forsøget er forløbet udrænet. Forsøget er under brudfasen forløbet med en tøjningshastighed på 1 %/time op til en tøjning på fire procent.

Inden styrkeparametrene for det kalkstabiliserede moræneler kan bestemmes, er det nød-



Figur 5.1 Arbejdskurve for triaxialforsøget på kalkstabiliseret moræneler med 4 % kalk

vendigt at betragte forsøgets arbejdskurve, med det formål at kontrollere om forsøget har forløbet som forventet, sådan at det sikres at forsøget er blevet udført korrekt. Det kontrolleres om aflastningen af arbejdskurven, aflastes nok til at slut tøjningen har samme start tøjning som det næste brudforsøg.

Arbejdskurverne for de tre brudforsøg fremgår af Figur 5.1.

Slut tøjningen for brudforsøg to er lavere end starttøjningen for brudforsøg tre, hvilket betyder, at der under konsolideringsfasen mellem brudforsøg to og tre er sket en axialdeformation. Ud over tøjnings forskellen mellem brud to og brud tre, er der intet at bemærke ved forsøget.

5.1. Teori.

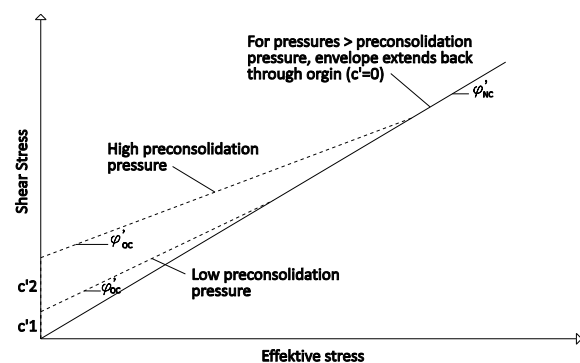
Triaxialforsøget er udført med det formål at bestemme det kalkstabiliseret moræne lers styrke. Forskydningsstyrken er en almindelig metode til at beskrive kohæsionsjords styrke. Forskydningsstyrken er principielt beskrevet som den maksimale forskydningspænding som jorden kan modstå. Forskydningsstyrken er af Mohr-Coulomb beskrevet som det fremgår af Formel (5.1) (Ovesen et. al., 2006)

$$\tau = c' + \sigma' \tan (\varphi') \quad (5.1)$$

Hvor:

τ	Forskydningsstyrke
c'	Effektiv kohæsion
φ'	Effektiv friktionsvinklen
σ'	Effektive spænding.

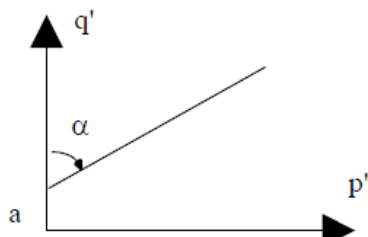
Den effektive kohæsion og den effektive friktionsvinkel er konstanter, mens de effektive spændinger er variable. Sammenhængen mellem de effektive spændinger og forskydningsstyrken fremgår af Figur 5.2. (Ovesen et. al., 2006)



Figur 5.2 Sammenhæng mellem forskydningsstyrke og effektive spændinger for ler afhængig af konsolideringsgraden.

5.2. Bestemmelse af styrkeparametre.

For at bestemme prøvens styrkeparametre, er det nødvendigt at få præsenteret de enkelte brudforsøg i et (p', q) -diagram, hvor ud fra en ret linje bestemmes med det formål at kunne bestemme linjens skæring med ordinataksen samt dens hældning, hvilket fremgår af Figur 5.3



Figur 5.3 Beskrivelse af konstanterne a og α .

Når a og α er bestemt er det muligt at bestemme værdierne for c' og φ' . Sammenhængen mellem a og α og prøvens styrkeparametre fremgår af formel 5.2 og 5.3.

$$\sin(\varphi'_{tr}) = \frac{3}{1 + 6 \tan(\alpha)} \quad (5.2)$$

$$c'_{tr} = a \tan(\alpha) \tan(\varphi'_{tr}) \quad (5.3)$$

Af Figur 5.2 fremgår de enkelte brudforsøg samt de tilnærmede rette linje, som beskriver brudgrænserne for prøven. Det er valgt at tilnærme to rette linjer til brudforsøgene, da det ikke har været muligt at få tilnærmet en brudlinje som går igennem alle tre brudforsøg.

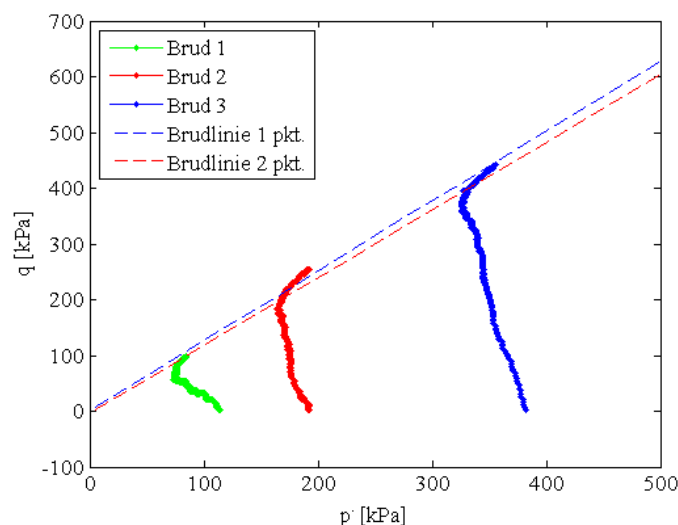
"Brudlinje 1 pkt." beskrevet med et punkt, henviser til at der fra hvert brudforsøg kun er brugt det punkt som har den højeste værdi af q , altså med $(p', q(\text{maks}))$ som kriterium, hvor ud fra at linjen er fundet.

"Brudlinje 2.pkt" beskrevet med to punkter, henviser til, at der fra hvert brudforsøg er brugt to punkter, hvor af det ene punkt til svarer punktet anvendt ved "brudlinje 1 pkt". Det andet punkt anvendt findes som den mindste værdi af p' , altså med $(p'(\text{min}), q)$ som kriterium. Grunden til at det netop er disse to punkter som benyttes skyldes, at den rette linje som dannes fra den mindste værdi af p' til den største værdi er q burde til svare det enkelte brudforsøgs brudlinje.

Konstanterne for de tilnærmede brudlinjer, hvor a er skæring med ordinataksen og b er linjens hældningskoefficient, er beskrevet i Tabel 5.1

	brudlinje 1. pkt. (b_1)	brudlinje 2 pkt. (b_2)
a	1,1	-17,9
b	1,3	1,3

Tabel 5.1 Bestemte værdier for konstanterne a og b for de rette linjer som fremgår af Figur 5.2



Figur 5.4 Tilnærmelse af to rettelinjer brudlinjer for kalkstabiliseret moræneler med en kalkprocent på 4. .

Skæringen med ordinataksen er negativ, hvilket betyder at den effektive kohæsion bliver negativ. Det forsøges, at tvinge den rette linje for "Brudlinje 2 pkt." igennem (0,0), for på den måde at sætte kohæsionen lig nul og kun finde en effektiv friktionsvinkel.

At tvinge linjen gennem (0,0) har ikke været muligt, men tilnærmelsesvis, da værdien af a efterfølgende er fundet til $a_{b2} = -0,9$, hvorfor a_{b2} sættes lig nul. Af teorien, findes det at den effektive kohæsion er lig nul, når brudlinjen går gennem (0,0).

Vinklen α , som fremgår af Figur 5.3, findes ud fra Formel (5.4)

$$\alpha = 90 - \tan^{-1} \left(\frac{b}{1} \right) \quad (5.4)$$

Når de to konstanter, a og α , som fremgår af Figur 5.3 er bestemt, er det muligt at finde de to styrkeparametre c' og ϕ' som beskriver jordens forskydningsstyrke, de to parametre er fundet som det fremgår af Tabel 5.2.

	Brudlinje 1. pkt.	Brudlinje 2 pkt.
$c' \text{ [kPa]}$	0,5	0
$\phi' \text{ [}^\circ\text{]}$	31,3	30,1

Tabel 5.2 Styrkeparametrene for kalkstabiliseret moræneler med en kalkprocent på fire.

5.3. Sammenligning med intakte styrker.

Der er ikke blevet udført triaxialforsøg på den intakte moræne ler, hvilket skyldes mangel på en intakt prøve, da moræneleret var så graderet, at det meste af den intakte prøve skulle kasseres, og der er derfor kun blevet udført et konsolideringsforsøg af den intakte moræne ler.

Der er i Teknisk Ståbi(2009) beskrevet nogle generelle værdi for en moræneler, disse værdier er varierende, da moræneler som beskrevet i Afsnit 2.1, er et varierende materiale både hvad

angår ler indhold og kalkmængden.

De generelle styrkeparametre for moræneler fremgår af Tabel 5.3.

Generelle styrkeparametre moræneler		
$c_u \text{ [kPa]}$	$c' \text{ [kPa]}$	$\phi' \text{ [}^\circ\text{]}$
50-1500	0-20	30-36

Tabel 5.3 Generelle styrkeparametre for moræneler (Teknisk Ståbi,200x)

Forventningerne beskrevet i Lysdahl(2010a), til effekten af kalkstabilisering var at leret ville opnå en forøgelse af styrken svarende til at den effektive friktionsvinkel vil ligge mellem 34-44 grader og at den effektive kohæsion vil svare til 35 % af c_u .

Effekten af kalkstabilisering har altså ikke haft nogen betydning for morænelerets styrke og den opnår ikke de værdier som der er i Lysdahl(2010b) er fundet frem til. Der er omtalt et forsøg, hvor det kalkstabiliseret ler har opnået en friktionsvinkel liggende mellem 65-68 grader og en forskydningsstyrke liggende mellem 400-550 kPa. Forsøget blev udført på kalkstabiliseret moræne ler med et vandindhold liggende i samme område som den moræne ler der er blevet kalkstabiliseret i denne artikel.

1.1. Fejlkilder

Der er i forbindelse med udførelsen af triaxialforsøget fundet nogle fejlkilder som kan have indflydelse på resultatet.

1. Overfladerne på prøven ikke har været helt glatte, hvilket ikke har været muligt grundet prøvens porøsitet, prøvens overflades fremgår af Figur 5.4. Ru overflader medfører større deformationer under forsøget, hvilket betyder at prøvens styrke falder.(Jakobsen, 1993)
2. De fundne styrkeparametre omtalt i Lysdahl (2010b), er blevet fundet ud fra kun to forsøgs resultater og derfor ligger der en usikkerhed ved at fitte den helt rigtige brudlinje. Dette skyldes at det ene forsøg kan have givet et resultat som ligger langt



Figur 5.4 Den kalkstabiliseret prøve efter endt triaxial forsøg.

fra andre resultater og derved give en for-
kert friktionsvinkel.

3. Stabiliseringsmetoden og mængden af kalk kendes ikke for triaxialforsøget beskrevet i Lysdahl(2010b).
4. Forkonsolidering af prøven har ikke været ordentligt. Triaxial forsøgene udført tidligere, kan være blevet konsolideret til et andet spændingsniveau.
5. Bestemmelse af kalibreringskonstanterne hvor kalibreringsfaktoren for stempeltrykket er af væsentlig betydning.

6. Konklusion.

Det er blevet undersøgt hvilken effekt kalkstabilisering har på danske lerarter, hvor det i denne artikel er blevet undersøgt hvilken effekt kalkstabilisering har på mager moræneler. Formålet har været at få fastlagt styrke og stivhedsparametrene for kalkstabilisering af morænele-ret. Følgende konklusioner kan opstilles efter at der er blevet udført, standard proctor, konsolidering og triaxialforsøg på det kalkstabiliserede aalborg ler.

1. Der kan ikke findes nogen lineær sammenhæng mellem mængden af kalk og materiales tørdensitet og optimale vandindhold. Det kan konkluderes at materialets tørdensitet er faldende ved kalkstabilisering og at det optimale vandindhold er stigende ved kalkstabilisering.
2. Det kan bekræftes, at konsolideringsmo-

dulet er stigende ved kalkstabilisering. Konsolideringsmodulet går fra en værdi liggende omkring 20-30 MPa til en værdi liggende mellem 75-100 MPa. Forventningen til forøgelsen var det konsolideringsmodulet skulle stige fra en værdi på 45 MPa til 125 MPa. Konsolideringsmodulet opnår ikke samme styrke som de ud fra Faxe Kalks undersøgelse viste det ville, men det kan konkluderes at der er en tendens til at kalkstabilisering øger konsolideringsmodulet af moræneler.

3. Det var forventet at kalkstabilisering vil medføre en forøgelse af den effektive kohæsion og friktionsvinkel. Resultaterne fra det udførte triaxialforsøg viste at det kalkstabiliserede moræneler ikke opnår en forøgelse af styrken. Det intakte ler, har jf. teknisk ståbi,(2009) en effektive kohæsion og en effektive friktionsvinkel på hhv. 0-20,0 kPa og 30-36 grader. Ud fra det triaxialforsøg som er udarbejdet, har den effektive kohæsion og den effektive friktionsvinkel værdier på hhv. 0-1 kPa og 30-31 grader. Altså bibeholdes morænelerets intakte styrke ved kalkstabilisering. Den bestemte friktionsvinkel ligger væsentligt lavere end den fundne friktionsvinkel bestemt i Lysdahl (2010b).

7. Perspektivering.

Resultaterne fra de udførte forsøg har vist at konsolideringsmodulet for moræneler øges ved kalkstabilisering, mens der for morænele-res styrke ikke konstanteres nogen ændring i styrken ved kalkstabilisering. Resultaterne er fundet ud fra få udførte forsøg, og det er derfor ikke muligt at fastlægge hvilket effekt kalkstabilisering har på moræneler, men kun påpege en tendens af hvad der kan forventes. Det er derfor nødvendigt at få udført flere forsøg med en moræneler der har samme karakteristika som den anvendte moræneler i denne artikel for at kunne fastlægge en mere præcis beskrivelse af hvilken effekt kalkstabilisering har på moræneler.

8. Bibliografi.

Anaconda. (1992). *ANACONDA manual*.

Bell, F. (1996). *Lime stabilization of clay minerals and soils.*

Dansk Standard. (2004). *DS/EN 13286-2.* Dansk Standard.

Dansk Standard. *DS/CEN ISO/TS 17892-12.* Dansk Standard.

Forening, Dansk Geotekniske. (2001). *Laboratoriehåndbogen.*

Google . (2011). *Google Maps.* Hentet fra <http://maps.google.dk>

Jacobsen, M. (1993). *Lærebog i videregående Geoteknik 2 - Sætninger i Jord.*

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

Lysdahl, K. (2010a). *Effektstudie af kalkstabilisering.* Aalborg.

Lysdahl, K. K. (2010b). *Casestudie af kalkstabiliseringseffekten på skråninger.* Aalborg.

Niels Krebs Ovesen, L. F. (2006). *Lærebog i Geoteknik.* Polyteknisk Forlag.

Overgaard, T. (2005). *Jordstabilisering på Syd-motorvejen Ønslev - Sakskøbing.*

Parameterstudie af kalkstabiliseret aalborgler.

Kåre K. Lysdahl

Institut for Byggeri og Anlæg

Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Vej- og trafikteknik

Parameterstudie af kalkstabiliseret aal- borgler.

K.K. Lysdahl

Juni 2011

© Aalborg Universitet

Videnskabelige publikationer ved Institut for Byggeri og Anlæg

Technical Reports anvendes til endelig afrapportering af forskningsresultater og videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet. Serien giver mulighed for at fremlægge teori, forsøgsbeskrivelser og resultater i fuldstændig og uforkortet form, hvilket ofte ikke tillades i videnskabelige tidsskrifter.

Technical Memoranda udarbejdes til præliminær udgivelse af videnskabeligt arbejde udført af ansatte ved Institut for Byggeri og Anlæg, hvor det skønnes passende. Dokumenter af denne type kan være ufuldstændige, midlertidige versioner eller dele af et større arbejde. Dette skal holdes in mente, når publikationer i serien refereres.

Contract Reports benyttes til afrapportering af rekvireret videnskabeligt arbejde. Denne type publikationer rummer fortroligt materiale, som kun vil være tilgængeligt for rekvirenten og Institut for Byggeri og Anlæg. Derfor vil Contract Reports sædvanligvis ikke blive udgivet offentligt.

Lecture Notes indeholder undervisningsmateriale udarbejdet af undervisere ansat ved Institut for Byggeri og Anlæg. Dette kan være kursusnoter, lærebøger, opgavekompendier, forsøgsmanualer eller vejledninger til computerprogrammer udviklet ved Institut for Byggeri og Anlæg.

Theses er monografier eller artikelsamlinger publiceret til afrapportering af videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg som led i opnåelsen af en ph.d.- eller doktorgrad. Afhandlingerne er offentligt tilgængelige efter succesfuldt forsvar af den akademiske grad.

Latest News rummer nyheder om det videnskabelige arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg med henblik på at skabe dialog, information og kontakt om igangværende forskning. Dette inkluderer status af forskningsprojekter, udvikling i laboratorier, information om samarbejde og nyeste forskningsresultater.

Udgivet 2011 af
Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Sohngårdsholmsvej 57,
DK-9000 Aalborg, Danmark

Trykt i Aalborg på Aalborg Universitet

Parameterstudie af kalkstabiliseret aalborg ler

K.K. Lysdahl

Aalborg Universitet, Januar 2011

Resumé

Denne artikel omhandler kalkstabilisering af aalborgler. Den anvendte aalborgler stammer fra området omkring Musikkenshus i Aalborg. Det karakteristiske ved aalborgler, er at den skiftende består af 1-2cm ler og 1-2mm silt. Der er som forundersøgelse til musikkenshus blevet udført både triaxial- og konsolideringsforsøg for aalborgleret i området, resultaterne benyttes her til klassifikation af aalborgleret. Der er som i første artikel blevet udført standard proctor-, konsoliderings- og triaxialforsøg for at undersøge effekten af kalkstabilisering. Hvad angår aalborglerets tørdensitet, så opleves der en tendens til at den øges ved øget kalkmængde, mens vandindholdet er faldende ved øget kalkmængde. Konsolideringsmodul øges fra en værdi liggende mellem 20-30 MPa til en værdi liggende mellem 100-130 MPa, hvilket stemmer helt overens med forventningerne. Kalkstabiliseret aalborgler med en kalkmængde på fire procent, opnår en effektiv kohæsion på 1-10 kPa og en friktionsvinkel på 42-44 grader. Denne styrke er en forøgelse af aalborglerets intakte styrke som er blevet bestemt at have en effektiv kohæsion på 7-12 kPa og en friktionsvinkel på 24-30 grader

Nøgleord: Forskydningsstyrke, forskydningsspænding, kalkstabilisering, casestudie, skråningsstabilitet.

1. Introduktion

Der er i Danmark kommet mere og mere fokus på anvendelsen af kalkstabilisering i med bygge og anlægsprojekter igennem de sidste ti år. Særligt er der af vejdirektoratet blevet benyttet kalkstabilisering i forbindelse med flere projekter. Et af projekterne hvor kalkstabilisering er anvendt er i forbindelsen med udvidelsen af motortrafikvejen mellem Ønslev og Sakskøbing i 2005 (Lysdahl, 2010b). Interessen for anvendelsen er siden steget, og i 2010 har vejdirektoratet udgivet en udbudsforskrift for anvendelsen af kalkstabilisering i Danmark (Vejdirektoratet, 2010).

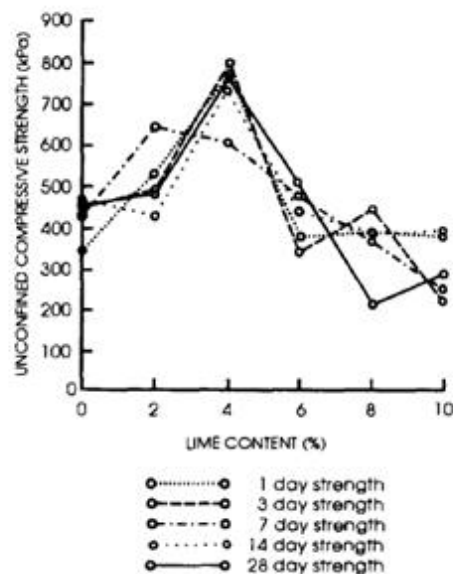
Denne artikel vil gennemgå effekten af kalkstabilisering på aalborgler fra Musikkenshus, her vil der blive undersøgt udviklingen af lerets optimale vandindhold, tørdensitet, konsolideringsmodul og forskydningsstyrken beskrevet igennem den effektive kohæsion og den effektive friktionsvinkel. I de to første kapitler vil der blive præsenteret resultater fra tidligere udførte forsøg. I kapitel 3,4 og 5 vil resultater fra forsøg udført på kalkstabiliseret og intakt aalborgler blive præsenteret.

Lysdahl (2010a) har i forbindelse med den stigende interesse udarbejdet et litteraturstudie, for at kortlægge hvilke erfaringer der tidligere og i andre lande er gjort med anvendelsen af kalkstabilisering. Særligt er der et studie udarbejdet af Bell (1996), som viser en tendens til, at styrken af leret bliver øget ved kalkstabilisering.

Undersøgelsen viste, at der ved kalkmængder på 4 % skete et peak for udviklingen af styrken, hvilket fremgår af Figur 1.1.

Figur 1.1 viser udviklingen af lers styrke for lerarter med et højt indhold af lermineralet montmorillonite, hvilket svarer til det lermineral der i Danmark benævnes Smectite, som der for nogen lerarter findes et højt indhold af i Danmark. Samme tendens ses for både quartz og kaolinite mineraler. (Lysdahl, 2010a)

Der er i Danmark ikke særlig stor kendskab til hvad kalkstabilisering har af betydning for udviklingen af lerets styrke og i nogen grad lerets stivhed. Faxe Kalk A/S har udarbejdet for-



Figur 1.1 Montmorillonites styrkeudvikling (Bell,1996)

søg på en lerart, med det formål at få bestemt udviklingen af lerartens Elasticitetsmodul ved kalkstabilisering(Overgaard, 2005). De udførte forsøg viste en forøgelse af E-modulet gående fra værdier liggende under 45 MPa til en værdi på mellem 120-195 MPa, samt at stigende vandindhold giver mindre eller ingen forøgelse. Forsøgene udført af Faxe Kalk fremgår af Figur 1.2. (Lysdahl, 2010a).

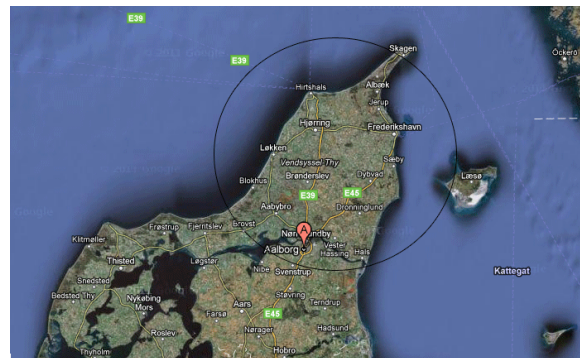
På trods af at vejdirektorat har udført forsøg med det formål at bestemme kalkstabiliseret lers E-modul, er der stadig manglende kendskab til hvordan danske lerarter udvikler deres stivhed og styrke ved kalkstabilisering. Det er nødvendigt, at få fastlagt stivheden og styrkeparametrene for kalkstabilisering af danske lerarter, sådan at kalkstabilisering af ler kan anvendes som et byggemateriale der vurderes som et anvendeligt materiale, når begge og anlægsprojekter projekteres.

Lysdahl (2010a) fandt gennem litteraturstudiet ud af, at tidligere studier af kalkstabilisering viser en tendens til, at lerets forskydningsstyrke opnår en stigning på mellem 100-250 %, at den effektive friktionsvinkel ligger mellem 34-44 grader og at den effektive kohæsion ligger på omkring 35 procent af forskydningsstyrken.

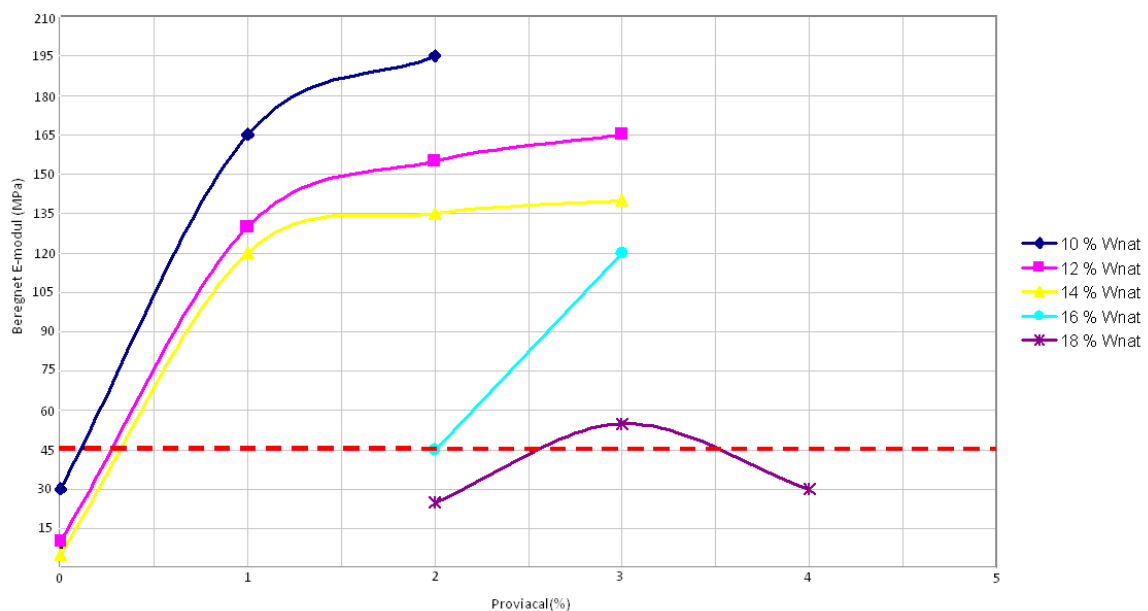
1.1 Beskrivelse af aalborgler.

Leret som findes i det nordlige Jylland i Danmark, kommer fra den senglaciale tid. Hvor der i den nordlige del af Nordjylland, se Figur 1.3, er fundet regulære ler depoter karakteriseret ved dyre liv, hvor især yoldia muslingen er blevet lerets kendetegn, hvilket også fremgår af lerets navn Yoldia-ler(Berthelsen 1987).

I området tættere på Aalborg, findes en ler med samme karakteristika som Yoldialer, men uden indhold af yoldia muslingen. Kendetegne for begge lerarter er, at de skiftende består af 1-2 cm ler og 1-2 mm silt/sand. Leret i dette om-



Figur 1.3 - Placering af Aalborg er markeret med A, mens den nordlige del af Nordjylland er markeret med en cirkel(Google Maps,2011).



Figur 1.2 Udvikling af Elasticitetsmodulet for kalkstabiliseret ler med forskelligt vandindhold. (Overgaard,2005)

råde er navngivet efter Aalborg.

Leret som benyttes i dette projekt, stammer fra området omkring Musikkenshus i Aalborg, se Figur 1.4. Som en del af forundersøgelserne til Musikkenshus er leret som beskrevet i Co-opHimmelblau (2009) karakteriseret som en senglacial aflejring primært af aalborgler med lag af sand og silt.



Figur 1.4 - Placering af Musikkenshus i Aalborg er markert med en cirkel. (Google maps, 2011).

2. Klassifikation.

I dette afsnit vil konsolideringsforsøg, konsistensgrænser, styrkeparametre, optimalt vandindhold samt lerets tørdensitet blive betragtet som et led i klassifikationen af aalborgleret. Klassifikation baseres på de konsolideringsforsøg som er udarbejdet i 1969 og de triaxialforsøg som er udarbejdet i 1985, begge forsøg udarbejdet på en aalborgler fra netop området omkring Musikkenshus, samt ved udarbejdelse af konsistensgrænse- og standard proctor forsøg.

	$W_{\text{før}}$ [%]	W_{efter} [%]	γ [kN/m ³]	c_u [kPa]
gen-nemsnit	27,9	23,7	19,7	110
maksi-mum	35,1	29,9	20,8	310
mini-mum	20,3	17	18,8	70

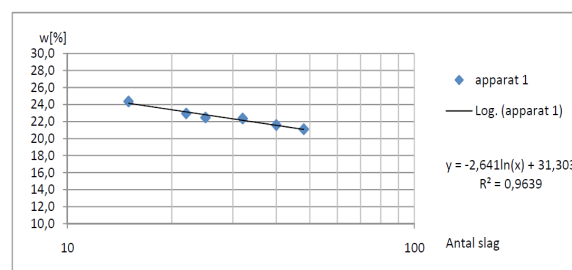
Tabel 2.1 Klassifikation data for tidligere gennemførte konsolideringsforsøg (Geoteknisk Institut, 1969)

2.1 Konsolideringsforsøg.

Bestemmelsen af lerets rumvægt og udrænedes forskydningsstyrke er baseret på konsolideringsforsøg som blev udarbejdet i 1969. Der blev i alt udført 19 konsolideringsforsøg for området omkring Musikkenshus. Resultaterne fra konsolideringsforsøgene i 1969 fremgår af Tabel 2.1.

2.2 Konsistensgrænser.

Der er blevet lavet et konsistensgrænse forsøg på aalborgleret fra musikkens hus, for at kunne klassificerer leret i forhold til Casagrandes konsistensgrænser, hvilket fremgår af Tabel 2.2 og Figur 2.1.



Figur 2.1 Graf til bestemmelse af flydegrænsen, w_L

Aalborgleret er bestemt til en "medium plasticity clay" ud fra casagrandes diagram, hvilket betyder at den bliver betragtet som en ret fed ler. Den ligger i den lave ende af intervallet for en medium plasticity clay (Ovesen, et al., 2006)

	I_p [%]	I_c	w_L [%]	W_p [%]
Aal-borgler	10,5	0,37	22,8	12,3

Tabel 2.2 Konsistensgrænser for intakt Aalborgler.

Det naturlige vandindhold for leret er bestemt til 18,9 %, hvilket ligger under vandindholdet fundet i borerne beskrevet i Tabel 2.3. Årsagen kan tilskrives ændring i de spændinger som belaster leret.

2.3 Drænet styrke.

Der er i 1985 blevet udført syv triaxialforsøg på Aalborg leret fra området ved Musikkens hus. Baseret på de forsøg vil der blive givet et estimat

på lerets drænedes styrke. Lerets styrke er nødvendig at have kendskab til, da det er styrken og stivheden som forsøges forbedret ved kalkstabilisering.

Triaxialforsøgende fra 1985, er udført som $CU_{u=0}$. Der er blevet udført tre forsøg, hvoraf to af forsøgene er angivet med bestemmelse af friktionsvinkel og kohæsion. Boringerne der er udført triaxialforsøg på fremgår af Tabel 2.3.

Boring nr.	σ' [kPa]	c_v [kPa]	w [%]
2	100	80	25
3	90	75	22
6	60	75	32

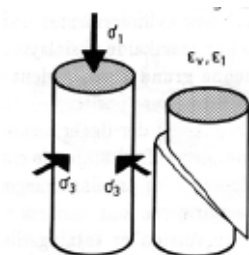
Tabel 2.3 Borningsdata for de boringer der er blevet udført triaxialforsøg på. (Geoteknisk institut, 1985)

Kun for boring 3 og 6 er triaxialforsøget blevet færdiggjort, hvorfor der kun findes styrkeparametrene, som det fremgår af Tabel 2.4.

Boring	φ' [°]	c' [kPa]
3	30,2	7,2
6	24,3	12,3

Tabel 2.4 Fundne styrkeparametre på to af de tre boringer. (Geoteknisk institut, 1985)

Forsøgene ved disse resultater er udarbejdet med forholdet $H/D=2$, hvor det fra dansk side anbefales at benytte forholdet $H/D = 1$, hvilket skyldes at der ved $H=2D$ opstår muligheden for et at der opstår brud ved kompression som illustreret på Figur 2.2 (Ibsen, 2011).

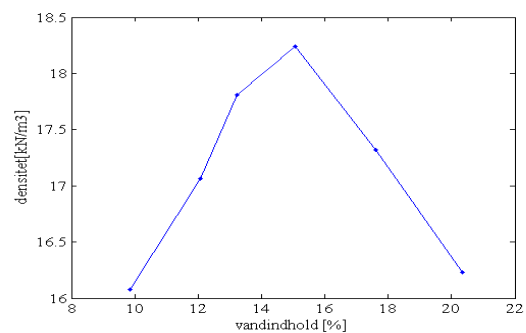


Figur 2.2 Brud på triaxialprøve ved en prøve med forholdet $H/D=2$ (Ibsen, 2011)

Ud fra de allerede foretagne forsøg, forventes det at aalborgleret har en intakt styrke som angivet i Tabel 2.4.

2.4 Optimal vandindhold og tørdensitet.

Der er blevet udført standard proctor forsøg, med henblik på at finde Aalborglers optimale vandindhold og lerets tørdensitet. Proctor forsøget er udført som et standard proctor forsøg jf. DS/EN 13286-2, (2004). Hvor der er blevet benyttet 75 slag over tre lag. Resultatet er angivet i Figur 2.3.



Figur 2.3 Resultat af standard proctor forsøg på intakt ler.

Ud fra Figur 2.3 og beregningerne betyder dette at Aalborg leret har en tør densitet og et w_{opt} som fremgår af Tabel 2.5.

w_{opt} [%]	ρ_d [kN/m ³]
14,1	18,40

Tabel 2.5 Værdier for optimal vandindhold og tørdensitet på Aalborg ler.

Formålet med at finde det optimale vandindhold er, at dette skal benyttes ved kalkstabilisering. Det er nødvendigt, at få det intakte lers vandindhold ned under det optimale vandindhold inden blanding og efterfølgende, at tilsætte vand under homogenisering af det kalkstabiliserede ler, sådan at vandindholdet opnår det optimale vandindhold for den intakte ler igen. Det ønskes, at få en sammenligning af de forskellige standard proctor forsøg, med det formål at se hvilken udvikling de to parametre opnår ved kalkstabilisering. Samlet set, betyder dette at leret som bliver kalkstabiliseret i denne artikel har egenskaber som beskrevet i Tabel 2.6.

W_{nat} [%]	$W_{\text{opt.}}$ [%]	γ_d [kN/m ³]	γ_w [kN/m ³]
18,9	14,1	18,4	18,8
φ [°]	c' [kPa]	I_p [%]	C_u [kPa]
27,25	9,75	10,5	70

Tabel 2.6 Klassifikations parametre for intakt aalborgler ved Musikkens hus i Aalborg.

3. Proctorforsøg.

Det er som nævnt i Afsnit 2.4 ønsket, at undersøge kalkstabiliseringens betydning for lerets optimale vandindhold og tørdensitet. Det blev i Lysdahl (2010a) konstateret at når kalk og ler reagere med hinanden, så falder vandindholdet i leret, hvorfor det kunne betyde, at der sker en ændring i det optimale vandindhold. Det forventes derfor at der sker en ændring i både w_{opt} og γ_d som en konsekvens af kalkstabilisering.

Det er undersøgt om der er en sammenhæng mellem mængden af kalk og ændringen af de to parametre. I Tabel 3.1 fremgår ændringen ud fra kalk procenten, hvilket også fremgår ud fra Figur 3.1.

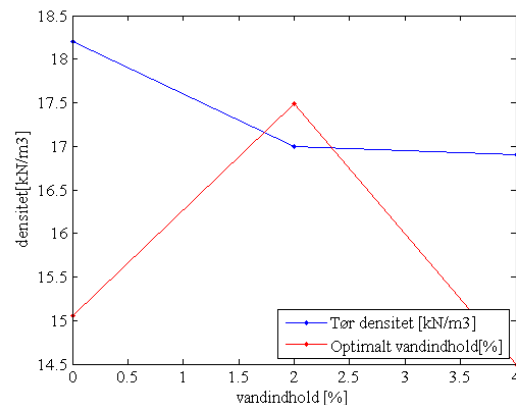
Kalk procent	γ_d [kN/m ³]	w_{opt} [%]
0	18,2	15,05
2	17,0	17,49
4	16,9	14,50

Tabel 3.1 Fundne værdier for hhv optimalt vandindhold og tørdensiteten for intakt og kalkstabiliseret aalborgler.

Forsøget udføres ved at cylinderen først fyldes en tredjedel op og herefter komprimeres med 25 slag fra faldloddet, hvorfor efter cylinderen fyldes 2/3 op og komprimeres for til sidst at blive fyldt helt op og komprimeres. Der er grundet forsøgsmetoden knyttet fejlkilder som kan have indflydelse på resultaterne.

En fejlkilde opstår når cylinderen skal fyldes en tredjedel op. Det er alt efter vandindholdet og ens øjemål ikke altid til at ramme en tredjedel

hver gang, hvilket har betydning for komprimeringen. Et højt vandindhold betyder, at det er svære at få dannet en plan flade nede i cylinderen da leret med øget mængde vand bliver mere klæbrig.



Figur 3.1 Grafiks fremstilling af udviklingen for både det optimale vandindhold og tørdensiteten.

For lerets tørdensitet opleves der først et fald ved kalkstabilisering med to procent kalk. Det kan konkluderes at der vil ske et fald i tørdensiteten ved kalkstabilisering, men om ændringens størrelse er afhængig af kalkmængden kan ikke konkluderes.

For det optimale vandindhold er det ikke muligt, at finde en sammenhæng. Vandindholdet varierer med kalkmængden. For at finde en generelle tendens, er det derfor nødvendigt at udføre flere proctor forsøg, og derved skabe et bedre data grundlag.

4. Konsolidering af aalborgler.

En af de parametre som ønskes bestemt i denne artikel er konsolideringsmodulet for både det intakte ler og det kalkstabiliserede ler. Metoden anvendt til bestemmelse af denne er ved udførelse af konsolideringsforsøg på begge prøver. Begge prøver er blevet udsat for samme belastningsplan, som er beskrevet i Tabel 4.1

Den udrænedede forskydningsstyrke bestemt ud fra konsolideringsforsøgene udarbejdet i 1969, har dannet grundlag for bestemmelse af

Belastnings program					
trin	lod [kg]	σ' [kPa]	trin	lod [kg]	σ' [kPa]
1	0,25	7,7	13	11	282,0
2	0,5	14,1	14	8	205,4
3	1	26,8	15	5	128,9
4	2	52,3	16	10	256,5
5	4	103,4	17	15	384,1
6	9	231,0	18	19	486,1
7	7	179,9	19	14	358,5
8	5	128,9	20	9	231,0
9	3	77,9	21	7	179,9
10	7	179,9	22	12	307,5
11	11	282,0	23	17	435,1
12	14	358,5	24	22	562,7

Tabel 4.1 Belastningsprogram for både intakt og kalkstabiliseret aalborg ler.

den forbelastningsspændingen som leret har været belastet med. Bestemmelsen kommer af en tommelfingerregel, som siger at $\sigma_{pc} = 3 c_u$. Dette betyder at σ_{pc} ligger i intervallet mellem 210-930 kPa. Hvis leret belastes højere end forbelastningsspændingen, vil leret opføre sig som en normalkonsolideret ler, hvilket vil få betydning for resultatet. Belastningsprogrammet er løbende blevet bestemt ud fra en vurdering af konsolideringens arbejdskurve(Ovesen et. al.,2006).

4.1 Analysemetode.

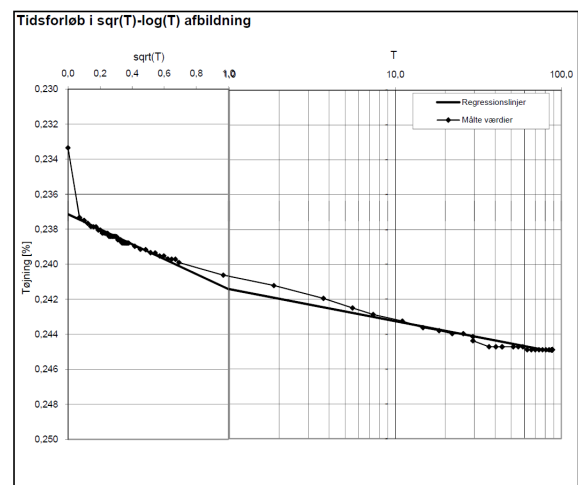
Der er anvendt to analysemetoder for de udførte konsolideringsforsøg, den traditionelle metode og ANACONDA-metoden (analysis of consolidation test data).

Den traditionelle metode bygger på at konsolidering og krybning er to processer som er uafhængige af hinanden, hvor krybning sker efter at konsolidering er færdig. ANACONDA betragter konsolideringsforsøget ud fra en teori om, at krybning og konsolidering sker samtidig. ANACONDA beregner deformationen ud fra Formel (4.1), hvor både krybning og konsolidering indgår(ANACONDA, 1992).

$$d\varepsilon = f(\sigma', e)d\sigma' + g(\sigma', e)dt \quad (4.1)$$

Hvor e er poretallet, f og g er funktioner der afhænger af σ' og e . Betragtes konsolideringsfasen alene, så er både $d\sigma'$ og dt forskellig fra nul mens $d\sigma'$ er tilnærmelsesvis nul ved krybning. Fordi krybning antages at finde sted under konsolideringsfasen er det nødvendigt at g -funktionen også indeholder en afhængighed af σ' .(ANACONDA,1992)

Efter den traditionelle metode så kan den tøjning forårsaget af konsolidering beskrives som en retlinje i et $\sqrt{T}$ – diagram, mens krybning kan beskrives som en retlinje i et $\log(T)$ - diagram.



Figur 4.1 Resultat af konsolideringstrin, afbildet i et $\sqrt{T}$ - $\log(T)$ -graf for belastningstrin 12 ved kalkstabiliseret aalborg ler med 4 % kalk

Den traditionelle metode benyttes til vurdering af om prøven er færdig konsolideret under en enkelte trin.

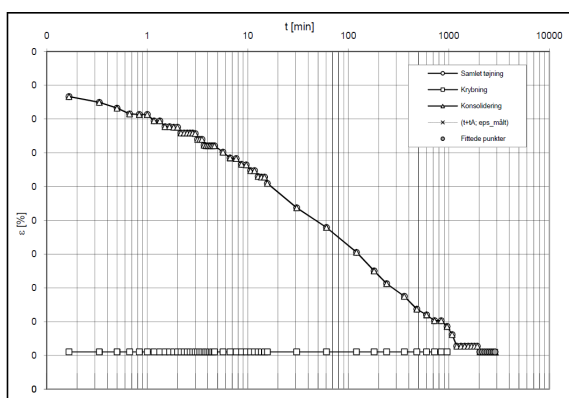
Et eksempel på en $\sqrt{t}$ -log(T)- graf fremgår af Figur 4.1.

Konsolidering og krybning sker i realiteten ikke hver for sig og uafhængig af hinanden, men på samme tid og er afhængige af hinanden. Derfor foreslog Bjerrum (1967), at antage at konsolideringsfasen forløber momentant. Bjerrum ville altså se bort fra vandudpresningsprocessen i første omgang og derved finde krybningstøjningerne. Vandudpresningsprocessen kan derefter findes som en forsinkelse af sætningerne. Bjerrums metode betyder, at de to faser kan studeres hver for sig, for senere at blive lagt oven i hinanden igen. Denne metode viser sig samtidig at være rimelig, da konsolideringstøjningerne stemmer overens med teorien. Med andre ord, så er det nødvendigt at kunne skelne mellem de deformationer som sker grundet konsolidering og de deformationer som sker grundet krybning. Et eksempel på en opdeling af krybning og tøjning ved hjælp af ANACONDA fremgår af Figur 4.2(ANACONDA,1992).

4.2 Prøve tildannelse.

For den intakte lerprøve, er lerprøve udtaget i en standard 70 mm cylinder, på byggepladsen ved musikshuset, og ud fra den intakte prøver er det blevet tildannet en prøve efter normerne.

Metoden for tildannelse af den kalkstabilise-



Figur 4.2 Eksempel på anvendelsen af ANACONDA-metoden, hvor krybnings- og konsolideringstøjningerne bliver adskilt for belastningstrin 12 for kalkstabiliseret aalborgler med 4 % kalk

ret ler prøve er sket ved anvendelse af standard proctor apparatet til at få komprimeret prøven og ud fra den at udtage en prøve til konsolideringsapparatet. Af Figur 4.3 fremgår det hvordan en prøve med en diameter på 70 mm er udtaget af proctor cylinderen.



Figur 4.3 Prøvedannelse af kalkstabiliseret aalborgler. Prøven tages ud af proctorcylinderen.

Begge konsolideringsforsøg er blevet udført med en prøve diameter på 70 mm og en højde på 35 mm, og med dræn i både øvre og nedre trykhoved.

4.3 Konsolideringsmodul.

For at bestemme prøvens konsolideringsmodul er det nødvendigt at af- og genbelaste prøven under konsolideringsforsøget. Dette skyldes at konsolideringsmodul pr. definition er defineret som begyndelseshældningen af genbelastningsgrenene. Det vælges i denne artikel at finde hældningen ud fra de to første konsolideringspunkter. (Forening, Dansk Geotekniske, 2001)

Konsolideringsmodul, K , bestemmes ud fra Formel (4.2). (Forening, Dansk Geotekniske, 2001)

$$K_t = K_{t0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red} \quad (4.2)$$

Hvor:

K_t = konsolideringsmodul in situ for en stærkt forbelastet jord, som er aflastet til σ_{red} .

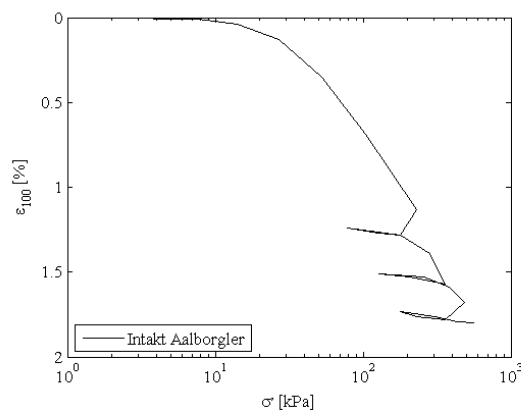
σ_{red} = den mindste vertikale effektive spænding, det aktuelle lag har været udsat for siden forkonsolideringen.

ΔK_t = et tillæg til K pr. spændingsenhed.

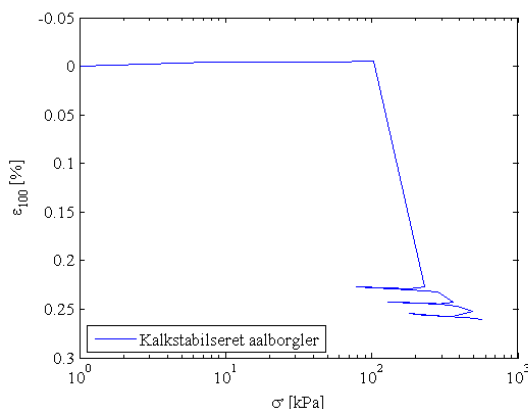
4.4 Konsolideringsarbejdskurve.

Arbejdskurverne for konsolideringsforsøget betragtes som kontrol af forsøgene. Hvis arbejdskurven går over i en ret linje betyder det at $\sigma'_{pc} < \sigma'$ og at σ'_{pc} kan findes som det punkt på arbejdskurven hvor kurven har den mindste krumning, grunden til at arbejdskurvens krumning skyldes aflastning ved prøveoptagelse. Da arbejdskurverne for de to konsolideringsforsøg, som forventet ikke går over i en ret linje betyder dette at σ'_{pc} ikke er opnået, se Figur 4.4 og 4.5 (Ovesen et. al., 2006).

Den rette linje ved arbejdskurven for det kalkstabiliserede aalborgler, skyldes en stor initial



Figur 4.4 Arbejdskurve for intakt aalborgler.



Figur 4.5 Arbejdskurve for kalkstabiliseret aalborgler.

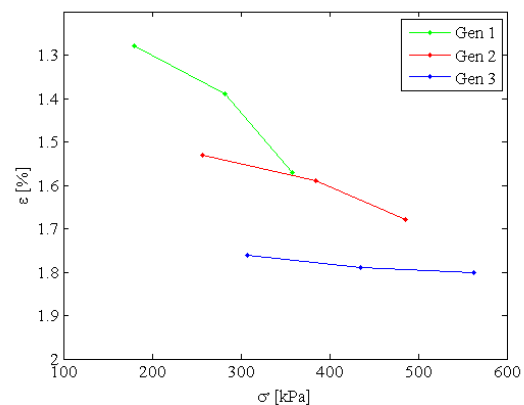
deformation og betyder at der er sket en prøve tilpasning ved dette belastningstrin.

4.5 Bestemmelse af konsolideringsmodul.

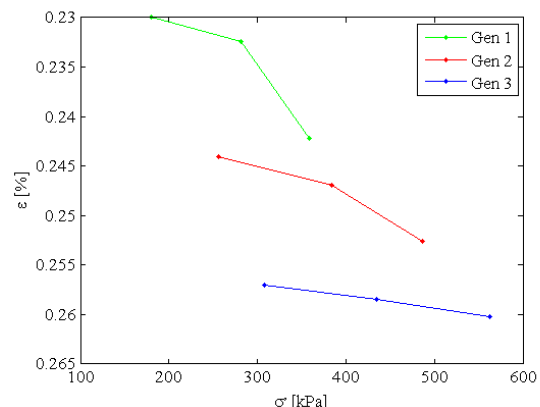
For at bestemme de to forsøgs konsolideringsmodul, betragtes prøvernes genbelastningsgrene, hvor K som nævnt i Afsnit 4.3, findes ved at finde hældning på to første punkter af genbelastningsgrenen. Belastningskurverne for den intakte aalborgler fremgår af Figur 4.6 og af Figur 4.7 fremgår belastningskurverne for kalkstabiliseret aalborgler.

Som det fremgår af Figur 4.6 og 4.7, så er hældningen på de tre genbelastningskurver ikke ens.

Ud fra Formel (4.2), er værdierne for K_{t0} og ΔK_t blevet bestemt og fremgår af Tabel 4.2 Den line-



Figur 4.6 Genbelastningsgrene for intakt aalborgler.



Figur 4.7 Genbelastningsgrene for kalkstabiliseret aalborgler.

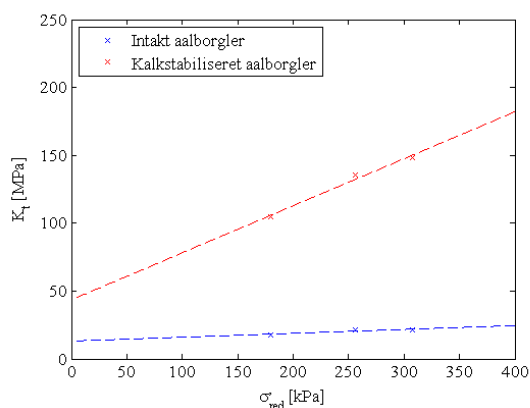
Prøve	Genbelastningsgren	σ'_{red} [kPa]	K_t [Mpa]	K_{t0} [Mpa]	ΔK_t [kPa]
Intakt aalborgler	1. gen	179,9	18,0		
	2. gen	256,5	21,2	13,17	28,52
	3. gen	307,5	21,5		
Kalkstabiliseret aalborgler, 4% kalk	1. gen	179,9	104,7		
	2. gen	256,5	135,5	43,53	346,52
	3. gen	307,5	148,2		

Tabel 4.2 - Resultater af konsolideringsforsøg og bestemmelse af K_{t0} og ΔK_t

ære udvikling af K_t som funktion af den mindste vertikale effektive spænding fremgår af Figur 4.8

Forventningerne til effekten af kalkstabilisering var ud fra Lysdahl(2010a), at konsolideringsmodulet for leret ville stige ved kalkstabilisering og at det vil stige fra 45 MPa til 120 MPa.

Værdien af konsolideringsmodulet er givet ved begyndelseshældningen af genbelastningsgenene som fremgår af Figur 4.6 for de forskellige aflastningsspændinger, hvilket betyder at konsolideringsmodulet er stigende op til den værdi som det i Lysdahl (2010a) er forventet, hvilket fremgår af Tabel 4.2. ΔK_t og dermed K_t er for kalkstabiliseret aalborgler højere end for den intakte aalborgler, hvilket betyder at udviklingen af K_t er større for kalkstabiliseret aalborgler ved øget belastning.



Figur 4.8 K_t som funktion af σ'_{red} . K_t er fundet ud fra de første to punkter på genbelastningsgrenen.

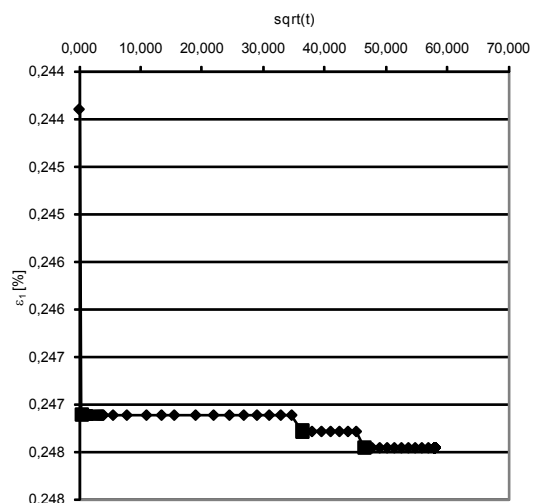
4.6 Fejkilder.

Flytningsmålerne for de anvendte konsolide-

ringsapparature har en præcision ned på tre decimaler, de belastninger som prøverne er påført, har i nogen tilfælde været så lille, at flytningsmålerne ikke har været i stand til at registrere flytningerne. Dette betyder at tidskurven for forsøget er forløbet i trin, frem for en flydende deformation, som der er illustreret på Figur 4.9.

Udover at flytningsmålerne ikke har kunnet måle de små deformationer prøven har været udsat for, er der i konsolideringsforsøget nogle generelle fejkilder.

- Friktion mellem prøven og den ydre ring kan betyde fejl i deformationerne.
- Sten eller anden materiale i prøven. Dette kontrolleres efter forsøget er afsluttet ved at dele prøven og kontrollere for sten og anden materiale. En deling af den intakte ler prøve er illustreret på Figur 4.10.



Figur 4.9 (vT- ϵ)-diagram af belastningstrin17 for kalkstabiliseret aalborgler.

Som det fremgår af Figur 4.9, så var der for den intakte lerprøve en kalk sten inden i prøven, hvilket angiver inhomogenitet i prøven. Inhomogenitet kan betyde ændring i sætningerne.



Figur 4.10 Intakt Aalborg ler, efter endt konsolideringsforsøg.

5. Bestemmelse af kalkstabiliseret aalborglers styrke.

Styrkeparametrene c' og φ' er blevet bestemt for det kalkstabiliserede aalborgler med en kalkmængde på fire procent. Bestemmelsen af de to parametre er fundet gennem et triaxialforsøg. Forsøget blev udført som et multiple stage forsøg med isotropisk konsolidering og brudfaser med konstant volumen, forsøget er et $CU_{u=200}$ med et poretryk på 200 kPa. Tøjningshastigheden i brudfasen var 1 %/time. Der blev udført tre brudfaser.

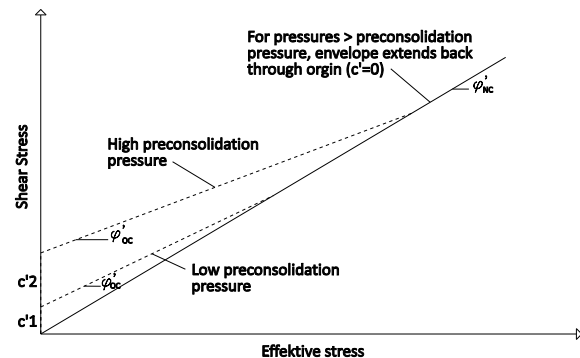
5.1 Teori.

Grundlæggende for gennemførelse af et triaxial forsøg, er at de brudforsøg som bliver udført er omfattet af teorien omkring Mohr-coulombs brudbetingelse. Hvilket betyder at prøvens forskydningsstyrke er afhængig af de effektive spændinger som prøven bliver udsat for, hvor sammenhængen er vist i Figur 5.1 og beskrevet i Formel (5.1).

$$\tau = c' + \sigma' \tan(\varphi') \quad (5.1)$$

Dette betyder altså at det er nødvendigt at få bestemt den effektive kohæsion og prøvens friktionsvinkel for at kunne beskrive hvilken sammenhæng der er mellem prøvens forskydnings-

styrke og de spændinger prøven bliver udsat for (Ovesen et. al., 2006).

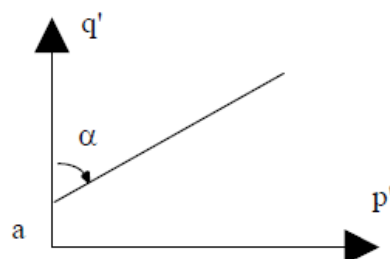


Figur 5.1 Sammenhæng mellem forskydningsstyrke og effektivespændinger.

5.2 Beskrivelse af triaxial apparat.

Triaxial apparatet fungerer på den måde, at prøven placeres i midten af en celle som fyldes med vand. Der placeres et trykhoved i hver ende af prøven, som giver prøven en axial spænding, også beskrevet som den største hovedspænding σ_1 . Den mindste hovedspænding, σ_3 bliver påført gennem trykket i cellen. Der bliver påført prøven et poretryk, u , gennem et bagtrykts system, som påfører et tryk i porerne. Der sidder to transducere som måler deformationen af prøven både under konsolidering og brud (Jacobsen, 1993).

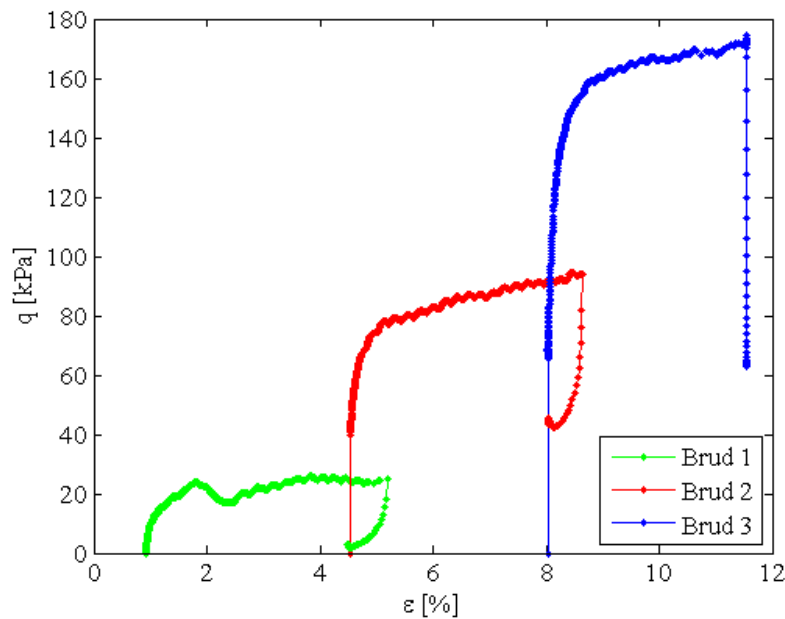
Ud fra disse fem målinger, er det muligt at bestemme brudforsøgenes brudlinje i et (p', q') -diagram som vist på Figur 5.2.



Figur 5.2 Illustration af en brudlinje i et (p', q') -diagram

Ud fra brudlinje diagrammet, er det muligt at finde konstanterne α og a . Sammenhængen mellem styrkeparametrene og konstanterne α og a , fremgår af Formel (5.2) og (5.3):

Derved er det muligt at bestemme prøvens



Figur 5.4 Arbejdskurver for de tre brudforsøg.

$$c'_{tr} = a \tan(\alpha) \tan(\varphi'_{tr}) \quad (5.2)$$

$$\sin(\varphi'_{tr}) = \frac{3}{1 + 6 \tan(\alpha)} \quad (5.3)$$

styrke parametre og derved finde en sammenhæng med prøvens forskydningsstyrke og de påførte spændinger.

5.3 Behandling af forsøg.

Inden behandling af forsøgsdata, er det nødvendigt at få valideret at forsøget og data er korrekte. Dette sker ved at betragte ler prøven, med det formål at finde ud af om der skulle være noget ved prøven som betyder at data afviger væsentlig fra det forventelige og derfor udgør en væsentlig fejlkilde.

En af de væsentlige fejlkilde som opstår er hvis prøvens ender ikke er helt glatte og plane. Dette betyder, at der opstår ekstra store deformationer under brudforsøget, hvilket betyder at styrkeparametrene bliver væsentlig mindre (Jacobsen, 1993).

Som det fremgår af Figur 5.3, så har prøven ikke haft en 100% glat overflade, og derfor kan det betyde at de målte deformationer er større end hvad de ville have været hvis prøven var 100% glat. Udover de ru endeplader, så er siderne på prøven pæne og glatte og der er derfor ikke tegn på at dette kunne have en indflydelse på resultaterne.

Når prøven er blevet vurderet og de eventuelle fejlkilder er blevet ridset op. Er næste skridt at kigge på arbejdskurverne for de tre brudforsøg, da disse gerne skulle forløbe ensformigt og uden større udsving, samt med stigende tøjning hvor anden arbejdskurve starter hvor første arbejdskurves afbelastningskurve slutter. Arbejds-



Figur 5.3 Efter tildannelse af prøve for kalkstabiliseret aalborgler med en kalkmængde på 4%

kurverne fremgår af Figur 5.4.

Betragtes arbejdskurverne, er det bemærkelsesværdigt at der under det første brudforsøg opleves et fald i deviatorspændingen efter en tøjning på omkring 2 %. Dette fald må henledes til at der under det første brudforsøg skete en prøvetildannelse, og derved har det ikke været muligt at holde volumenet konstant under hele brudforsøget, hvis volumenet ikke har været konstant under hele forsøget betyder dette, at der har været en ændring i poretrykket og derved er der sket en dræning af prøven (Jacobsen, 1993).

5.4 Bestemmelse af styrkeparametre.

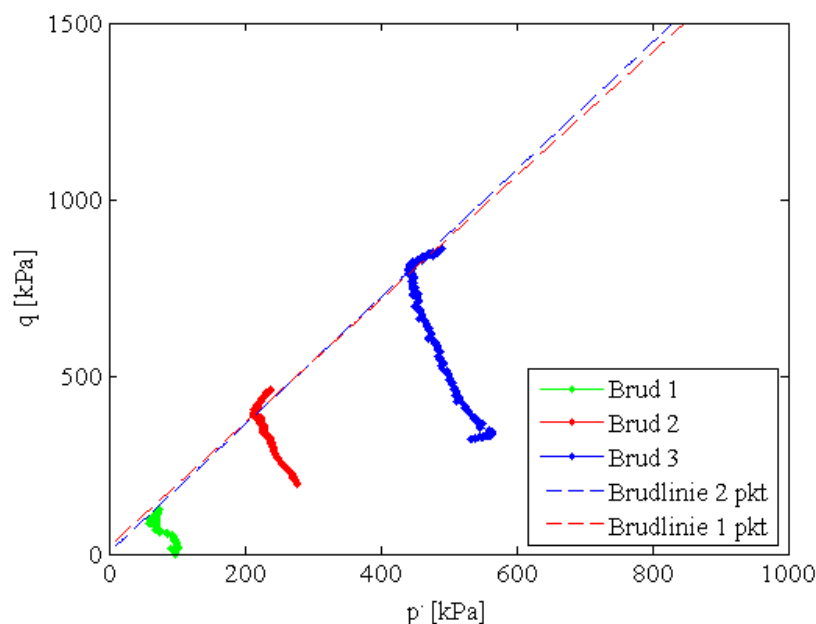
For at kunne behandle forsøgets data, er det nødvendigt at få præsenteret brudforsøgene i et (p', q) -diagram, for at kunne bestemme den bedst mulige brudlinje som danner grundlag for bestemmelse af prøvens styrkeparametre. Brudforsøgene fremgår af Figur 5.5.

Det er valgt at tilnærme to rette linjer til de tre brudforsøg, da det ikke har været muligt at få tilnærmet en ret linje som rammer alle tre brudforsøg. Dette betyder, at det gør det svært at få defineret den mest præcise brudlinje.

På Figur 5.5 illustreres to forskellige brudlinjer, som er blevet bestemt på hver sin måde. Den første brudlinje, navngivet "brudlinje 1 pkt." er bestemt med den afgrænsning at kun et punkt fra hvert brudforsøg har bestemt linjens retning. Punktet er bestemt som $(p', q(\text{maks}))$ altså det punkt hvor deviatorspændingen opnår sit maksimum. Den anden brudlinje, navngivet "brudlinje 2 pkt." hvis kriterier for bestemmelse af brudlinje, er to punkter fra hvert brudforsøg. Det første punkt er bestemt på samme måde som ved "brudlinje 1 pkt.", hvor det andet punkt er bestemt som $(p'(\text{min}), q)$, altså som den minimumsværdi af p' med tilhørende q . Dette er gjort med den begrundelse at det præcise brudpunkt må ligge et sted mellem disse to punkter. For at kunne bestemme prøvens styrkeparametre, er det først nødvendigt at bestemme konstanterne a og α , som fremgår af Figur 5.2.

Bestemmelse af α , sker ved at først at finde hældningskoefficienten, b , for brudlinjen og derefter at bestemme α ud fra Formel (5.4).

$$\alpha = 90 - \tan^{-1} \left(\frac{b}{1} \right) \quad (5.4)$$



Figur 5.5 Bestemmelse af brudlinjen for triaxialforsøget på kalkstabiliseret aalborgler. brudlinje 1 pkt fitter med et punkt på hvert brudforsøg mens brudlinje 2 pkt. fitter med to punkter på hver brudforsøg.

Konstanterne a og α fremgår af Tabel 5.1.

Efter bestemmelsen af de to konstanter for brudlinjerne, er det muligt at finde styrkeparametrene ud fra Formel (5.2) og (5.3). Resultatet fremgår af Tabel 5.2.

	Brudlinje 1 pkt.	Brudlinje 2 pkt.
a	19,4	2,9
α	29,8	29,0

Tabel 5.1 Bestemmelse af konstanterne a og α

	Brudlinje 1 pkt.	Brudlinje 2 pkt.
c' [kPa]	10,2	1,5
ϕ' [°]	42,5	43,8

Figur 5.2 Bestemmelse af styrkeparametrene c' og ϕ' for kalkstabiliseret aalborgler med 4% kalk

5.5 Sammenligning med tidligere bestemte data.

Der er blevet udført to triaxialforsøg i 1985, som beskrevet i Afsnit 1, disse resultater fremgår af Tabel 2.4

Og det er i Lysdahl(2010a) blevet beskrevet, at det forventes at kalkstabiliseret ler vil opnå en styrke, hvor den effektive kohæsion svare til omkring 35 procent af den udrænedede forskydningsstyrke og den effektive friktionsvinkel ligger mellem 34-44 grader.

Resultatet for de udførte triaxialforsøg på en aalborgler der er blevet kalkstabiliseret med fire procent kalk, viser at styrken er blevet øget i forhold til de intakte værdier styrker som angivet i Tabel 2.4. Den intakte ler har ud fra triaxialforsøgene udført i 1985 en styrke, hvor den effektive kohæsion ligger på 7,2-12,3 kPa og en friktionsvinkel på 24-30 grader mens den kalkstabiliseret ler har en styrke hvor den effektive kohæsion ligger på 1-10 kPa og en friktionsvinkel på 42-44 grader.

I forhold til de forventningerne, så opnår den effektive friktionsvinkel en værdi i toppen af det

forventede interval mellem 34-44 grader.

1. Fejlkilder

Som nævnt i Afsnit 5.3 så var prøven under tildannelse ikke helt plan i enderne hvilket betyder, at de deformationer som opstår under brudforsøget kan blive større end hvis enderne var plane. Større deformationer betyder samtidig at styrke parametrene bliver mindre. Hvorfor det kan forventes at det kalk stabiliserede ler har en større styrke end hvad resultaterne viser. Hvor meget større styrker, kan ikke bestemmes.

Det er yderligere nødvendigt at forholde sig kritisk til det at der kun er blevet udført tre brudforsøg på en prøve. Det at der kun er et forsøg som grundlag for en bestemmelse af prøvens styrke, betyder at der ikke er noget statistisk grundlag for at udtale sig om kalkstabilisering har nogen effekt, set i forhold til at det efter litteraturen burde øge styrken på leret. Dette enkelte forsøg kan for så vidt ligge i bunden af de styrker som prøven vil opnå, lige så vel som det kan ligge i toppen, og derfor er det ikke muligt at bruge resultater som en endegyldig tendens.

Der ligger også visse fejlkilder ved bestemmelsen af de kalibreringsfaktorer som er blevet bestemt inden forsøget blev udført. Er kalibreringsfaktorerne ikke helt præcise kan dette have betydning for resultaterne.

6. Konklusion

Det er blevet undersøgt hvilken effekt kalkstabilisering har på danske lerarter, hvor det i denne artikel er blevet undersøgt hvilken effekt kalkstabilisering har på aalborgler. Formålet har været at få fastlagt styrke og stivheds parametrene for kalkstabilisering af aalborgler. Følgende konklusioner kan opstilles efter at der er blevet udført, standard proctor, konsolidering og triaxialforsøg på det kalkstabiliserede aalborg ler.

1. Der kan ikke findes nogen lineær sammenhæng mellem mængden af kalk og materiales tørdensitet og optimale vandindhold. Det kan konkluderes at materialets tørdensitet er faldende ved kalkstabilisering og at det optimale vandindhold er stigende ved kalkstabi-

lisering. Det ser ud til at det optimale vandindhold vil stige med stigende mængde kalk.

2. Det kan bekræftes, at konsolideringsmodulet er stigende ved kalkstabilisering. Dette stemmer helt overens med det som FAXE KALK A/S og Vejdirektoratet har konkluderet i deres forsøg med kalkstabilisering. Konsolideringsmodulet går fra en værdi liggende omkring 20-30 MPa til en værdi liggende omkring 100-130 MPa. Forventningen til forøgelsen var det konsolideringsmodulet skulle stige fra en værdi på 45 MPa til 125 MPa.
3. Det kalkstabiliserede ler opnår en forøgelse af styrken, i forhold til det intakte lers styrke. Det intakte ler, har ud fra triaxialforsøg udarbejdet i 1985 en styrke, hvor den effektive kohæsion og den effektive friktionsvinkel har værdier på hhv. 7,2-12,3 kPa og 24-30 grader. Ud fra det triaxialforsøg som er udarbejdet, har den effektive kohæsion og den effektive friktionsvinkel værdier på hhv. 1-10 kPa og 42-44 grader. Altså forøges aalborglerets styrke ved kalkstabilisering, og det vil være et brugbart byggemateriale i forbindelse med vejprojekter hvor der skal stabiliseres skråninger og dæmninger som er blevet undersøgt i Lysdahl(2010b).

7. Perspektivering.

Det er igenne denne artikel blevet bevist at aalborgler vil opnå en forøgelse af både styrken og stivheden ved kalkstabilisering. Resultaterne er blevet bestemt ud fra få udførte forsøg, og derfor kan der ikke fastlægges nogen tendens eller fastlæggelse af hverken konsolideringsmodulet, den effektive friktionsvinkel eller den effektive kohæsion. For at fastlægge en tendens eller de nævnte parametre er det nødvendigt at udføre flere forsøg med en aalborgler af samme karakteristika som den anvendte i denne artikel.

8. Bibliografi.

- Anaconda.** (1992). *ANACONDA manual*.
- Bell, F.** (1996). *Lime stabilization of clay minerals and soils*.
- Berthelsen, O.** (1987). *Geologi i Aalborgområdet*.
- CoopHimmelblau.** (2009). *Musikkens Hus i Nordjylland - Geotekniske rapport*. Vienna.
- Dansk Standard.** (2004). *DS/EN 13286-2*. Dansk Standard.
- Forening, Dansk Geotekniske.** (2001). *Laboratoriehåndbogen*.
- Google .** (2011). *Google Maps*. Hentet fra <http://maps.google.dk>
- Geoteknisk institut.** (1985). *Geotekniskrapport - Triaxialforsøg*.
- Geoteknisk Institut.** (1969). *Resultater af konsolideringsforsøg*.
- Ibsen, Lars Bo.** (2011). *Undervisningsslides, Soil testing*.
- Jacobsen, M.** (1993). *Lærebog i videregående Geoteknik 2 - Sætninger i Jord*.
- Jensen, B. C.** (2009). *Teknisk Ståbi*. København : Nyt Teknisk Forlag.
- Lysdahl, K.** (2010a). *Effektstudie af kalkstabilisering*. Aalborg.
- Lysdahl, K. K.** (2010b). *Casestudie af kalkstabiliseringseffekten på skråninger*. Aalborg.
- Niels Krebs Ovesen, L. F.** (2006). *Lærebog i Geoteknik*. Polyteknisk Forlag.
- Overgaard, T.** (2005). *Jordstabilisering på Syd-motorvejen Ønslev - Sakskøbing*.

A - Vejledning i kalkstabilisering.

Metoden som anvendes til blanding af kalk og ler, vil blive beskrevet og præsenteret i det følgende.

Det er nødvendigt at sikre metode som anvendes til kalkstabilisering er ens, sådan at resultaterne som opnås ved de forskellige forsøg kan sammenlignes. Metoden skal samtidig også være relevant i forhold til den metode som benyttes i praksis.

De efterfølgende ti trin, er den metode som anvendes til kalkstabilisering i dette projekt.

1. Udarbejdelse af et standard proctor forsøg, med det formål at få bestemt det optimale vandindhold samt lerets tør densitet.
2. Bestemmelse af vandindhold i leret som skal blandes, for at finde mængden af tørt materiale.
3. Findeling af materialet gennem en sigte på 16 mm.
4. Tørring af ler så $w = w_{\text{opt}} - 2-4 \%$
5. Kalkmængde afvejes ud fra andelen af tørt materiale
6. Kalk og ler blandes under omrøring vha. rørmaskine se Figur A-1.
7. Der tilsættes vand i en mængde svarende til at leret vil opnå det optimale vandindhold, se Figur A-1.
8. Det kalkstabiliserede ler blandes i minimum fem minutter for at sikre homogenitet.
9. Kontrol af homogenitet, ved at finde vandindhold på to forskellige prøver af det kalkstabiliserede ler og sammenligne vandprocenten.
10. Komprimering ved proctorforsøg.



Figur A-1. Tilføjelse af kalk til venstre og efterfølgende tilføjelse af vand til højre under kalkstabilisering.

Praktisk metode til kalkstabilisering.

Kalkstabilisering er i Danmark blevet benyttet siden 2005, hvor der blev udarbejdet en forsøgsstrækning ved udvidelsen af motortrafikvejen ved Ønslev –Sakskøbing(Lysdahl2010a). Siden er der blevet udarbejdet en udbudsforskrift af vejdirektoratet og Faxe Kalk har udarbejdet en vejledning i brugen af pulveriseret, brændt kalk til arbejdsveje på byggepladser. Vejledningen beskriver hvordan der i praksis bliver kalkstabiliseret, denne metode bliver holdt op mod den anvendte metode i dette projekt for at få en vurdering af om den anvendte metode i dette projekt også vil kunne anvendes i praksis.(Faxe Kalk A/S)

Ifølge vejledningen består kalkstabilisering af syv forskellige trin:

1. Spredning.

På arealet som skal kalkstabiliseres, placeres kalksække i en afstand der svare til 8-10 kg kalk pr. m². Herefter tømmes sækkene og spredes jævnt fordelt ud over arealet med en rive eller en skovl.

2. Kalkmængde.

Bestemmelsen af den nødvendige kalkmængde afhænger af følgende:

- Jordens lerindhold.
- Tykkelsen af laget som skal kalkstabiliseres.
- Vandindholdet i det intakte ler.

3. Fræsning.

Det spredte kalk bliver fræset ned med en jordfræser i 15-25 cm dybde, og det er her nødvendigt at fræse jorden igennem flere gange for at sikre homogenitet.

4. Komprimering.

Arealet komprimeres i første omgang med gummihjulskøretøjer indtil overfladen er trykket godt sammen, herefter anvendes tungere køretøjer, hvor en gummihjulstrømle vil være det bedste valg.

5. Afretning med fald.

6. Forstærkning af bærelaget

7. Slidlag.

De sidste tre punkter har ikke relevans for dette projekt. (Faxe Kalk A/S)

Metoden anvendte til kalkstabilisering ligger i hovedtræk op ad den metode som Faxe Kalk har beskrevet, da den anvendte metode i hovedtræk går på at

1. Bestemmelse af kalkmængde
2. Omrøring ved hjælp af rørmaskine, dette til svarer fræsning
3. Komprimering – her benyttes proctor, hvor en anden metode benyttes i praksis.

Det kan derfor konkluderes at den anvendte metode stemmer overens med den metode som an-

vendes i praksis. At der bliver benyttet en anden metode til bestemmelse af kalkmængden er noget som hurtigt at revurderes, men det vurderes ikke at have nogen indflydelse på resultaterne. Det vurderes at den anvendte metode til bestemmelse af kalkmængden er mere præcis end den praktiske metode.

Komprimeringsmetoden beskrives i det efterfølgende.

Udførelse af proctor.

Der vil blive udført et proctor forsøg på det kalkstabiliserede ler, for derigennem at sikre leret er komprimeret inden der udtages prøve til konsoliderings- og triaxialforsøg. Det kalkstabiliserede ler vil blive komprimeret ud fra en standart proctor, hvilket svare til 75 slag over tre lag. Faldloddet har en faldhøjde på 305 mm. Denne metode vil blive benyttet til af fastlægge w_{opt} og γ_d for kalkstabiliseret ler med en kalkmængde på hhv. 2- og 4 % samt til komprimering af det kalkstabiliseret ler med en kalkmængde på fire procent. (Dansk Standard, 2004)

Hertil skal der tilføjes at man fra vejdirektoratets side er gået fra at benytte proctorforsøg grundet følgende.

"Vibrationsbord er eneste referencemetode, dels fordi metoden baserer prøvningen på totalmaterialet, og dels fordi prøvningen simulerer den egentlige komprimering i marken bedre end proctorforsøgets "hammerpåvirkning". (Berg F.)"

Grunden til at denne metode ikke anvendes i dette tilfælde skyldes at det for Aalborgers vedkomne alligevel ikke var at finde sten større end 16 mm og derfor skulle begge forsøg give et lige pålideligt og præcist resultat som reference forsøg da leret er velsorteret. Dog var der for Morænelerets vedkomne at finde en omkring ca. 15 % sten materiale større end 16 mm, det er dog valgt at benytte samme metode til komprimering, for at sikre at den anvendte metode er ens for alle forsøg og at der derfor ikke kan sås tvivl omkring forsøgs resultaterne for de to forskellige lerarter. (Berg, F)

Som ved alle andre materialer, så skal de opbevares sådan at deres egenskaber ikke bliver ændret over tid

Opbevaring af det kalkstabiliseret ler.

Det kalkstabiliserede ler opbevares efter homogenisering i 99% fugtighed ved at placere en skål med vand i den bakke som materialet opbevares i. herefter indpakkes bakken i en plasticpose for at sikre luft tæthed. Det kalkstabiliserede ler opbevares i et rum med stuetemperatur svarende til 20°C. (Stockmarr, 2011)

Sikkerhed omkring behandling af ler med kalk.

For at sikre at der ikke opstår nogle komplikationer rent helbredsmæssigt under arbejdet med det brændte kalk, er det nødvendigt at tage sikkerhedsforanstaltninger. Foranstaltningerne som foretages, til svarer dem som tages når der kalkstabiliseres i praksis.

Det er sådan, at kalken reagere meget kraftigt med både ler og vand, hvilket betyder at ens slimhin-

der og hornhinder er ekstra udsat for udtørring. Derfor er det nødvendigt at have både beskyttelsesbriller og mund beskyttelse på.

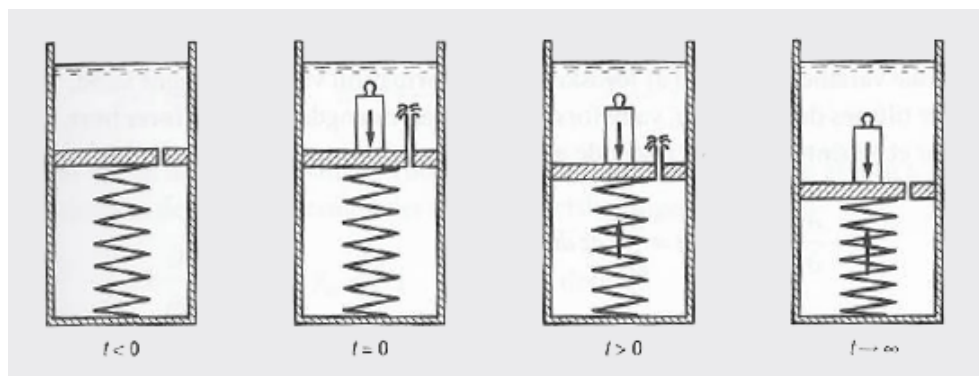
Hvis ikke der benyttes beskyttelsesbriller og på en eller anden måde beskytter munden, vil hoste og svinen i øjenen kunne forekomme, hvilket ikke er behageligt, og som desuden nedsætter evnen til at arbejde optimalt.

Der arbejdes med pulveriseret brændt kalk, hvilket betyder at kalken har let ved at støve. Derfor er det nødvendigt at tage forbehold for dette, da en spredning vil kunne påvirke andre personer i laboratoriet. Under udførelse af kalkstabiliseringen, blev det erfaret at mængden af kalk var så lille, at det ikke var nødvendigt at tage ekstra forbehold for at kalken vil støve under blanding. (Faxø Kalk, 2010)

B – Konsolideringsteori.

De deformationer som opstår i jorden afhænger meget af den spændingshistorie som jorden har været udsat for, og det er derfor vigtigt at have kendskab til forbelastningsspændingen, σ'_{pc} .

Når en ler belastes, øges spændingerne i jorden. Disse spændinger bliver i starten båret af vandet i porerne, indtil porerne er drænet. Dette medfører en forøgelse af de totale spændinger mens den effektive spænding forbliver uændret. Denne proces kaldes konsolidering af jorden. Da ler har en lav permeabilitet, tager det lang tid for vandet at dræne, modsat sand som har en høj permeabilitet og derfor dræner med det samme. Det er derfor kun ved ler konsolidering tages i betragtning. Med tiden vil vandet dræne fra leret og den øget spænding vil blive båret af lerets struktur, som medføre en ændring i de effektive spændinger. (Ovesen et. al., 2006)



Figur B-1 Mekanisk analogi til konsolideringsteori. (Ovesen et. al., 2006)

Figur B-1 viser en mekanisk analogi til forståelsen af konsolidering, hvor det tydeligt ses at det til at starte med er vandet som bærer belastningen hvor det med tiden gående mod uendelig bliver fjederen (strukturen) som bærer belastningen.

Selvom leret er færdig konsolideret betyder det ikke at leret ikke længere deformere, det er sådan at der over tid hele tiden sker en lille deformation, denne deformation kaldes for krybning og er afhængig af lerstrukturen og vandmolekylerne. (Ovesen et. al., 2006)

1. Analysemetoder.

Der er anvendt to metoder til analysere af konsolideringsforsøg, den traditionelle metode og ANA-CONDA (analysis of consolidation test data) -metoden. (ANACONDA, 1992)

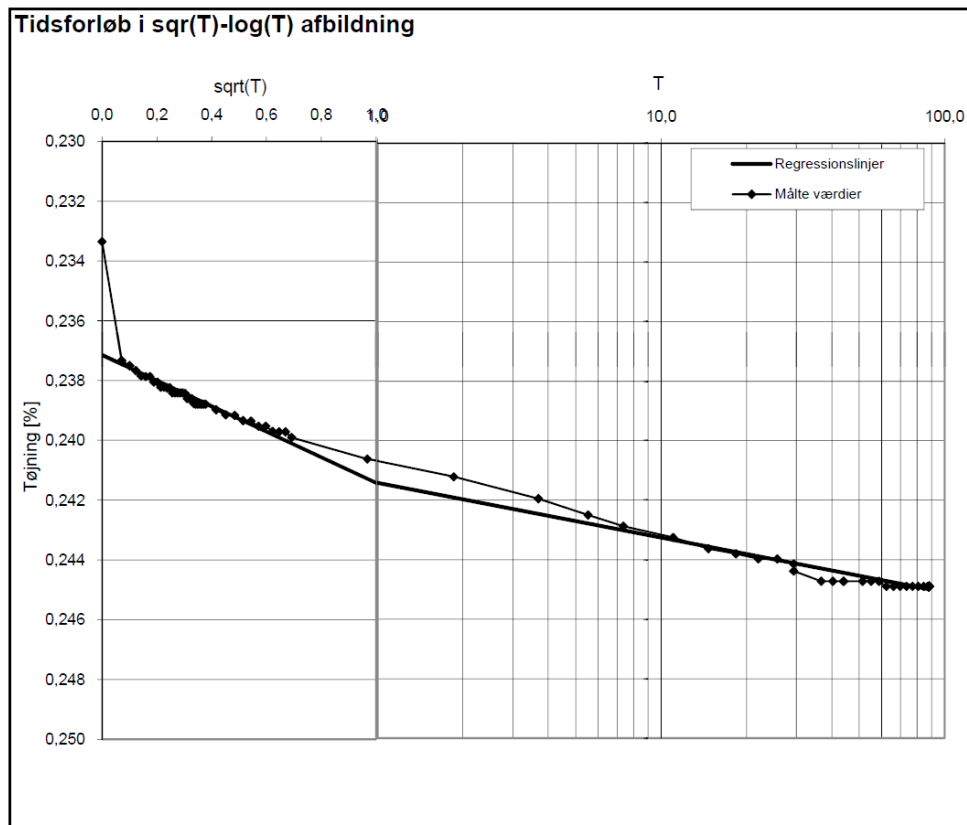
Den traditionelle metode bygger på at konsolidering og krybning er to processer som er uafhængige af hinanden, hvor krybning sker efter at konsolidering er færdig. ANACONDA betragter konsolideringsforsøget ud fra en teori om, at krybning og konsolidering sker samtidig. Derfor betragter ANACONDA den deformation ud fra følgende formel, hvor både krybning og konsolidering indgår.

$$d\varepsilon = f(\sigma', e)d\sigma' + g(\sigma', e)dt$$

Hvor e er poretallet, f og g er funktioner der afhænger af σ' og e . Betragtes konsolideringsfasen alene, så er både $d\sigma'$ og dt forskellig fra nul mens $d\sigma'$ er tilnærmelsesvis nul ved krybning. Fordi krybning antages at finde sted under konsolideringsfasen er det nødvendigt at g -funktionen også indeholder en afhængighed af σ' . (ANACONDA, 1992)

Efter den traditionelle metode så kan den tøjning forårsaget af konsolidering beskrives som en retlinje i et $\sqrt{T}$ - diagram, mens krybning kan beskrives som en retlinje i et $\log(T)$ - diagram. En kombination af disse to grafer kan således benyttes til at bestemme konsolideringstiden, t_c , konsolideringstøjningen, ε_{100} , krybningstøjningen ε_{cr} . Initialtøjning ε_i

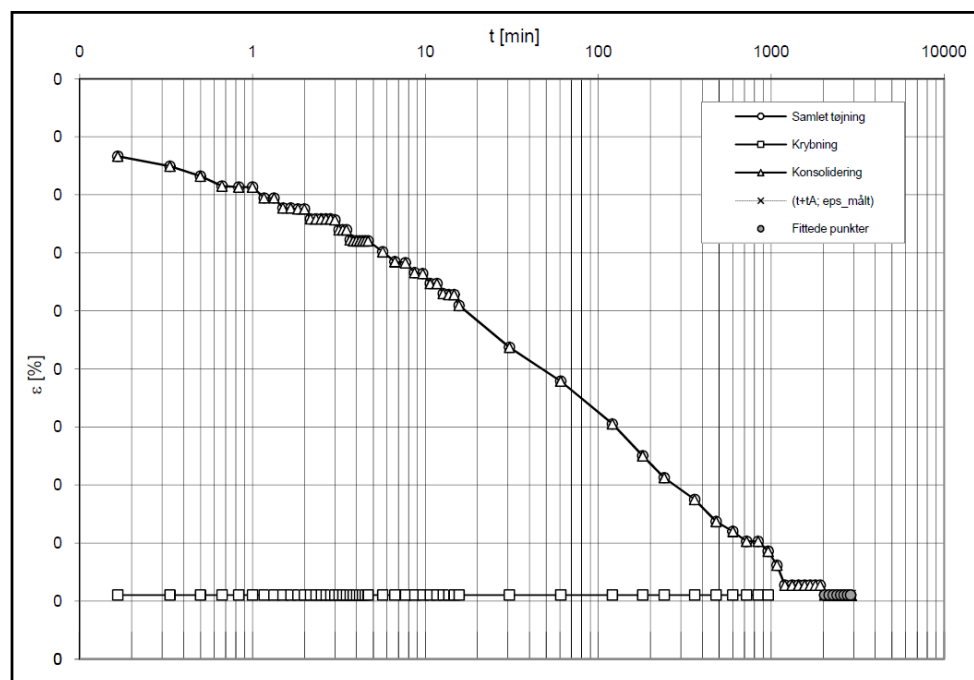
Et eksempel at en $\sqrt{T}$ - $\log(T)$ - graf fremgår af Figur B-2(ANACONDA,1992).



Figur B-2 Resultat af konsolideringstrin, afbildet i et $\sqrt{T}$ - $\log(T)$ -graf for belastningstrin 12 ved kalk-stabiliseret aalborgler med 4 % kalk

Konsolidering og krybning sket i realiteten ikke hver for sig og uafhængig af hinanden, men på samme tid og er hinanden afhængige. Derfor foreslog Bjerrum (1967), at antage konsolideringsfasen som et momentant forløb. Bjerrum ville altså se bort fra vandudpresningsprocessen i første omgang og derved finde krybningstøjningerne. Vandudpresningsprocessen kan derefter findes en som forsinkelse af sætningerne. Bjerrums metode betyder at de to fase kan studeres hver for sig, for senere at blive lagt oven i hinanden igen. Denne metode viser sig samtidig at være rimelig, da konsolideringstøjningerne stemmer overens med konsolideringsteorien teorien. Med andre ord, så er det nødvendigt at kunne skelne mellem de deformationer som sker grundet konsolidering og de deformationer som sker grundet krybning. Et eksempel på en opdeling af krybning og tøjning ved hjælp af ANACONDA fremgår af Figur B-3.

For at få en indtryk af ændringen i jordens stivhed, er det nødvendigt men en definition af hvilke tøjninger der opstår når de effektive spændinger i leret forøges. Konsolideringsmodulet, K , er lerets stivhedsparameter som beskriver sammenhængen mellem tøjningerne og de effektive spændinger og er derfor defineret som:



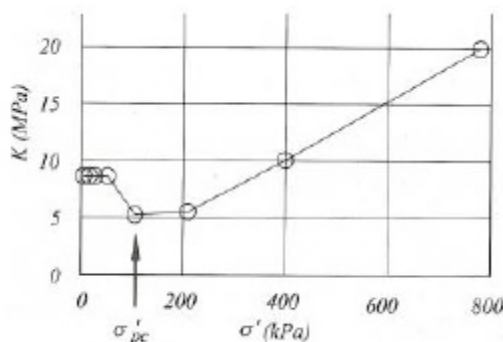
Figur B-3 Eksempel på anvendelsen af ANACONDA-metoden, hvor krybnings- og konsolideringstøjningerne bliver adskilt for belastningstrin 12 for kalkstabiliseret aalborgler med 4 % kalk

Altså beskriver konsolideringsmodulet forøgelsen af tøjningerne i jorden når de effektive spændinger stiger.

$$K = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\varepsilon_j}$$

$\Delta\varepsilon$ er de konsolideringstøjninger der opstår som en konsekvens af en ændring i de effektive spændinger, hvilket altså betyder at det er vigtigt at kunne skelne mellem krybningstøjningerne og konsolideringstøjningerne. I dette projekt vil ANACONDA metode benyttes til at skelne mellem de to tøjninger, dette kunne også være gjort med den traditionelle metode, derimod vil den traditionelle metode benyttes til at vurdere om det enkelte trin er færdig konsolideret.

Når der udføres et konsoliderings forsøg, er det vigtigt at belastningen ikke overstiger , da prøven ellers vil ændre struktur, hvilket betyder en signifikant ændring af konsolideringsmodulet, K, altså en ændring af prøvens stivhed. Arbejdskurven for konsolideringsforsøget vil gå over i en ret linje og



Figur B-4 Bestemmelse af forbelastningsspænding ud fra konsolideringsmodulet, K, som ligger hvor K har sit minimumspunkt.

prøven vil opføre sig som en normal konsolideret ler. Forbelastningsspændingen kan findes ud fra sammenhængen mellem K og σ' , hvis prøven belastes ud over forbelastningsspændingen, da den må ligge der hvor et fald i K opstår, se Figur B-4 (Forening, Dansk Geoteknik, 2001)

2. Bestemmelse af konsolideringsmodul.

For at bestemme prøvens konsolideringsmodul er det nødvendigt at af- og genbelaste prøven under konsolideringsforsøget. Dette skyldes at konsolideringsmodulet er pr. definition er defineret som starthældningen af genbelastningsgrenen. Det vælges at finde hældningen ud fra de to første punkter (Forening, Dansk Geoteknik, 2001).

Konsolideringsmodulet, K , bestemmes ud fra følgende formel.

$$K_t = K_{t0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$$

Hvor:

K_t = konsolideringsmodulet in situ for en stærkt forbelastet jord, som er aflastet til .

σ'_{red} = den mindste vertikale effektive spænding, det aktuelle lag har været udsat for siden forkonsolideringen.

ΔK_t = et tillæg til K pr. spændingsenhed.

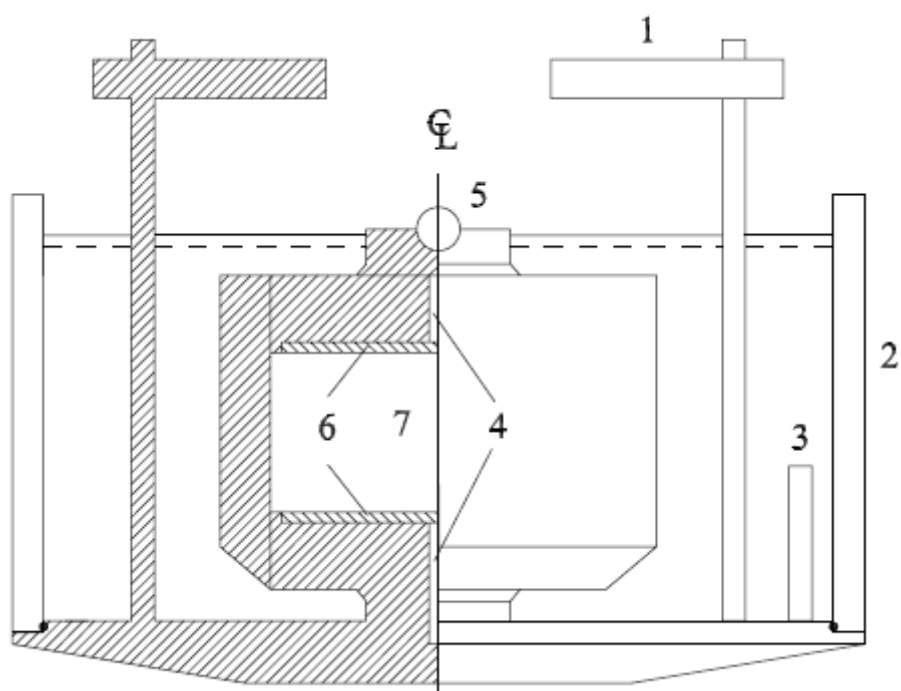
3. Procedure.

Konsolideringsforsøgene udarbejdet i denne rapport er udført i et dansk konsoliderings apparatet. Apparatet består af en celle hvori prøven placeres og en tværbjælke som er koblet på en arm der belaster prøven i forholdet 1:10.

Cellen som prøven placeres i består af en stiv ydre ring som sikre, at der ikke kan komme deformationer i radialretning, to trykhoved, begge med filtre som sikre prøven kan dræne, en i toppen og en i bunden af prøven. Den stive ydre ring er løs og bliver kun holdt på plads af den friktion der er mellem ringen og prøven. Figur B-5 illustrerer opbygningen af konsolideringsapparatet.

Konsolideringsforsøgene er udført i en cylinderring med en diameter på 70 mm og en højde på 35 mm. Drænene som er anvendt, er af samme diameter som prøven. Sætningerne af prøven er målt med to flytnings transducers placeret på det øvre trykhoved. Belastningen er påført ved at placere vægt på armen som overfører belastning gennem en kugle placeret i centrum af det øvre trykhoved.

Efter prøve tildannelse hvor prøven er placeret i cylinderen og ender er rettet til efter cylinderhøjden og gjort plane, så placeret hele konsoliderings apparatet under vægtstangen som går på tværs og første belastningstrin påføres apparatet. Efter to minutter flydes cellen med vandmættet vand. Efterfølgende belastes prøven yderligere jævnt før den udarbejdede belastningsplan og først når prøven, ved det foregående belastningstrin er færdigkonsolideret. Under de første belastningstrin betragtes prøven for swellning. Opstår der swellning belastes prøven yderligere indtil der observeres sætninger.



Figur B-5 Opbygning af konsolideringsapparatet. 1.) Flytningstranducers. 2.) Plexiglasring 3) Mætningsrør 4) Rør til mætningsdræn. 5) Kugle, hvor belastning placeres. 6.) Dræn. 7.) Placering af dræn. (Grønbech, 2010)

C – Beskrivelse af triaxialforsøget og baggrundsteori.

Triaxialforsøg er en almindelig anvendt forsøgsmetode til bestemmelse af jordens styrke i Danmark, hvorfor det vil blive anvendt i dette projekt, med det formål at bestemme det kalkstabiliseret lers styrke. Der vil i det efterfølgende blive beskrevet teorien som ligger til grund for triaxialforsøg.

Et triaxialforsøg, består af følgende fire punkter.

1. Prøvetildannelse.
2. Forberedelse af triaxial apparatet - kalibrering af apparaturet.
3. Test af den forberedte prøve
4. Analyse af den test resultaterne.

De fire ovenstående trin vil blive beskrevet i det følgende.

I. Prøvetildannelse.

Der vil blive udført triaxialforsøg på to forskellige lerarter som er kalkstabiliseret med fire procent kalk. Efter at leret er blevet kalkstabiliseret, vil de blive komprimeret efter metoden som er beskrevet i bilag A – vejledning til kalkstabilisering.

Prøvetildannelse består som det første efter komprimering, i at få tildannet en prøve til et cylindrisk rør med en diameter på 72 mm og en højde på 70 mm.

Efter at prøven er blevet afrettet cylinderen presses den ud og kontrolleres efterfølgende for sprækker eller synlige skader, en tilrette prøve fremgår af Figur C-1.



Figur C-1 Færdig tildannelse af kalkstabiliseret aalborglerprøve med 4 % kalk.

Som det fremgår af Figur C-1, så er prøven homogen og uden synlige skader. Eneste bemærkning er prøvens endeflader, da disse er ru. Dette kan resultere i større deformationer under brudforsøgene.

Resten af prøvetildannelsen forløber som beskrevet i litteraturen og vil derfor ikke blive beskrevet nærmere i denne rapport.

I. Forberedelse af apparaturet

Inden triaxial apparatet kan benyttes er det nødvendigt at udføre kalibrering af apparatet, sådan at der under behandling af forsøgsdata kan korrigeres for nulpunkterne.

II. Test af den forberedte prøve.

Det vælges at køre triaxialforsøget som et $CU_{u=200 \text{ kPa}}$ et udrænet forsøg med et kontant poretryk på 200 kPa. og med isotropisk konsolidering. Prøven belastes herefter op til brud over tre gange med spændinger som fremgår af Tabel C-1. Brudfasen forløber en med hastighed på 1%/time.

Volumen bliver holdt konstant under belastningen og aflastning, hvilket betyder at kammertrykket vil være varierende, mens deviatorspændingen er stigende, altså øges den vertikale belastning med konstant hastighed.

Inden udførelse af brudforsøg, skal det sikres at prøven er færdig konsolideret. Grunden til at det er

	σ'_3	Δu	σ_{celle}
brud 1	100	200	300
brud 2	200	200	400
brud 3	400	200	600

Tabel C-1 Forskellige spændingstilstande ved de tre brudforsøg.

nødvendigt at sikre at prøven er færdig konsolideret, skyldes at det kræver dræning af porevand for at opnå bruddeformationer. Hvilket betyder at de første deformationer som måles skyldes dræning af porevand, og belastningen vil i starten blive båret af vandet og ikke af lerets kornskelet. Måden hvorpå konsolideringen sker i et triaxialforsøg sker ved at celletrykket øges op til det ønskede, i dette tilfælde hhv. 300, 400 og 600 kPa.

Prøven belastes i dette tilfælde op til en deformations tøjning på fireprocent hvor efter den aflastes igen.

III. Analyse af test resultaterne.

Ud fra forsøgsresultaterne er det muligt både at finde de effektive og de udrænedes styrke parametre for det kalkstabiliserede ler. Metoden til analysen af data er nærmere beskrevet i Kapitel II

IV. Fejlkilder.

Der findes en række generelle fejlkilder som er knyttet til et triaxialforsøg, disse vil blive beskrevet i dette afsnit.

Under tildannelsen af prøven, sker der en masse flytninger og bevægelser med prøven, som påvirker prøven, det er her vigtigt at benytte det stativ som sikre at prøven opnår så minimale påvirkninger som muligt.

Af de generelle fejlkilder er det et ru trykhoved, hvilket medfører at prøven bliver tøndeformet. Der er i dette forsøg anvendt glatte trykhoved, hvorfor denne fejlkilde ikke betragtes.

Hvis membranformen ikke har prøvens form kan dette give for store ændringer i volumen. Den

største fejlkilde er dårlig prøvetilpasning. Det er vigtigt at prøvens ender er glatte, hvis ikke dette er tilfældet, kan det medføre for store ændringer i tøjningerne i axialretningen.

II. Teori.

I det følgende afsnit vil der blive redegjort for den teori som ligger til grund for udførelse af triaxialforsøget. Som nævnt sker der to faser under et triaxial forsøg. Den første fase er konsolideringsfasen, denne fase vil ikke blive beskrevet da denne er beskrevet i Bilag B.

Den næste fase er brudfasen, hvor prøven vil blive belastet med en axialbelastning op til brud med en maksimal trøjning på fire procent.

Når der snakkes om ler eller jords styrke, snakkes der om jordens forskydningsstyrke, dette skyldes at jordens har en tendens til at forskyde sig med en anden under belastning. Jordens forskydningsstyrke er principielt beskrevet som den maksimale forskydningsspænding jorden kan modstå.

Mohr og Columb beskrevet en sammenhæng mellem forskydningsstyrken og de effektive spændinger, sammenhængen er beskrevet som Mohr-Columbs brudbetingelse(Ovesen et. al.,2006):

$$\tau = c' + \sigma' \tan (\varphi')$$

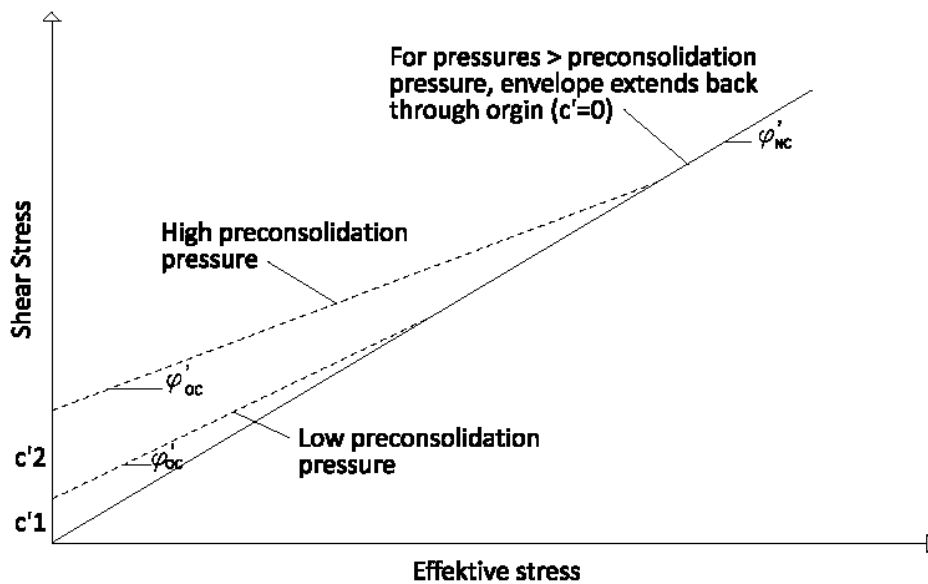
Hvor:

τ	Forskydningsstyrke
c'	Effektiv kohæsion
φ'	Effektiv friktionsvinklen
σ'	Effektive spænding.

Der findes to forskellige tilstandsformer når der arbejdes med jord, drænet og udrænet tilstand. Forskellen på de to tilstande kan kort forklares som tid. Forskellen i de to tilstande ligger i hvor lang tid jorden er blevet belastet, alt efter hvilken jordart der arbejdes med. Det er gældende for ler, at tidsperioden for at leret går fra udrænet til drænet er væsentlig længere end for friktionsmaterialer som sand. Derfor er det nødvendigt, at der sker en konsolidering af leret. Konsolidering er som beskrevet i Bilag B, den proces hvor lerets pore drænes for vand. Da det er velkendt at ler over tid går mod drænet tilstand er det ofte i den tilstand at lers styrke parametre beskrives. Dette er endvidere også grunden til at Mohr-Columb i dette tilfælde er beskrevet som de effektive værdier af styrke parametrene kohæsion og jordens friktionsvinkel. Ved udrænedede forsøg sættes forskydningsstyrken lig kohæsionen, hvilket betyder at styrken ikke er afhængig af hvilke effektive spændinger jordens bliver belastet med.

Sammenhængen mellem forskydningsstyrken og de effektive spændinger fremgår af Figur C-2. Hvor det fremgår at jordens styrke øges alt efter om leret er lettere forkonsolideret eller stærkt forkonsolideret. (Ovesen et. al.,2006)

For bedre at forstå teorien, er det nødvendigt at have kendskab til hvordan triaxialapparatet er bygget op.



Figur C-2 Sammenhæng mellem forskydningsstyrke og effektive spændinger, ud fra Mohr-Columb.

I. Opbygning af triaxial apparatet.

I et triaxial-apparat udsættes den cylindriske jordprøve for et aksialsymmetrisk spændingstilstand hvor det er den største hovedspænding som er varierende, mens den mindste holdes konstant. Jordprøven tildannes således at den får et forhold mellem H og D på 1, hvor der efter dansk praksis bliver benyttet en prøve på 70 x 70 mm. Prøven placeres efterfølgende lodret og er indesluttet i en tæt gummi-membran, mens der på enderne bliver placeret to trykhoveder, hvorpå der er placeret to glatte membraner. Efter at prøven er tildannet, bliver den anbragt i et cirkulært kammer, som flydes med vand for at kunne give prøven en isotropisk last, se figur . Trykket som ligger i kammeret benævnes kammertrykket og vil altid være den mindste hovedspænding. På det øverste trykhoved er der placeret to axial deformations transducere som måler de axiale deformationer på prøven. Udover at de axiale deformationer bliver registreret, så blive prøvens poretryk, celletrykket og belastningen også registreret.

Inden der bliver tilført den største hovedspænding, vil prøven først blive konsolideret, hvilket sker gennem kammertrykket, der kan sættes en analogi til at kammertrykket til svarer den dybde prøven befandt sig i in situ, hvorfor det ofte vælges et kammertryk svarende til $\sigma_{in situ}$. Først efter at konsolideringsprocessen er færdig vil den lodrette belastning blive påført prøven. Denne belastning sker gennem et stempel som bliver først ned gennem kammerets topdæksel. Den lodrette belastning måles gennem en kraftmåler som er koblet på til trykkammeret. (Ibsen,2011)

Den spænding som prøven nu udsættes for, må til svarer spændingsforskellen mellem kammertrykket og den spænding som stemplet giver. Dette skyldes at kammertrykke allerede i forvejen virker på prøven, desuden kaldes denne spænding for deviatorspændingen og er givet ved. (Ibsen,2011)

$$\sigma_1 - \sigma_3 = q = P/A$$

Hvor P er stempelkraften og A er prøvens tværsnitareal. Det er sådan, at der under belastning sker en ændring af prøvens tværsnitareal, hvilket betyder at det er nødvendigt at tage højde for denne ændring og benytte et korrigeret areal som findes gennem følgende formel. (Ibsen,2011)

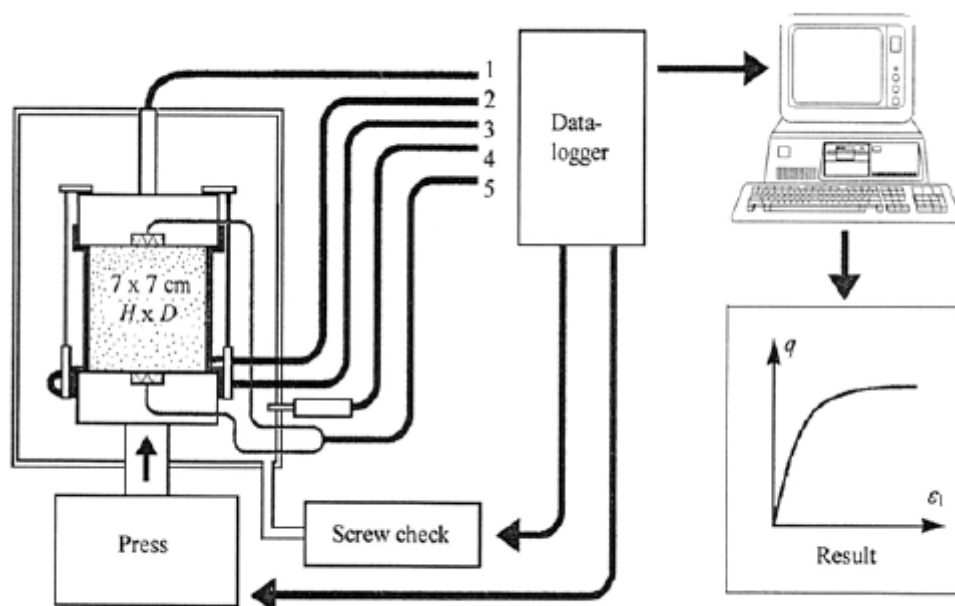


Figure 1.2: Triaxial apparatus. 1) Load transducer, 2-3) Axial deformation transducers, 4) Confining pressure transducer, 5) Pore water transducer.

Figur C-3 Opbygning af triaxialapparat. 1) Krafterammen, påfører prøven vertikalbelastning. 2-3) flytnings-transducere. 4) Celltrykstranducere. 5) Poretrykstranducere. (Forening, Dansk Geoteknik, 2001).

$$A = A_0 \frac{1 - \varepsilon_v}{1 - \varepsilon_1}$$

Sættes de to formler sammen fås følgende udtryk for deviatorspændingen. (Ibsen, 2011)

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P (1 - \varepsilon_v)}{A_0 (1 - \varepsilon_1)}$$

Hvert forsøg består af to forskellige faser en konsolideringsfase og en brud fase. Dette er uanset om forsøget udføres drænet eller udrænet.

Konsolideringsfasen er den fase hvor der ofte sker en isotropisk belastning ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) af prøven. Dette med det formål at få poreovertrykkene til at udligne sig, ved at bortdræne vandet fra porerne. Denne proces kan for længe tage flere dage. Det er også muligt at udføre konsolideringen med uåbnede dræneveje, hvilket blot betyder at prøven ikke konsoliderer, denne metode bliver sjældent brugt. (Ovesen et. al., 2006)

Brudfasen er den fase, hvor stempeltrykke gradvist bliver øget op til der opstår brud i prøven, brudfasen stoppes når der er opnået en deformation af prøven på fire procent. Denne fase kan lige som konsolideringsfasen udføres drænet og udrænet. (Ovesen et. al., 2006)

V. Analyse af data.

Efter at forsøgene er udført, skal data behandles og prøvens styrkeparametre skal bestemmes. Som

beskrevet i Afsnit II-I opbygning af triaxialapparatet fremgår det at der bliver målt på fem forskellige parametre. Ud fra disse fem målinger er det muligt at få bestemt de enkelte brudforsøg og dets tilhørende brudpunkt. Brudpunkterne kan efterfølgende plottes i et (p',q)-diagram. Hvor p' er defineret som (Forening, Dansk Geoteknik,2001).:

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3}$$

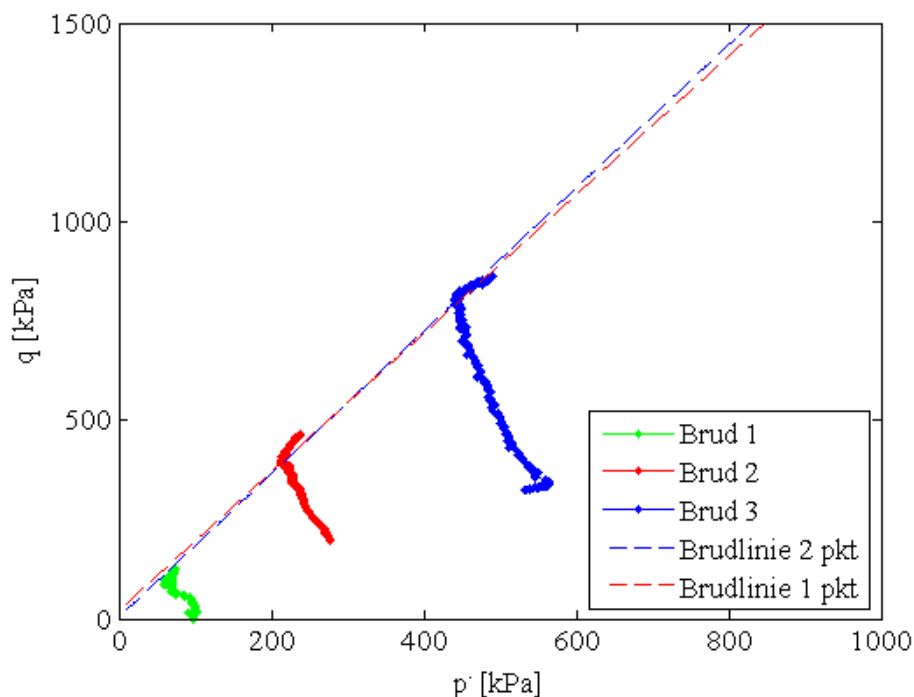
Og q er deviatorspændingen som er defineret som (Forening, Dansk Geoteknik,2001).:

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3$$

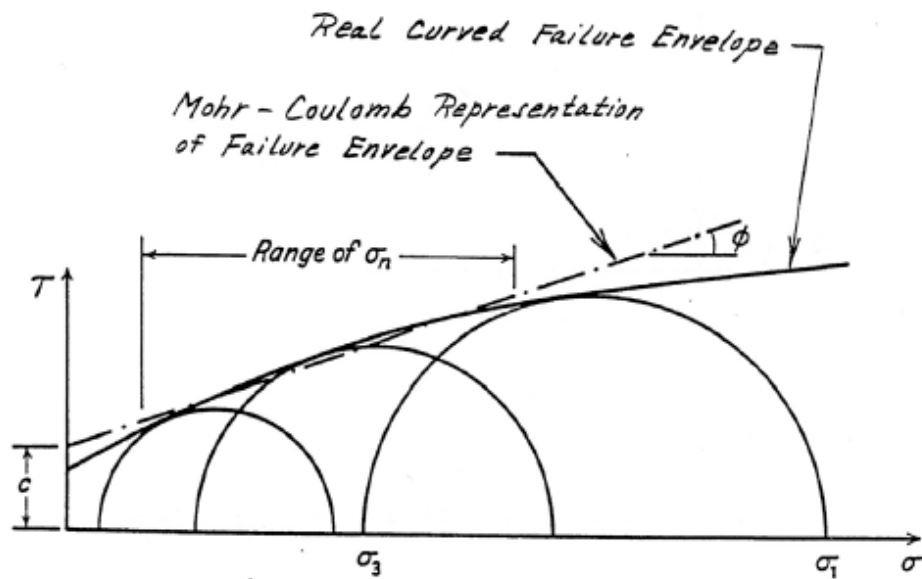
Ud fra de tre brudpunkter er det muligt at bestemme en tilnærmet ret linje, brudlinjen for prøven. En tilnærmelse af en brudlinje for kalkstabiliseret aalborgler med en kalkmængde på fire procent fremgår af Figur C-4. Som det fremgår af Figur C-4 er det ikke muligt at tilnærme en retlinje gennem alle tre brudpunkter.

At det ikke er muligt at tilnærme en ret linje til de tre brudpunkter, er som forventet. Af Figur C-5 fremgår det at en reel Mohr-Coulomb brudlinje ofte vil fremstå med en krumning. Den reelle krumme brudlinje betyder imidlertid at det bliver svært at beskrive prøvens styrke, hvorfor det vælges at tilnærme en ret linje til brudpunkterne. Ud fra den rette linje er det muligt at finde en sammenhæng mellem brudlinjens hældning og prøvens friktionsvinkel, samt en sammenhæng mellem brudlinjens skæring med ordinataksen og den effektive kohæsion .(Ibsen,2011)

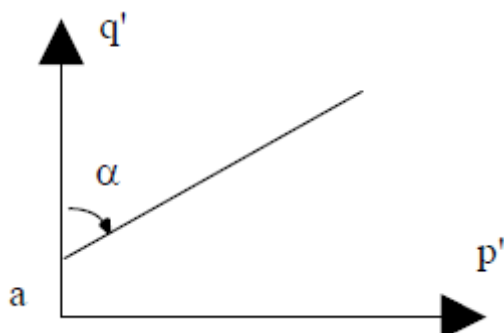
Efter dansk praksis præsenteres brudlinjen oftes i et (p',q)-diagram som fremgår af Figur C-6.



Figur C-4 Tilnærmelse af bedste rettelinje ud fra tre brudforsøg udført på kalkstabiliseret aalborgler med 4 % kalk.



Figur C-5 Bestemmelse af brudlinje efter Morh-columb, hvor det fremgår at brudlinjen reelt set er krum frem for retlinjet (Ibsen, 2011).



Figur C-6 Beskrivelse af konstanterne a og α i et (p', q') -diagram.

Her kan sammenhængen mellem α og a og c' og ϕ' udtrykkes ved følgende udtryk.

Når først styrke parametrene for den kalkstabiliserede ler er fundet er det muligt at finde prøvens forskydningsstyrke ved en bestemt spændings påvirkning.

$$c'_{tr} = a \tan(\alpha) \tan(\phi'_{tr})$$

$$\sin(\phi'_{tr}) = \frac{3}{1 + 6 \tan(\alpha)}$$

Bibliografi.

Anaconda. (1992). *ANACONDA manual*.

Bell, F. (1996). *Lime stabilization of clay minerals and soils*.

Berthelsen, O. (1987). *Geologi i Aalnorgområdet*.

Berg, F. *Ubundne vejmaterialer – nye regler og standarder*. Vejteknisk Institut

CoopHimmelblau. (2009). *Musikkens Hus i Nordjylland - Geotekniske rapport*. Vienna.

Dansk Standard. (2004). *DS/EN 13286-2*. Dansk Standard.

Faxe Kalk A/S. *Jordbundsstabilisering med kalk*, Vejledning i brug af pulveriseret, brændt kalk til arbejdsveje på byggepladser

Faxe Kalk A/S. (2010). Sikkerhedsdatablad.

Forening, Dansk Geotekniske. (2001). *Laboratoriehåndbogen*.

Google . (2011). *Google Maps*. Hentet fra <http://maps.google.dk>

Geoteknisk institut. (1985). *Geotekniskrapport - Triaxialforsøg*.

Geoteknisk Institut. (1969). *Resultater af konsolideringsforsøg*.

Grønbech, G.L. (2010) *Geotechnical Testing of Søvind Marl*

Ibsen, Lars Bo. (2011). *Undervisningsslides, Soil testing*.

Jacobsen, M. (1993). *Lærebog i videregående Geoteknik 2 - Sætninger i Jord*.

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

Lysdahl, K. (2010a). *Effektstudie af kalkstabilisering*. Aalborg.

Lysdahl, K. K. (2010b). *Casestudie af kalkstabiliseringseffekten på skråninger*. Aalborg.

Niels Krebs Ovesen, L. F. (2006). *Lærebog i Geoteknik*. Polyteknisk Forlag.

Overgaard, T. (2005). *Jordstabilisering på Sydmotorvejen Ønslev - Sakskøbing*.

Stockmarr, P (2011). Korrespondance omkring håndtering af kalkstabiliseret ler.