

Kalkstabilisering

- Udformning af metoder



Det Ingeniør-, Natur- og Sundhedsvidenskabelige Fakultet
Vej- og trafikteknik
Gruppe 09VT1002
2009

**Titel:**

Kalkstabilisering
- Udformning af metoder

Tema:

Afgangsprojekt

Projektperiode:

1. februar 2009 – 11. juni 2009

Projektgruppe:

Gruppe 2, Vej og trafik, 10. semester

Deltager:

Brian Aagaard Christiansen

Michael Gärtner Nielsen

Vejleder:

Lars Bolet

Oplagstal:

Hoveddelen: 74 sider

Bilagsdelen: 12 sider

Synopsis:

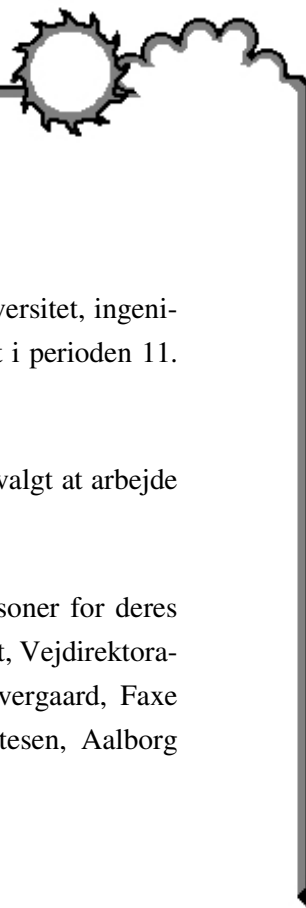
Gennem de senere år har kalkstabilisering vundet større og større indpas i den danske vejsektor. De danske erfaringer inden for området er dog begrænsede.

Rapporten belyser de teoretiske aspekter af kalkstabilisering, hvordan den strukturelle opbygning af jorden ændres ved en kalkstabilisering, styrkeudviklingen i jorden belyses samt de økonomiske aspekter, med henblik på en sammenligning af alternativer til kalkstabilisering. En metode til bestemmelse af de økonomiske aspekter er blevet konverteret fra franske til danske forhold.

Den anden del af projektet har en mere praktisk karakter. Der er blevet udført forsøg med 3 forskellige jordprøver, hvor den initiale styrkeforøgelse er blevet målt. Forsøgene er udformet med henblik på at kunne opstille en metode til bestemmelse af den nødvendige kalkmængde ud fra lettilgængelige parametre, som jordtype og vandindhold.



SYNOPSIS



FORORD

Denne rapport er udarbejdet af projektgruppe 09VT1002.på Aalborg Universitet, ingeniøruddannelsen Vej- og Trafiktekniiks 10. semester. Projektet er udarbejdet i perioden 11. februar 2009 til 11. juni 2009.

Temaet for rapporten er Afgangsprojekt, og herunder har projektgruppen valgt at arbejde med kalkstabilisering med henblik på udformning af metoder.

I forbindelse med projektet ønsker projektgruppen at takke følgende personer for deres bidrag: Caroline Hejlesen samt laboratoriepersonale ved Vejteknisk Institut, Vejdirektoratet, Finn Thøgersen, Vejdirektoratet, Holger Isaksen, Inreco, Torben Overgaard, Faxe Kalk, Rørdal Genbrugscenter, Ellidshøj Grusgrav, Anders Hust Augustesen, Aalborg Universitet samt Lars Bolet, Aalborg Universitet.

LÆSEVEJLEDNING

Projektet er udformet som en rapport opdelt i en hoveddel og en bilagsdel. Hoveddelen indeholder analyser, vurderinger, antagelser og resultater. Bilagsdelen indeholder grundlæggende beskrivelser. Henvisninger mellem hoved- og bilagsdel og mellem de enkelte afsnit fremgår af teksten.

Tabeller og figurer bliver henvist med tabel- og figurnummer. Ligninger henvises der til med ligningsnummer omgivet af parenteser.

Litteraturlisten findes sidst i hoveddelen. Ved kildehenvisninger er der benyttet Harvard metoden, hvor henvisningen fremgår af teksten.

Beregninger er udført i forskellige Excel-ark, hvilke fremgår af teksten. Bagerst i rapporten er der vedlagt en cd, hvorpå beregninger og programfiler findes. Ydermere indeholder cd'en en digital version af rapporten samt resultaterne fra CBR-forsøgene i scannet version.





ENGLISH SUMMARY

In many countries, lime-stabilisation is frequently used on the basis of existing methods. In Denmark, though, this is not the case. Lime-stabilisation is not widely used and there are no references to this method in the Danish road rules.

This report aims to describe the theoretical, economic and practical aspects of lime-stabilisation in road based constructions. The beneficial short term effects of stabilisation are examined by carrying out tests on three clay soils stabilised with quicklime. The goal is to uncover usable methods to determine the necessary percentage of lime to be applied in different clay types with different water percentages.

A method for economic evaluation of lime-stabilised and unbound aggregate bases is converted from French methodology to Danish use.

Lime-stabilisation occurs when quicklime or hydrated lime is added to clay soils and improves both the stiffness of the clay soils and their resistance to permanent deformation. The exothermic formation of hydrated lime, from quicklime, significantly reduces the amount of water in the soil. There are two processes which improves the performance of clay soils.

The first process is modification in which calcium ions are released from the hydrated lime and initiates several chemical reactions. These chemical reactions result in increased strength and a more granular structure of the clay soil.

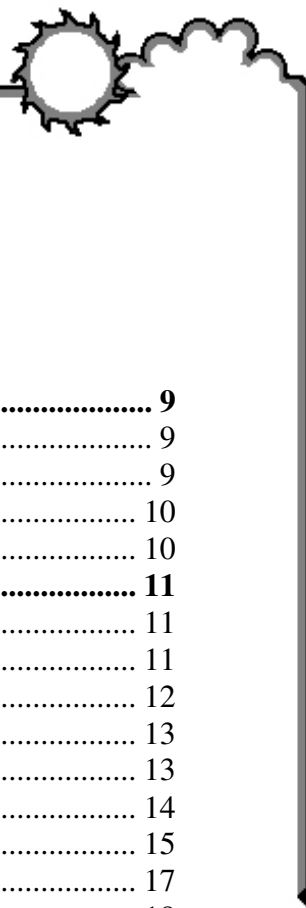
The second process is solidification in which the strength of the stabilised soil is increased over time due to an increased pH-value which causes the dissolution of silicon and aluminium from the edge of the clay plates. As a result, the compounds crystallize and thereby reduces plasticity and increases strength.

The methodology of calculating durable subgrade layers in Denmark does not cover lime-stabilised soils. In this report such a method is described building on the existing methodology and programs.

The mechanical experimentation uses the California Bearing Ratio (CBR) to uncover the increase in strength after stabilisation. Two different clay types are used in the tests and the tests are done with a lime percentage of 0-4 %. The results show an increase in strength shortly after stabilisation.

The results of the tests have been used to form a graph with the objective to facilitate the process of determining the necessary amount of quicklime. The graphs show the CBR values for the different clay types in relation to the original water percentages. Thus, an person will be able to measure the water percentage and clay type and use the graph to determine the necessary amount of quicklime.

Keywords: Lime-stabilisation, lime-stabilization, California Bearing Ration (CBR), clay, roads and road base.



INDHOLDSFORTEGNELSE

1	Indledning	9
1.1.1	Kalkstabiliseringens historie	9
1.1.2	Kalkstabilisering i dag.....	9
1.2	Kalkstabiliseringens formål	10
1.3	Problemstilling	10
2	Teori	11
2.1	Blande tekniker	11
2.1.1	Massestabilisering	11
2.1.2	Pælestabilisering	12
2.2	Kemisk teori	13
2.2.1	Stabiliserings materialer	13
2.2.2	Kalktyper.....	14
2.2.3	Ler	15
2.2.4	Kemisk reaktion	17
2.3	Dimensionering	18
2.3.1	Dimensioneringstyper	19
2.3.2	Analytisk/empirisk metode	20
2.3.3	Dimensionering med MMOPP.....	22
2.4	Økonomi.....	23
2.4.1	Blødbundsudskiftning	24
2.4.2	Kalkstabilisering	24
2.4.3	Den Franske beregningsmetode	25
2.5	Fordele og ulemper	28
2.5.1	Fordele.....	28
2.5.2	Ulemper.....	29
3	Forsøgsmetoder	31
3.1	CBR-forsøg	31
3.2	Minifaldlod - LWD	36
3.3	Isotopmetoden – Troxler	37
3.4	Opsummering	38
4	Beskrivelse af prøverne.....	41
4.1	Valg af prøver	41
4.2	Indhentning af prøver	41
5	Klassificeringsforsøg.....	45
5.1	Konsistensgrænser	45
5.2	Sigte- og hydrometeranalyse.....	46
5.3	Glødetab og kalkindhold	48
5.4	Opsummering	49
6	CBR-forsøg	51
6.1	Prøve 1	51
6.2	Prøve 2	54
6.3	Prøve 3	56

6.4	Sammenligning med andre forsøg	58
6.5	Brugbarhed i marken	59
6.6	Opsummering	62
7	Perspektivering	63
7.1.1	Metoder.....	63
7.1.2	Litteratur og forskning	64
7.1.3	Kritik.....	65
8	Konklusion	67
9	Litteraturliste	69
10	Bilag	73



1 INDLEDNING

Denne rapport omhandler kalkstabilisering, med henblik på udvikling af metoder der kan benyttes i forbindelse med vejbygning. Dette kapitel giver en kort introduktion til emnet kalkstabilisering, herunder både den historiske benyttelse og anvendelsen i dag. Desuden bliver der redegjort for de problemer, som projektgruppen ønsker at belyse. Rapporten har til formål at få løst de problemer, som opstilles.

I dette kapitel vil nogle af grundene til at vælge at kalkstabiliserer i forbindelse med vejbygning blive skitseret. I de senere kapitler vil disse grunde blive yderligere uddybet.

1.1.1 KALKSTABILISERINGENS HISTORIE

Benyttelsen af kalkstabilisering i ler er over 5000 år gammelt. Det blev første gang benyttet ved bygningen af pyramider i Tibet, hvor pyramiderne var bygget af komprimeret blandet kalk og ler. (C. D. F. Rogers et al., 1996)

I nyere tid begyndte USA i løbet af 1940'erne at benytte stabilisering. Først i forbindelse med granulære materialer og ca. 10 år senere i forbindelse med finkornede materialer. Kalkstabilisering blev derfor begyndt benyttet i 1950'erne og blev hurtigt mere og mere populært. Kalkstabilisering blev benyttet til anlæggelse af både lufthavne og motorveje. Europæiske lande, f.eks. England og Frankrig startede først omkring 1960'erne og fortsatte op igennem årene. Udviklingen fortsatte, og flere videnskabelige artikler blev udviklet, men specifikationer og metoder blev først indført i 1986 for England og 1992 for Frankrig. (C. D. F. Rogers et al., 1996) (LCPC, 2004)

Materiellet til kalkstabilisering har også udviklet sig. Før i tiden er in situ kalkstabilisering blevet udført med tallerkenplov eller en almindelig landbrugsfræser. I disse tider er materiellet blevet bedre. Materiellet vil blive beskrevet yderligere i afsnit 2.1. (NCC, 2001)

1.1.2 KALKSTABILISERING I DAG

Der er fornyet interesse om kalkstabilisering i Danmark. Vejdirektoratet har på det seneste lavet nogle forsøgsstrækninger. I 2005 blev en motorvejsstrækning udvidet mellem Ønslev og Sakskøbing på Lolland, hvor der blev foretaget en prøvestrækning med kalk-

stabilisering. Det foregik tilfredsstillende, og på baggrund af de positive erfaringer blev der udført kalkstabilisering på resten af Ønslev-Sakskøbing motorvejen. (Vejdirektoratet, 2008)

På Fyn er motorvejen mellem Odense og Ringe blevet kalkstabiliseret i 2005 (Vejdirektoratet, 2005b). Kalkstabilisering er også blevet benyttet i andre tilfælde i Danmark i nyere tid, både mindre veje, dæmninger og motorveje er blevet kalkstabiliseret.

Med vejdirektoratets nye udmelding (Vejdirektoratet, 2009), hvor der beskrives at kalkstabilisering bør udnyttes systematisk fremover, vil det sandsynligvis medføre at der bliver benyttet kalkstabilisering i større udstrækning end i dag.

1.2 KALKSTABILISERINGENS FORMÅL

Kalkstabilisering er, når brændt kalk iblandes en ler- eller siltholdig jordart for at opnå en bedre bæreevne i materialet. Kalkstabilisering af underbund med svag bæreevne kan medføre, at en blødbundsudskiftning bliver undgået, og derved spares ressourcer i form af tid, transport, materiale og økonomi. Ved lerholdige jordarter med almindelig bæreevne er det muligt at formindske koblingshøjden og derigennem spare ressourcer. Formålet med kalkstabilisering er derved at opnå besparelser på anlæg igennem denne alternative metode.

1.3 PROBLEMSTILLING

I dette afsnit fremgår projektgruppens problemstillinger. Problemstillingerne er valgt for at få en forståelse af teori og anvendelige metoder. Det er valgt at fokusere på følgende problemstillinger:

- Hvordan foregår en kalkstabilisering, og hvilke processer forekommer
- Hvordan indsamles og vurderes data omhandlende kalkstabilisering
- Hvordan omdannes teori og forsøgsdata til anvendelig praktisk metode

Efter denne indledning og fremstillingen af de problemstillinger projektet fokusere på, vil der i det efterfølgende kapitel, blive set nærmere på de teoretiske aspekter vedrørende kalkstabilisering.



2 TEORI

I dette kapitel vil de teoretiske aspekter omhandlende kalkstabilisering blive behandlet. Først bliver de tekniske omstændigheder vedrørende iblanding af kalken beskrevet. Dette bliver efterfulgt af den kemiske teori. Derefter bliver dimensioneringen af en vejkasse med kalkstabiliseret jord gennemgået, og afslutningsvis beskrives det økonomiske aspekt af kalkstabilisering.

2.1 BLANDE TEKNIKER

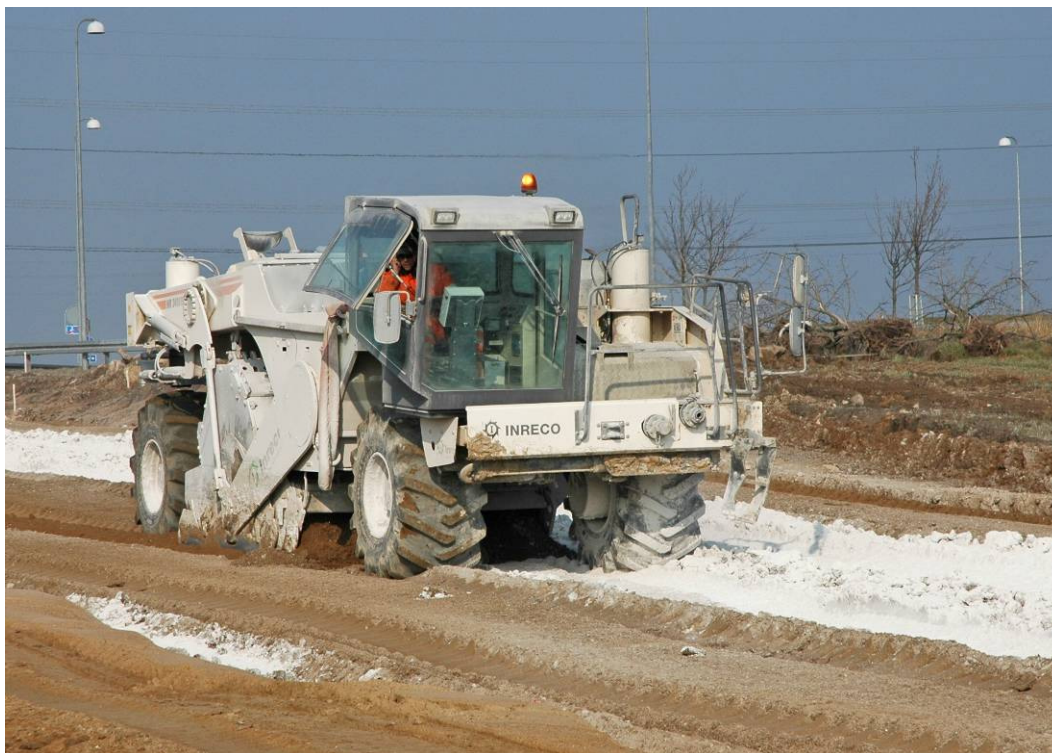
Stabilisering foregår i dag med specielt materiel, men i bund og grund kræver det en mekanisk omvæltning og blanding af en præcis mængde bindemiddel og jordmateriale. De to metoder og det materiel, der benyttes i dag, er beskrevet i de følgende afsnit.

2.1.1 MASSESTABILISERING

Ved massestabilisering opnås der en pladelignende konstruktion med en tykkelse og stivhed, som bestemmes af mængden af bindemiddel og hvilket materiel, der benyttes til stabiliseringen.

Det materiel, der bliver benyttet til massestabilisering, kan variere meget. En hydraulisk gravemaskine eller en mixer vil være optimal for stabiliseringen, men så længe materiellet kan blande bindemiddelet med jorden, vil det være muligt at stabilisere.

Med massestabilisering vha. en hydraulisk gravemaskine kan der opnås en dybde på 5 m. I sådanne tilfælde er gravemaskinen sat i forbindelse med en bindemiddelbeholder og blander bindemidlet med jorden. En kalkudlægger fordeler bindemidlet på overfladen, hvorefter det overkøres med en mixer, som ses på figur 1, den blander ned til en dybde på 50 cm. Udlæggeren kan fra førerhuset indstilles til at udlægge forskellige mængder bindemiddel. Før udlægning bør større sten være fjernet i hele den ønskede arbejdsdybde, hvilket oftest gøres med plov eller afgravning, ellers vil der være en øget risiko for, at mixeren går i stykker.



Figur 1: Mixer, som blander kalk med jorden

Det stabiliserede materiale kan derefter flyttes til en anden placering, hvis dette er nødvendigt, og derved kan der benyttes stabiliseret jord i større dybde end 50 cm. Efter stabiliseringen skal jorden komprimeres.

2.1.2 PÆLESTABILISERING

Pælestabilisering benyttes, hvor der skal stabiliseres i dybder ned til 25 m. Det foregår ved at føre et miksehoved til den ønskede dybde, således at jorden bliver omrørt og klargjort til stabilisering. Herefter indblæses en tør bindeblanding ofte i form af kalk og cement eller blot cement. Indblæsningen foregår under stadig omrøring af jorden og imens miksehovedet trækkes op. Pælens diameter er normalt mellem 50-90cm.

Under en samtale med afdelingsleder Holger Isaksen fra virksomheden Inrecos stabiliseringsafdeling, blev det blevet gjort klart, at pælestabilisering ikke bliver benyttet i Danmark i skrivende stund. Desuden blev det fremhævet, at pælestabilisering oftest bliver benyttet i forbindelse med havnebyggerier.



2.2 KEMISK TEORI

Ved stabilisering foregår en kemisk proces, der forårsager en ændring i opbygningen af det stabiliserede materiale og derigennem bl.a. en forøgelse af stivheden, en formindskelse af plasticiteten og en ændring af jordtypens opførsel. I dette kapitel vil den kemiske teori blive behandlet, hvilke materialer, der kan benyttes til stabilisering, samt jordarterne, der kan stabiliseres med brændt kalk.

2.2.1 STABILISERINGS MATERIALER

For at opnå større stivhed og bedre funderingsmæssige egenskaber i jordmaterialet benyttes stabiliseringsmaterialer. Projektet omhandler kalkstabilisering, men for at få en oversigt over andre alternativer er disse kort beskrevet.

Ved kalkstabilisering benyttes brændt kalk eller kalkhydrat. Pulveriseret kalksten, som normalt anvendes i landbruget til at justere pH-værdien i jorden, kan ikke forbedre jordens vejtekniske egenskaber. Fremstillingen af brændt kalk sker ved opvarmning af kalksten i en ovn til 900 °C. Det brændte kalk kan derefter læskes med vand for at opnå kalkhydrat i form af et hvidt, fint, tørt pulver. Stabilisering med kalk virker kun på lerholdige jordarter, som virker som puzzolan for kalk. Puzzolaner er et svært opløseligt produkt med bindemidleegenskaber (A. D. Herholdt et al., 1985). Stabilisering med kalk danner modifikation og solidificering. Modifikation er, hvor vand bliver optaget af kalken, og hvor varmeudviklingen øger fordampningen af vandet. Modifikationen medfører, at ler skifter fra at være et plastisk materiale til at være et mere kornet materiale grundet en koagulering af partiklerne (B. Thagesen et al., 1998). Solidificering opstår, når ler og kalk danner puzzolanske reaktioner og med tiden danner cementlignende produkter. Solidificering kræver dog tid, varme, vand og en fortsat høj pH værdi. (R. L. Parsons og J. P. Milburn, 2003)

Flyveaske er et biprodukt, der primært kommer fra kul-kraftværker. Flyveasken, der kan benyttes, er en selvcementerende klasse-c flyveaske. Den selvcementerende flyveaske reagerer med vand og producerer et cementmateriale. Fordi den indeholder sine egne puzzolaner, afhænger reaktionen ikke af jordmaterialet. For mange flyveasker forekommer reaktionerne hurtigt, og det er derfor en fordel at mixe og komprimere flyveasken så hurtig som muligt. (R. L. Parsons og J. P. Milburn, 2003)

Cement består primært af kalk og ler, brændt i en ovn. Cement indeholder dog også mange andre tilsætningsstoffer, primært jern. Det bruges oftest til at lave beton, ved iblanding af tilsslag i form af sand og grus. Da cement indeholder kalk vil der, som i kalkstabilisering, også opstå modificering af lermaterialer. (R. L. Parsons og J. P. Milburn, 2003)

Enzymatisk stabilisator består af store organiske molekyler, der er designet til at maksimere komprimeringen og til at forbedre jordens naturlige egenskaber for bæreevne. Desuden er den designet til at give jorden en større massefylde under komprimering og accelerere den kohæsive binding af jordpartiklerne. (R. L. Parsons og J. P. Milburn, 2003)

Fordelene for disse stabiliseringsmetoder ses bedst i forhold til hinanden. Tydelige forbedringer i stivheden er set ved kalk-, flyveaske- og cementstabilisering. Enzymatisk stabilisator viser kun moderat forbedringer af stivheden. I en undersøgelse (R. L. Parsons og J. P. Milburn, 2003) hvor siltet sand, silt, ler og fed ler blev udsat for alle fire stabiliseringsmetoder blev en forøgelse af elasticitetsmodulet observeret. Undersøgelsen blev foretaget i laboratorium, og blandingsmetoden kan være mindre præcis ved praktisk anvendelse, hvilket vil medføre en lavere stivhed end beskrevet i tabel 1.

Tabel 1: Stivhedsforøgelse ved forskellige stabiliseringsmetoder. (R. L. Parsons og J. P. Milburn, 2003)

Stabiliseringsmetode	Stivhedsforøgelse
Kalk	140% - 480%
Flyveaske	190% - 480%
Cement	440% - 1480%
Enzymatisk stabilisator	20% - 40%

Der vil under dette projekt blive fokuseret på kalk, hvorfor dette beskrives i dybden i det efterfølgende.

2.2.2 KALKTYPER

Kalk er en bjergart, der hovedsageligt består af calciumcarbonat (CaCO_3). Dette kan findes som mineralerne calcit eller argonit. Kalk, i form af kalksten, har ikke egenskaberne til andet end at ændre jordens pH-værdi. For at opnå førnævnte modificering og solidificering skal man benytte brændt kalk eller læsket kalk. Der vil blive fokuseret på brændt kalk og dets egenskaber, da dette er det første trin, hvor kalken får stabiliseringsegenskaber.

Brændt kalk, også kendt som calciumoxid (CaO), udtørre jorden ved læskning og egner sig bedst til våde jordarter. I Europa stabiliseres mere end 60 millioner m^3 jord om året i forbindelse med byggeri- og anlægsopgaver. 95% af dette er stabiliseret med brændt kalk, grundet vejrforholdene. (T. Overgaard, 2007)

Kalkhydrat, hydratkalk eller læsket kalk er alle betegnelser for blandingen af brændt kalk og vand (Ca(OH)_2). Kalkhydrat er stærkt ætsende, men ikke i så stor grad som brændt kalk, og ved brug opstår der ikke så store arbejdsmiljømæssige problemer, da væsken er nemmere at håndtere end det fine pulver, som brændt kalk består af. Læskning af kalken



er gjort på forhånd, hvilket medfører, at jordarten ikke bliver udtørret på samme måde som med brændt kalk. (T. Overgaard, 2007)

For at undgå at kalken støver og derigennem skaber arbejdsmiljømæssige problemer er der udviklet typer af brændt kalk, der ikke støver i samme udstrækning. Dette er opnået vha. tilsætning af olie til kalken. Olie er en væske der ikke reagerer med kalken, men stadig holder den samlet, hvorfor den er ideel, da reaktionerne i stedet kan forekomme i jorden. Olien er biologisk nedbrydelig og det tilsatte olie udgør kun 0,7% af kalkblandingen. (T. Overgaard, 2007)

2.2.3 LER

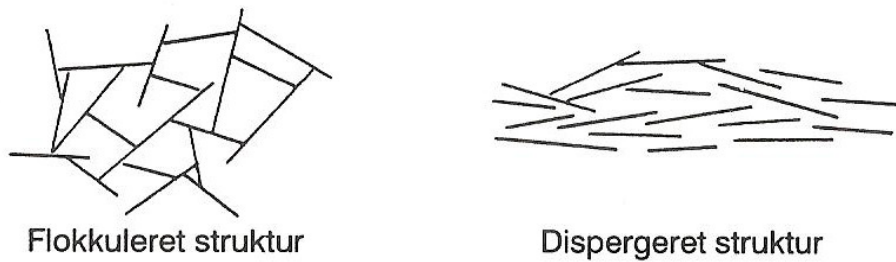
Ler og siltholdig jord er det eneste jordmateriale, der indeholder de nødvendige materialer, i form af aluminiumoxid (Al_2O_3) og siliciumdioxid (SiO_2), som kalken kan gå i forbindelse med, så der forekommer en kalkstabilisering. Lers forskydningsstyrke afhænger primært af de tiltrækkende kræfter mellem partiklerne, de såkaldte kohæsiionskræfter, og benævnes derfor kohæsiionsjord. Silt kan også stabiliseres med brændt eller læsket kalk, men der fokuseres i følgende på ler.

Ler består af mineraler, der er dannet ved kemisk omdannelse af silikatholdige mineraler eller ved udkrystallisering. Mineralerne er i form af mindre partikler. En ler indeholder vægtmæssig mere end 15% partikler med en diameter på 0,002mm eller mindre, hvilket vil sige partikler i ler-fraktionen. (N. K. Ovesen et al., 2007)

De fleste lerpartikler er i form af små flader eller plader, som indeholder flere krystallag. I disse krystallag er der bundet vand og ioner. Krystalgitteret bliver svagere, jo mere vand der bindes i det. Vand og ioner bundet på overfladen er negativt ladet. Kanterne af pladerne er positivt ladet og kan binde negative ioner. De positive og negative ladninger gør, at partiklerne både frastøder og tiltrækker hinanden. Ved en tilføjelse af flere ioner i porevandet vil de tiltrækkende kræfter øges mellem kanter og plader, og forskydningsstyrken vil øges. Dette sker, når jorden bliver kalkstabiliseret. (B. Thagesen et al., 1998)

Pladerne er bl.a. orienteret i forhold til de tiltrækkende og frastødende kræfter. Ved store tiltrækningskræfter er der en tendens til, at der er flokkuleret struktur, og ved store frastødningskræfter er der en tendens til, at der er dispergeret struktur, de to strukturer er skitseret på figur 2. Ved dispergeret struktur menes, at pladerne ligger i lag side mod side.

Ved flokkuleret struktur menes der, at pladerne ligger med kant mod side og derved bliver strukturen stivere. Flokkuleret struktur er stivest grundet de store tiltrækningskræfter. (B. Thagesen et al., 1998)



Figur 2: Principskitse af flokkuleret og dispergeret struktur (B. Thagesen et al., 1998)

Som tidligere nævnt afhænger lers forskydningsstyrke primært af de tiltrækkende kræfter mellem partiklerne, såkaldte kohæsiionskræfter, og benævnes derfor kohæsiionsjord. De stoffer, som er nødvendige i jorden for at opnå puzzolaniske reaktioner, er aluminiumoxid (Al_2O_3) og siliciumdioxid (SiO_2), hvilket ler består af.

Når lerpartiklernes gitter bliver svækket ved tilføjelse af vand, medfører det, at leret kvælder, udvides, og derigennem forårsager problemer for anlæg. Ler er også kendt for at kunne have plastiske egenskaber. Den plastiske tilstand karakteriseres ved at leret, når det udsættes for tryk, deformeres og fastholder den deformerede tilstand, når den ikke længere udsættes for tryk. Dette kan give årsag til sætningsskader. (N. K. Ovesen et al., 2007)

Lerholdige jordarter klassificeres som ler selvom, de kun indeholder 10-15% partikler fra lerfraktionen, fordi de stadig bliver så plastiske, at de kun kan kaldes ler. Ler inddeles efter sin plasticitets- og flydegrænse, henholdsvis $I_p\%$ og $w_L\%$, samt jordartens procentvis lerindhold. Opdelingen og navngivning fremgår af tabel 2.

Tabel 2: Navngivning af ler efter UCS systemet (N. K. Ovesen et al., 2007)

Dansk navn	$w_L\%$	$I_p\%$	Ler %	USC-system
Ler, meget fed	>80	>50		CV
Ler, fed	50-80	25-50		CH
Ler, ret fed	30-50	10-25		CM
Ler, siltet/sandet	<30	7-10	15-20	CL
Ler, stærkt siltet/sandet	<30	4-7	10-15	CL
Silt, stærkt leret		4-7	<10	ML
Siltet, leret/sandet		<4	<10	ML

USC systemet er de internationale navne på det opdelte ler og er medtaget da det giver bedre forståelse for de engelske kilder benyttet i dette projekt. Forkortelsen er beskrevet på tabel 3.



Tabel 3: USC-system forkortelser (N. K. Ovesen et al., 2007)

Forkortelse	Navn
CL	Low plasticity clay
CM	Medium plasticity clay
CH	High plasticity clay
CV	Very high plasticity clay
ML	Low plasticity silt
MH	High plasticity silt
OL	Low plasticity organic clay
OH	High plasticity organic clay

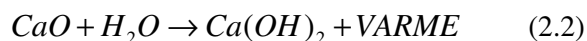
2.2.4 KEMISK REAKTION

I følgende bliver den kemiske reaktion beskrevet. Ved stabilisering sker der primært to kemiske reaktioner. Den første er kaldet modifikation og den anden kaldet solidificering. Begge giver lermaterialet en større forskydningsstyrke men har ellers forskellige indvirkning på materialet. De to reaktioner og deres indvirkning på materialet forklares i dette afsnit.

Kalksten, der brændes ved ca. 900 °C, omdannes til brændt kalk. Reaktionens opbygning kan ses nedenfor i formel (2.1).



Når brændt kalk tilføres et ler og/eller siltholdig jordmateriale, er det første der sker en modifikation. Modifikationen er når det brændte kalk, calciumoxid, (CaO), optager vand fra materialet, hvilket kaldes hydrering. Denne reaktion udvikler varme, hvilket forøger fordampningen og igen reducerer vandindholdet. Under hydreringen udvikles kalkhydrat (Ca(OH)₂) jf. formel (2.2). (T. Overgaard, 2007)



Modifikation omhandler ændringer i ionbindinger, der afhænger af spændingsrækken. I spændingsrækken er grundstofferne fordelt efter deres reaktionsvillighed. Således vil stoffer til venstre i spændingsrækken udskifte stoffer til højre. Spændingsrækken er for metaller: Li, Cs, K, Ba, Ca, Na, Mg, Al, Mn, Zn, Cr, Fe, Co, Ni, Sn, Pb, H, Cu, Hg, Ag, Pt, Au. Derfor vil Ca udskifte f.eks. Na i en binding.

Calciumioner udskifter natrium- og hydroxid-ioner, hhv. (Na⁺) og (OH⁻), i lermaterialet, hvilket forårsager, at de pladeformede lermineraller vil ændre sig, således at der vil opstå vinkler på hinanden (T. Overgaard, 2007). Lermaterialet flokkulerer, som nævnt i beskri-

velsen af ler. Derefter opfører materialet sig mere som et friktionsmateriale og er nemmere at bearbejde, derudover mister det også stor del af sin plasticitet (T. Overgaard, 2007). Ved ændring i ionerne i porevandet styrkes tiltrækningen mellem lerpartiklerne, der igen styrker stivheden (B. Thagesen et al., 1998).

Den anden store reaktion, solidificeringen, sker grundet den høje pH værdi i materialet, som kommer over en pH værdi på 12 (T. Overgaard, 2007). Ved blanding af jordarten og den brændte kalk vil kalken reagere med jordens vandindhold og danne calciumhydroxid. Dette gør blandingen stærkt basisk, hvilket vil medføre en geldannelse af omkringværende opløste materialer. Denne vil danne et svært opløseligt materiale med bindemiddelegenskaber (A. D. Herholdt et al., 1985). Under indblanding vil forøgelsen af koncentrationen af hydroxid-ioner medføre en forøget pH værdi, der leder til opløsningen af dele af lerminerallerne i form af aluminiumoxid (Al_2O_3) og siliciumdioxid (SiO_2). Disse frigjorte stoffer, vil interagere med calciumioner, og danne puzzolaniske reaktioner (R. N. Young og V. R. Ouhadi, 2007). Dette vil over tiden danne nåleformede cementmineraller, der giver en forøgelse af stivheden i materialet. Så længe pH værdien er høj, og der er lermi- neral til stede, vil denne udvikling fortsætte (T. Overgaard, 2007).

Ved Vejdirektoratets forsøg på motorvejstrækningen mellem Odense og Ringe er der blevet udarbejdet målinger af overflade E-modulet, E_0 , ved brug af minifaldlod. Målin- gerne viser at leren efter 32-37 dage, opnår en forøgelse på 3,5 – 10 gange det oprindelige E-modul. De største forøgelser er observeret ved de jorde, som ved udgangspunktet havde de mindste E-moduler. (Vejdirektoratet, 2005b)

2.3 DIMENSIONERING

I dette afsnit vil metoderne til at dimensionere en vejbefæstelse, hvor der benyttes kalk- stabilisering af underbunden, blive beskrevet.

Dimensionering af vejbefæstelsen ved kalkstabilisering foregår efter lidt andre metoder end normalt. Det er kun et lag af underbunden, der stabiliseres. Tilføjelsen af et ekstra lag i vej-kassen medfører, at simulationsprogrammet MMOPP ikke kan benyttes på samme måde, som man normalt gør.

Tilføjelsen af kalkstabilisering til et projekt medfører, at højden på bundsikringslaget og bærelaget kan formindskes. Dette medfører, at den nødvendige mængde af sand og grus reduceres. Derfor vil også de to materialer være en del af beskrivelsen.



2.3.1 DIMENSIONERINGSTYPER

Ved normale omstændigheder kan metoderne for dimensionering deles op i fire kategorier:

- Ingeniørmæssig erfaring
- Standardbefæstelser
- Empiriske metoder
- Analytiske/empiriske metoder

Ingeniørmæssig erfaring er altid brugbar også i forbindelse med de andre former for dimensionering (B. Thagesen et al., 1998). Da kalkstabilisering først er ved at blive genintroduceret i Danmark siden anvendelsen i 70'erne, er den ingeniørmæssige erfaring angående kalkstabilisering generelt manglende i landet. Primært er det entreprenørerne selv, der bestemmer og beregner, hvor meget kalk der skal i alt afhængig af vandindholdet og jordens art.

Standardbefæstelser er at finde ved opslag i katalog, hvoraf der fremgår befæstelsestykkelser i forhold til en grov inddeling af trafikbelastning og underbundsforhold. I Danmark bliver katalogmetoden, for sig selv, kun brugt for mindre vejanlæg (B. Thagesen et al., 1998). Ved veje der skal dimensioneres ved beregning, benyttes kataloget som udgangspunkt, men det bliver ikke brugt herefter. Kataloget kan findes i de danske vejregler og denne indeholder ingen standardbefæstelser for kalkstabilisering, hvorfor det ikke vil blive behandlet yderligere (Vejdirektoratet, 2007a).

De empiriske metoder tager bedre hensyn til variationer i forudsætningerne, hvilket gør dimensioneringen mere økonomisk. Empiriske metoder kan kun benyttes ved anlæg, der minder om tidligere anlæg, hvor de empiriske data er indhentet (B. Thagesen et al., 1998). Således skal trafikbelastning, klima, tilstandsgrænse, underbund samt befæstelsesmaterialer og -typer alle i en vis grad være lig et tidligere projekt. Der er dog ikke etableret mange anlæg med kalkstabilisering i nyere tid i Danmark. Da klima og underbund er specifik for Danmark, mangler empiriske metoder, og metoderne fra andre lande skal først testes under danske forhold, før de kan implementeres generelt.

De analytiske metoder er baseret på viden omkring materialernes evne til at optage påvirkninger, og på en viden om hvilke påvirkninger anlægget bliver udsat for (B. Thagesen et al., 1998). Gennem beregninger opnås forståelse for, hvor store lagene bør være i vej-kassen. Det er dog endnu ikke lykkedes at lave en fuldkommen analytisk metode til dimensionering af vejbefæstelser. Alle eksisterende metoder indeholder også elementer fra empiri for at få de nødvendige resultater (B. Thagesen et al., 1998). I Danmark benyttes den danske analytiske/empiriske metode, der vil blive beskrevet nedenfor.

2.3.2 ANALYTISK/EMPIRISK METODE

Ved dimensionering på større anlæg benyttes en analytisk/empirisk metode. Metoden er baseret på at sammenligne de spændinger, som vil befinde sig i jorden fra belastningen fra trafikken, med de empiriske data for materialers evne til at optage disse spændinger, hvilket vil sige materialernes elasticitetsmodul. Det antages, at materialerne er homogene, isotrope og lineært elastiske materialer (B. Thagesen et al., 1998).

Vejen skal bære trafikbelastningen uden, at der opstår strukturelle eller funktionelle problemer. En funktionel nedbrydning er, når plastiske deformationer akkumuleres og medfører en nedbrydning i form af sporkørring og lunger. Denne forekommer i de ubundne bærelag, såsom SG, BS og underbunden. En strukturel nedbrydning er, når asfalten revner.

Dimensioneringsperioden er ofte enten 10 eller 20 år, hvor der regnes en stigning i trafikmængden på 3-5 % pr. år. Selv ved en trafikstigning, der er anderledes end de 3-5 %, regnes der stadig med, at lastbiltrafikken stiger med denne procent. Lastbilerne, grundet deres store vægt, er primære årsag til funktionelle eller strukturelle problemer. (B. Thagesen et al., 1998)

Trafikbelastningen beskrives ofte som det dimensionsgivende hjultryk. Det dimensionsgivende hjultryk er afledt af de tunge køretøjer, da personbiler har en markant mindre effekt på vejen. Det dimensionsgivende hjultryk er målt i ækvivalente 10 tons akseltryk, N_{10} , som beregnes jf. vejregler (Vejdirektoratet, 2007a). Et estimat på trafikbelastningen kommer fra vejklassifikationen og fra analyse af de omkringliggende veje: årsdøgnstrafikken, ÅDT.

De klimatiske påvirkninger, der er en del af analysen, er temperatur og frost. Temperaturen har indvirkning, da asfalten bliver plastisk, når det udsættes for højere temperaturer, og er derfor ikke vigtigt mht. kalkstabilisering, da det er en ændring i underbunden. Frostpåvirkninger er et problem grundet underbundens dårlige bæreevne under optøning (B. Thagesen et al., 1998). Trods den er lav, benyttes bæreevnen under optøning ikke som den dimensionsgivende, men derimod benyttes en minimumstykkelse baseret på undergrundens frostfarlighed og den dimensionsgivende trafikbelastning. Minimumstykkelserne er opgivet i tabel 4. (B. Thagesen et al., 1998)



Tabel 4: Minimums befæstelsestykkelser på frostvivlsom og frostfarlig underbund (B. Thagesen et al., 1998)

N_{10}	Frostvivlsomt jord. Moræner og ler.	Frostfarlig jord. Silt og meget siltholdig jord med vandtilstrømning.
10^3	400 mm	500 mm
10^4	500 mm	700 mm
10^5	600 mm	800 mm
10^6	700 mm	900 mm

Den spænding, underbunden kan optage uden funktionelt brud, er baseret på underbundens E-modul og antallet af ækvivalente 10-tons akseltryk. Har et lag et højt E-modul har det også en større bæreevne, hvis lagtykkelsen ellers er den samme. Grundet trykspredningen er det nødvendigt at lag højere i vej-kassen har et større E-modul. (Vejdirektoratet, 2007a)

Ud fra tabel 5 ses E-modulet for forskellige underbundsmaterialer. Lertypernes E-modul er afhængig af vandindholdet.

Tabel 5: E-moduler for underbundsmaterialer (Vejdirektoratet, 2007a)

Jordart	E-modul (MPa)
Moræner, kalkfrit	10-20
Moræner, kalkholdigt	20-50
Moræner, fedt, kalkholdigt	10-30
Senglaciale ler- og siltaflejringer	5-15
Sand, fint (frostfarligt)	40-70
Sand	70-150
Grus	100-300

Trykket fra lastbilers dæk på overfladen af vejen spredes ned igennem vej-kassen. Der regnes med en lastbils dæk med et hjultryk på 0,06 ton, hvilket svarer til en halv standard aksel og 20 % stødtillæg. Hjultrykket bliver tilføjet vejoverfladen via dækket. Ved beregning antages en radius, a , på 0,165 m, hvilket er kommet ud fra hjultrykket og kontaktspændingen, der er afledt af lufttrykket i bildækket. (Vejdirektoratet, 2007a)

Samtlige lag samt underbunden antages at være lineært elastiske, isotrope og homogene. Under beregninger antages de også at have en uendelig udstrækning i det horisontale plan. Trykspændingen i dybden, z , under centrum af kontaktspændingen fra hjulet beregnes ved hjælp af Boussinesq's formel (2.3). (Vejdirektoratet, 2007a)

$$\sigma_z = \sigma_0 \left(1 - \left(1 + \left(\frac{a}{z} \right)^2 \right)^{-3/2} \right) \quad (2.3)$$

Hvor:

σ_0 = trykspændingen i dybden nul (0,7 MPa)

Det stabiliserede lag regnes for et separat lag under vej-kassen, da det har en specifik og begrænset laghøjde. Den højst tilladelige trykspænding på underbunden beregnes ud fra det totale antal ækvivalente 10-tons akseltryk i dimensioneringsperioden, N_{10} , underbunden E-modul, E, og en værdi α som er sat til 1,16 for materialer med et E-modul på mere end 160 MPa og 1,00 for værdier under. Beregningen fremgår af formel (2.4). (Vejdirektoratet, 2007a)

$$\sigma_{z, \text{till}} = 8,34 * N_{10}^{-0,307} * \left(\frac{E}{160} \right)^{\alpha} \quad (2.4)$$

Beregning af ubundne bærelag, såsom stabilgrus og bundsikring, beregnes også med ovennævnte formel. En anden formel benyttes til at beregne de bundne bærelags bæreevner, men denne er ikke umiddelbart relevant for kalkstabiliserede lag. Formlen til beregning af asfaltlag kan findes i vejregler (Vejdirektoratet, 2007a).

Med formel (2.3) og (2.4) kan vej-kassen dimensioneres også i situationer hvor kalkstabilisering er benyttet. Det stabiliserede lag vurderes som et hvert andet lag. I en dimensionering vælges først en opbygning af vej-kassen ud fra katalogmetoden for derefter at undersøge, om denne er for stærk eller svag. Derefter ændres lagtykkelserne imens der tages højde for den nødvendige dybde grundet frost, minimumslagtykkelse samt prisen på lagene. (B. Thagesen et al., 1998)

Programmet MMOPP kan benyttes til at udføre dimensioneringen nemmere og hurtigere, men programmet har ikke plads i sine input til det ekstra lag, som opstår ved kalkstabilisering. Derfor bør der tages til en kreativ beregningsmetode. Hvilket vil blive beskrevet i næste afsnit.

2.3.3 DIMENSIONERING MED MMOPP

Dimensioneringsprogrammet MMOPP er ikke lavet til at dimensionere vej-kasser i forbindelse med kalkstabilisering. Den normale metode til dimensionering med MMOPP er beskrevet i vejregler (Vejdirektoratet, 2007b).

Input parametre kan ses på figur 3.

Input parametre			
Materiale	Tykkelse	E-værdi	1693
Nyt lag	0	0	Gem
25 AB 160/220 40 GAB 0 70/100 GAB I 70/100	118	2169	Start
SG	170	300	Slut
Bundsikring	312	100	Analytisk
Frosttvivlsom		40	Optimer
Navn	T3-dimensionering - langsom kørsel	Længde	30
			Levetid, år
			Standard E
Hjul	1		
Antal pr. år	18300		
Vækst, %	0		Total.xls
Min hastighed	20	Max hastighed	40
Start årstid	5		Grafik.xls
År i simulering/dimensionering	10	Antal simuleringer	10
			Data.xls
Lag			
Vis resultater			

Figur 3: Input parametre i MMOPP

Til den uberørte underbund bruges rækken frosttvivlsom i tabel 4, som forbliver uændret. Bundsikring ændres til at have en tykkelse og E-modul, der svarer til det stabiliserede jord. Bundsikring flyttes derefter op. Undersøgelserne er alene fokuseret på dybdedimensionering, hvorfor de eneste resultater, der uddrages, er for sporkørring og overfladens jævnhedsmål, IRI. Asfaltens strukturelle nedbrydelse antages ikke afhængig af den funktionelle nedbrydelse, hvorfor denne kan laves separat. (C. Busch, 2008)

2.4 ØKONOMI

Kalkstabilisering giver mulighed for at formindske koblingshøjden på vejaksen og derigennem spare på grus og sand. Valget, om hvorvidt der skal foretages blødbundsudskift-

ning eller stabilisering, er ofte baseret på økonomiske overvejelser, og derfor er det vigtigt at undersøge, om blødbundsudskiftning eller stabilisering er billigst. Dette belyses i dette afsnit.

Informationer, der er samlet om emnet, er baseret på franske metoder og de nye erfaringer fra Vejdirektoratet. Vejdirektoratet har lavet en økonomisk undersøgelse på motorvejsanlæg og ikke på mindre betydende vejanlæg. Derfor må de resultater, der opnås, tages med det forbehold, at de er lavet på større anlæg og kun gælder for større anlæg.

2.4.1 BLØDBUNDSUDSKIFTNING

Ved blødbundsudskiftning forstås det, at den bløde underbund fjernes og udskiftes med sand. Dette medfører, at afstanden fra dækket til planum forøges, og derved at trykket kan spredes yderligere, til der opstår en spænding, som underbunden kan optage.

Blødbundsudskiftningen medfører følgende opgaver:

- Afgravning, transport og deponering af blødbund
- Udgravning, transport og indbygning af sand.

Disse opgaver er ligeledes nødvendige for kalkstabilisering, men i mindre grad. Beregning af prisen for en vejkasse følger forskellige metoder og vil blive beskrevet i forhold til kalkstabilisering ud fra de franske økonomiske metoder.

2.4.2 KALKSTABILISERING

Kalkstabiliseringen formindsker koblingshøjden, da E-modulet stiger og derigennem formindsker forbruget af sand og grus. En af grundene til at det muligvis kan være økonomisk rentabelt at benytte kalkstabilisering, er den lille mængde materiale, der skal benyttes. For ca. 1-4 % brændt kalk kan underbunden stabiliseres. Dette kan gøres i store dybder ved forskellige former for kalkstabilisering, men benyttes oftest i 40cm dybde. Ved lerarter med meget små E-moduler, er der tendens til større styrkeforøgelse. Disse lerarter skulle ved blød bund udskiftes i større dybde, for at opnå samme styrkeforøgelsen. (C. Busch, 2008)

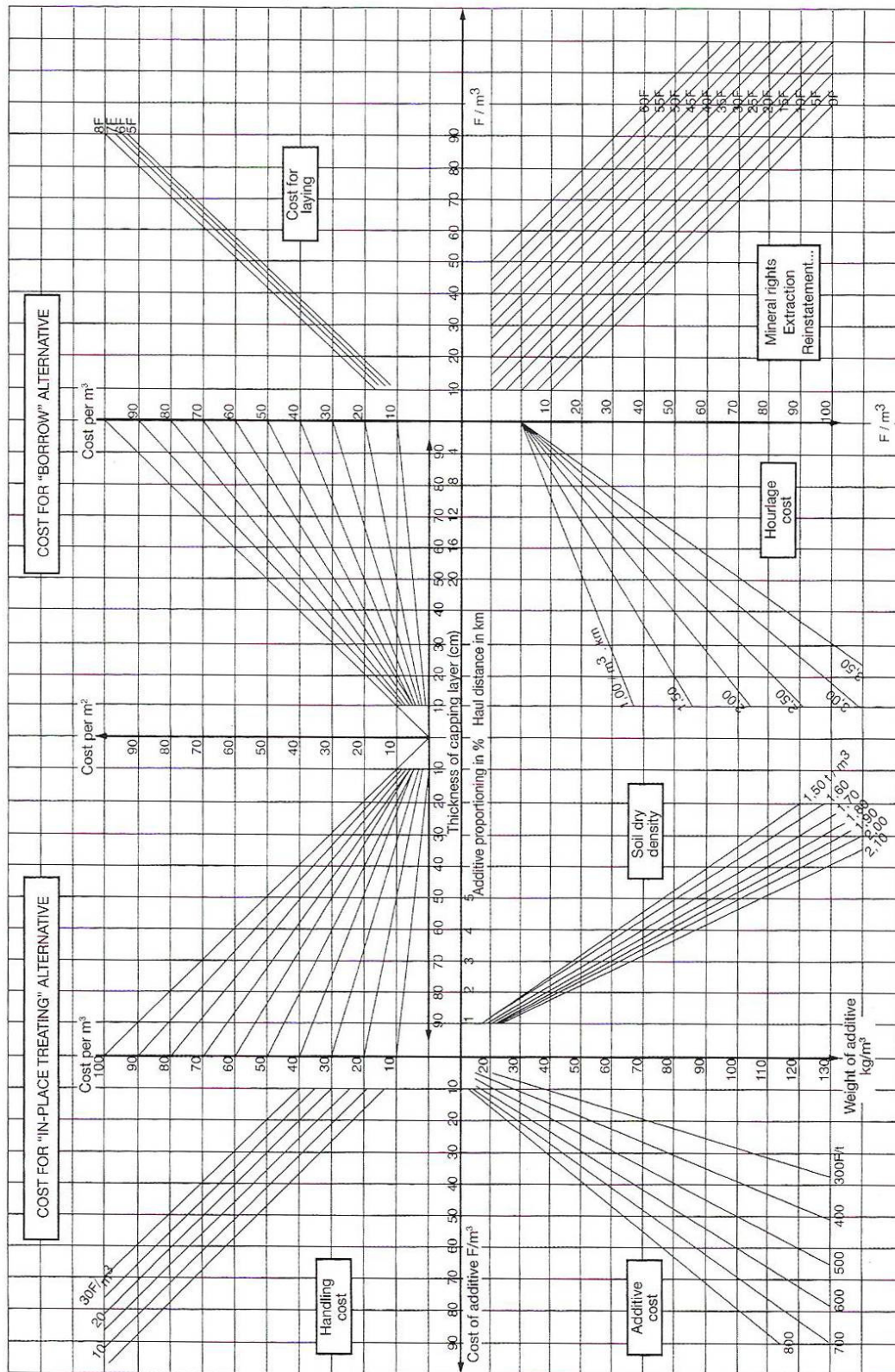
Normalt ved et motorvejsprojekt benyttes ca. 25 cm asfalt og ca. 75 cm grus, men ved indblanding af blot 1 % kalk kan der spares 30 % grus, hvilket kan give besparelser i millionklassen (Vejdirektoratet, 2009). På forsøgsstrækninger er der blevet beregnet besparelser på ca. en million per kilometer motorvej (Vejdirektoratet, 2009).



2.4.3 DEN FRANSKE BEREGNINGSMETODE

Andre lande har benyttet kalkstabilisering i større grad end Danmark og er længere i udviklingen af økonomiske beregningsmetoder. Den franske økonomiske beregningsmetode er en enkel måde at få et indblik i, hvad der er billigst. Den franske metode baserer sig på et nomogram, hvor prisen kan aflæses ud fra forskellige faktorer, såsom kalkprocent, pris på stabilisator, pris på stabilisering per kubikmeter og også tilsvarende værdier for blødbundsudskiftning. Faktorerne er skrevet på engelsk og kan ses i nomogrammet på figur 4. Nomogrammet forklares efterfølgende, en forklaring kan også ses på figur 5.

Metoden er baseret på franske forhold og kan derfor ikke umiddelbart bruges uden former for verificering i forhold til danske metoder, men vurderes at være en god metode for sammenligning af priser, hvis der er adgang til priser og mængder. På trods af at kilden (LCPC, 2004) er fra efter at euroen blev indført i Frankrig, er der i nomogrammet blevet benyttet den tidligere franske valuta frank, F, for prisen. (LCPC, 2004)



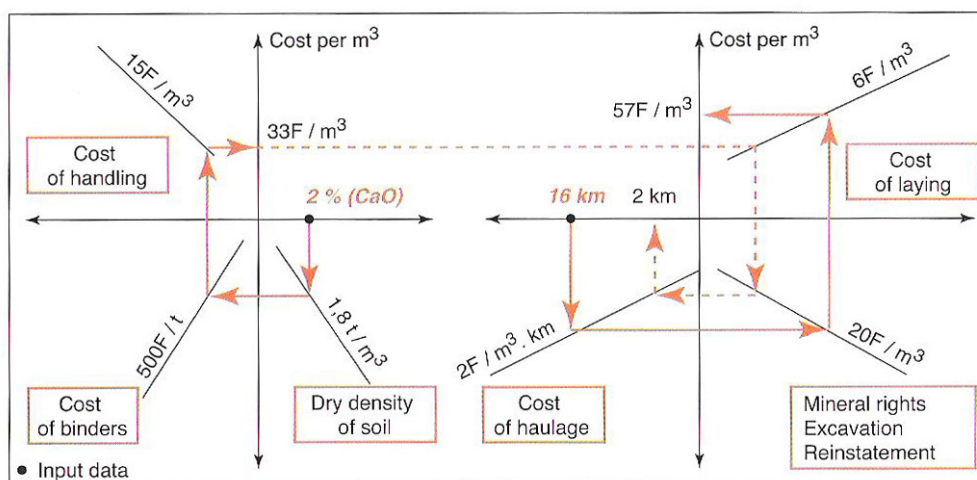
Figur 4: Vurdering af billigste metode (LCPC, 2004)



For at finde kalkstabiliseringsprisen benyttes den venstre halvdel af figur 4. En linje trækkes fra kalkindholdet ned til jordens tør densitet. En streg trækkes til venstre til stabilisatorens pris per ton og derefter op til prisen for ind bygning af stabilisator. Et eksempel på dette kan ses på figur 5. På figuren ses, at der startes med 2 % kalk, og tørdensiteten for jorden er $1,8 \text{ t/m}^3$. Prisen på bindemidlet er 500 F/t, og håndteringen er 15 F/m³. Dette kan aflæses til en værdi af 33 F/m³. Sandet skal transporteres over en afstand på 16 km, hvilket sammen med de andre faktorer giver en pris på 57 F/m³.

Til beregning af prisen på blødbundsudskiftning benyttes den højre halvdel af figur 4. Beregningen starter med afstanden fra grusgraven, hvor materialerne skal hentes, og en streg føres ned til prisen, for transport af materialet. Derefter føres linjen mod linjerne mod højre, der er prisen for prisen på selve gruset. Stregen føres op til prisen for at bygge grus og sand ind i vej-kassen og derefter til venstre for at finde den samlede pris per kubikmeter. Dette fremgår ligeledes af figur 5. (LCPC, 2004)

Det er forskellen på mængden af sand og grus ved de to metoder, der er interessant. Derfor vil det være forskellen i mængden af sand og grus, der skal undersøges, da der også benyttes sand og grus ved kalkstabilisering.



Figur 5: Forklaring på nomogram (LCPC, 2004)

På figur 5 ses ydermere en stiplede linje, denne viser at hvis man kender priserne på sand- og grusmaterialerne, kan man bestemme, hvad den maksimale afstand til en grusgrav må være, før dette er det billigste alternativ.

Selvom det er en enkel metode at udføre en sammenligning på, er der dog nogle mangler, der skal udbedres, inden at det kan benyttes til et retvisende estimat. For det første er den ikke blevet omregnet til dansk valuta. Derudover er det ikke sikkert, at priserne er opdelt på samme måde ved danske anlægsprojekter. Aflæsning er ikke altid præcis, og resultatet

må antages at være en estimering af prisen. Nomogrammet tager ikke højde for deponering af blødbund eller transport af denne.

Ved brug af den franske metode bør der være kendskab til alle enhedspriserne, som fremgår af nomogrammet. En dansk metode kunne nemt blive konverteret ved udskiftning af frank med den tilsvarende værdi i danske kroner. Nomogrammet har projektgruppen omdannet til Excel-arket, Omkostningsberegner.xls, som findes på bilags-cd'en. Denne har de samme krav og funktioner som det franske nomogram. Dvs. det har brug for de samme enhedspriser og kan finde prisen per kubikmeter for en vis kalkprocent samt prisen for blødbundsudskiftning. Ligeledes kan Excel-arket finde den nødvendige afstand til grusgraven før at en blødbundsudskiftning er økonomisk rentabel.

I det næste afsnit vil kalkstabiliseringens praktiske, teoretiske og økonomiske fordele og ulemper blive belyst for at give en opsummering og vurdering af kalkstabilisering til vej anlæg.

2.5 FORDELE OG ULEMPER

Kalkstabilisering er anderledes end almindelig blødbundsudskiftning på mange måder. Disse måder ønskes belyst for at give et godt vurderingsgrundlag for at træffe et valg mellem de to metoder. I løbet af teoriafsnittet er det blevet undersøgt og vurderet, hvorledes kalkstabilisering benyttes i praksis, hvordan kalkstabilisering fungerer, og hvordan det økonomisk kan sammenlignes med alternativet, blødbundsudskiftning. I dette afsnit bliver fordelene og ulemperne fra disse afsnit opsummeret.

2.5.1 FORDELE

Kalkstabilisering kan med fordel benyttes i følgende tilfælde:

- Hvis jorden er uacceptabelt våd eller plastisk, da modificeringen formindsker vandindhold og plasticitet.
- Når forbedret bearbejdsomhed og komprimeringsegenskaber er nødvendige, da kalkstabilisering medfører, at ler bliver et granuleret materiale, der kan komprimeres og bearbejdes bedre.
- Når større jordstyrke og stabilitet er et krav, da stabilisering forbedrer forskydningsstyrken.
- Når det er nødvendigt at køre jord til deponi uden for området, da det meste jord kan genanvendes efter det er blevet stabiliseret, hvilket medfører en formindsket transport af jord fra anlægspladsen.
- Når det er nødvendigt, at in situ jord skal benyttes som vejbase, da in situ jorden bliver væsentligt stærkere.



- Når interimsveje skal benyttes, da disse bliver væsentlige stærkere. Med den formindskede plasticitet opnås mindre pløre på interimsvejene.
- Når det er nødvendigt at indkapsle besværlige materialer.
- I projektområder, der er påvirket af dårligt vejr, er det også en fordel, da kalken både formindsker jordens plasticitet og vandindhold.

(C. D. F. Rogers et al., 1996)

Kalkstabilisering har rig mulighed for at bruges på forskellige typer projekter, hvilket fremgår af de to metoder massestabilisering og pælestabilisering. Dette giver kalkstabilisering bred anvendelse inden for anlægssektoren.

Det er vigtigt at bemærke, at så længe pH-værdien er høj, forøges styrken i solidificeringsfasen. En vej, der i sig selv bliver stærkere med tiden, er en fordel.

Økonomisk har det vist sig, at der er mulighed for at spare penge ved benyttelse af kalkstabilisering. Der er udregnet besparelser på et tocifret millionbeløb på en udvidelse af en ti kilometer lang motorvejsstrækning. (Vejdirektoratet, 2009)

2.5.2 ULEMPER

Kalkstabilisering har visse ulemper, der er vigtige at have klarhed over, således at der ikke opstår fejl eller sikkerhedsmæssige problemer grundet fejlagtig brug af materialet.

Det første, som er vigtigt at pointere, er, at brændt kalk og læsket kalk er stærke baser. Derfor er det også vigtigt at beskytte sig både med åndedrætsværn, sikkerhedsbriller og handsker. Især ved kalktyper, der støver, er det vigtigt, da den stærke base har større risiko for at komme i kontakt med hud, øjne eller komme ned i lungerne. Ved mindre støvende kalktyper er det mindre vigtigt.

En kemisk proces, som har en mulig negativ indvirkning på stivheden af det stabiliserede materiale, er i de tilfælde hvor, ler indeholder sulfat. Denne kombination skaber et udvidende krystallisk mineral kaldet ettringite (R. N. Young og V. R. Ouhadi, 2007). Ettringitesudvidelse kan skabe revner og skader i selv cement. Derfor skal man være forsigtig, når man stabiliserer i sulfatholdige lerarter, da ettringite kan forårsage svækkelse.

Der skal ligeledes tages højde for surheden af jorden, da et surt materiale optager noget af pH-værdien, der er så vigtigt for at opnå solidificering. Dette kan imidlertid overkommes ved at tilsætte mere kalk.

På trods af at materialet opnår ligheder med et granulært materialet er den kalkstabiliserende jord ikke frostsikker og bør derfor indbygges i frostfri dybde.

Kalkstabilisering er desuden en metode, som ikke er udbredt endnu, derfor er der ikke så mange firmaer, der kan udføre kalkstabilisering endnu. Dette er primært grundet den begrænsede mængde ordentlig materiel i Danmark, der igen må stamme fra en begrænset efterspørgsel. Hvis der opstår bredere fokus på kalkstabiliseringens fordele, vil det være muligt at udvide området betydeligt.

Efter gennemgangen af de teoretiske aspekter af områder, vil det næste kapitel fokusere på de forsøgsmetoder som benyttes inden for området.



3 FORSØGSMETODER

I dette afsnit vil nogle af de forsøgsmetoder som benyttes til at bestemme styrke- og deformationsegenskaberne for den kalkstabiliserede jord blive beskrevet. Nogle af disse forsøgsmetoder er laboratorieforsøg mens andre er markforsøg.

For at bestemme jordens styrke ønskes E-modulet bestemt. Dette kan i laboratoriet bl.a. gøres ved at udføre et CBR forsøg. For at kontrollere jordens styrke i marken, benyttes bl.a. forsøg med minifaldlod eller troxler. I dette kapitel vil disse forsøgsmetoder blive beskrevet med fokus på CBR-forsøg.

3.1 CBR-FORSØG

CBR-forsøg (California Bearing Ratio) er en forsøgsmetode som bestemmer jordens relative styrke som skal benyttes når den nødvendige tykkelse af vejbefæstelsen skal bestemmes. Forsøgene følger (Dansk standard, 2004b).

Forsøgsmetoden er empirisk. Jordens bæreevne bestemmes ved at registrere størrelsen på den kraft som skal benyttes for at presse et stempel ned i materialet med konstant hastighed til en bestemt dybde. Apparatet kan ses på figur 6. Denne måling bliver sammenlignet med resultaterne fra et tilsvarende forsøg med et tilsvarende standardmateriale. Prøvens resultater opgives i procent af kraften af standartmaterialet. (NCC, 2001)



Figur 6: CBR-presse, cylinderen indeholder en sammenstampet prøve, et stempel penetrerer prøven med en konstant hastighed. CBR-pressen registrerer den kraft der skal benyttes.

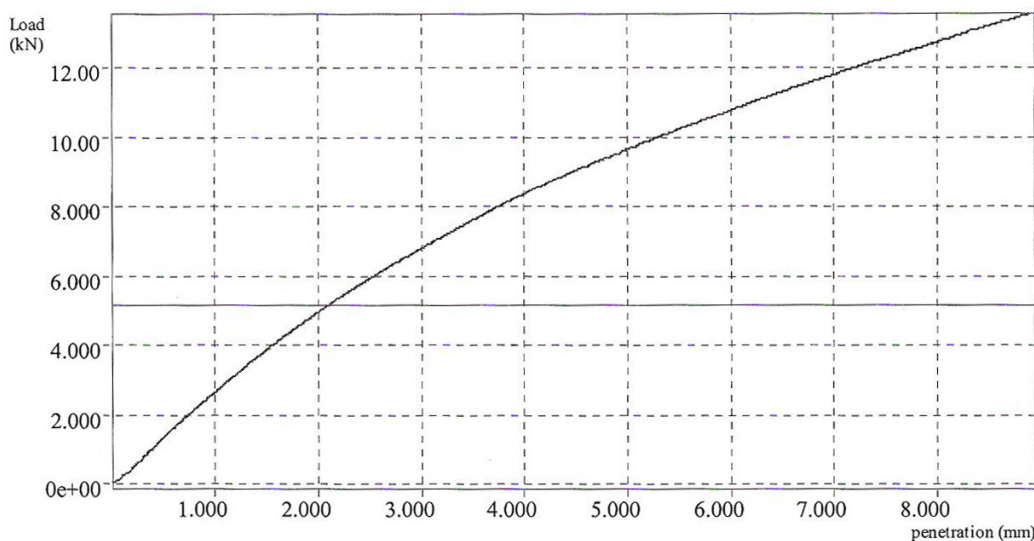
På figur 6 ses selve CBR-pressen, som benyttes til CBR-forsøget. Apparatet programmeres til at flytte stemplet 1,27 mm/min, den kraft som skal benyttes for at flytte stemplet registreres. Registreringen af kraften begynder først efter at prøven har optaget en indledende belastning på 44 N. Til et forsøg skal benyttes en jordprøve på ca. 5500 g, cylinderen til jordprøven har en diameter på 15 cm. Stemplet som penetrere jordprøven er en cylinder med en diameter på 49,64 mm. (Dansk standard, 2004b)

Inden cylinderen anbringes i CBR-pressen bliver prøven stampet sammen. På figur 7 ses det apparat som benyttes til at sammenstampe jordprøven. Jordprøven sammenstemples af tre omgange, hvor hver tredjedel af prøven stemples 56 gange. Ved en optimal indstampning af jordprøven, bliver de tre lag i prøven den samme tykkelse, samtidig forsøges det at opnå en overhøjde på 5 mm på prøven.



Figur 7: Stamper, stamper prøven 3 gange med 56 slag.

Når værdier fra CBR-førsøget er kendt, optegnes forholdet mellem stemplets penetration og den anvendte kraft, penetrationen tegnes ud af x-aksen og kraften op af y-aksen. På figur 8 ses et eksempel på en sådan graf.



Figur 8: Sammenhæng mellem penetration og kraft

På figur 8 ses et eksempel på plotningen af sammenhængen mellem penetration og kraften. Kraften aflæses ved en penetration på henholdsvis 2,5 og 5 mm, svarende til 0,1 og 0,2 tommer, og de to værdier divideres med standart værdierne på henholdsvis 13,2 kN og 20 kN og multipliceres med 100. Dette kan opstilles jf. formel (3.1) og formel (3.2). (NCC, 2001)

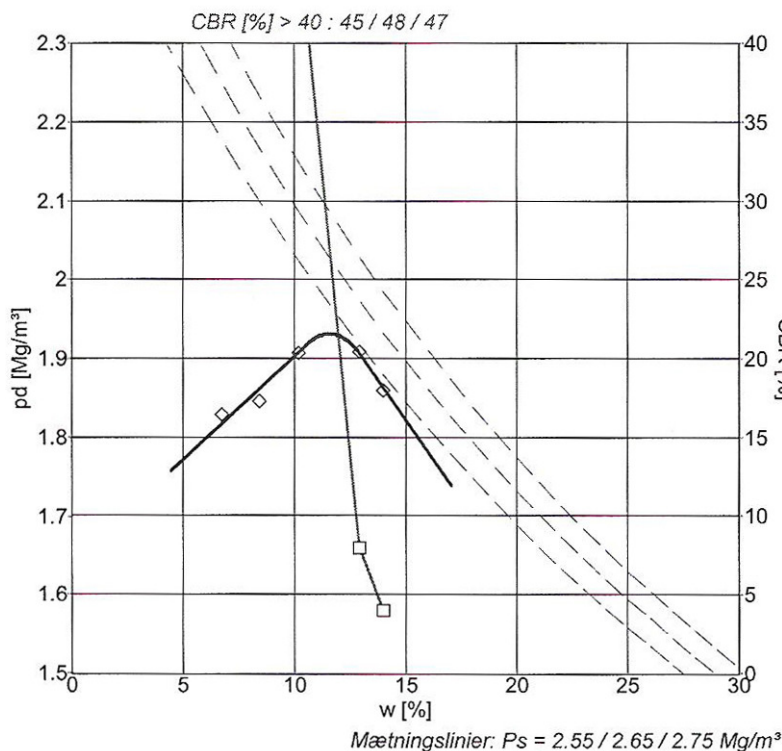
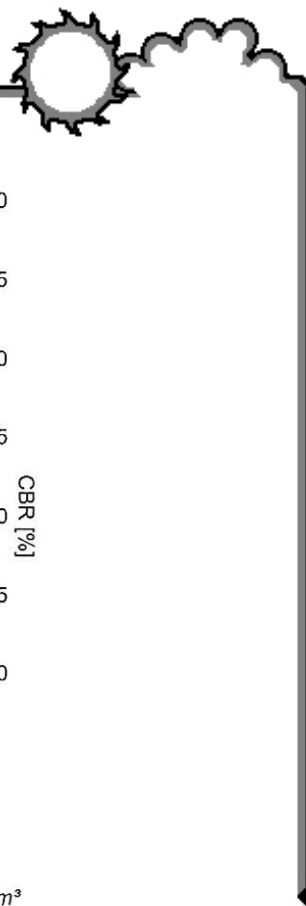
$$CBR_{2,5} = \frac{kraft_{2,5}}{13,2} * 100 \quad (3.1)$$

$$CBR_5 = \frac{kraft_5}{20} * 100 \quad (3.2)$$

Den største af de to beregnede værdier er materialets CBR-værdi. (Dansk standart, 2004b)

Eksempelvis er kræfterne fra figur 8 henholdsvis 5,94 og 9,659, udtaget fra logningen. $CBR_{2,5}$ kan beregnes til 45 og CBR_5 kan beregnes til 48. Dermed angiver CBR_5 CBR-værdien for denne prøve.

Ved at lave en forsøgsrække med et bestemt kalkindhold og varierende vandindhold, kan indvirkningen af vandet bestemmes. På figur 9 ses et eksempel på en plotning af sammenhængen mellem CBR-værdierne og vandindholdet. Ydermere er det optimale vandindhold også afbillede på figur 9.



Figur 9: Plotning af CBR-værdier ved en bestemt kalk % med forskellige vandindhold. CBR-værdier over 40 er angivet ovenfor grafen. Punkterne på CBR-kurven er tilsvarende de punkter som angiver densiteten på den buede kurve, densiteten aflæses til venstre men CBR-værdierne aflæses til højre. De stiplede kurver angiver den maksimale densitet med henholdsvis 10, 5 og 0 % luft.

Denne forsøgsmetode kan bl.a. benyttes til at undersøge hvor stor en indvirkning f.eks. kalkindholdet har på en jordarts bæreevne, ved forskellige vandindhold. Ved et givent vejprojekt hvor der skal forekommer kalkstabilisering, kan den optimale mængde af kalk, i forhold til det naturlige vandindhold bestemmes ved en række CBR-forsøg. Det vil som minimum tage 3-4 dage.

Som en grov tilnærmelse er der en empirisk sammenhæng mellem jordens E-modul og CBR-værdi jf. formel (3.3).

$$E = 10 * \text{CBR (MPa)} \quad (3.3)$$

Vejdirektoratet havde på motorvejen mellem Odense og Ringe, som mål at undersøge om jorden, ved brug af kalkstabiliserings, kunne opnå et E-modul på minimum 40 MPa. (Vejdirektoratet, 2005b) Det er op til bygherre at bestemme hvilket E-modul jorden efter kalkstabiliseringen som minimum skal have, dette gøres som beskrevet afsnit 2.3.

3.2 MINIFALDLOD - LWD

Når opbygningen af en vej dimensioneres gøres dette normalt ved at bestemme jord arten, og derfra bestemme bundlages styrke i form af E-modul. Ved en dimensionering stilles der krav til hvor høj en styrke den stabiliserede jord skal have. Til at undersøge om den ønskede styrke er opnået, kan et minifaldlod benyttes (LWD). En udgave af minifaldloddet kan ses på figur 10. Et traditionelt faldlod (FWD) kan også benyttes, men i denne rapport fokuseres på LWD, da dette apparat ikke har nogle begrænsninger på de jordlag som kalkstabiliseres, desuden er LWD'en lettere at transportere.

Metoden til at finde jordens E-modul via minifaldlod beskrives ud fra vejdirektoratets provisoriske prøvemethode "Måling af overflademodul med minifaldlod" (Vejdirektoratet, 2007c).



Figur 10: Minifaldlod, PRIMA 100. (Prima, 2009)

Apparatet på figur 10 fungerer ved at loddet slippes fra en given højde som kan varieres, når loddet rammer foden måler en vejecelle og en geofon (deflektionssensor) de reaktioner som loddet udsætter underlaget for. Alt efter hvilket materiale målingerne udføres på kan dele af apparatet udskiftes, ved fx grus bærelag kan loddet tilføres ekstra vægt eller bundpladens radius formindskes. Ved bløde underbunde kan en lavere faldhøjde benyttes. (Vejdirektoratet, 2007c)



Overflade E-modulet kan beregnes ved hjælp af formel (3.4).

$$E_0 = \frac{f * (1 - \nu^2) * \sigma * a}{d_0} \quad (3.4)$$

Hvor:

E_0 - Overflade E-modul

f - Spændingsfordelingsfaktorer

ν - Poissons forhold

a - Radius af bundplade

σ - Spænding

d_0 - centerdeflektionen

f er normalt 2 for ensformigt belastet råjord, ν er sat til 0,5, a er normalt 0,150 m og minifaldloddet måler de sidste to ubekendte. Dermed kan det pågældende lags overflade E-modul beregnes. (P.E. Jakobsen, 2007)

Det er vigtigt at vide om en overflade har det E-modul, som det i virkeligheden er blevet dimensioneret efter. Hvis E-modulet er større medfører det blot at levetiden er længere end beregninger viste, dog kunne der have været sparet på resurserne i forbindelse med udførelsen. Hvis E-modulet er mindre end hvad der var grundlaget for dimensioneringen, vil det medføre at levetiden kan være betydelig formindsket i forhold til dimensioneringen.

Minifaldlod kan benyttes til at måle råjordens bæreevne. Problemet er dog at vejreglerne ikke stiller nogle krav til jordens bæreevne, vejreglerne stiller kun krav til komprimeringsgraden. Minifaldlod kan dog benyttes til at undersøge at den kalkstabiliserede jord har det overflademodul som en eventuel kontrakt har foreskrevet. Ved at benytte en kombination af målinger med minifaldlod og isotopsonde, bør der kunne opnås sikkerhed for at materialerne lever op til kravene. Til bestemmelse af komprimeringsgraden kan man benytte isotopmetoden. (P.E. Jakobsen, 2007)

3.3 ISOTOPMETODEN – TROXLER

Denne forsøgsmetode bliver hovedsagelig brugt til at kontrollere, at opbygningen af vej-kassen overholder de krav til komprimeringsgraden som måtte være gældende for det enkelte jordlag. På figur 11 ses en isotopmåler i brug.



Figur 11. Bestemmelse af komprimeringsgraden ved brug af isotopmetoden.

Apparatet måler ved hjælp af radioaktive isotoper henholdsvis jordens tæthed og vandindhold. Dette sker ved at den radioaktive stråling bliver bremses og reflekteret af jorden, og dette registreres af apparatet. Apparatets spyd skal placeres halvvejs nede i det jordlag hvor man ønsker at bestemme forholdene for. (NCC, 2001)

Denne metode bruges til at kontrollere at de stabiliserede lag har opnået den nødvendige styrke efter de er blevet komprimeret. Ved at sammenligne komprimeringen af jordlaget med den i laboratoriet opnået reference værdi. (NCC, 2001)

3.4 OPSUMMERING

Som beskrevet i dette afsnit er der flere forskellige metoder til at kontrollere at den kalkstabiliserede jord har opnået de ønskede egenskaber. For både isotopmetoden og minifaldloddet gælder det, at det er metoder, som benyttes til at kontrollere egenskaberne efter udførelsen af stabiliseringen. Disse to forsøgsmetoder vil sammen kunne give et nuanceret billede af om jorden har de ønskede egenskaber.

CBR-forsøget udmærker sig ved at entreprenøren inden udførelsen af en evt. stabilisering, kan opnå kendskab til hvad hvor stor en kalkmængde der skal tilsættes, i forhold til det naturlige vandindhold, og dermed have en mulighed for at optimere forbruget af kalk. Forsøgsmetoden kan også benyttes til at undersøge forholdet mellem vandindhold og



kalkmængde på et mere generelt niveau, som det er tilfældet med dette projekt. I det næste afsnit vil de jordprøver som projektgruppen har udtaget blive beskrevet.



3 FORSØGSMETODER



4 BESKRIVELSE AF PRØVERNE

I dette kapitel vil de jordprøver som er benyttet i projektet blive beskrevet. Først beskrives hvilke overvejelse projektgruppen har haft i forbindelse med udvælgelsen af jordprøverne. Efterfølgende er selve indsamlingsprocessen beskrevet.

4.1 VALG AF PRØVER

Det er valgt at lave forsøg på tre forskellige typer ler, der er typiske for den danske jord. Størrelsen på prøverne, 60kg, forhindre undersøgelse af flere ler-arter, da større volumen ikke kan placeres i den personbil, der var tilgængelig som transportmiddel.

Der er forsøgt at indsamle følgende lertyper til forsøgene:

- En fed ler, der ville være særdeles uegnet til fundering, da denne er yderst plastisk.
- En moræneler. Ler opblandet med sand og grus i mindre omfang.
- En sandet og gruset moræneler.

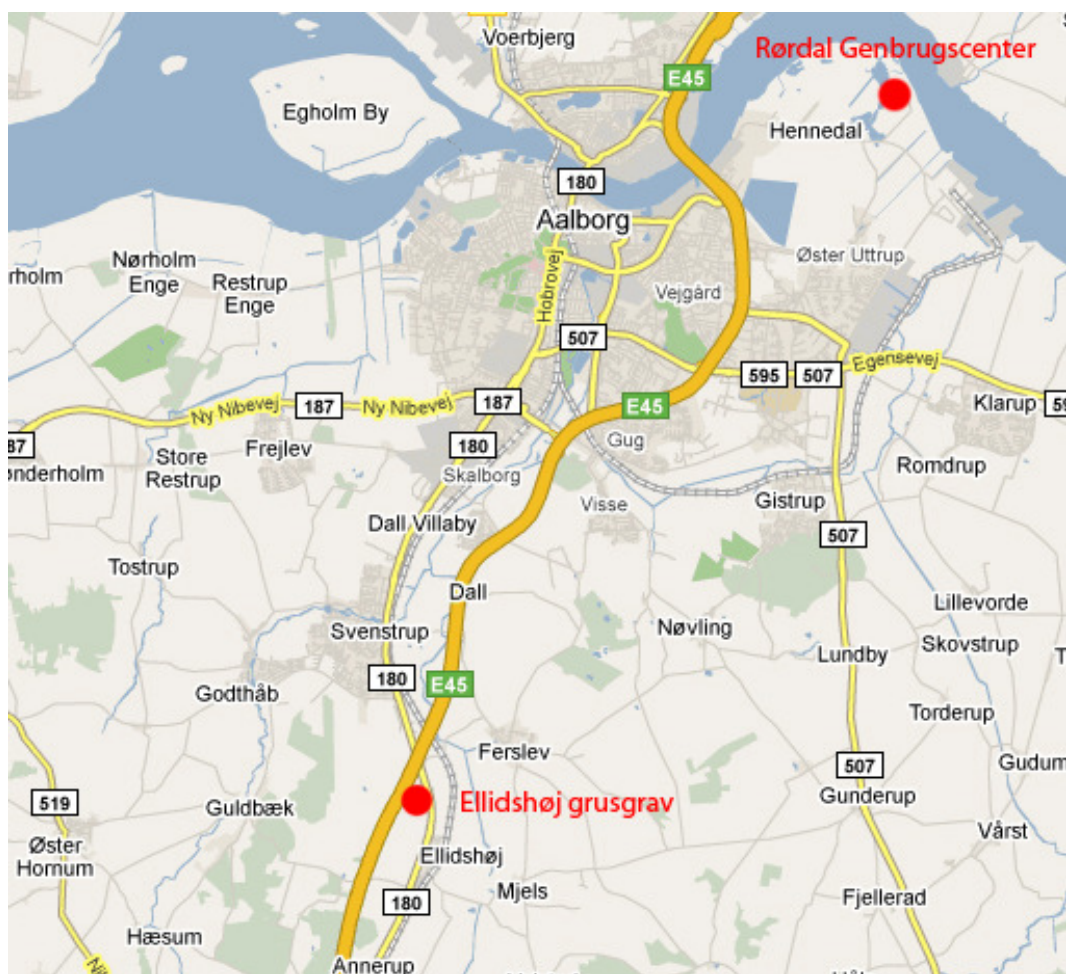
Disse prøver vil i rapport blive omtalt som henholdsvis prøve 1, 2 og 3. Prøverne er valgt ud fra ideen om at forskellige typer ler jord giver forskellige data og derigennem en bedre forståelse for stabilisering ved forskellige lertyper.

Ler typer med høj grus og sand indhold har normalt en større bæreevne end jordarter hovedsageligt bestående af ler. Dette er afhængigt af vandprocenten af materialet.

4.2 INDHENTNING AF PRØVER

Før indhentning af prøver blev der opstillet kriterier for dette. Prøverne skulle indhentes kort tid før klassificeringsforsøgene for at undgå at de tørrede ud. De skulle indhentes ved brug af mandkraft, skovl og spand, transporteres i personbil og være af de tre førnævnte lertyper.

De første to prøver blev hentet ved Rørdals genbrugscenter og den sidste prøve blev indhentet i Ellidshøj grusgrav. Placeringerne fremgår af figur 12.



Figur 12: Prøverne er indhentet på de markerede placeringer.

Ved Rørdal genbrugscenter blev prøve 1 og 2 gravet op. En gravemaskine gravede toppen af en bakke, hvorefter prøverne blev indhentet. Prøve 1, den fede ler, blev taget fra en halv meters dybde og prøve 2 blev taget fra en meters dybde. Prøverne blev placeret i lukkede spande for at forhindre udtørring. Prøverne er tidligere blevet transporteret til Rørdal genbrugscenter fra forskellige anlæg og er dermed ikke in situ prøver. Optagningen af prøve 1 kan ses på figur 13.



Figur 13: Udtagning af prøve 1

Som det ses på figur 13 blev prøve 1 og 2 lidt forurenet, som konsekvens af at det ikke var intaktprøver. Prøverne var blevet blandet med andre materialer, primært top jord.

Ved JT grusgrav var der fundet ler under udgravningen. Her blev prøve 3, den sandede og grusede moræneler, fundet på flere meters dybde. Prøven blev placeret i lukkede spande. Eftersom prøven kommer direkte fra en udgravning, er den ikke omrørt som prøverne fra Rørdal.

4 BESKRIVELSE AF PRØVERNE

Af alle prøverne blev der udtaget en delprøve, til brug til klassificeringsforsøgene. På figur 14 ses udtagning af en af disse prøver. Prøverne vejede mellem 1,5 og 2,5 kg.



Figur 14: Udtagning af delprøve til klassificeringsforsøg

Efter beskrivelsen af indsamlingen af prøverne vil der i det efterfølgende kapitel blive fokuseret på resultaterne, fra de klassificeringsforsøg, som er udført på prøverne.



5 KLASSIFICERINGSFORSØG

I dette kapitel vil resultaterne fra klassificeringsforsøgene blive behandlet. Fremgangsmåden for forsøgene er beskrevet i bilag A. Beregningerne fra klassificeringsforsøgene findes på bilags-cd'en.

Først vil konsistensgrænserne for forsøgene blive præsenteret, herefter vil resultaterne af sigte- og hydrometeranalyserne blive gennemgået. Derefter vil glødetab og kalkindhold blive gennemgået for de udtagne prøver. Til sidst vil der blive opsummeret på alle resultaterne for de gennemførte klassificeringsforsøg for hver prøve.

5.1 KONSISTENSGRÆNSER

I nærværende afsnit vil resultaterne fra forsøgene angående bestemmelse af konsistensgrænserne blive gennemgået. Først skal henholdsvis flydegrænsen, w_L , og plasticitetsgrænsen, w_p , bestemmes. Derefter kan plasticitetsindekset, I_p , bestemmes. Selve fremgangsmåden er beskrevet i bilag A.

I tabel 6 er resultaterne fra forsøgene oplistet.

Tabel 6: Resultater fra bestemmelse af flyde- og plasticitetsgrænser, samt plasticitetsindekset

	Prøve 1	Prøve 2	Prøve 3
w_L	62 %	28 %	20 %
w_p	21 %	22 %	17 %
I_p	41 %	6 %	3 %

Projektgruppen er efter forsøgenes gennemførelse blevet gjort opmærksom på, at der er begået visse fejl i forbindelse med udførelsen af disse forsøg. Disse fejl medfører, at vandprocenten ved flydegrænsen, w_L , er lavere end den reelle flydegrænse. Samtidig er vandprocenten ved plasticitetsgrænsen, w_p , højere end den reelle vandprocent ved prøve 2 og specielt prøve 3. Disse fejl var ikke opstået, hvis de studerende havde haft større kendskab til udførelsen af forsøgene. Fejlene medfører, at I_p er mindre for alle prøver end det reelt ville være såfremt forsøgene havde været korrekt udførte. Disse fejl og deres konsekvenser er uddybet i bilag A.

I tabel 7 ses en inddeling af jordarter efter plasticitetsindeks.

Tabel 7: Fordeling af jordarter i forhold til $w_L\%$, $I_p\%$ og $ler\%$ (N. K. Ovesen et al., 2007)

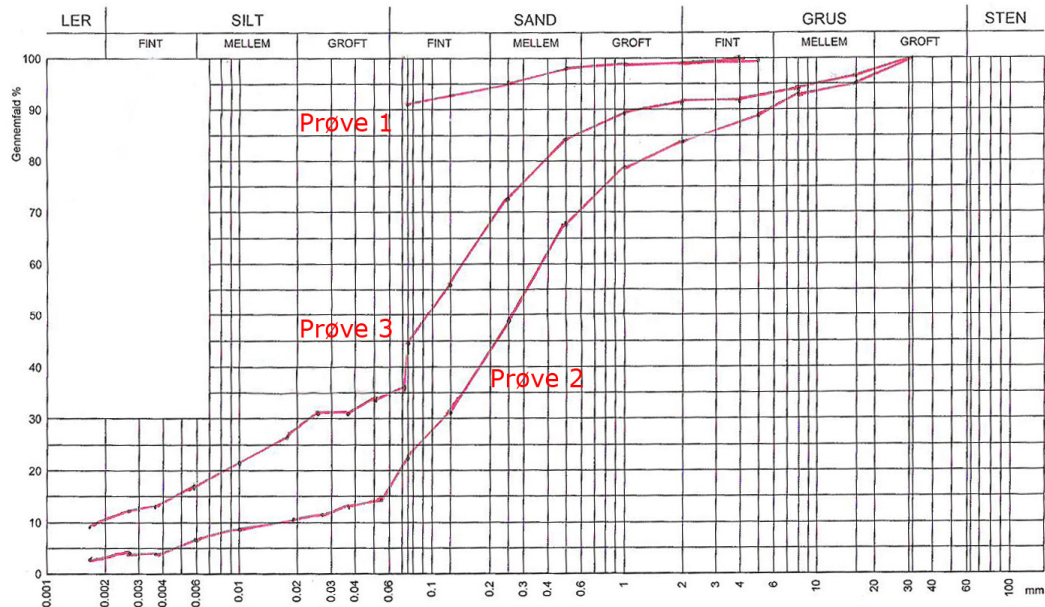
Dansk navn	$w_L\%$	$I_p\%$	Ler %	USC-system
Ler, meget fed	>80	>50		CV
Ler, fed	50-80	25-50		CH
Ler, ret fed	30-50	10-25		CM
Ler, siltet/sandet	<30	7-10	15-20	CL
Ler, stærkt siltet/sandet	<30	4-7	10-15	CL
Silt, stærkt leret		4-7	<10	ML
Siltet, leret/sandet		<4	<10	ML

Når ovennævnte fejl tages i betragtning, fremgår det, at prøve 1 er en fed ler. Havde det ikke været for forureningen ved opgravningen jf. afsnit 4.2, hvor der kom større partikler på ydersiden af lermaterialet, havde plasticitetsindekset været større endnu. For både prøve 2 og 3 gælder det, at en klassificering ved hjælp af plasticitetsindekset, grundet større fejlkilder, er problematisk. Dog vurderer projektgruppen, at resultaterne viser, at prøve 2 er en siltet/sandet ler, mens prøve 3 enten er en siltet/sandet ler eller en stærk siltet/sandet ler.

De fejl, der er sket, er ikke noget, der får direkte indflydelse på stabiliseringsforsøgene. For prøve 1 forventes det høje plasticitetsindekset at bevirke, at en større mængde kalk skal benyttes for at opnå en styrkeforøgelse.

5.2 SIGTE- OG HYDROMETERANALYSE

Resultaterne fra sigte- og hydrometeranalysen vil blive belyst i dette afsnit. Som det fremgår af bilag A er formålet med sigte- og hydrometeranalysen er at bestemme en given jordprøves fordeling i kornstørrelsen. Dette fremgår endvidere af bilag A, hvor også selve processen er beskrevet mere detaljeret. På figur 15 ses kornkurverne for alle tre jordarter.

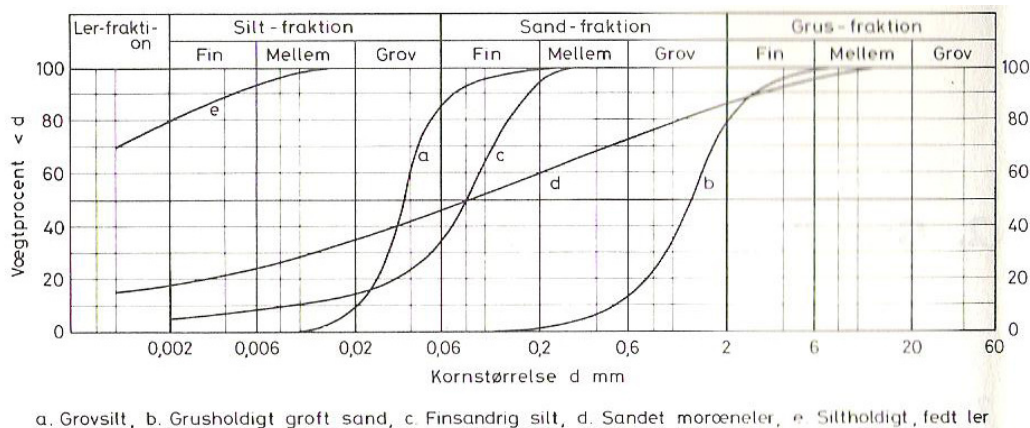


Figur 15: Kornkurverne for de tre prøver.

Som det fremgår af figur 15 og uddybet i bilag A, er der begået fejl i hydrometeranalysen. Prøverne, der skulle benyttes, havde et alt for højt vandindhold, hvilket var medvirkende til, at mængden af tørstof i prøverne ikke var tilstrækkeligt. I bilag A er det også beskrevet, at projektgruppen er blevet nødsaget til at antage hvilke korrektions faktorer der skulle benyttes, da der ikke var sammenhæng mellem det anvendte hydrometer og korrektions graferne. Værst var dette for prøve 1, og som det fremgår af figur 15, er resultaterne så dårlige, at det ikke er muligt at optegne kurven. Af samme årsag falder korkkurven for prøve 2 og 3 voldsomt efter 0,075 mm. Dette betyder, at resultaterne ligger under de reelle værdier for denne del af kurven for de to prøver.

For prøve 1 kan det konstateres, at 90 % af materialet tilhører silt- og lerfraktionerne. Det skal i denne forbindelse konstateres, at havde prøven ikke været forurenet med anden jord ved opgravningen, havde indholdet af sandpartikler været endnu lavere eller ikke eksisterende. På figur 16 ses det, at prøve 1 mest minder om en fed ler.

Når prøve 2 og 3 sammenlignes med figur 16, ses det, at begge jordarter minder om en sandet moræneler.



Figur 16: Kornkurver for forskellige jordarter. (Harremoës et al., 2005)

Det fremgår dog af figur 15, at prøve 3 har et større indhold af silt end prøve 2. Prøve 2 er til gengæld mere sandholdig. Fejlen i metoden for hydrometeranalysen er medvirkende til, at lerprocenten er svær at fastsætte. For prøve 2 formoder projektgruppen, at lerprocenten ligger mellem 5-15 %, lerprocenten for prøve 3 formodes at ligge mellem 10-20 %.

Resultaterne har ikke nogen direkte indflydelse på stabiliseringsforsøgene, dog kan det være svært at komme med en præcis klassificering af jorden.

5.3 GLØDETAB OG KALKINDHOLD

Formålet med at bestemme glødetabet og kalkindholdet af en jord er, at bestemme det procentvise indhold af organisk materiale i en jordprøve. Dette fremgår ligeledes af bilag A. Forsøgene med glødetab og kalkindholdet blev udført på prøve 1 og 2, da der ved observation af prøverne fremgik at være en del organisk materiale. Dette var ikke tilfældet for prøve 3, derfor blev disse forsøg ikke udført for denne prøve. Det blev også klart ved observation, at prøve 3 ikke havde et nævneværdigt kalkindhold. Mængden af kalk i en lerart har indflydelse på lerens stivhed og pH-værdi (B. Thagesen et al., 1998)

I tabel 8 fremgår resultaterne af forsøgene.

Tabel 8: Resultater fra glødetab og bestemmelse af kalkindhold for prøve 1 og 2

	Prøve 1	Prøve 2
GI%	14,6	6,6
k%	21,5	6,6
Org %	5,1	3,7



Resultaterne i tabel 6 viser, at der i prøverne er henholdsvis 5,1 % og 3,7 % organisk materiale. Dette skyldes sandsynligvis, at prøverne, som beskrevet i afsnit 4.2, blev udtaget på Rørdal genbrugsstation, og dermed ikke var intaktprøver. Forekomsten af organisk materiale er generelt ikke ønsket i vejbygningsmaterialer, da organisk materiale kan medføre sætninger eller plantevækst gennem asfalten. Derfor ville prøve 1 og 2 ikke kunne indbygges i en vej.

5.4 OPSUMMERING

Klassificeringsforsøgene har haft til formål at klassificere de tre jordprøver, som er blevet udtaget. Der er blevet udført bestemmelse af konsistensgrænser, bestemmelse af kornkurve samt bestemmelse af organisk indhold.

Resultaterne for prøve 1 viser, at der er tale om en fed ler med et plasticitetsindeks på over 41 %. Ydermere viser forsøgene, at prøven har et indhold af organisk materiale, som ikke er ønskelig i vejbygningsmaterialer.

Prøve 2 indeholder ligeledes et så stort indhold af organisk materiale, at jorden ikke ville blive brugt til vejbygning. Resultaterne viser, at derpå baggrund af kornkurven er tale om en kalkholdig siltet/sandet ler, men ud fra plasticitetsindeks og flydegrænsen anses den som stærkt siltet/sandet.

Resultaterne for prøve 3 viser, at denne ler ligeledes er siltet/sandet. Dog er indholdet af lerpartikler højere og mængden af sand mindre end for prøve 2. Ud fra kornkurven svarer prøve 3 til en sandet moræneler men som en stærkt siltet/sandet ler på baggrund af plasticitetsindeks og flydegrænsen.

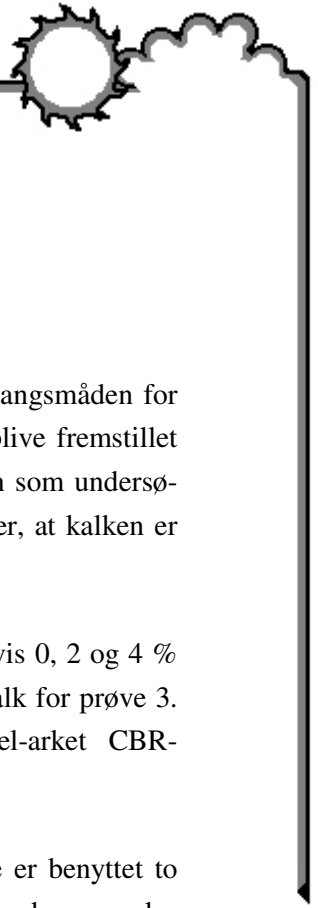
Materialerne er alle tydeligvis lerarter af forskellig art, hvilket gør dem egnede til de planlagte CBR-forsøg.

Vurderingen er, at kalkstabilisering stadig vil have en positiv effekt på de opgravede materialer grundet deres lerindhold, men at de organiske materialer vil medføre unøjagtigheder. Organisk materiale er i bund og grund uforudsigelig i anlægssammenhæng, hvilket er grund nok til ikke at indbygge dem i vejprojekter. I forsøgene er det dog under så kontrollerede forhold, at det vurderes, at det organiske materiale kun vil være en fejlkilde og ikke decideret være ødelæggende for forsøgene eller deres resultater.

Efter fremlæggelse af resultaterne fra klassificeringsforsøgene, vil der i næste kapitel blive fokuseret på resultaterne fra kalkstabiliseringsforsøgene.



5 KLASSIFICERINGSFORSØG



6 CBR-FORSØG

I dette kapitel vil resultaterne fra CBR-forsøgene blive behandlet. Fremgangsmåden for forsøgene er beskrevet i afsnit 3.1. Resultaterne fra CBR-forsøgene vil blive fremstillet særskilt et forsøg af gangen. Det er modificeringen af kalkstabiliseringen som undersøges. Forsøgene med indblanding af kalk er udført mellem 1-18 timer efter, at kalken er blevet iblandet.

CBR-forsøgene er blevet udført med varierende kalkindhold på henholdsvis 0, 2 og 4 % kalk for alle tre prøver. Ydermere er der blevet udført forsøg med 1 % kalk for prøve 3. Resultaterne fra CBR-forsøgene forefindes på bilags-cd'en på excel-arket CBR-værdier.xls.

Forsøgene er udført i vejdirektoratets laboratorier i Fløng. Til forsøgene er benyttet to cylindere, for forsøgene med prøve 1 og 2 er cylinder nr. 1 benyttet, denne har en volumen på 2102 cm³, mens det for prøve 3 er cylinder nr. 35 der er benyttet, som har et volumen på 2113 cm³. Indstampningen af prøve 1 og 2 er fortaget på maskine nr. 7 mens prøve 3 er udført på maskine nr. 5.

Efterfølgende vil resultaterne blive sammenlignet med resultaterne fra et tilsvarende forsøg udført af Vejdirektoratet i forbindelse med et motorvejsprojekt på Lolland-Falster. Afslutningsvis vil brugbarheden af resultaterne blive vurderet med henblik på en eventuel udførelse af et projekt, hvor der skal kalkstabiliseres.

6.1 PRØVE 1

Som beskrevet i kapitel 5 er prøve 1 en fed ler med et højt plasticitetsindeks på over 41 %. Det høje plasticitetsindeks har den indvirkning på kalkstabiliseringen, at det forventes, at der skal benyttes mere kalk for at stabiliser leren. Som beskrevet i kapitel 5 indeholder prøven organisk materiale, hvilket kan få indvirkning på resultaterne, da det organiske materiale ikke reagerer på samme måde som leren eller endda mineralsk jord.

I

tabel 9 ses en oversigt over hvilke vandindhold, der er blevet indblandet i de forskellige prøver.

Tabel 9: Forholdet mellem iblandet kalk og vand for forsøgene.

	Forsøg 1	Forsøg 2	Forsøg 3	Forsøg 4	Forsøg 5	Forsøg 6
0 % kalk	8 %	10 %	12 %	14 %	16 %	18 %
2 % kalk	12 %	14 %	16 %	18 %		
4 % kalk	12 %	15 %	18 %			

Til sammenligning kan vandindholdet efter forsøgets udførelse ses i tabel 10.

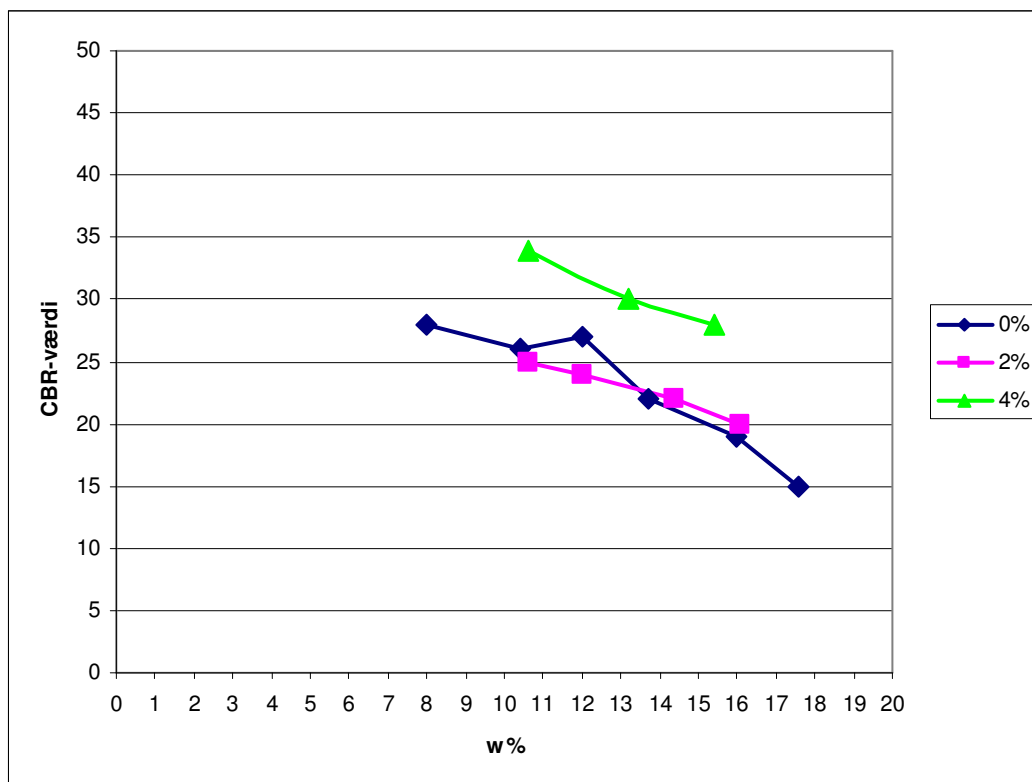
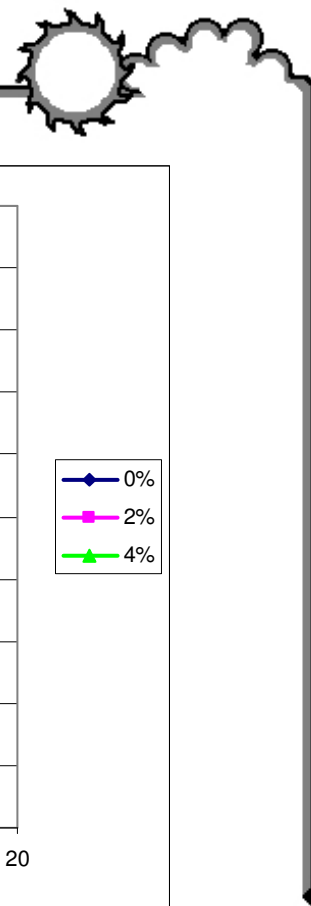
Tabel 10: Vandindhold efter udførelse af forsøg

	Forsøg 1	Forsøg 2	Forsøg 3	Forsøg 4	Forsøg 5	Forsøg 6
0 % kalk	8,0 %	10,4 %	12,0 %	13,7 %	16,0 %	17,6 %
2 % kalk	10,6 %	12,0 %	14,4 %	16,1 %		
4 % kalk	10,6 %	13,2 %	15,4 %			

Som det fremgår af

tabel 9 og tabel 10, resulterer tilføjelsen af kalk i et fald i vandindholdet. Dette skyldes den kemiske proces, som foregår mellem ler og kalk, som beskrevet i afsnit 2.2.

På figur 17 er resultaterne af de forskellige CBR-forsøg plottet. Værdierne kan ses i Excel-arket, CBR-værdier.xls, på bilags-cd'en.



Figur 17: CBR-værdier for prøve 1.

Som figur 17 viser, er CBR-værdierne for henholdsvis 0 og 2 % kalk næsten identiske. Dette skyldes lerens høje plasticitetsindeks, hvilket bevirker, at modifikationen mellem ler og kalken ikke giver nogen større ændring i CBR-værdi. Det fremgår endvidere af figur 17, at leret ved iblanding af 4 % kalk opnår en væsentlig styrkeforøgelse. Det kunne være interessant for prøve 1 at øge vandindholdet yderligere, dette var dog ikke muligt, da der ikke var mere materiale.

Ved forsøgene er det optimale vandindhold, w_{opt} , og den maksimale densitet, $\rho_{d,max}$, også blevet bestemt. w_{opt} angiver det vandindhold, hvorved den mest optimale sammenstampning kan opnås, $\rho_{d,max}$ angiver den tilhørende densitet. Resultaterne forefindes på bilags-cd'en i Excel-arket CBR-værdier.xls. Det optimale vandindhold er angivet i tabel 11.

Tabel 11: Det optimale vandindhold og densitet for de tre kalkprocenter.

	0 % kalk	2 % kalk	4 % kalk
w_{opt}	13,2 %	11,3	11,4 %
$\rho_{d,max}$	1,56 Mg/m ³	1,51 Mg/m ³	1,53 Mg/m ³

Tabel 11 viser et fald i det optimale vandindhold for prøve 1, når der iblandes kalk, uden, at det har den store indvirkning på den maksimale densitet.

6.2 PRØVE 2

Som beskrevet i kapitel 5 er prøve 2 en kalkholdig siltet/sandet ler. Prøve 2 har lig prøve 1 et forholdsvis stort indhold af organisk materiale, hvilket kan medføre usikkerhed i forsøgsresultaterne.

I tabel 12 ses en opgørelse over hvilke vandindhold, der er blevet indblandet i de forskellige prøver.

Tabel 12: Sammenhæng mellem vandindhold og kalkprocent for de forskellige forsøg.

	Forsøg 1	Forsøg 2	Forsøg 3	Forsøg 4
0 % kalk	6 %	10 %	12 %	14 %
2 % kalk	10 %	12 %	14 %	2 * 16 %
4 % kalk	12 %	16 %	17 %	19 %

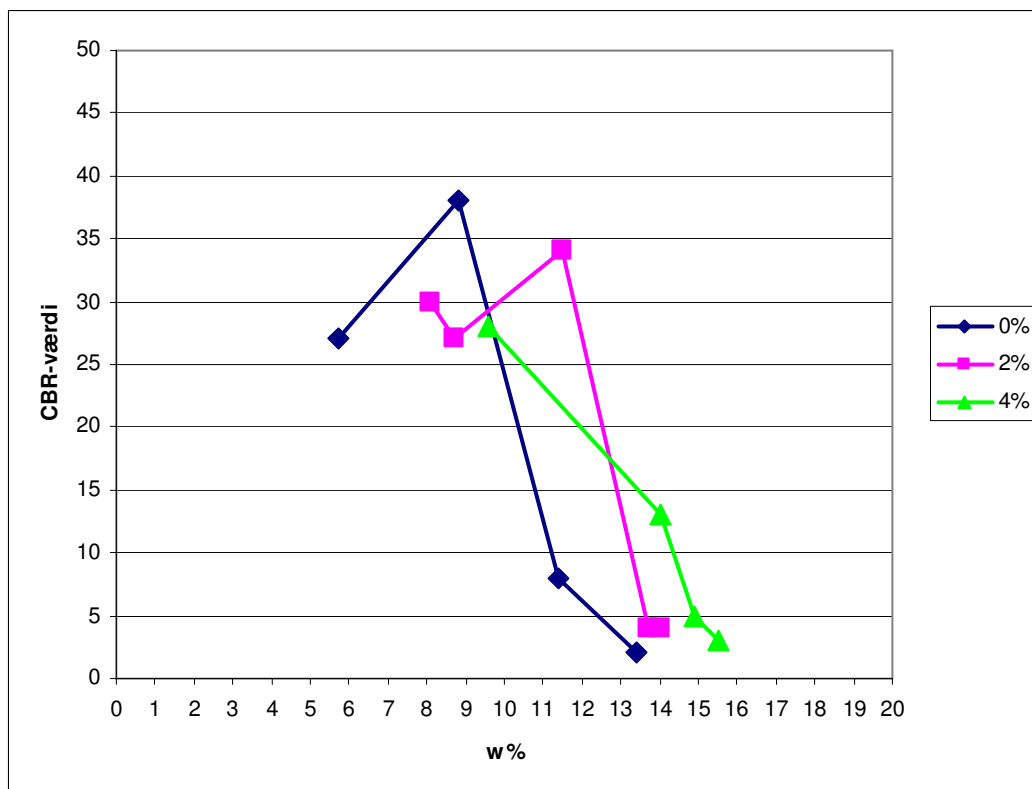
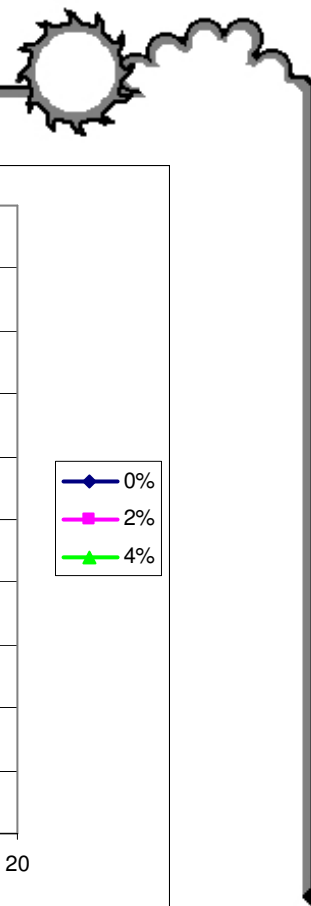
Ved en fejl blev der udført to forsøg med 2 % kalk og 16 % vand. Til sammenligning med værdierne i tabel 12 er vandindholdet efter udførelse af forsøgene angivet i tabel 13.

Tabel 13: Vandindhold efter udførelse af forsøg for prøve 2.

	Forsøg 1	Forsøg 2	Forsøg 3	Forsøg 4
0 % kalk	5,7 %	8,8 %	11,4 %	13,4 %
2 % kalk	8,1 %	8,7 %	11,5 %	13,7 og 14,0 %
4 % kalk	9,6 %	14,0 %	14,9 %	15,5 %

Tilsvarende forsøg 1 ses det ved sammenligning af resultaterne fra tabel 12 og tabel 13, at kalken grundet de kemiske processer binder noget af vandet jf. afsnit 2.2.

På figur 18 er CBR-værdierne for forsøgene plottet. Værdierne kan ses på bilags-cd'en ved Excel-arket CBR-værdier.xls.



Figur 18: CBR-værdier for prøve 2.

Figur 18 viser, at iblandingen af kalk har den indvirkning på CBR-værdien, at når kalkmængden øges, opnås højere CBR-værdier. Dette betyder, at styrken af jorden øges, når der iblandes mere kalk. Med andre ord vil det være muligt at bestemme den nødvendige kalkmængde, hvis det naturlige vandindhold er kendt.

På samme måde som for prøve 1 er det optimale vandindhold og den maksimale densitet blevet bestemt. Resultaterne er opgivet i tabel 14, desuden er forsøgsresultaterne at finde på bilags-cd'en i Excel-filen CBR-værdier.xls.

Tabel 14: Det optimale vandindhold og maksimal densitet for de tre kalkprocenter.

	0 % kalk	2 % kalk	4 % kalk
w_{opt}	9,8 %	12,1 %	13,1 %
$\rho_{d,max}$	1,98 Mg/m ³	1,87 Mg/m ³	1,85 Mg/m ³

Som det fremgår af tabel 14, stiger den optimale vandprocent, når mængden af kalk øges. Ligeledes ses det, at den maksimale densitet falder, når vandindholdet stiger.

6.3 PRØVE 3

Prøve 3 er som beskrevet i kapitel 5 en siltet/sandet moræneler lige som prøve 2. Indholdet af lerpartikler er dog større end for prøve 2, og sandmængden er mindre.

Tabel 15 viser en oversigt over hvilke vandindhold, der er blevet indblandet i de forskellige prøver. Som tidligere nævnt er der for prøve 3 også udført en forsøgsrække med 1 % kalk.

Tabel 15: Sammenhæng mellem iblandet kalk og vand for prøve 3.

	Forsøg 1	Forsøg 2	Forsøg 3	Forsøg 4	Forsøg 5
0 % kalk	6 %	8 %	10 %	12 %	14 %
1 % kalk	8 %	10 %	12 %	14 %	
2 % kalk	8 %	10 %	12 %	14 %	16 %
4 % kalk	12 %	14 %	16 %		

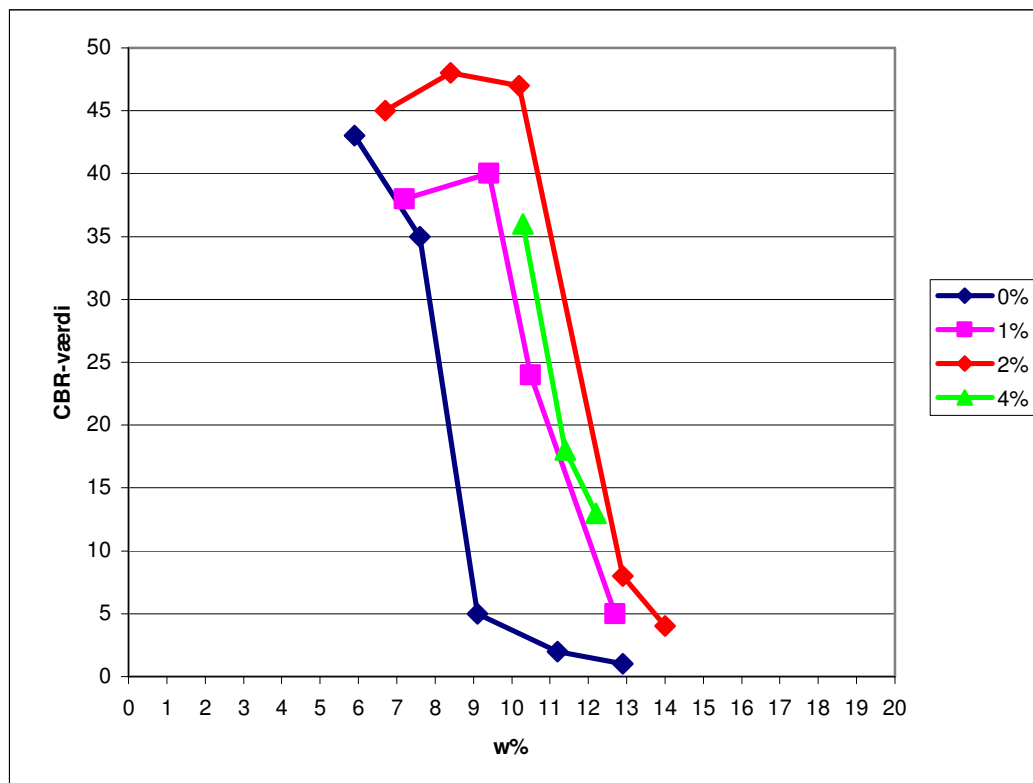
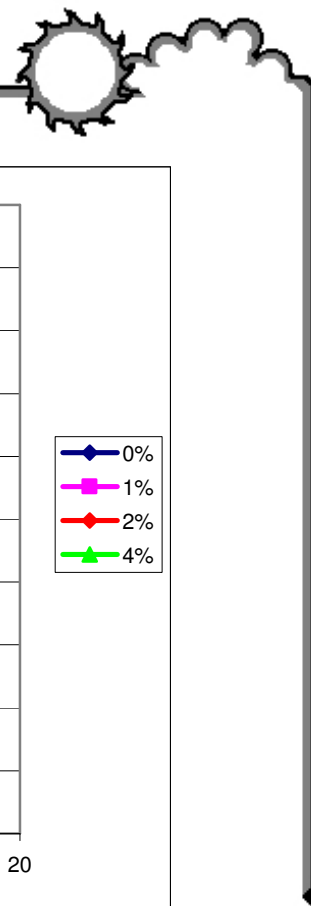
Til sammenligninger er vandprocenten efter udførelse af forsøgene angivet i tabel 16.

Tabel 16: Vandprocent for efter udførelse af forsøg for prøve 3.

	Forsøg 1	Forsøg 2	Forsøg 3	Forsøg 4	Forsøg 5
0 % kalk	5,9 %	7,6 %	9,1 %	11,2 %	12,9 %
1 % kalk	7,2 %	9,4 %	10,5 %	12,7 %	
2 % kalk	6,7 %	8,4 %	10,2 %	12,9 %	14,0 %
4 % kalk	10,3 %	11,4 %	12,2 %		

Som for prøve 1 og 2, fremgår det ved en sammenligning af værdierne i tabel 15 og tabel 16, at en forøgelse af kalkmængden medfører et fald i vandindholdet. Dette skyldes som beskrevet i afsnit 2.2 de kemiske processer.

På figur 19 ses CBR-værdierne for forsøgene med prøve 3.



Figur 19: CBR-værdier for prøve 3.

Som det fremgår af figur 19, stiger CBR-værdierne, når mængden af kalk øges. Det fremgår dog også af figuren, at CBR-værdierne for 4 % kalk ligger under værdierne for 2 % kalk. Dette kan muligvis skyldes at forsøgene med 2 % kalk har stået natten over. Der blev desværre ikke ved udførelse af forsøgene, foretaget nogen registrering af tidsintervallet mellem sammenblanding og CBR-måling. Forskellen kan imidlertid også skyldes, at den styrkeforøgelse, der kommer ved modifikationen ved 2 %, er den maksimale modifikation, og der dermed ikke opnås større styrkeforøgelse ved iblanding af mere kalk.

Ligesom prøve 1 og 2 er det optimale vandindhold og den maksimale densitet blevet bestemt, værdierne er angivet i tabel 17.

Tabel 17: Det optimale vandindhold og maksimal densitet for de fire kalkprocenter.

	0 % kalk	1 % kalk	2 % kalk	4 % kalk
w_{opt}	8,4 %	10,9 %	11,6 %	11,1 %
$\rho_{d,max}$	2,08 Mg/m ³	1,99 Mg/m ³	1,93 Mg/m ³	19,4 Mg/m ³

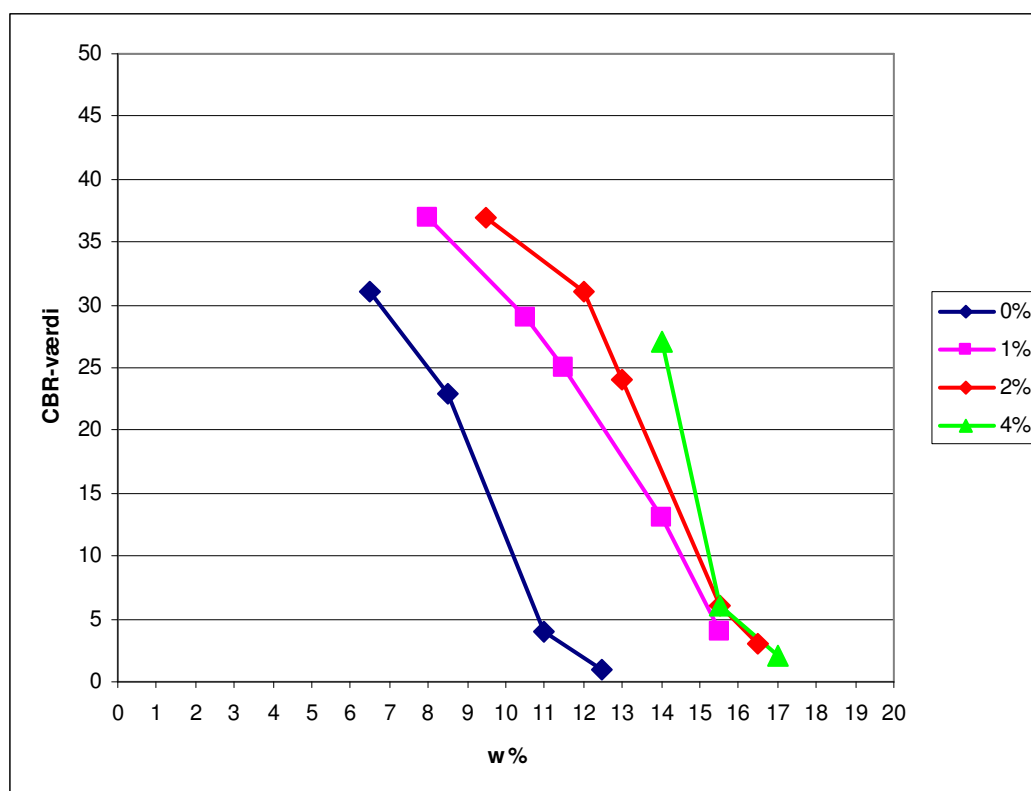
I overensstemmelse med CBR-værdierne viser resultaterne i tabel 17, at det optimale vandindhold er større ved 2 % kalk end ved 4 % kalk. Ellers stemmer resultaterne i tabel 17 overens med tendenserne fra prøve 2.

6.4 SAMMENLIGNING MED ANDRE FORSØG

Grundet det organiske materiale i prøve 1 og 2 udleverede personalet ved Vejdirektoratet nogle forsøgsdata fra et motorvejsprojekt på Lolland-Falster ved henholdsvis st. 25550 og st. 27650. I dette afsnit vil data fra st. 27650 blive sammenlignet med projekts forsøgsdata. Vejdirektoratets data er at finde på bilags-cd'en

Leren ved st. 27650 kan beskrives som en sandet/siltet moræneler, den har et plasticitetsindeks på 9,7 og en lerandel på 20 %. Prøven har mange af de samme karakteregenskaber som prøve 2 og 3.

På figur 20 ses CBR-værdierne samt vandindholdet for henholdsvis 0, 1, 2 og 4 % kalk. Resultater er aflæst fra de grafer, som er blevet udleveret. Dermed kan der være usikkerhed omkring vandprocenten. Dog vurderes aflæsningen at give et retvisende billede af resultaterne. Værdierne kan ses i Excel-arket, CBR-værdier.xls, på bilags-cd'en.



Figur 20: CPR-værdier fra st. 27650 (Vejdirektorater, 2005a).

På figur 20 ses det, at resultaterne fra st. 27650 ligesom prøve 1,2 og 3 viser, at CBR-værdierne tiltager, når der tilsættes mere kalk. Ligesom ved prøve 3 ses en tildens til, at der er en maksimal tilvækst, som kan opnås ved modifikation.



Lig prøve 1,2 og 3 er det optimale vandindhold og den maksimale densitet blevet bestemt. I tabel 18 er værdierne for leret ved st. 27650 opgivet.

Tabel 18: Det optimale vandindhold og maksimal densitet for de fire kalkprocenter ved st. 27650 (Vejdirektoratet, 2005a).

	0 % kalk	1 % kalk	2 % kalk	4 % kalk
w_{opt}	9,4 %	13,2 %	12,6 %	14,8 %
$\rho_{d,max}$	2,06 Mg/m ³	1,91 Mg/m ³	1,89 Mg/m ³	1,81 Mg/m ³

Ligesom resultaterne fra forsøg 2 og 3 viser resultaterne i tabel 18, at det optimale vandindhold stiger i forhold til mængden af kalk. Det ses også af værdierne, at det optimale vandindhold har små udsving.

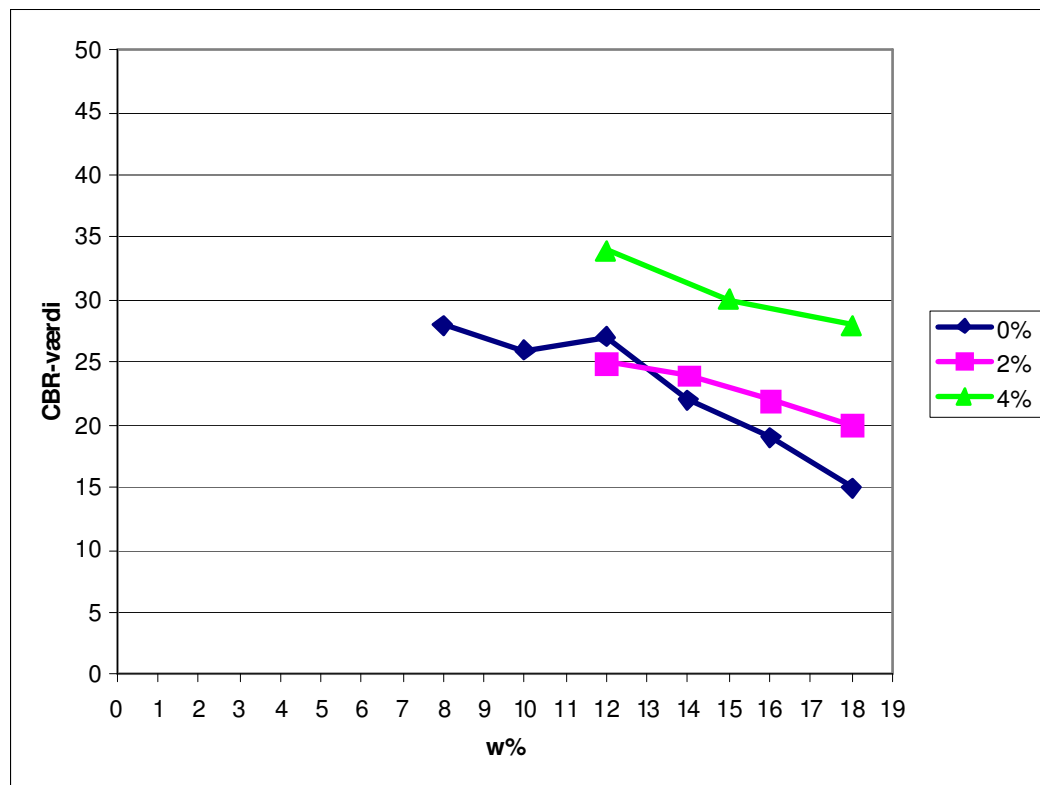
Når resultaterne fra prøve 1, 2 og 3 sammenlignes, vurderes det, at resultaterne fra projektgruppens forsøg på trods af organisk materiale og fejl i udførelsen af klassificeringsforsøgene giver et retvisende billede af den udvikling, der sker med leret, når det kalkstabiliseres. Dermed vurderes resultaterne at kunne benyttes til generelle vurderinger af kalkstabilisering.

6.5 BRUGBARHED I MARKEN

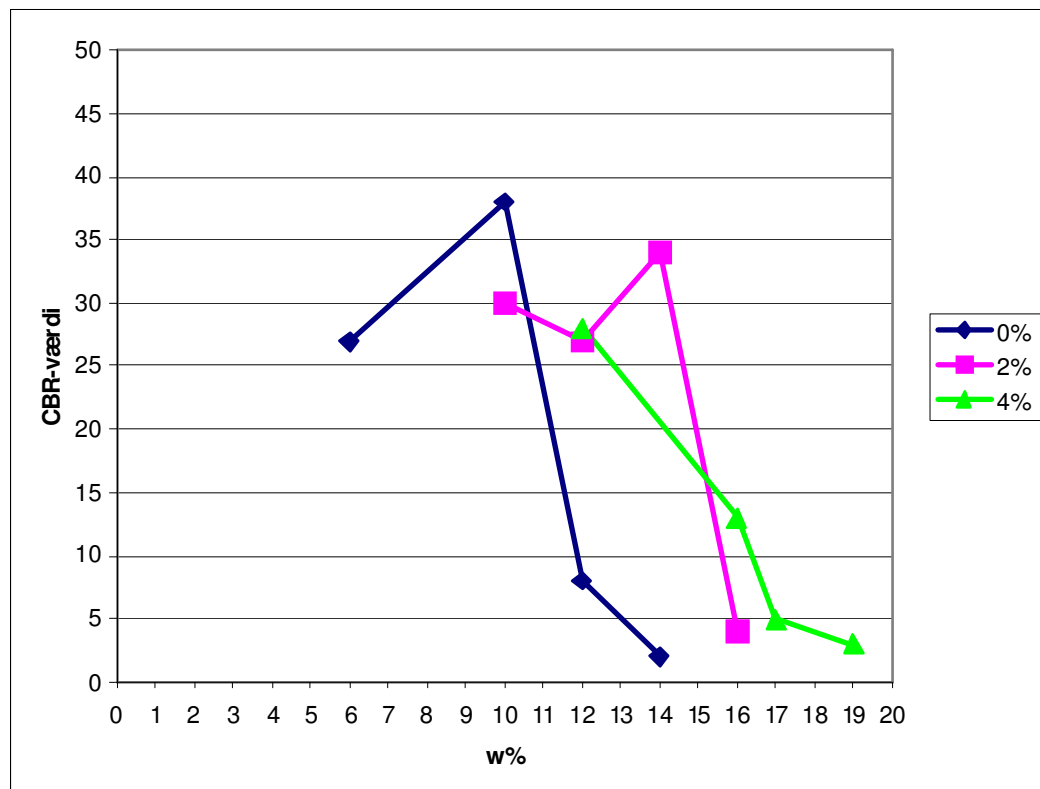
I dette afsnit vil brugbarheden af de resultater, som er præsenteret i de ovenstående afsnit, blive diskuteret med henblik på, om de oplysninger, som er relevante i en konkret entreprise, er fremstillet.

Beskrivelsen af sammenhængen mellem CBR-værdien og vandindholdet efter forsøgenes gennemførelse er i entreprenørmæssig sammenhæng mindre brugbar. Det er svært at bestemme den kalkmængde, der er nødvendig for at opnå den nødvendige styrke på baggrund af vandmængde, der er i prøven efter de kemiske reaktioner.

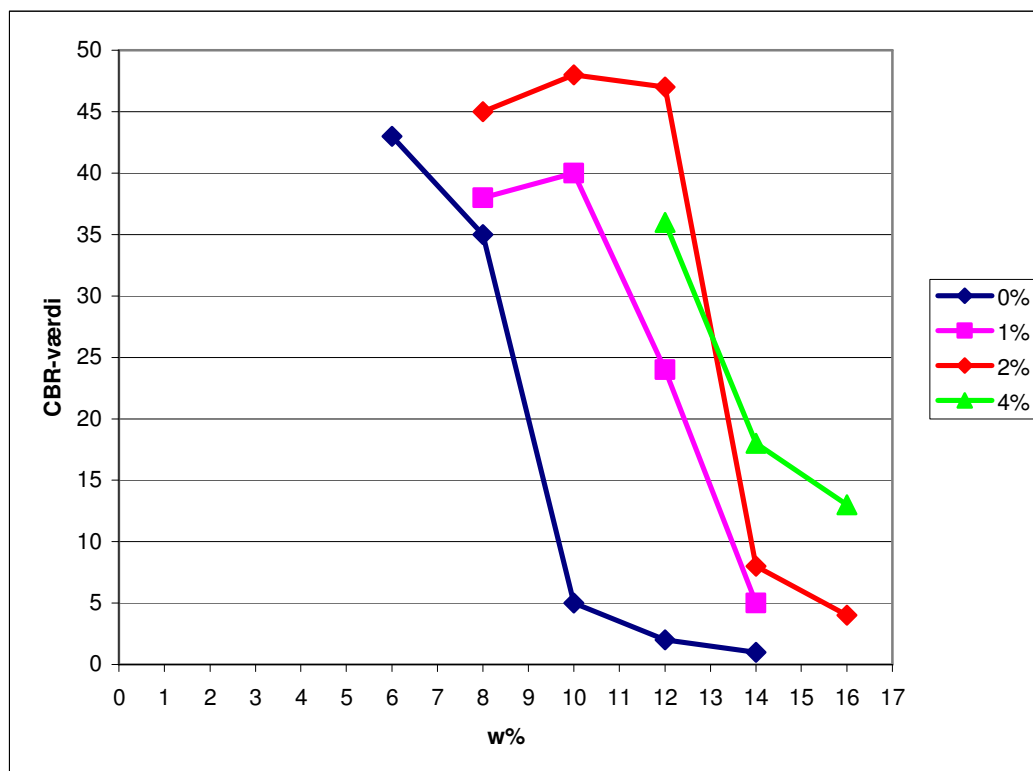
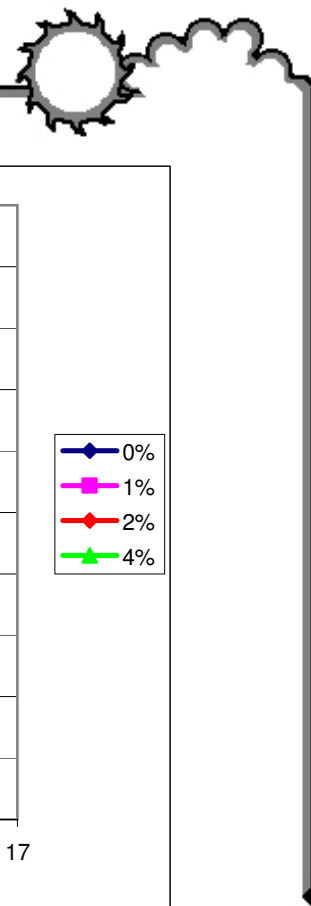
Som entreprenør er oplysningen om hvor meget kalk, der skal iblandes i forhold til det naturlige vandindhold, mere interessant. Dermed ville en plotning af CBR-værdierne i forhold til det iblandede mængde vand være mere brugbar. Dette er vist for de tre prøver på henholdsvis figur 21, figur 22 og figur 23.



Figur 21: CPR-værdier for prøve 1 i forhold til vandindholdet inden den kemiske reaktion.



Figur 22: CPR-værdier for prøve 2 i forhold til vandindholdet inden den kemiske reaktion.



Figur 23: CPR-værdier for prøve 3 i forhold til vandindholdet inden den kemiske reaktion.

Som figur 21, figur 22 og figur 23 viser, kan en sammenhæng mellem den iblandede mængde kalk og det oprindelige vandindhold give et billede af hvor meget kalk, der skal benyttes for at opnå en ønskelig styrke. Det skal dog bemærkes, at bestemmelsen af vandindholdet ikke er nær så præcis, da disse vandindhold ikke er målt efter fremgangsmåden præsenteret i bilag A, men er det vandindhold, som var planlagt iblandet.

Som eksempel kunne det på en entreprise være fastsat, at der skulle opnås en E-værdi på 50 MPa svarende til en CBR-værdi på 5. Hvis leren tilsvarende den i prøve 3, og det naturlige vandindhold var målt til for eksempelvis 13 %, ville en aflæsning på figur 23 vise, at der var behov for at iblande 1 % kalk. Dermed ville entrepriseleder og tilsyn have en mulighed for at føre kontrol med stabiliseringen inden udførelsen.

Metoden til at finde den nødvendige kalkprocent er baseret på målingerne af CBR-værdierne. Et større datagrundlag vil gøre resultaterne bedre. For at bestemme den rigtige kalkprocent er det kun jordtypen og jordens vandindhold, som skal undersøges. Derefter findes det nødvendige E-modul, og kalkprocenten aflæses i venstre side. En sikkerhedsfaktor bør ganges på E-modulet baseret på forskellen mellem forskellige ensformige jordarter. Skemaerne bør ideelt være middelværdier af ensformige jordarter. Da indholdet af ikke brændt kalk, har en betragtelig indvirkning på E-modulet af en lerart, er de to moræner ikke ens nok til en sammenligning. Yderligere forskning for at vise om ellers ensar-

tede jorde har samme E-moduler ved kalkstabilisering er nødvendig. Eksempler på skemaer, dog her kun baseret på et enkelt forsøg, er givet i tabel 19, tabel 20 og tabel 21.

Tabel 19: Prøve 1's E-modul for den originale vandprocent ved forskellige kalkprocenter.

w%	8 %	10 %	12 %	14 %	15 %	16 %	18 %
E for 0 %	280	260	270	220	-	190	150
E for 2 %	-	-	250	240	-	220	200
E for 4 %	-	-	340	-	300	-	280

Tabel 20: Prøve 2's E-modul for den originale vandprocent ved forskellige kalkprocenter.

w%	6 %	10 %	12 %	14 %	16 %	17 %	19 %
E for 0 %	270	380	80	20	-	-	-
E for 2 %	-	300	270	340	40	-	-
E for 4 %	-	-	280	-	130	50	30

Tabel 21: Prøve 3's E-modul for den originale vandprocent ved forskellige kalkprocenter.

w%	6 %	8 %	10 %	12 %	14 %	16 %
E for 0 %	430	350	50	20	10	-
E for 1 %	-	380	400	240	50	-
E for 2 %	-	450	480	470	80	40
E for 4 %	-	-	-	360	140	160

6.6 OPSUMMERING

I dette kapitel er resultaterne af CBR-forsøgene blevet præcenteret. Resultaterne viser, at den forventede styrkeforøgelse i forhold til mængden af iblandet kalk fremkommer. Tidligere er det blevet beskrevet, at prøve 1 og 2 havde indhold af organisk materiale. Ved sammenligning af prøvernes resultater med mere traditionelle lerarters resultater viste det sig, at dette ikke har nogen indvirkning på de generelle tendenser ved en kalkstabilisering.

Sammenhængen mellem forsøgene og brugbarheden af resultaterne i marken er også blevet belyst, dette emne vil ydermere indgå i næste kapitel, omhandlende rapportens perspektivering.



7 PERSPEKTIVERING

Som beskrevet i indledningen er det først gennem de senere år, at kalkstabilisering har vundet indpas i Danmark. Dette medfører, at den generelle viden om emnet ikke er omfattende inden for faget. Projektet er kun en mindre del af det samlede videnskabelige samfunds samlede litteratur. Det er derfor nødvendigt at se, hvorledes dette projekt passer ind i det samlede billede, og hvad det bidrager med. Dette kapitel vil indeholde en sådan perspektivering.

7.1.1 METODER

Som beskrevet i afsnit 6.5 er der ikke noget materiale, som kan benyttes til at bestemme, hvor stor en kalkmængde, der skal benyttes for at opnå den nødvendige styrke. Dermed er bygherre og tilsyn tvunget til at lave omfattende forsøg for hvert konkret projekt, hvis de ønsker at have kontrol med den nødvendige kalkmængde. Hvis der ikke bliver udført forsøg for at bestemme forholdet mellem kalk- og vandmængder for den pågældende jord, er det op til en vurdering fra entreprenøren, hvor meget kalk, der skal benyttes.

Der mangler en empirisk metode til at bestemme den nødvendige kalkmængde, som vil nedsætte det tidsforbrug, som forsøg tager. Det er nødvendigt, for at en sådan metode kan udvikles, at mængden af data og erfaring bliver større. Projektgruppen forestiller sig en udformning af en vejledning, hvor det i skemaer kan aflæses en kalkprocent alt efter hvad jordart, der er tale om, og hvad in situ vandindholdet er. Forsøgene udført i forbindelse med projektet, er i afsnit 6.5 fremstillet som en del af denne metode, men jo mere data des mere detaljeret og korrekt bliver metoden.

Sådanne skemaer skal udvikles for forskellige lerarter, dette vil betyde, at en klassificering af eksempelvis en sandet moræneler eller fed ler vil have hvert deres skema. På samme måde som andre standarter kan der indlægges en sikkerhed i skemaet. Alt dette ville medvirke, at der ville foreligge en empirisk metode, som beskrevet i afsnit 2.3. Et sådant empirisk datagrundlag vil også medføre, at der kan laves KS i anlægsfasen og at en vurdering af økonomien ville være nemmere.

En anden ting, som kunne hjælpe på kalkstabiliserings anvendelighed, er oversættelsen af det franske nomogram i Excel-arket, Omkostningsberegner.xls, som omtalt i afsnit 2.4. Dette skema kan udvides til at medtage flere udgifter. På nuværende tidspunkt kan det

diskuteres om skemaet giver et retmæssigt billede af udgifterne for de to metoder. Eksempelvis burde udgifterne til bortskaffelse af blødbunden medregnes.

Dimensioneringspraksissen, som er beskrevet i afsnit 2.3, kan ved omprogrammering af programmet MMOPP simplificeres. Programmet kan udformes, så dimensionering foregår i en arbejdsgang og ikke over to omgange, som det kræver i dag.

7.1.2 LITTERATUR OG FORSKNING

Det er interessant at se forsøgene og de fundne metoder i forhold til forskningen og litteraturen på emnet. Forskning på emnet er fordelt ud på forskellige emner, hvoraf en del er fokuseret på verificering og test af kalkstabiliserings positive effekt på jordmaterialets stivhed. Disse har generelt til formål at bekræfte tidligere resultater, men også at skabe et stort datagrundlag til empirisk forskning.

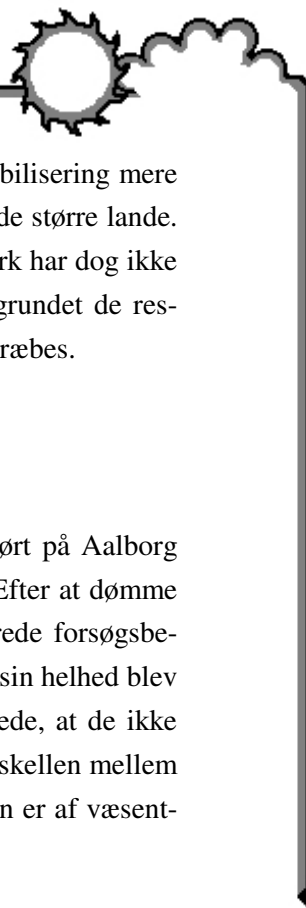
Artikler er blevet søgt på engelsk (UK og US) samt dansk. Der er udelukkende blevet indhentet artikler angående kalkstabilisering af vejes underbund, samt teoretiske artikler om kalkstabilisering generelt. Artikler omhandlende kalkstabilisering af vejoverflade eller på anden måde iblandet asfalten er blevet sorteret fra. Ligeledes er kalkstabilisering i andre anlæg end veje blevet sorteret fra. Der er også forsøgt at fremskaffe artikler omhandlende økonomien ved kalkstabilisering uden resultater.

Artiklerne kan deles op i tre grupper:

Artikler, der undersøger kalkstabiliseringens styrkeforøgelse, er den største gruppe af artikler og mest relevante at sammenligne med, da forsøgene udført i forbindelse med projektet er af samme art. For at opnå empiriske beregningsmetoder, som nævnt i 6.5 bør der benyttes et stort datagrundlag. Artiklerne bidrager til dette og ligeledes gør forsøgene. Forsøgene understøtter desuden artiklerne, da de viser, at kalkstabilisering giver en betragtelig styrkeforøgelse i materialet.

Artikler udelukkende omhandlende de sætningsgivende og livstidsmæssige problemstillinger ved kalkstabiliserede veje. Det har ikke i samme grad været interessant at sammenligne forsøgsresultaterne med disse artikler, da en vejs levetid er væsentligt længere end projektperioden.

En artikel, der sammenligner forskellige stabiliseringsmaterialer, har været informativ og givet et større indblik i materialer og kalkstabiliseringens fordele og ulemper i forhold til alternativer.



Målet med forskningen må være at finde frem til metoder, der gør kalkstabilisering mere anvendelig. På nuværende tidspunkt er der blevet lavet metodetekster for de større lande. I Europa er metodetekster blevet lavet i både Frankrig og England. Danmark har dog ikke en metodetekst, og eftersom kalkstabilisering er ved at komme i fokus grundet de ressourcemæssige besparelserne, er et methodedokument et mål, der bør efterstræbes.

7.1.3 KRITIK

Laboratoriearbejdet var delt op, således at klassificeringsforsøg blev udført på Aalborg Universitet og CBR-forsøg på Vejteknisk Instituts laboratorium i Fløng. Efter at dømme på den kvalificerede hjælp, der blev ydet i Fløng både med standardiserede forsøgsbeskrivelser og med godt forsøgsmateriel, må det vurderes, at hvis forsøget i sin helhed blev udført på Aalborg Universitet ville resultaterne have været så fejlbehæftede, at de ikke ville kunne benyttes til at konkluderes på. Grunden til dette kan ses på forskellen mellem kvaliteten af CBR-forsøgsdata og klassificeringsdata. Klassificeringsdataen er af væsentligt ringere kvalitet end CBR-forsøgsdataen.

Grunden til den ringere kvalitet er trefoldig. Laboratorieudstyret var ikke tidssvarende, forsøgsvejledningen var for gammel, og der var ikke ressourcer til grundig indføring i forsøgsmetoderne.

Efter perspektivering vil der i det efterfølgende kapitel blive konkluderet på projektet.



7 PERSPEKTIVERING



8 KONKLUSION

De kemiske reaktioner er hvad, der giver kalkstabiliseret jord sin forøgede styrke. Grundene til styrke forøgelserne er blevet beskrevet. Kalkstabilisering med meget små mængder kalk, 1 – 4 %, giver en stor styrkeforøgelse grundet processernes modifikation og solidificering. Der er gået i dybden med teorien, og selv de kemiske processer er blevet forklaret. Forståelsen for det teoretiske grundlag har givet mulighed for at forklare kalkstabiliseringens fordele og ulemper.

Vejregler indeholder ikke en dimensionering af kalkstabilisering. Standardiserede metoder til dimensionering af kalkstabilisering er en nødvendighed for at opnå et øget forbrug af metoden. En sådan dimensioneringsmetode er beskrevet ud fra artikler om emnet og eksisterende vejregler. Da Vejdirektoratet vil gøre systematisk brug af kalkstabilisering konkluderes det, at beregningsprogrammet MMOPP bør opdateres, så der i beregningerne kan dimensioneres for denne nye situation.

Økonomien for kalkstabilisering er undersøgt i forbindelse med en sammenligning med alternativet blødbundsudskiftning. Her fremgår det, at der kan spares en del penge på kalkstabilisering af større projekter såsom motorvejsudvidelser. Vejdirektoratet regner med en tocifret million besparelse på deres næste motorvejsprojekt.

Den franske metode for at sammenligne kalkstabilisering og blødbundsudskiftning bliver beskrevet og konverteret til dansk. Hvis ellers enhedspriserne er kendt, kan forskellen på blødbundsudskiftning og kalkstabilisering hurtigt beregnes baseret på metoden.

Klassificeringsforsøgene har desværre været fejlbehæftede grundet gammelt laboratorivejledning og utidssvarende forsøgsmateriel. Klassifikationerne af de tre prøver viste, at der jordmateriale var af følgende typer:

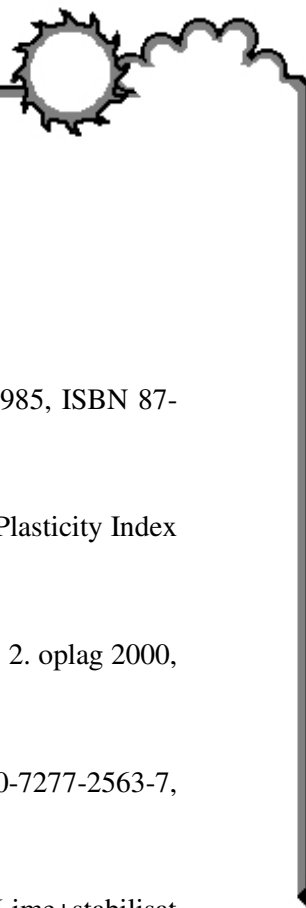
- Fed kalkholdig ler, forurenat af muld.
- Kalkholdig sandet og siltet moræneler, forurenat af muld.
- Sandet og siltet moræneler uden nævneværdig kalk.

CBR-forsøgene blev udført under gode omstændigheder på Vejteknisk laboratorium i Fløng. Ved sammenkædning af dimensionering findes, at resultaternes E-værdi er nødvendig i dimensioneringsøjemed. Det er tydeligt, at E-modulet stiger efter stabilisering. Forsøgene viser, at der opstår et optimalt vandindhold, hvor stivheden er størst. Stivheden aftager derefter ved stigende vandindhold. Vandindholdet er derfor den vigtige parameter

for bestemmelse af styrken en given lertype. Resultaterne er at prøve 1 har et meget højt E-modul og kan optage mere vand, før den bliver svag. Den skal dog også optage mere kalk end de to andre prøver, før der opstår en effekt. Prøve 2 er den midterste værdi. Prøve 3 har den ringeste bæreevne, men opnår det største E-modul i forhold til de andre prøver.

Der er udarbejdet en metode omhandlende praktisk anvendelse. Denne har brug for videreudvikling, men metoden har mulighed for at blive en katalogmetode for bestemmelse af kalkindhold baseret på vandindhold og lertype. Metoden til at finde den nødvendige kalkprocent er baseret på målingerne af CBR-værdierne. For at bestemme den rigtige kalkprocent skal jordtypen og jordens vandindhold findes, eksempelvis ved observation og et forsøg angående vandindhold. Derefter findes det nødvendige E-modul for dimensioneringen, og kalkprocenten aflæses i venstre side. En sikkerhedsfaktor bør ganges på E-modulet baseret på forskellen mellem forskellige ensformige jordarter. Skemaerne bør ideelt være middelværdier af ensformige jordarter. Da indhold af ikke brændt kalk, har en betragtelig indvirkning på E-modulet af en lerart, er de to moræner ikke ens nok til en sammenligning. Yderligere forskning for at vise, om ellers ensartede jorde har samme E-moduler ved kalkstabilisering, er nødvendig.

Problemstillingen er blevet løst, da der er opnået indsigt i kalkstabiliseringens processer og den bagvedliggende teori, data omhandlende kalkstabilisering er indhentet og vurderet af projektgruppen. Projektgruppen kommer frem til metoder, der er anvendelige i praksis. Dog kan metoderne i alle tilfælde forbedres af yderligere data og efterprøvning. Især bestemmelse af kalkindholdet bør i høj grad sammenlignes med andre lignende lertyper og udvides med flere lertyper.



9 LITTERATURLISTE

A. D. Herholdt et al., 1985, Beton-Bogen, Aalborg Portland, 2. udgave 1985, ISBN 87-980916-0-8

ASTM, 2000, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, D 4318, udgivet 2000

B. Thagesen et al., 1998, VEJE OG STIER, Polyteknisk Forlag, 1. udgave, 2. oplag 2000, ISBN 87-502-0804-7

C. D. F. Rogers et al., 1996, Lime Stabilisation, Thomas Telford, ISBN 0-7277-2563-7, lokaliseret d. 20.02.09 på:

<http://books.google.com/books?id=gBYNrGrqE4kC&pg=PP1&dq=Lime+stabilisation&hl=da>

C. Busch, 2008, Dansk Vejtidskrift, No. 4 2008, ISSN 0011-6548

Dansk Standard, 2000, Prøvningsmetoder for kemiske egenskaber ved tilslag – Del 1: Kemisk analyse, Dansk Standard, DS/EN 1744-1, 2. udgave, udgivet 2000

Dansk Standard, 2004a, Prøvningsmetoder for geometriske egenskaber ved tilslag – Del 1: Bestemmelse af kornstørrelsesfordeling – Sigteanalyse, Dansk Standard, DS/EN 933-1, 2. udgave, udgivet 2004

Dansk Standard, 2004b, Vejmataterialer – Ubundne og hydraulisk bunde blandinger – Del 47: Prøvningsmetode til bestemmelse af bæreevne, California Bearing Ratio, direkte bæreindeks og lineær udvidelse, Dansk Standard, DS/EN 13286-47, 1. udgave, udgivet 2004

Harremoës et al., 2005, Lærebog i GEOTEKNIK 1, Polyteknisk forlag, 5. udgave, 8. oplag 2005, ISBN 87-502-0577-3

LCPC, 2004, Soil treatment with lime and/or hydraulic binders, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, udgivet 2004, ISSN 1151-1516

N. K. Ovesen et al., 2007, Lærebog i Geoteknik, Polyteknisk Forlag, 1. udgave, 1 oplag 2007, ISBN 87-502-0961-2

NCC, 2001, Vejbygning, NCC, 3. reviderede udgave, 1992. 3. oplag 2001, ISBN 87-984200-0-3

P. E. Jakobsen, 2007, Brugen af letfaldlod, Dansk Vejtidsakrift, Blad nr. 12, 2007

Prima, 2009, Carl Bro, lokaliseret d. 07.05.09 på:

<http://www.prima100.dk/>

R. L. Parsons og J. P. Milburn, 2003, Engineering behavior of stabilized soils, Transportation Research Record, Del 1837, Paper no. 03-4100, 2003

R. N. Young og V. R. Ouhadi, 2006, Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils, Applied Clay Science, Volumen 35, Hæfte 3, 2007

T. Overgaard, 2007, Brændt kalkprodukt med lav støv-emission, Dansk Vejtidsakrift, Blad nr. 2, 2007

Vejdirektoratet, 2005a, Udleveret forsøgsresultater, scannet kopi vedlagt på bilags cd'en

Vejdirektoratet, 2005b, Kalkstabilisering på motorvejen Odense – Ringe, Vejdirektoratet, Internt notat, 2005

Vejdirektoratet, 2007a, Vejregel - Dimensionering af befæstelser, ISBN 87-7923-930-5

Vejdirektoratet, 2007b, Vejregel - Dimensionering af befæstelser, Brugervejledning, ISBN 87-7923-930-5

Vejdirektoratet, 2007c, Måling af overflademodul med minifaldlod, Vejdirektoratet, prVI 90-4, udgivet 2007

Vejdirektorer, 2008, Kalkstabilisering Ønslev – Sakskøbing, Udkast til Internt Notat, Vejdirektoratet, 2008

Vejdirektoratet, 2009, ”Sparer 30% vejgrus ved brug af kalk”, Vejdirektoratet, lokaliseret d. 02.06.09 på:

<http://www.vejsektoren.dk/wimpnews.asp?page=document&objno=593409>



W. Lund, 1981, Vejledning i udførelse af geotekniske klassifikationsforsøg, Aalborg Universitet,



9 LITTERATURLISTE



10 BILAG

Bilag A – Klassificeringsforsøg	s. 75
A.1 Vandindhold	s. 75
A.2 Konsistensgrænser	s. 76
A.3 Sigteanalyse	s. 79
A.4 Hydrometeranalyse	s. 81
A.5 Glødetab	s. 84
A.6 Bestemmelse af kalkindhold	s. 85





A KLASIFICERINGSFORSØG

Dette bilag vil beskrive de klassificeringsforsøg, som er blevet udført på de forskellige jordprøver, der er beskrevet i kapitel 5. Forsøgene er blevet udført for at kunne beskrive de indsamlede jordprøver. Resultaterne af forsøgene er fremstillet i kapitel 5.

De forsøg, der er blevet udført, er:

- Bestemmelse af vandindhold
- Bestemmelse af konsistensgrænser
- Sigteanalyse
- Hydrometeranalyse
- Glødetab
- Bestemmelse af kalkindhold

Ovenstående forsøg vil blive behandlet enkeltvis i de følgende afsnit.

A.1 VANDINDHOLD

I forbindelse med de forskellige forsøg skal vandindholdet af en prøve ofte bestemmes. Dette gøres ved at udtage en delprøve, afveje prøven så vægten af prøven inklusiv vandindhold er kendt, W . Størrelsen af delprøven varierer fra forsøg til forsøg, generel vil en større delprøve medføre større sikkerhed. Efterfølgende anbringes prøven i et tørreskab ved 105 °C indtil alt vandet er fordampet. Prøven vejes derefter igen, og vægten af tørstoffet bestemmes, W_s . Herefter kan vægten af vandet bestemmes, $W_w = W - W_s$. Dermed kan vandindholdet af prøven beregnes ved brug af formel (A.1). (W. Lund, 1981)

$$w\% = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad (A.1)$$

Hvor:

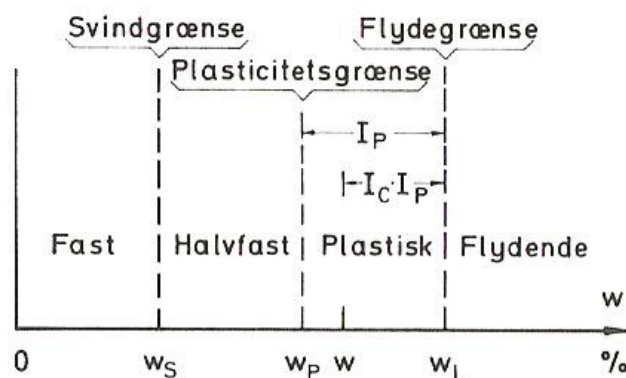
$w\%$ = Vandprocent

W_w = Vægten af vandet

W_s = Vægten af tørstoffet

A.2 KONSISTENSGRÆNSER

Konsistensgrænser kan benyttes til at beskrive lerarten. På figur 1 ses en inddeling af de forskellige konsistensgrænser.



Figur 1: Konsistensgrænser (Harremoës et al., 2005).

Ved brug af to forskellige forsøg bestemmes henholdsvis flydegrænsen, w_L , og plasticitetsgrænsen, w_p . Forsøgene er udført i henhold til (ASTM, 2000). Flydegrænsen angiver den vandprocent, hvorved en lerart ved naturlige forhold har en flydende konsistens. Tilsvarende angiver plasticitetsgrænsen overgangen mellem det punkt, hvor lerarten går fra plastisk til halvfast konsistens. (Harremoës et al., 2005)

Til forsøgene udvaskes en del af prøven på en sigte med en maskevisse på 0,42 mm. (ASTM, 2000)

De følgende afsnit vil behandle henholdsvis flydegrænse, plasticitetsgrænse og plasticitetsindekset, som udregnes på basis af de to andre.

Flydegrænse

Flydegrænsen bestemmes ved brug af en metode som A. Casagrande fremsatte i 1932. Flydegrænsen defineres ved det vandindhold, som lerarten indeholder, når den flyder sammen over en afstand på 13 mm efter at have været udsat for 25 slag af Casagrandes apparat, som ses på figur 2.



Figur 2: Casagrande apparat til bestemmelse af flydegrænsen.

Flydegrænsen er bestemt ud fra (ASTM, 2000) metode A, hvor w_L bestemmes ud fra flere punkter. Forsøget kræver, at der laves minimum 3 forsøg, hvor jordprøven har forskelligt vandindhold. På figur 2 ses det, hvordan prøven fyldes i skålen, hvorefter der laves en fuge i materialet. Derefter udsættes prøven for slag ved at dreje på håndtaget, så der leveres 1,9 – 2,1 slag i sekundet. Når fugen samler sig over en afstand på 13 mm, udtages en prøve af materialet der, hvor sammenflydningen er forekommet. Herefter bestemmes vandindholdet, som beskrevet i afsnit A.1. Resultaterne af prøverne plottes, så sammenhængen mellem slag og vandindhold vises. Antal slag angives på abscisseaksen på en logaritmiskskala, vandindholdet angives på ordinataksen på en aritmetiskskala og den bedste rette linje tegnes, hvorefter vandprocenten ved 25 slag bestemmes, denne vandprocent angiver lerens flydegrænse, w_L , og opgives i nærmeste hele tal. (ASTM, 2000)

Det skal imidlertid bemærkes, at projektgruppen efter udførelse af forsøget er blevet informeret om, at forsøget ikke er blevet udført helt efter forskrifterne. Projektgruppen søgte vejledning ved Aalborg Universitets laboranter, som fortalte, hvordan de normalt udførte forsøget. På figur 2 ses det, at lerprøven er blevet afrettet i forhold til skålens kant, dette skulle dog have foregået i forhold til bundpladen. Dette ville have medført, at der ikke ville være så meget materiale i skålen, og dermed ville der skulle benyttes flere slag før prøven flød sammen. Denne fejl medfører at forsøgets w_L er lavere end det reelt er. Efter opdagelsen af fejlen var det ikke muligt at lave forsøget om, da jorden var blevet yderligere indtørret til brug til bestemmelse af plasticitetsgrænsen.

A.2.1 PLASTICITETSGRÆNSE

Plasticitetsgrænsen bestemmes ved at udrulle prøven til en 3,2 mm tyk tråd. Dette gentages indtil jorden brister under det præs, der skal benyttes for at udrulle jorden. På figur 3 ses en udrullet jordprøve og en 3,2 mm tyk stang til sammenligning, denne jordprøve skal deles, sammenpresses og udrulles igen.



Figur 3: Lerprøven udrulles til 3,2 mm, uden at det bryder.

Når prøven har opnået den rette konsistens, udtages en prøve for hvilket vandindholdet bestemmes, som beskrevet i afsnit A.1. Prøven skal mindst indeholde 6 g jord. Forsøget laves minimum 2 gange, og den gennemsnitlige vandprocent angiver materialets plasticitetsgrænse, w_p , og opgives i nærmeste hele tal. De to vandprocenter må ikke have for store udsving, kravene hertil kan findes i normen. (ASTM, 2000)

Dette forsøg blev for prøve 1's vedkommende udført i Vejteknisk Instituts laboratorier, mens prøve 2 og 3 tidligere var blevet gennemført på Aalborg Universitet. Ved dette forsøg havde projektgruppen imidlertid fejlfortolket vejledningen, hvilket betød, at forsøget blev stoppet i det øjeblik, leret brød. Under forsøget med prøve 1. Her blev det tydeligt for projektgruppen, at forsøgene med prøve 2 og 3 ikke var udført efter den korrekte metode. For disse to jordarter medfører det, at vandindholdet ved plasticitetsgrænsen er målt højere end det reelle vandindhold ved plasticitetsgrænsen, dette var specielt kritisk for prøve 3. Ved prøve 2 er kravet til minimum 6 g jord ikke overholdt, hvilket medfører større usikkerhed, når vandindholdet bestemmes.



A.2.2 PLASTICITETSINDEKSET

Når flyde- og plasticitetsgrænsen er kendt kan plasticitetsindekset bestemmes. Det gøres ved brug af nedenstående formel (A.2).

$$I_p = w_L - w_p \quad (A.2)$$

Hvor:

I_p = plasticitetsindekset

w_L = flydegrænsen

w_p = plasticitetsgrænsen

Plasticitetsindekset er 0 for sand, meget lille for grovsilt og nogle få procent for fintsilt. For meget sandet ler, ligger I_p på over 8% og på over 100% ved de fedeste lerarter. (N. K. Ovesen et al., 2007)

A.3 SIGTEANALYSE

En sigteanalyse har til formål at bestemme vægtfordelingen af kornstørrelsen i en given jordprøve, analysen måler på sand- og grusfraktioner mellem 60 og 0,06 mm. Forsøgene er blevet udformet i henhold til (Dansk Standard, 2004a)

Afhængig af den maksimale diameter på jorden er det i tabel 1 angivet, hvor stor en analyseprøve som minimum skal være.

Tabel 1: Sammenhæng mellem prøvestørrelse og den maksimale diameter i jordprøven (Dansk Standard, 2004a).

Tilslags størrelse D (maksimum)	Analyseprøvens masse (minimum)
63 mm	40 kg
32 mm	10 kg
16 mm	2,6 kg
8 mm	0,6 kg
≤ 4 mm	0,2 kg

For at sikre, at materialet kan falde gennem en given sigte, er der en grænse for hvor meget materiale, der må forekomme på en sigte efter sigtningen. Denne maksimale last kan udregnes ved anvendelse af formel (A.3).

$$m_{\max} = \frac{A \cdot \sqrt{d}}{200} \quad (\text{A.3})$$

Hvor:

$m_{\max}$ = en maksimale last på sigten

A = sigtens areal i kvadratmillimeter

d = sigtens maskevidde i millimeter

Hvis det materiale, som forefindes på en sigte efter sigtningen, overstiger den maksimale tilladte vægt, skal prøven neddeles i mindre enheder og sigtes endnu en gang. (Dansk Standard, 2004a)

Selve sigtningen foregår over to omgange. Først gennemføres en grovsigtning, hvorefter materialet udvaskes på en 0,075 mm sigte. Efter at resten fra udvaskningen er tørret, bliver finsigtningen udført. Ved grovsigtningen benyttes følgende sigte:

- 64 mm
- 32 mm
- 16 mm

Det materiale, som benyttes til sigteanalysen, vejes inden forsøget påbegyndes, denne vægt betegnes M_1 . Det materiale, som efter sigtningen ligger på de enkelte sigter, udtages og vejes. Det procentuelle gennemfald i forhold til M_1 bestemmes.

Gennemfaldet på 16 mm sigten, udvaskes over en 0,075 mm sigte. Det udvaskede materiale skal senere bruges til en hydrometeranalyse, dette bliver beskrevet i afsnit A.4.

Vaskeresten tørres inden finsigtningen påbegyndes. Opbygning af sigterne ved finsigtning er som følger, det kan også ses på figur 4:

- 8 mm
- 4 mm
- 2 mm
- 1 mm
- 0,5 mm
- 0,25 mm
- 0,125 mm
- 0,075 mm



Figur 4: Opbygning af sigterne ved finsigtningen.

På samme måde som ved grovsigtningen udtages materialet, og vægten registreres. For alle fraktioner beregnes det procentuelle gennemfald af M_1 .

Efter registreringen af vægten af fraktionerne, skal hydrometeranalysen udføres for at bestemme fordelingen af korn med en diameter mindre end 0,075 mm, silt- og lerfraktioner. Derefter kan en kornkurve optegnes. I næste afsnit vil proceduren for hydrometeranalysen blive beskrevet.

A.4 HYDROMETERANALYSE

Hydrometeranalysen har til formål at finde fordelingen af partikelstørrelserne med en diameter på mindre end 0,075 mm. Der er tale om silt- og lerfraktioner. Forsøgene er udført i henhold til (W. Lund, 1981).

Resterne af sigtningen fra 0,075mm bliver udtørret til plastisk tilstand, hvorefter de opblandes i en 0,005 mol peptisator i form af natriumpyrofosfat. Peptisatoren har til formål at ændre jordpartiklernes elektrokemiske forhold, dette forhindrer, at partiklerne klumper sig sammen. Vandindholdet bestemmes jf. afsnit A.1 for at kunne beregne mængden af tørstof blandet i peptisatoren.

Et hydrometer holdes klart i destilleret vand indtil, det skal afmåles. Prøven iblandet peptisatoren rystes i et halvt minut og afmåles i forskellige tidsintervaller med termometer og hydrometer. Der afmåles ved 15 sekunder og 30 sekunder samt 1, 2, 4, 8, 30 og 90 minutter. Desuden foretages der målinger efter 4, 8 og 24 timer. En afmåling kan ses på figur 5.



Figur 5: Hydrometeraflæsninge efter 24 timer

De synkende partikler i væsken fortrænger noget af vandet i cylinderglasset og medføre en opdrift på hydrometeret. Denne opdrift kan herefter aflæses.

Beregningerne af partikelstørrelsen er baseret på Stoke's lov, som udmønter sig i formel (A.4):



$$d = \sqrt{\frac{18\eta \cdot 100}{(d_s - d_0)g \cdot 60}} \cdot \sqrt{\frac{h}{t}} \quad (\text{A.4})$$

Hvor:

d = Kuglediameter i mm

η = Væskens viskositet i g/(cm*sek)

d_s = kuglens relative densitet

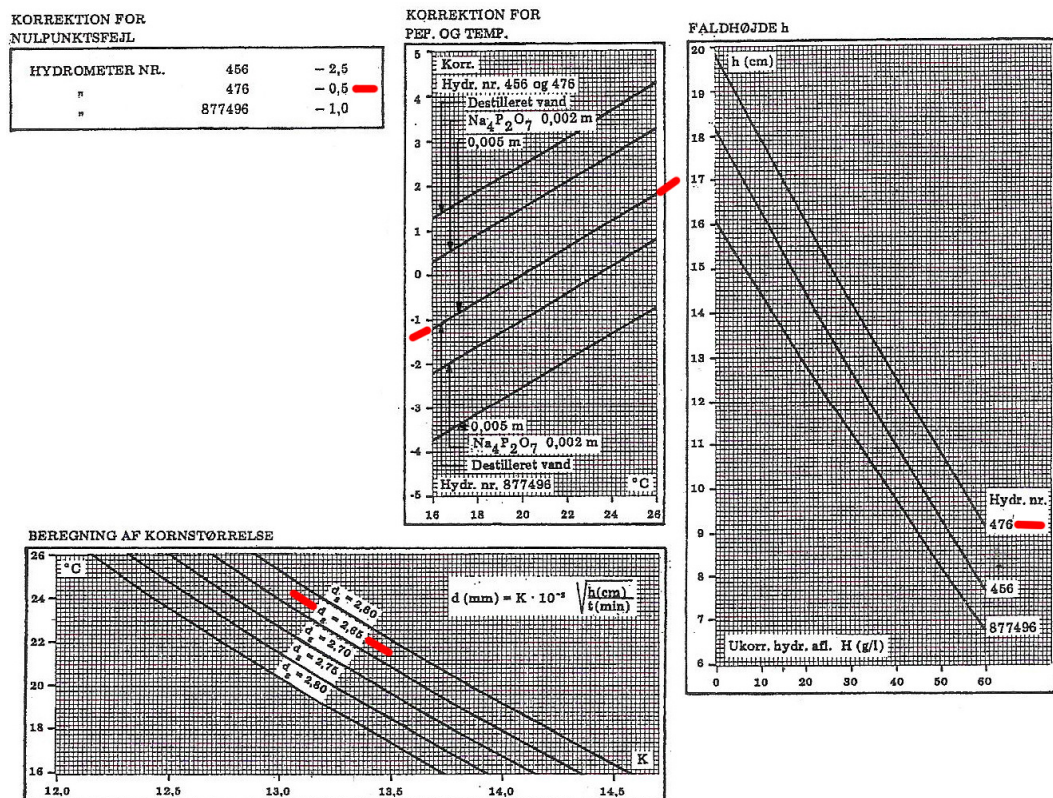
d_0 = væskens relative densitet

g = tyngdeaccelerationen (981,6 cm/sek²)

h = faldhøjde i cm

t = faldtid i min.

Således kan partikelstørrelsen findes, såfremt faldhøjden og tiden er kendt. Derudover kan den procentuelle mængde i forhold til M_1 , fra sigteanalysen i afsnit A.3, beregnes. Beregningerne er udført i et Excel-ark, Klassificeringsforsøg.xls, jf. (W. Lund, 1981). Til beregningerne skal der foretages en del korrektioner. På figur 6 kan disse aflæses. De skalaer, som er benyttet, er angivet med rød.

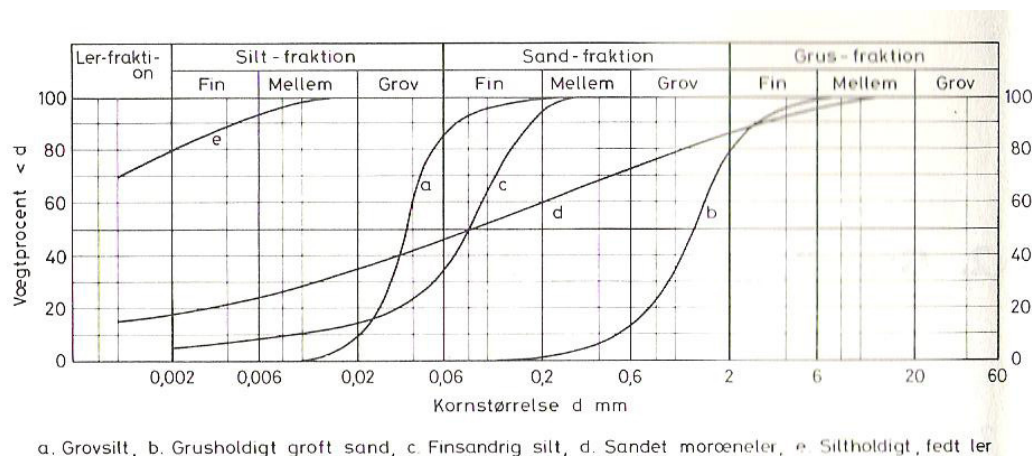


Figur 6: Korrektions skemaer og grafer til hydrometeranalyse (W. Lund, 1981).

Der er usikkerhed omkring de faktorer, som er blevet aflæst på figur 6. Disse er ikke sammenhængende med det hydrometer, som projektgruppen har benyttet. De ansatte ved Aalborg Universitet havde ikke kendskab til eksistensen af de nødvendige grafer for det benyttede hydrometer. Projektgruppen har derfor antaget, at hydrometret svarer til hydrometer nr. 476.

Prøverne opnåede ikke plastisk tilstand inden forsøgets start. Dette medførte efterfølgende et problem, hvor en lille tørstofs mængde, under de ca. 50 g der var målet, resulterede i unøjagtigheder i bestemmelsen af det procentvise indhold. Dette er primært et problem på jordprøve 1, men da denne har et godt resultat mht. bestemmelse af konsistensgrænser, er det ikke ødelæggende for klassificeringen.

Når sigte- og hydrometeranalysen er udformet, kan kornkurven tegnes. På figur 7 ses eksempler på kornkurver for forskellige jordarter. Den del af kurven, som stammer fra hydrometeranalysen, kaldes slemmekurven.



Figur 7: Kornkurver for forskellige jordarter. (Harremoës et al., 2005).

A.5 GLØDETAB

Formålet med glødetabforsøget er at finde den procentvise vægt af materiale, der brændes væk. Det materiale, der brændes væk, er det organiske materiale samt jordens indhold af kalk. Forsøgene er lavet i henhold til (Dansk Standard, 2000)

Skålen bliver vejjet, hvorefter skålen og den tørre jordprøve bliver vejjet. Prøven varmes til 975°C i en periode på ca. 24 timer. Derefter vejes prøven igen, og kalkindhold samt organisk indhold kan beregnes med formel (A.5).



$$GI\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100\% \quad (A.5)$$

Hvor:

$GI\%$ = Glødetabet i procent

m_1 = Den tørre jordprøve i g

m_2 = Jordprøven efter opvarmning i g

Efterfølgende skal kalkindholdet bestemmes for at isolere indholdet af organisk materiale.

A.6 BESTEMMELSE AF KALKINDHOLD

Der er to formål med at bestemme indholdet af kalk. For det første at finde jordens kalkindhold, og for det andet at opnå vished omkring det organiske indhold i jorden ved at sammenligne resultaterne fra dette forsøg med dem fra glødetab.

Forsøget foregår ved at en udvasket prøve nedtørres og derefter knuses i en morter. Prøven vejes, og der tilsættes 25 ml 1 mol saltsyre (HCl), hvilket reagerer med kalken og får prøven til at boble. Hvis det bruser meget tilsættes yderligere 25 ml.

Når det er holdt op med at bruse, tilsættes destilleret vand, og prøven bliver koges ved svag varme. Derefter bliver en autoburette benyttet til at udligne det overskydende saltsyre med natriumhydroxid (NaOH), som kan ses på figur 8.



Figur 8: Autoburette som blander prøven med NaOH til en pH på 7.

Mængden af det tilsatte natriumhydroxid registreres og stoppes når pH-værdien når 7. Derefter beregnes kalkindholdet ud fra formel (A.6).

$$k\% = \frac{5 \cdot (ml_{HCl} - ml_{NaOH})}{g_{mat}} \quad (A.6)$$

Hvor:

$k\%$ = kalkindholdet i procent

g_{mat} = er gram prøvemateriale

Når både kalkprocenten og glødetabet er kendt, kan mængden af det organiske stof bestemmes ved brug af formel (A.7).

$$Org\% = Gl\% - 0,44 \cdot k\% \quad (A.7)$$

Hvor:

$Org\%$ = Organiskindhold i procent