



Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Arbetsrapport 16
2000-04

Laboratorieinblandning för stabilisering av lera –Referensmetod

Torbjörn Edstam

Svensk Djupstabilisering

Svensk Djupstabilisering (SD) är ett centrum för forskning och utveckling inom djupstabilisering med kalk-cementpelare. Verksamheten syftar till att initiera och bedriva en branschsamordnad forsknings- och utvecklingsverksamhet, som ger säkerhetsmässiga, funktionsmässiga och ekonomiska vinster som tillgodoser svenska intressen hos samhället och industrin. Verksamheten baseras på en FoU-plan för åren 1996-2000. Medlemmar är myndigheter, kalk- och cementleverantörer, entreprenörer, konsulter, forskningsinstitut och högskolor.

Verksamheten finansieras av medlemmarna samt genom anslag från Byggforskningsrådet, Svenska byggbranschens utvecklingsfond och Kommunikationsforskningsberedningen.

Svensk Djupstabilisering har sitt säte vid Statens geotekniska institut (SGI) och leds av en styrgrupp med representanter för medlemmarna.

Ytterligare upplysningar om verksamheten lämnas av SD:s projektledare Göran Holm, tel: 013-20 18 61, 070-521 09 39, fax: 013-20 19 14, e-post: goran.holm@swedgeo.se, <http://www.swedgeo.se/sd.htm>.

Swedish Deep Stabilization Research Centre

The Swedish Deep Stabilization Research Centre coordinates research and development activities in deep stabilization of soft soils with lime-cement columns. A joint research programme based on the needs stated by the authorities and the industry is being conducted during the period 1996 - 2000. Members of the Centre include authorities, lime and cement manufactures, contractors, consultants, research institutes and universities.

The work of the Swedish Deep Stabilization Research Centre is financed by its members and by research grants.

The Swedish Deep Stabilization Research Centre is located at the Swedish Geotechnical Institute and has a Steering Committee with representatives chosen from among its members.

Further information on the Swedish Deep Stabilization Research Centre can be obtained from the Project Manager, Mr G Holm, tel: +46 13 20 18 61, fax: +46 13 20 19 14 or e-mail: goran.holm@swedgeo.se, <http://www.swedgeo.se/sd.htm>.



Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Arbetsrapport 16
2000-04

Laboratorieinblandning
för stabilisering av lera
– Referensmetod –

Torbjörn Edstam

Förord

Svensk Djupstabilisering (SD) baserar verksamheten på sin FoU-plan som bl a innehåller ett antal stora FoU-projekt. För att öka underlaget för dessa forskningsprojekt satsar SD på kompletterande mätningar/analyser i lämpliga förstärkningsprojekt. Redovisningen av dessa mätningar /analyser granskas inte av SD, utan redovisade resultat och framförda åsikter är författarens. Redovisningarna är arbetsrapporter inom SD. Även delredovisningar av FoU-projekt inom SD sker i SD:s arbetsrapportserie. Rapporter i SD:s arbetsrapportserie skall endast användas internt inom SD och inte spridas utanför SD.

Föreliggande arbetsrapport är en komplett redovisning av FoU-projektet ”Referensmetod för laboratorieinblandning av lera” omfattande ett flertal rapporter.

Linköping i april 2000

Göran Holm
Projektledare för SD

Arbetsrapport	Svensk Djupstabilisering c/o Statens geotekniska institut 581 93 Linköping
Beställning (endast för medlemmar av SD)	Tel: 013-20 18 42 Fax: 013-20 19 14 E-post: birgitta.sahlin@swedgeo.se
Upplaga	150 ex
Tryckeri	Roland Offset AB, Linköping, maj 2000

Inledning

På uppdrag av Svensk Djupstabilisering (SD) har Statens geotekniska institut (SGI) drivit ett projekt i syfte att utveckla en förbättrad metod för laboratorietillverkning av kemiskt stabiliserade provkroppar.

Bakgrunden till projektet är att den metod (eller snarare metoder) som idag används ofta leder till att provkroppar med identisk sammansättning (åtminstone tror man att de har det) uppvisar stor spridning vid bestämning av t.ex. hållfastheten. Därmed är det svårt, eller till och med omöjligt, att genomföra laboriestudier i syfte att påvisa stabiliseringseffektens koppling till t.ex. olika jordar, bindemedelstyper, bindemedelsmängder och härdningstid.

Storleken på de mekaniska egenskaperna hos provkroppar tillverkade i laboratoriet skiljer sig normalt avsevärt ifrån de som erhålls i pelare tillverkade i fält. Därför har **målsättningen med projektet** varit att utveckla en tillverkningsmetod som resulterar i god reproducerbarhet (liten spridning). De mekaniska egenskapernas storlek, i absoluta tal, har däremot inte varit av primärt intresse.

Projektet har **genomförts** och **dokumenterats** enligt följande:

- Utveckling av en konceptprototyp. Resultatet framgår av rapporten ”Tillverkning och testning av prototyp för Referensmetod. Preliminär slutrapport”, daterad 970830.
- Tillverkning och testning av en fullskaleprototyp. Resultatet framgår av rapporten ”Tillverkning och testning av prototyp i full skala. Preliminär slutrapport”, daterad 98-07-13.
- Kompletterande testning av fullskaleprototypen. Resultatet framgår av rapporten ”Kompletterande kontroll av Blandaren. Slutrapport”, daterad 1999-04-12.
- Kompletterande testning av konceptprototypen. Resultatet framgår av rapporten ”Förnyad kontroll av den Lilla Blandaren. Slutrapport”, daterad 1999-10-08.

Dokumentationen av projektet utgörs av således av ovannämnda rapporter som samlats i denna skrift. Utöver dessa rapporter har artikeln ”A New method for laboratory preparation of stabilised clay” publicerats i proceedings till konferensen ”International conference on dry mix methods for deep soil stabilization, Stockholm, Oct. 1999”, med Torbjörn Edstam och Peter Carlsten som författare.

Konceptprototypen och **fullskaleprototypen** finns idag på laboratoriet hos SGI, Linköping.

Linköping i april 2000

Torbjörn Edstam

Innehåll

Inledning	3
Tillverkning och testning av prototyp för Referensmetod. Preliminär slutrapport	7
Tillverkning och testning av prototyp i full skala. Preliminär slutrapport	53
Kompletterande kontroll av Blandaren. Slutrapport	69
Förnyad kontroll av den Lilla Blandaren. Slutrapport	87

SVENSK DJUPSTABILISERING

**Laboratorietillverkning av kemiskt
stabiliserade provkroppar**

**Tillverkning och testning av
prototyp för Referensmetod**

Preliminär slutrapport 970830

Datum:	1997-08-30
Objekt:	1-9610-543
Kontaktpersoner:	Peter Carlsten Torbjörn Edstam

Förord

Svensk Djupstabilisering har tagit fram en omfattande FoU-plan för att öka kunskapen om djupstabilisering med kalk-cementpelare. I denna plan ingår ett flertal projekt som innefattar tester på laboratorietillverkade provkroppar. Föreliggande projekt har genomförts i syfte att ta fram en referensmetod för laboratorietillverkning av stabiliserade provkroppar, eftersom dagens metod medför att provkropparnas egenskaper alltför mycket påverkas av vem som tillverkar dem.

Projektet har samfinansierats av Svensk Djupstabilisering och SGI.

I referensgruppen har representanter från laboratorier och SGFs Laboratiekommité ingått, nämligen:

Gunnar Tibblin, VBB-VIAK
Lennart Nilsson, Scandiaconsult
Bertil Svensson, Geolab (VBB-VIAK fr.o.m. juni 1997)

Dessutom har personalen på laboratorierna som ingått i studien bidragit med värdefull hjälp och goda råd.

Ett stort tack riktas till samtliga ovanstående.

Linköping i augusti 1997

Torbjörn Edstam

Peter Carlsten

Förord	9
Sammanfattning	12
1. Inledning.....	16
1.1. Bakgrund och syfte	16
1.2. Genomförande och omfattning.....	16
2. Tillverkningsprocedur med nuvarande metoder.....	17
2.1. Inledning.....	17
2.2. Homogenisering av lera.....	17
2.3. Blandning av stabiliseringsmedel och lera	17
2.4. Formning av provkroppar	17
3. Reproducerbarhet med nuvarande metoder (Etapp 1).....	19
3.1. Inledning.....	19
3.2. Lerans och provkropparnas sammansättning.....	20
3.3. De stabiliserade provkropparnas ytstruktur	22
3.4. Reproducerbarhet inom laboratoriet.....	23
3.5. Reproducerbarhet mellan laboratorierna	24
3.6. Spännings-töjningskurvans form.....	26
4. Framtagen prototyp för modifierad tillverkningsmetod (Etapp 2)	27
4.1. Inledning.....	27
4.2. Homogenisering av lera och inblandning av stabiliseringsmedel	27
4.3. Formning av provkropparna	29
4.4. Resultat.....	31
5. Reproducerbarhet med modifierad metod (Etapp 3).....	32
5.1. Inledning.....	32
5.2. Lerans och provkropparnas sammansättning.....	32
5.3. De stabiliserade provkropparnas ytstruktur	34
5.4. Reproducerbarhet inom laboratorierna	35
5.5. Reproducerbarhet mellan laboratorierna	35
5.6. Spännings-töjningskurvans form.....	37
6. Analys av resultat med nuvarande och modifierad metod	38
7. Slutsatser och rekommendationer	39
8. Förslag på referensmetod	41
8.1. Inledning.....	41
8.2. Erforderlig utrustning	41
8.3. Utförande	41
8.3.1. Homogenisering av ostabiliserad lera.....	41
8.3.2. Tillsättning av stabiliseringsmedel	42
8.3.3. Blandning av stabiliseringsmedel och lera	42
8.3.4. Formning av provkroppar	42
8.4. Bestämning av hållfasthet.....	42
9. Förslag på fortsatt arbete	43
10. Referenser.....	44
Bilaga A Utvärderad skjuvhållfasthet	
Bilaga B Spännings-töjningskurvor vid enaxliga tryckförsök	

Sammanfattning

Inledning

Vid laboratorietillverkning av stabiliserade provkroppar ställs krav på god reproducerbarhet och problemfri funktion oavsett jordtyp, men tyvärr uppfyller inte dagens tillverkningsmetod dessa krav. Projektets mål har därför varit att utveckla en metod som uppfyller kraven.

Undersökta tillverkningsmetoder

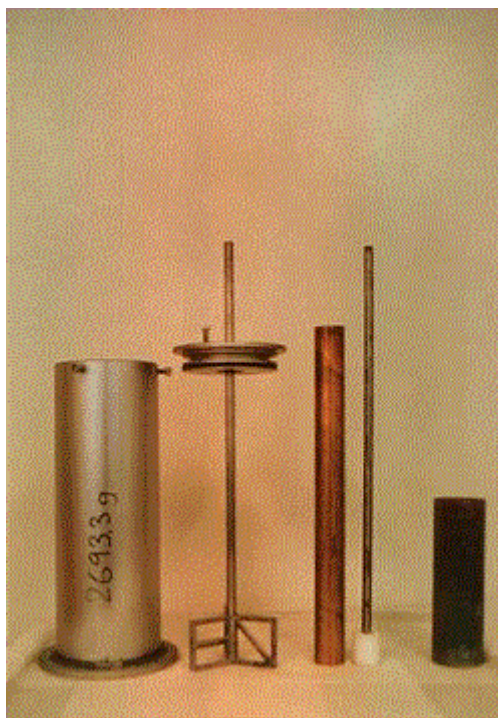
Idag tillverkas provkroppar genom att först blanda jorden och stabiliseringsmedlet. Därefter formas provkroppen genom packning. Blandningen utförs vanligen med någon form av köksmixer eller cementblandare, men även helt manuell blandning förekommer. Packningen sker i hylsor för kolvprovtagare genom att skiktvis packa materialet med en stämpel. Normalt anbringas ett statiskt stämpeltryck, i storleksordningen 100 á 200 kPa, under ca 10 sekunder. Vid ett av de medverkande laboratorerna utförs dock en dynamisk packning, vilken åstadkoms genom att placera en ca 1 kg tung stämpel mot provets överyta och stöta det tre gånger mot en bänk. Oavsett vilken metod som används krävs ofta en mängd manuella ingrepp eftersom diverse problem uppstår.

Den nya metoden omfattar blandning av jorden och stabiliseringsmedlet i en behållare. Därefter formas provkroppen genom stansning direkt i behållaren. Behållaren är helt sluten och blandningen utförs genom att rotera ett blandarverktyg samtidigt som det förs fram och tillbaka i behållaren, se Figur 1. Metoden ger en god blandning och samtidigt en viss packning. Stansningen utförs med hylsor för kolvprovtagning.

Utförda tester

Lera från västkusten (Eka, $w_n \approx 75\%$) och Mälardalen (Jäder, $w_n \approx 110\%$) blandades med kalk och/eller cement enligt Tabell 1. Fyra laboratorier/personer tillverkade vardera tre jämförbara provkroppar av respektive blandning. För att eliminera eventuella ovidkommande fel lagrades alla provkroppar på samma ställe och testades med samma utrustning. Bestämning av vattenkvot, densitet och CaO-innehållet visade att alla jämförbara prover hade likadan sammansättning, vilket innebär att uppmätta avvikelser avspeglar kvalitén på tillverkningsmetoden. Reproducerbarheten kontrollerades genom att jämföra hållfastheten vid enaxligt tryckförsök.

I Etapp 1 tillverkade laboratorerna provkroppar på för dem normalt sätt och provkropparna testades efter 28 respektive 56 dygn. I Etapp 3 använde samtliga laboratorier den nya utrustningen. Vid varje blandning formades provkropparna dels genom stansning (ett prov per blandning) och dels genom packning (tre prov per blandning). Vid packningen använde alla laboratorier/personer samma utrustning, packningstryck, etc.



Figur 1. Ingående delar i blandningsutrustningen.
a) Från vänster till höger ses blandarcylindern; blandarverktyget med tillhörande stång och blandarcylinderns lock; KC-rör och KC-plugg i änden på en stång för ifyllning av stabiliseringsmedel. Längst till höger har en kolvborrhylsa placerats som referensobjekt med avseende på utrustningens storlek.
b) Blandarutrustningen monterad i bormaskinstativ

Tabell 1. Provkropparnas sammansättning.

Provbenämning	EKA-A	EKA-B	JÄDER-A	JÄDER-B
Kalk/cementproportion	100/0	50/50	50/50	50/50
Tillsatt mängd [kg/m ³]	92	92	80	110

Resultat

Med dagens metod (Ettapp 1) är den maximala avvikelsen för den enskilda provkroppen 22 % jämfört med medelhållfastheten om endast provkroppar inom respektive laboratorium jämförs (lokal reproducerbarhet). Jämförs laboratorierna sinsemellan (global reproducerbarhet) kan dock avvikelsen i sämsta fall uppgå till 53% för enskilda provkroppar. Om medelvärdena för laboratorierna jämförs sinsemellan (global medelreproducerbarhet) är avvikelsen i sämsta fall 35 %.

Med den nya utrustningen (Ettapp 3) är den lokala reproducerbarheten för packade provkroppar sämre än tidigare (maximalt 35 % avvikelse, se Figur 2) medan den globala reproducerbarheten är något bättre (maximalt 43 % avvikelse, se Figur 3) och den globala medelreproducerbarheten är mycket bättre (maximalt 12 %, se Figur 4). Eftersom endast en

provkropp stansades ur varje blandning kunde endast den globala reproducerbarheten för stansade provkroppar bestämmas. Den maximala avvikelsen uppgår då till 12 %, se Figur 2. Medelhållfastheten är ungefär lika stor för packade och stansade provkroppar, se Figur 4. Däremot är de stansade provkropparnas styvhet i vissa fall nästan 50 % lägre än för de som packats.

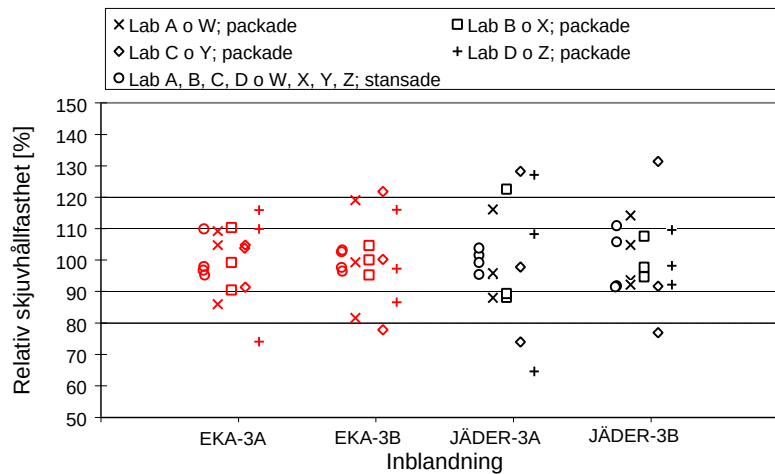
Under utvecklingen av den nya utrustningen utfördes flera mindre försöksserier då bl.a. siltig lera ($w_n \approx 40$ %) och högförmultnad torv ($w_n \approx 500$ %) testades. Den maximala avvikelsen för enskilda stansade provkroppar överstiger i dessa fall aldrig 10%. Då jordens naturliga vattenkvot var hög var det ofta mycket svårt att forma provkroppar genom packning och då gytta stabiliserades var det omöjligt eftersom materialet klibbade fast på stämpeln.

Slutsatser och rekommendationer

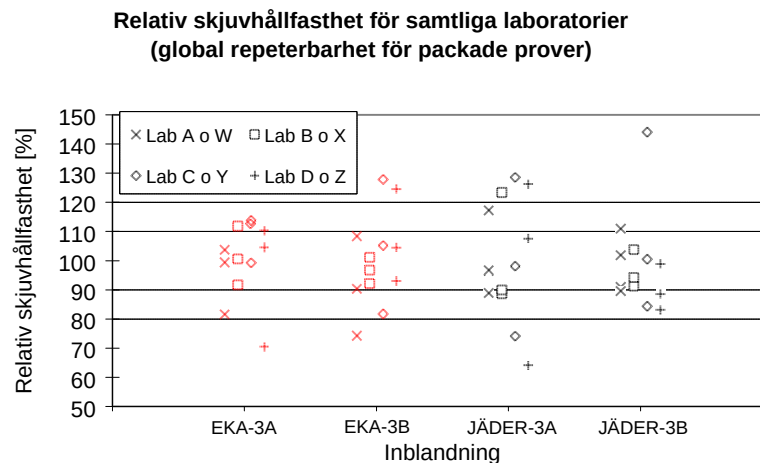
Utförda tester visar att den nya metoden ger god reproducerbarhet för en mängd olika jordtyper med en naturlig vattenkvot (innan inblandning) i intervallet ca 40-500 %. Enskilda provkroppars hållfasthet avviker inte mer än ca 10 % från medelhållfastheten om dessa formas genom stansning. Om provkropparna formas genom packning erhålls en god reproducerbarhet om medelhållfastheten, baserad på trippelprov, används. Inte heller i detta fall blir avvikelsen större än ca 10 %. Det är dock svårt, i vissa fall omöjligt, att packa provkroppar om den ostabiliserade jordens naturliga vattenkvot är för hög ($> ca 100$ %).

Försämringen av den globala reproducerbarheten för packade provkroppar i Etapp 3 jämfört med Etapp 1 beror troligen på att laboratorierna/personerna inte var vana vid den använda utrustningen. Den kraftiga förbättringen av den globala medelreproducerbarheten för packade provkroppar beror på att samtliga laboratorier denna gång använde en betydligt mer likartad tillverkningsmetod, vilket eliminerar systematiska skillnader. Den mycket goda globala reproducerbarheten för stansade provkroppar beror på att samtliga laboratorier använder samma utrustning och att metoden är utformad så att svårkontrollerade moment eliminerats. De stansade provkropparnas lägre styvhet jämfört med de packade beror troligen på att porositeten är jämnt fördelad i de förra medan den är mer koncentrerad till mantelytan i de senare.

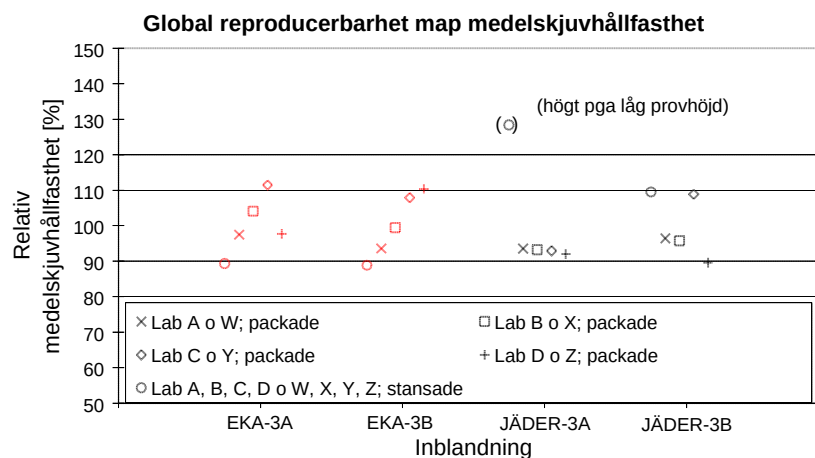
Den referensmetod som föreslås för laboratorietillverkning av stabiliserade provkroppar inom projekt tillhörande Svensk Djupstabiliserings forskningsplan innebär att provkroppar tillverkas enligt den utvecklade metoden med stansning. Tillförlitligheten är då så hög att enskilda provkroppar kan användas vid jämförande studier. Vidare är denna procedur enkel att standardisera och kontrollera. Dessutom fungerar den i alla jordar som normalt används. Eftersom packningsmomentet som finns i dagens metod elimineras innebär den nya metoden dessutom en stor tidsvinst. Nackdelarna är att antalet provkroppar som kan stansas per blandning helt styrs av blandarcyklinderns diameter och att endast ca 50 % av materialet som ingår i blandningen används vid stansningen. Den senare nackdelen kan dock minskas genom att använda det resterande materialet för tillverkning av packade provkroppar. Samtliga packade provkroppar bör i så fall provtryckas vid en gemensam tidpunkt, förslagsvis någon gång mellan första och sista provningstillfället för de stansade provkropparna. För att vara praktiskt användbar behöver den testade prototypens diameter ökas med knappt 50 %. Rekommenderad dimension och en detaljerad instruktion för handhavandet redovisas i Kapitel 8.



Figur 2. Lokalt normaliserad skjuvhållfasthet i Etapp 3 vid enaxliga tryckförsök . Provkropparna som stansats betraktas som tillverkade av ett laboratorium för respektive blandning.



Figur 3. Globalt normaliserad skjuvhållfasthet för packade provkroppar i Etapp 3 vid enaxliga tryckförsök.



Figur 4. Globalt normaliserad skjuvhållfasthet i Etapp 3 vid enaxliga tryckförsök.

1. Inledning

1.1. Bakgrund och syfte

Inom ramen för Svensk Djupstabiliserings forskningsprogram skall flera projekt genomföras som bland annat omfattar provning av laboratorietillverkade provkroppar. För att resultaten från de olika projekten skall vara jämförbara är det av största vikt att en metod används som inte påverkas av den mänskliga faktorn utan ger reproducerbara provkroppar. Syftet med föreliggande projekt har primärt varit att utveckla en sådan referensmetod. Det bör dock påpekas att ingen jämförelse med hållfastheten erhållen i fält har skett. Syftet har enbart varit att öka reproducerbarheten i laboratoriet. Samtidigt har strävan varit att göra metoden så enkel att den, om önskvärt, kan användas vid rutinmässig tillverkning av provkroppar vid konsultuppdrag.

1.2. Genomförande och omfattning

Projektet har genomförts i tre etapper enligt följande:

Ettapp 1

Fyra svenska laboratorier med stor erfarenhet av att tillverka provkroppar erhöll likadan lera, kalk och cement och utförde tillverkning enligt respektive laboratoriums normala förfarande. Detta dokumenterades noggrant och laboratoriepersonalen intervjuades om sina erfarenheter av tillverkningsproceduren. Provkropparna lagrades och provades på SGI för att i största möjliga omfattning eliminera eventuell inverkan av faktorer som inte är direkt kopplade till tillverkningsproceduren.

Ettapp 2

Baserat på de erfarenheter som framkom i Ettapp 1 utvecklades en ny metod för tillverkning av provkroppar. Denna metod testades på SGI i samband med tillverkning av provkroppar innehållande siltig lera, lera, gyttja och torv med en naturlig vattenkvot i intervallet ca 40 till 500 %. Den tillsatta mängden stabiliseringsmedel (såväl kalk, cement som Lohjamix) varierade mellan 50 och 250 kg/m³.

Ettapp 3

De fyra laboratorierna som tillverkade provkropparna i Ettapp 1 upprepade detta, med likadan lera, kalk och cement som tidigare, men denna gång använde samtliga laboratorierna den utrustning som utvecklats i Ettapp 2.

De provkroppar som tillverkades i Ettapp 1 och 3 utgjordes dels av lera från Västkusten ($w_n \approx 75\%$) och dels av lera från Mälardalen ($w_n \approx 110\%$). Totalt testades fyra olika sammansättningar av lera, kalk och cement och varje laboratorium tillverkade tre (i vissa fall fyra) jämförbara provkroppar av varje sammansättning.

2. Tillverkningsprocedur med nuvarande metoder

2.1. Inledning

Idag finns ingen anvisning för hur stabiliserade provkroppar skall tillverkas i laboratoriet. Däremot har ett förslag till anvisning tagits fram, Carlsten & Ekström (1995). Vid intervjuerna med de olika laboratorierna framkom att man i de flesta fallen i stort sett följer rekommendationen, men i några avssenden var avvikelser stor.

2.2. Homogenisering av lera

Homogeniseringen utförs normalt i någon form av cementblandare eller köksmixer, där antingen skålen eller blandarverktyget roterar, se Figur 1. Homogeniseringen pågår normalt i 2 till 6 minuter. I ett fall utförs homogeniseringen genom att enbart använda händerna. Efter utförd homogenisering, som normalt utförs dagen innan inblandningen med stabiliseringsmedlet, tas prover för bestämning av den ostabiliserade jordens vattenkvot.

2.3. Blandning av stabiliseringsmedel och lera

Samma utrustning som vid homogeniseringen används. Önskad mängd stabiliseringsmedel strös ut på lerans överyta, ibland allt på en gång och ibland portionsvis. Inblandningstiden uppgår normalt till 4 till 10 minuter. I de fall då maskinell inblandning används måste man ibland dessutom röra om manuellt i materialet för att erhålla en tillfredsställande blandning.

2.4. Formning av provkroppar

Formningen av provkropparna utförs genom att på något sätt packa den stabiliserade leran i hylsor för kolvprovtagare. Provkropparna formas genom packning i lager om ca 2-4 cm (efter packning). Dellagren skapas genom att lägga i klumpar av material i hylsor och därefter komprimera lagret då det blivit så tjockt att den förväntade tjockleken erhålls. Normalt utförs komprimeringen med hjälp av en packningsapparat där ett statiskt tryck läggs på ca 5 á 10 sekunder, se Figur 2. I ett fall sker dock en dynamisk packning, vilken åstadkoms genom att placera en ca 1 kg tung stämpel mot provets överyta och stöta det tre gånger mot en bänk, se Figur 1b. I de fall då ett statiskt tryck läggs på uppgår detta till i storleksordningen 100 á 200 kPa (räknat på hylsans tvärsnittsarea), men den exakta storleken är inte kontrollerbar. Det har visat sig att denna statiska metod ofta inte fungerar då gyttjigt och/eller sulfidhaltigt material används eftersom materialet klibbar fast mot stämpeln. I dessa fall måste packningstrycket minskas och flera manuella ingrepp krävs för att tillverka provkropparna.



a)



b)



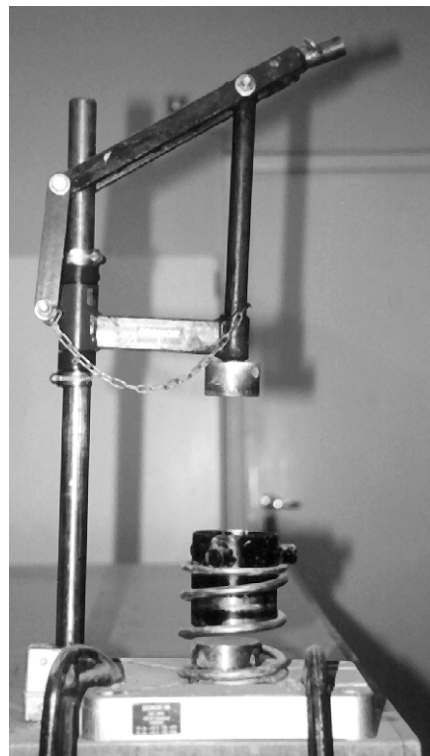
c)

Figur 1. Vanligen förekommande blandarutrustningar.

a) köksmixer.

b) diskbalja vid manuell inblandning (stämpeln mellan diskbaljan och kolvborrhylsan används av ett av laboratorierna vid packning).

c) cementblandare.



Figur 2. Packningsutrustning typ statisk belastning.

3. Reproducerbarhet med nuvarande metoder (Etapp 1)

3.1. Inledning

För att avgöra hur väl nuvarande metoder fungerar fick fyra laboratorier, hädanefter benämnda W, X, Y och Z, i uppdrag att tillverka provkroppar innehållande lera och stabiliseringsmedel som ur praktisk synvinkel kunde antas vara identiska.

Laboratorium W utförde homogeniseringen och blandningen för hand. Provkropparna formades med utrustningen i Figur 1b. Övriga laboratorier (X, Y och Z) utförde homogenisering och inblandningen med hushållsassistent/cementblandare, se Figur 1a och c, och formade provkropparna med någon form av packningsapparat, se Figur 2.

Varje laboratorium tillverkade provkroppar med fyra olika sammansättningar, se Tabell 1. För varje sammansättning tillverkade laboratorierna sex provkroppar vardera. Tre av dessa undersöktes efter 28 dygn och de resterande tre efter 56 dygn. Vid undersökningarna bestämdes vattenkvot, densitet och CaO-halt (i utvalda provkroppar). Dessutom bestämdes hållfastheten genom konförsök, fickpenetrometerförsök och enaxligt tryckförsök.

Tabell 1. Provkropparnas sammansättning.

Provbenämning	EKA-A	EKA-B	JÄDER-A	JÄDER-B
Kalk/cementproportion	100/0	50/50	50/50	50/50
Tillsatt mängd [kg/m ³]	92	92	80	110

Samtliga provkroppar lagrades och provades på SGI för att eliminera eventuella faktorer som inte är direkt kopplade till tillverkningsproceduren. Provkropparna som enbart innehöll kalk lagrades i rumstemperatur (+22° C) de 10 första dygnen och resterande tid i +7° C. Övriga provkroppar lagrades vid temperaturen +7° C hela tiden.

Eftersom studien syftade till att jämföra provkropparnas hållfasthet sinsemellan var hållfastheten i absoluta tal inte av primärt intresse. Den uppmätta hållfastheten i absoluta tal redovisas därför endast översiktligt i Tabell 2. En mer detaljerad redovisning ges i Bilaga A.

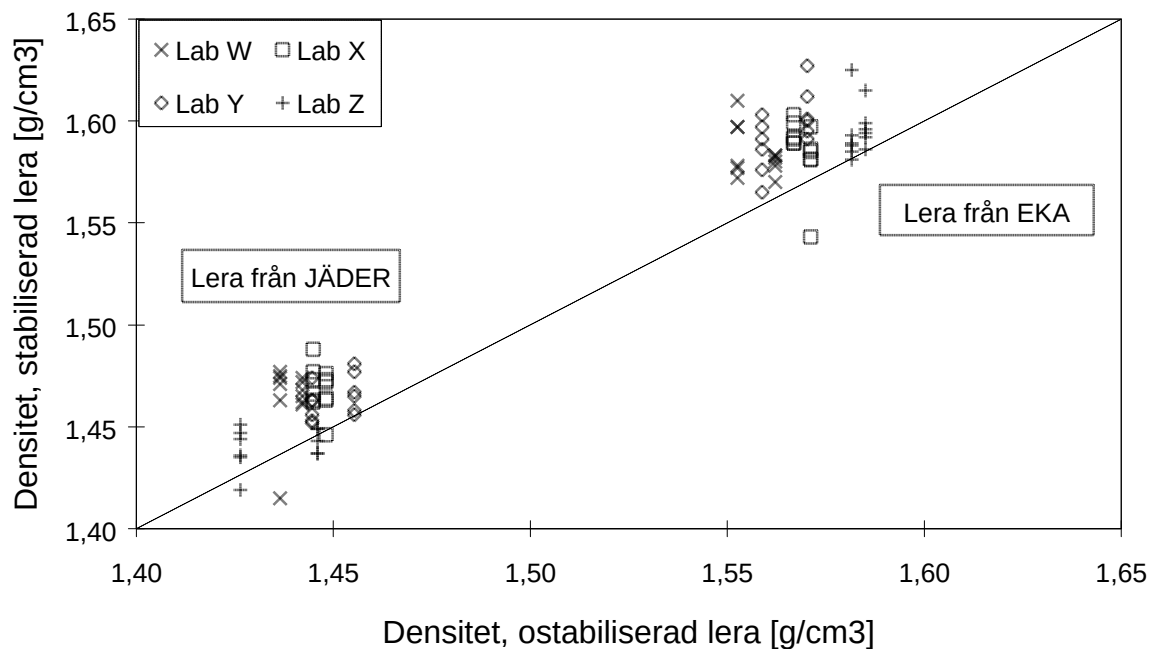
Tabell 2. De stabiliserade provkropparnas skjuvhållfasthet vid enaxliga tryckförsök.

	EKA-A Skjuvhållfasthet [kPa]	EKA-B Skjuvhållfasthet [kPa]	JÄDER-A Skjuvhållfasthet [kPa]	JÄDER-B Skjuvhållfasthet [kPa]
28 dygns lagring	52-88	79-138	37-57	61-97
56 dygns lagring	64-105	86-220	48-74	70-125

En detaljerad redogörelse ges endast för resultaten som erhållits från de enaxliga tryckförsöken eftersom dessa anses mest relevanta. Hållfastheten bestämd med fallkon och fickpenetrometer är av samma storleksordning inbördes, men ca 1,5-3 gånger större än vad som erhållits med enaxligt tryckförsök, se Bilaga A.

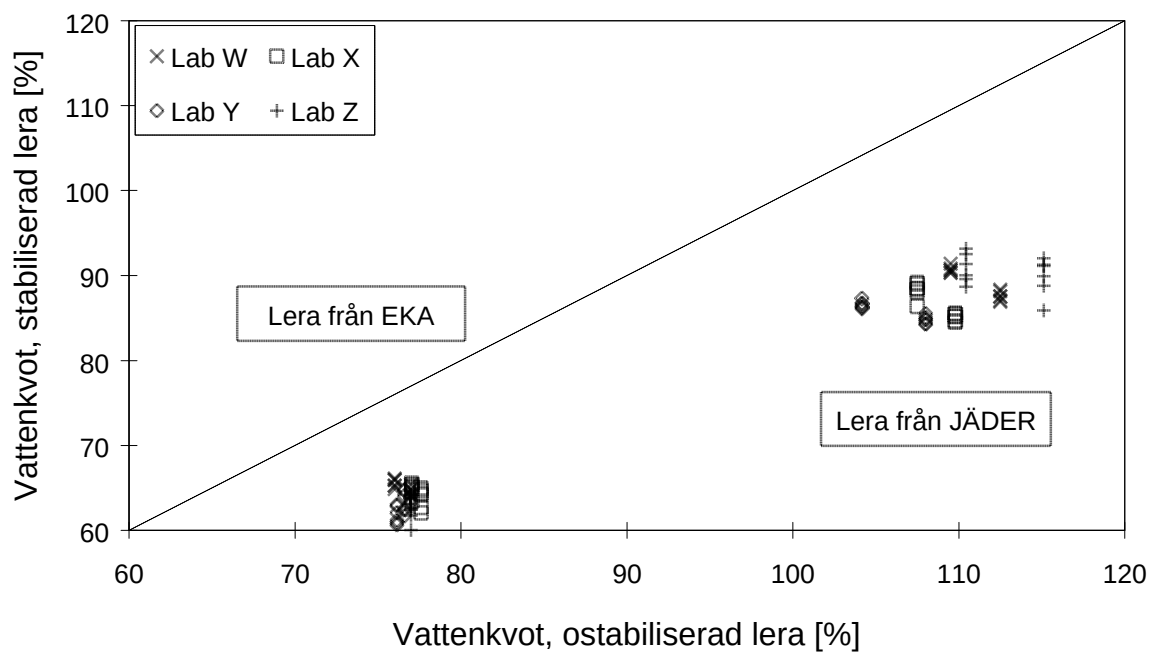
3.2. Lerans och provkropparnas sammansättning

Uppmätt vattenkvot och densitet för den ostabiliserade och stabiliserade lera redovisas i Figur 3. Som förväntat medför stabiliseringen en liten ökning av densiteten och en minskning av vattenkvoten. Vidare har mängden CaO bestämts i några av de stabiliserade provkropparna, se Tabell 3. Som framgår är den inbördes samstämmigheten i samtliga fall mycket god. Det är intressant notera att den naturliga CaO-halten i lera från Eka är ca 25 % av vad som uppmäts i provkropparna efter stabilisering. Motsvarande siffra för lera från Jäder är knappt 10 %. Detta indikerar att CaO-halten innan stabiliseringen måste bestämmas om en rättvisande bild av den tillsatta mängden vid stabiliseringen skall kunna erhållas.



a)

Figur 3a. Det ostabiliserade och stabiliserade materialets sammansättning (samtliga provkroppar).
a) skrymdensitet.



b)

**Figur 3b. Det ostabiliserade och stabiliserade materialets sammansättning (samtliga provkroppar).
b) vattenkvot.**

Tabell 3. Mängd stabiliseringsmedel i utvalda provkroppar, bestämd genom utfällning av Ca^{2+} -joner (De testade provkropparna utgörs av de provkroppar som uppvisat störst hållfasthetsskillnad för respektive sammansättning).

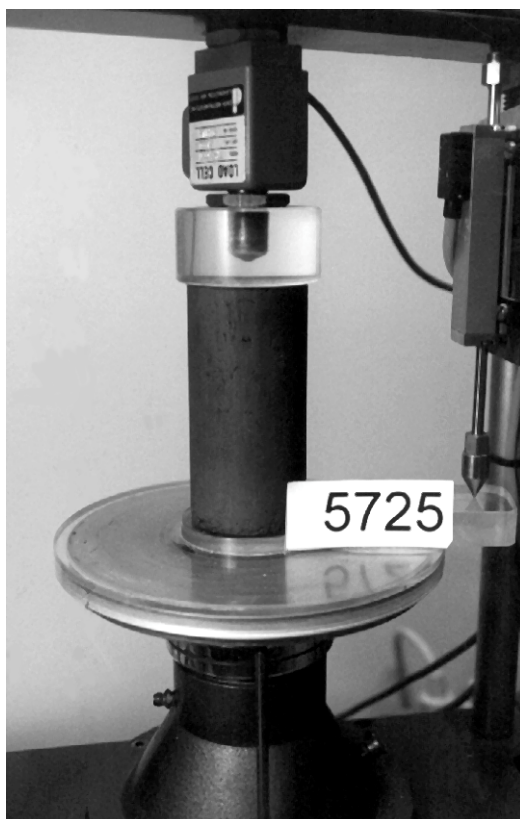
Lokal	Tillsatt mängd [kg/m ³]	Fördelning K/C [%/%]	Uppmätt CaO- koncentration i torra provkroppar [g/kg]	*Naturlig CaO- koncentration [g/kg torr lera]	Skjuvhållfasthet enligt enaxligt tryckförsök [kPa]
EKA-1A	92	100/0	158	70	51,9
EKA-1A	92	100/0	162	75	88,3
EKA-2B	92	50/50	147	70	96,4
EKA-2B	92	50/50	147	70	219,9
JÄDER-1A	80	50/50	109	22	44,7
JÄDER-1A	80	50/50	112	22	57,4
JÄDER-2B	110	50/50	143	24	81,5
JÄDER-2B	110	50/50	143	20	122,2
Kalk	-	-	1000	-	-
Cement	-	-	774	-	-

*Den naturliga CaO-halten i proven (innan tillsats av K/C) är framräknad på basis av uppmätt CaO-koncentration i den aktuella kalken och cementen.

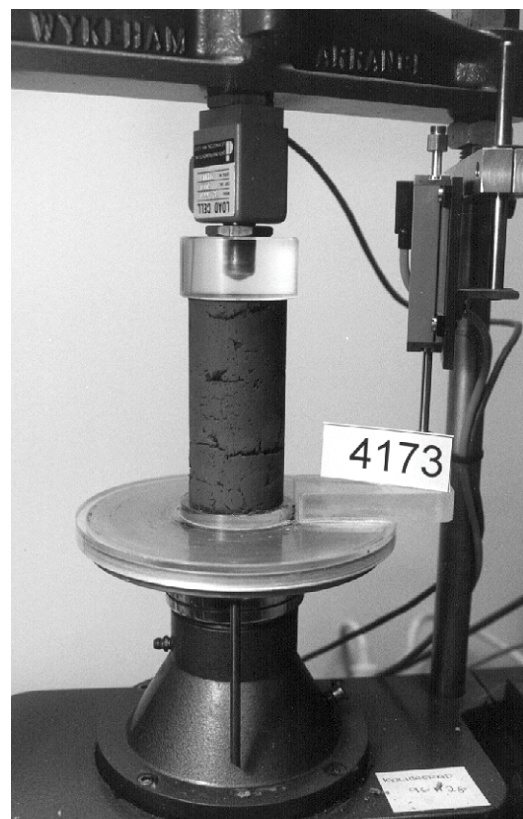
Sammantaget visar de ovan redovisade resultaten att sammansättningen i provkropparna, i de fall den är jämförbar, är i stort sett likadan, dvs de olika laboratorierna har erhållit material och tillverkat provkroppar med sinsemellan likadan sammansättning. Detta innebär alltså att de skillnader i hållfasthet som redovisas nedan kan hänföras till olikheter vid tillverkningen av provkropparna.

3.3. De stabiliserade provkropparnas ytstruktur

I samband med monteringen av de stabiliserade provkropparna i den enaxliga tryckapparaten fotograferades dessa, se Figur 4. Genomgående uppvisade de provkroppar som tillverkats av laboratorium W en mycket slät mantelyta medan de övriga laboratoriernas provkroppar innehöll sprickor och håligheter i varierande grad. Vid sönderdelning av dessa provkroppar visade det sig dock att sprickorna och hålen normalt hade ett djup av endast 1 á 3 mm.



a)



b)

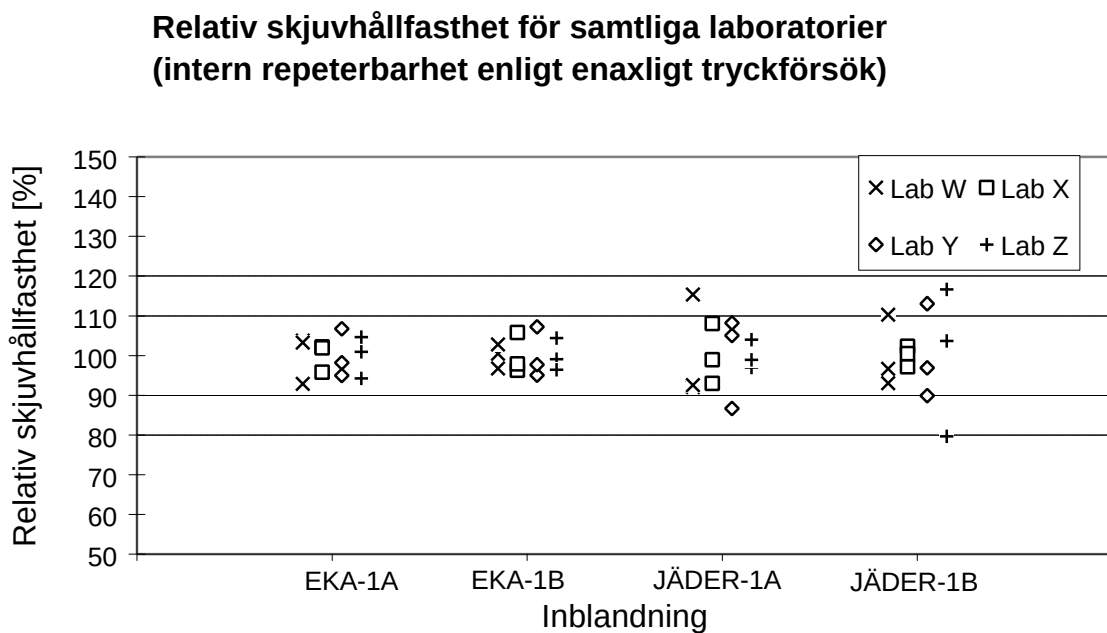
Figur 4. Typiskt utseende hos provkroppar innan hållfasthetsprovning.

a) Laboratorium W.

b) Laboratorium X, Y, och Z.

3.4. Reproducerbarhet inom laboratoriet

För att kvantifiera reproducerbarheten inom respektive laboratorium, den "lokala reproducerbarheten", har de enskilda provkropparnas hållfasthet normaliserats mot medelhållfastheten för respektive laboratorium, sammansättning och lagringstid, se Figur 5. Som framgår är spridningen i de allra flesta fallen mindre än $\pm 10\%$ och aldrig större än $\pm 22\%$. Vidare förefaller den genomsnittliga lokala reproducerbarheten vara något bättre med lera från Eka än från Jäder. Detta var förväntat eftersom lera från Jäder hade högre vattenkvot och var svårare att packa. Slutligen kan konstateras att provkropparna som tillverkats av laboratorierna W och X ger bäst reproducerbarhet medan provkroppar som tillverkats av laboratorium Y ger sämst reproducerbarhet.



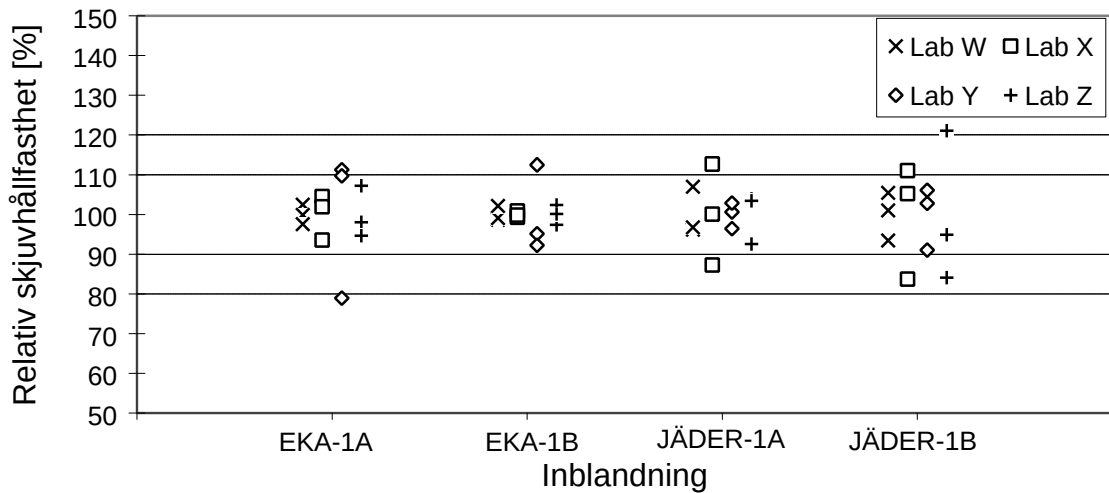
a)

Figur 5a. Lokalt normaliserad skjuvhållfasthet vid enaxliga tryckförsök.

a) 28 dygns lagring.

b) 56 dygns lagring.

Relativ skjuvhållfasthet för samtliga laboratorier (enligt enaxligt tryckförsök)

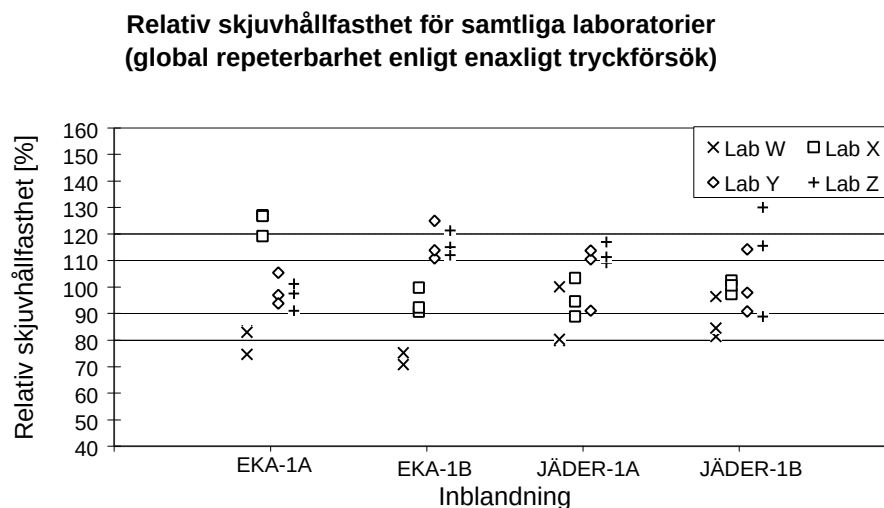


b)

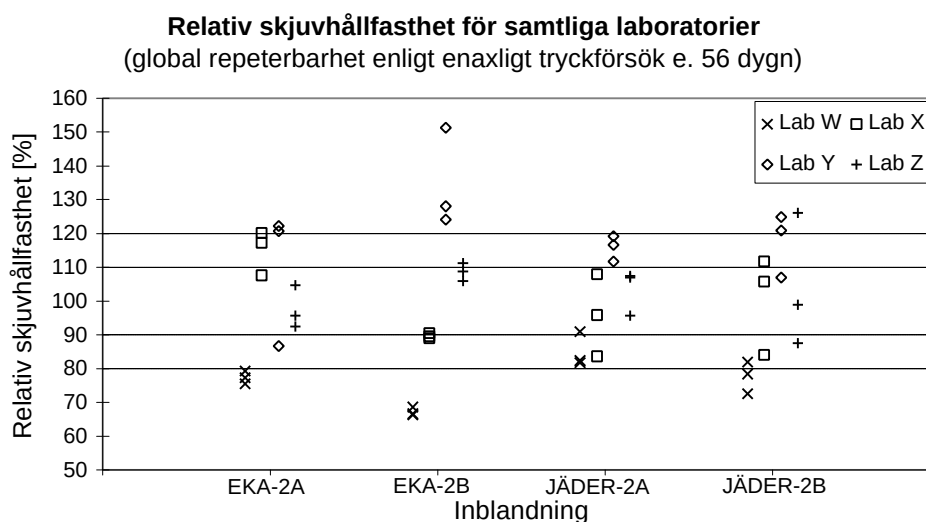
Figur 5b. Lokalt normaliserad skjuvhållfasthet vid enaxliga tryckförsök.
a) 28 dygns lagring.
b) 56 dygns lagring.

3.5. Reproducerbarhet mellan laboratorierna

Reproducerbarheten mellan laboratorierna, den "globala reproducerbarheten", kvantifieras genom att normalisera de enskilda provkropparnas hållfasthet mot medelhållfastheten för respektive sammansättning och ålder, se Figur 6. Som framgår är spridningen i de flesta fallen mindre än ± 20 % och i samtliga fall mindre än ± 53 %. Vidare förefaller den globala reproducerbarheten vara bättre med lera från Jäder än från Eka. Slutligen kan konstateras att provkropparna som tillverkats av laboratorierna X och Z bäst överensstämmer med den genomsnittliga hållfastheten medan provkroppar som tillverkats av laboratorium W avviker mest.



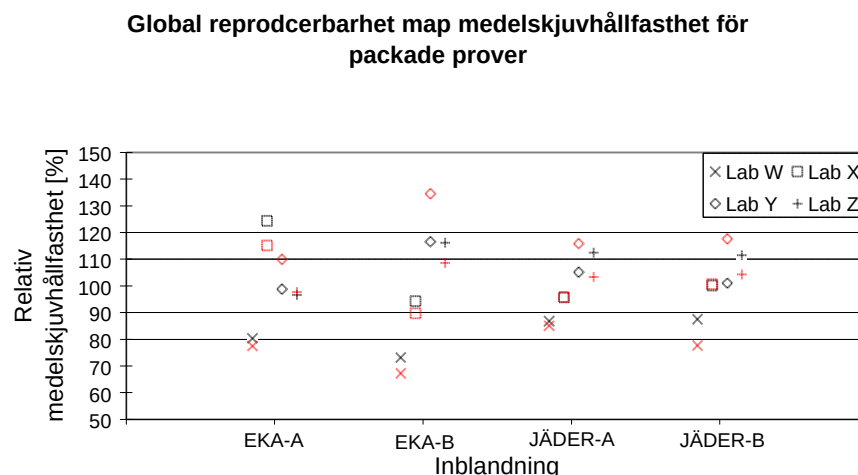
a)



b)

Figur 6. Globalt normaliserad skjuvhållfasthet vid enaxliga tryckförsök.
a) 28 dygn
b) 56 dygn

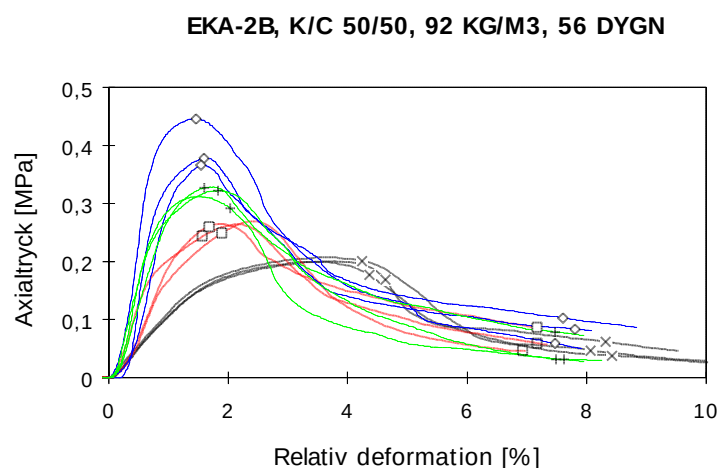
Genom att endast beakta varje laboratoriums medelhållfasthet för respektive blandning (tre provkroppar) kan effekten av enstaka prov med avvikande hållfasthet mildras. Tillförlitligheten i detta betraktelsesätt kan kvantifieras genom att normalisera varje laboratoriums medelhållfasthet mot den globala medelhållfastheten, se Figur 7. Som framgår uppgår spridningen maximalt till $\pm 35\%$.



Figur 7. Globalt normaliserad medelhållfasthet vid enaxliga tryckförsök.

3.6. Spännings-töjningskurvans form

Som framgått av tidigare beskrivning är den lokala reproducerbarheten, baserat på hållfastheten, bättre än den globala. Detta återspeglas i flera fall även mycket tydligt i arbetskurvans form, se Figur 8 (samtliga spännings-töjningskurvor redovisas i Bilaga B). Provkropparna från laboratorium W uppvisar genomgående relativt sett låg hållfasthet och styvhet, men stor brottkompression. Dessutom är dessa arbetskurvor mer "platta" nära brottspänningen jämfört med övriga laboratorier.



Figur 8. Exempel på erhållna spännings-töjningskurvor vid enaxliga tryckförsök (test EKA-2B). (x = Lab W packade; □ = Lab X packade ; ◇ = Lab Y; + = Lab Z packade).

4. Framtagen prototyp för modifierad tillverkningsmetod (Ettapp 2)

4.1. Inledning

Baserat på de erfarenheter och synpunkter som framkom vid testerna med nuvarande metoder ställdes följande krav på en förbättrad tillverkningsprocess:

- förbättrad global reproducerbarhet,
- minskat antal manuella ingrepp,
- problemfri funktion i många olika typer av jord.

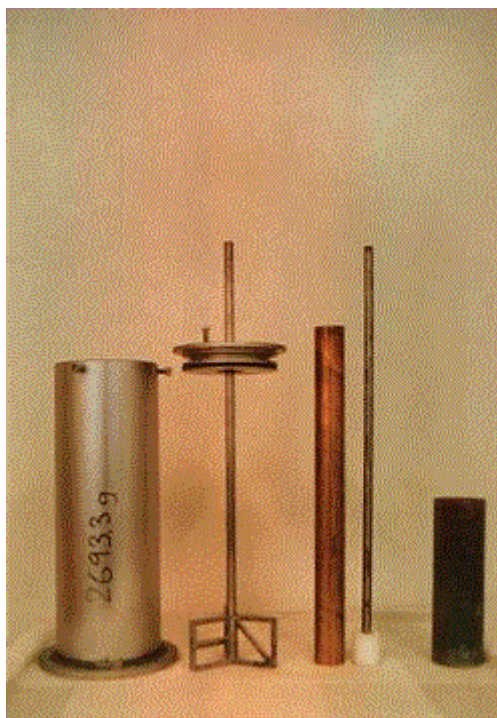
En prototyp utvecklades därför på SGI, delvis baserad på synpunkter från Larsson (1997 a, b), och provades på ett flertal olika jordar, se Tabell 4. Baserat på erfarenheterna av dessa tester utformades den tillverkningsprocess som beskrivs i de följande avsnitten.

Tabell 4. Sammansättning i provkroppar som tillverkats vid utprovning av prototyp för modifierad tillverkning av provkroppar.

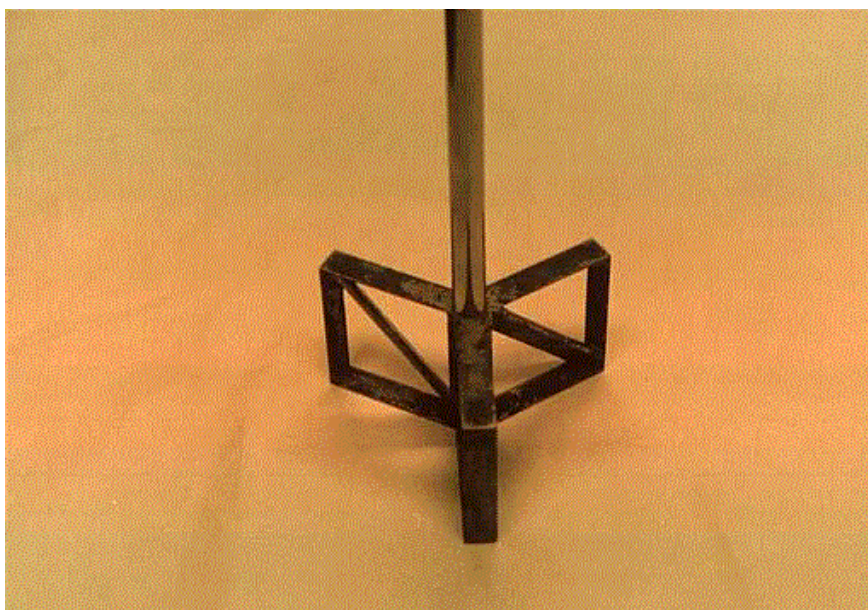
Jordtyp	Naturlig vattenkvot [%]	Typ av stabiliseringsmedel	Tillsatt mängd stabiliseringsmedel [kg/m ³]
Grå, varvig, siltig lera med tunna silt- och sandskikt	39	K/C 50/50	100
Grå lera med skal (Eka)	76	K/C 50/50	100; 150
Gyttjig lera	103	Lohjamix	120
Gråsvart sulfidlera (JÄDER)	110	K/C 50/50	50; 110
Lerig gyttja	155	Lohjamix	120
Gröngrå gyttja	274	K/C 50/50	150; 250
Brunsvart högförmultnad torv	491	K/C 50/50	250

4.2. Homogenisering av lera och inblandning av stabiliseringsmedel

Homogenisering av lera och inblandning av stabiliseringsmedlet utfördes med ett blandarverktyg som rörde sig fram och tillbaka i en sluten cylinder, se Figur 9. Fördelen med detta system är att allt material alltid kommer att tvingas passera genom blandarverktyget (med tidigare utrustningar kunde materialet "kana" framför blandarverktyget utan att någon inblandning erhöles). Cylindern har inre diametern 100 mm och den fria höjden 205 mm (en distans finns i cylinderns botten för att erhålla önskad fri höjd). Blandarverktygets höjd är 50 mm och det omsluter diametern 98 mm vid rotation. För att erhålla en bra inblandning varierar bladens lutning mot centrumstångens axel. Dessutom är bladen snedställda kring sin längdaxel för att få en stor projicerad area mot rörelseriktningen (huvudsakligen tangentiell). Sammantaget gör detta att bladens vinkel mot rörelseriktningen är ca 45°.



a)



b)

Figur 9. Ingående delar i blandningsutrustningen.

- a) Från vänster till höger ses blandarcylindern; blandarverktyget med tillhörande stång och blandarcylinders lock; KC-rör och KC-plugg i änden på en stång för ifyllning av stabiliseringsmedel. Längst till höger har en kolvborrhylsa placerats som referensobjekt med avseende på utrustningens storlek.
- b) Närbild av blandarverktyget.

Blandarutrustningen var monterad i ett bormaskinstativ vid samtliga tester, se Figur 10a. Maskinen roterade med en konstant rotationshastighet medan stigningen sköttes manuellt. De inledande testerna visade att torven krävde mest inblandningsarbete medan leran från Eka krävde minst. Sammantaget visade det sig att rotationshastigheten 100 varv/minut, stigningen 2 mm/varv och 7 passager (dvs verktyget förs upp-ned-upp-ned-upp-ned-upp) krävs för att erhålla ett gott blandningsarbete i torven (mest svårblandat).

Stabiliseringsmedlet tillsattes i form av en vertikal sträng halvvägs ut från cylinderns centrum. För att åstadkomma detta användes ett rör och en plugg fäst i änden på en stång, se Figur 9a och 10b. Ett hål i leran skapades genom att trycka ned röret, med pluggen nedförd till dess underkant, till cylinderns botten. Därefter drogs pluggen upp och röret fylldes med stabiliseringsmedlet. Slutligen drogs röret upp samtidigt som pluggen hölls fixerad mot stabiliseringsmedlets överyta. Tidsåtgången från påbörjad uppdragning av röret till påbörjad inblandning uppgick till 2 minuter i samtliga fall. Därefter utfördes inblandningen enligt ovan.

Det visade sig att en dålig inblandning erhöles om blandarcylindern fylls helt. I sådana fall skar blandarverktyget igenom leran och strängen med stabiliseringsmedel. Genom att endast fylla 90 % av den tillgängliga volymen erhöles dock en god inblandning. Med de aktuella måtten motsvarar detta lera från fyra kolvborrhylsor.

4.3. Formning av provkropparna

Provkropparna formades enligt två olika förfaranden; packning med den metodik som rekommenderas av Carlsten & Ekström (1995) men med varierande packningsenergi (100-200 kPa tryck med 1-10 sekunders varaktighet), samt genom att stansa ut provkroppar direkt ur blandarcylindern med hjälp av kolvborrhylsor. Varje sats räckte till fyra packade provkroppar, eller en stansad och tre packade provkroppar. Orsaken till att endast en provkropp kunde stansas ur är att blandarcylinderns diameter var för liten (100 mm) jämfört med kolvborrhylsans ytterdiameter (54 mm).



a)



b)

**Figur 10. a) Blandarutrustningen monterad i bormaskinstativ.
b) Tillsättning av stabiliseringsmedel.**

4.4. Resultat

De stansade provkropparna hade genomgående en mycket slät mantelyta, men i några fall förekom en ytlig insjunkning längs en stor del av provkroppens höjd. Detta var troligen spår av blandarverktygets centrumstång. De packade provkropparna hade genomgående mer hål och sprickor. Omfattningen av dessa ökade generellt med lerans naturliga vattenkvot och var i gytthan och torven mycket omfattande. I provkropparna med siltig lera förekom få sprickor och hål, men dessa var istället starkt koncentrerade till gränsen för delskikten. Dessa provkroppar var mycket hårda och spröda, vilket gjorde att de lätt bröts av längs skiktgränserna vid förberedelserna för de enaxliga tryckförsöken.

Trots skillnaderna i ytstrukturen var densiteten i stort sett den samma för stansade och packade provkroppar, vilket tyder på att luftporerna fördelas jämnare i de stansade provkropparna.

Reproducerbarheten, baserad på hållfastheten, var mycket god för de stansade provkropparna och det relativa felet understeg i jämförbara fall (torv respektive siltig lera) ca $\pm 10\%$.

De packade provkropparnas hållfasthet var relativt oberoende av packningsenergin, men risken för fastklibbning ökade med ökande vattenkvot och packningstryck. Reproducerbarheten, baserad på hållfastheten, var vanligen god med ett relativt fel understigande ca $\pm 15\%$, men i några fall uppgick den till ca $\pm 30\%$. Någon direkt koppling till omfattningen av sprickor och hål kunde dock inte upptäckas.

Hållfastheten hos de stansade och packade provkropparna var av samma storleksordning. De packade provkropparna tenderade att ha högre hållfasthet än de stansade provkropparna då den ostabiliserade jordens naturliga vattenkvot var låg. Vid högre naturlig vattenkvot hade dock de stansade provkropparna en högre hållfasthet än de packade.

5. Reproducerbarhet med modifierad metod (Ettapp 3)

5.1. Inledning

För att avgöra hur väl den föreslagna metoden fungerade upprepades de tidigare testerna (jfr Kapitel 3) med lera från samma lokaler som tidigare, men denna gång använde laboratorierna den nya utrustningen och tillverkningsmetoden (se Kapitel 4). På grund av tekniska problem tillverkade laboratorierna W, X, Y och Z endast provkroppar innehållande lera från Jäder. Provkropparna med lera från Eka kunde dock tillverkas av fyra olika personer på SGI, hädanefter benämnda A, B, C och D. De tidigare testerna visade att provkroppar lagrade i 28 dygn ledde till i stort sett samma spridning som de som lagrats i 56 dygn. Därför begränsades studien till att endast omfatta bestämning av densitet, vattenkvot och hållfasthet genom enaxliga tryckförsök efter 28 dygns lagring. Dessutom kontrollerades CaO-halten i utvalda provkroppar. Vid samtliga blandningar tillverkades fyra provkroppar varav en var stansad och de övriga packade.

Som tidigare påpekats är hållfastheten i absoluta tal inte av primärt intresse i denna jämförande studie. Dessa redovisas därför endast översiktligt i Tabell 5 och i övrigt hänvisas till Bilaga A.

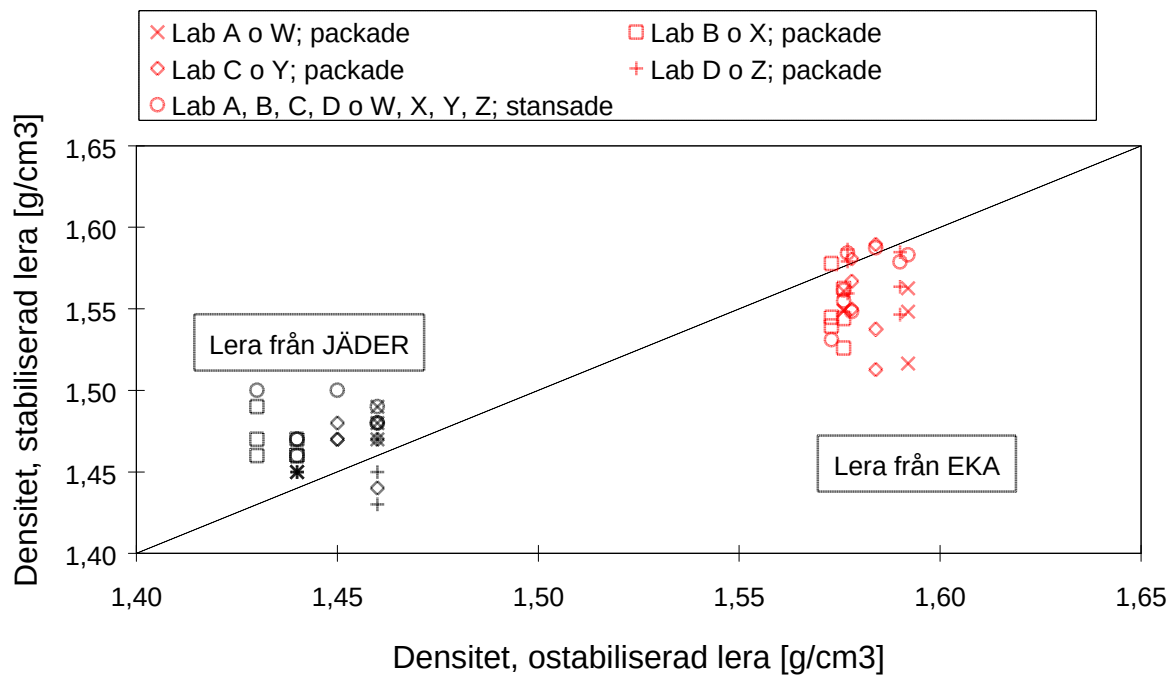
Tabell 5. De stabiliserade provkropparnas skjuvhållfasthet vid enaxliga tryckförsök.

	EKA-3A Skjuvhållfasthet [kPa]	EKA-3B Skjuvhållfasthet [kPa]	JÄDER-3A Skjuvhållfasthet [kPa]	JÄDER-3B Skjuvhållfasthet [kPa]
28 dygns lagring	43-75	88-151	24-55	41-71

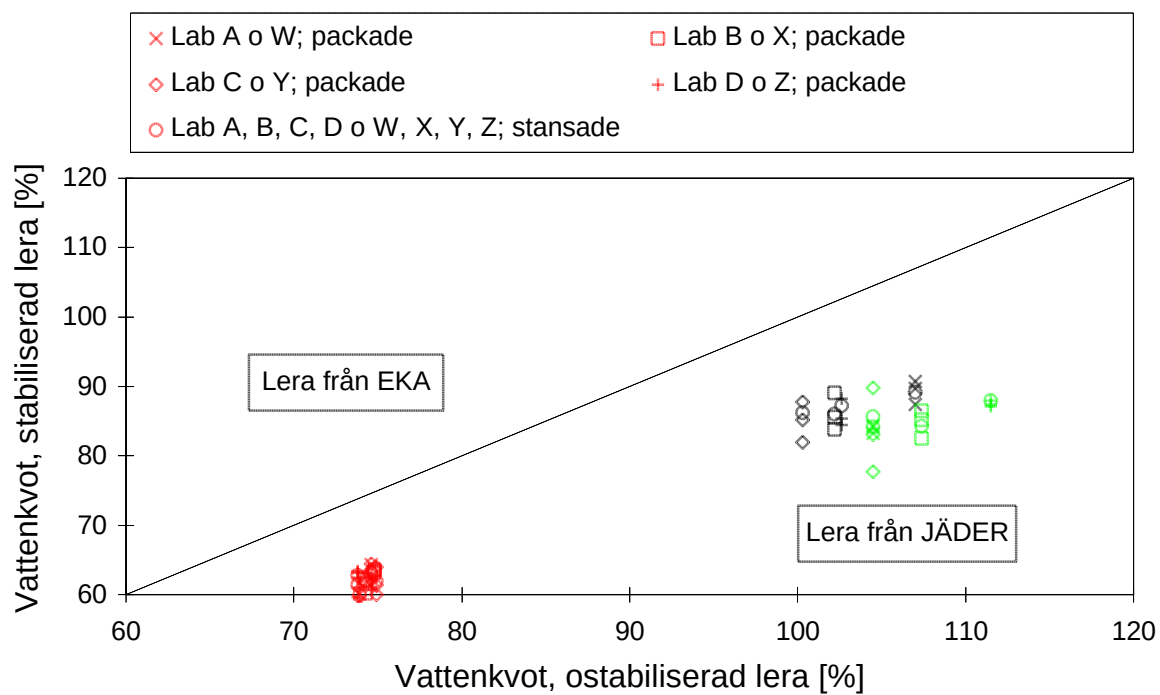
5.2. Lerans och provkropparnas sammansättning

Densitet och vattenkvot före och efter tillsättningen av stabiliseringsmedel redovisas i Figur 11. Som framgår är samstämmigheten mycket god även om de stansade provkropparna har en tendens att ha en något högre densitet än de packade efter inblandningen. Det är dock överraskande att provkropparna från Eka har högre densitet innan än efter tillsatsen av stabiliseringsmedlet. Möjligen kan detta förklaras av att provkropparna innehåller mycket sprickor och/eller luftporer. Det viktiga i denna studie är dock att densitetsvärdena för samtliga provkroppar som innehåller lera från Eka ligger väl samlade.

Mängden CaO i utvalda provkroppar anges i Tabell 6. Som framgår är samstämmigheten mycket god i lera från EKA-3A. I övriga fall är avvikelserna större, även om skillnaden i CaO-halt inte överstiger ca $\pm 7\%$. I samtliga fall har proverna med högst CaO-innehåll även högst hållfasthet, men skillnaden i hållfasthet är betydligt större än skillnaden i CaO-halt.



a)



b)

Figur 11. Provkropparnas sammansättning före och efter tillsats av stabiliseringsmedel.
a) skrymdensitet.
b) vattenkvot.

Tabell 6. Mängd stabiliseringsmedel i utvalda provkroppar, bestämd genom utfällning av Ca⁺-joner (De testade provkropparna utgörs av de provkroppar som uppvisat störst hållfasthetsskillnad för respektive sammansättning).

Lokal	Tillsatt mängd [kg/m ³]	Fördelning K/C [%/%]	Uppmätt CaO- koncentration i torra provkroppar [g/kg]	*Naturlig CaO- koncentration [g/kg torrt mtrl]	Skjuvhållfasthet enligt enaxligt tryckförsök [kPa]
EKA-3A	92	100/0	120	32	42,7
EKA-3A	92	100/0	123	33	67,7
EKA-3B	92	50/50	109;122; 121; 122; 123	30-45	87,5
EKA-3B	92	50/50	134	58	150,7
JÄDER-3A	80	50/50	91	3	24,4
JÄDER-3A	80	50/50	101	12	52,3
JÄDER-3B	110	50/50	127; 137; 141; 140; 127	10-26	44,4
JÄDER-3B	110	50/50	159	46	71,4

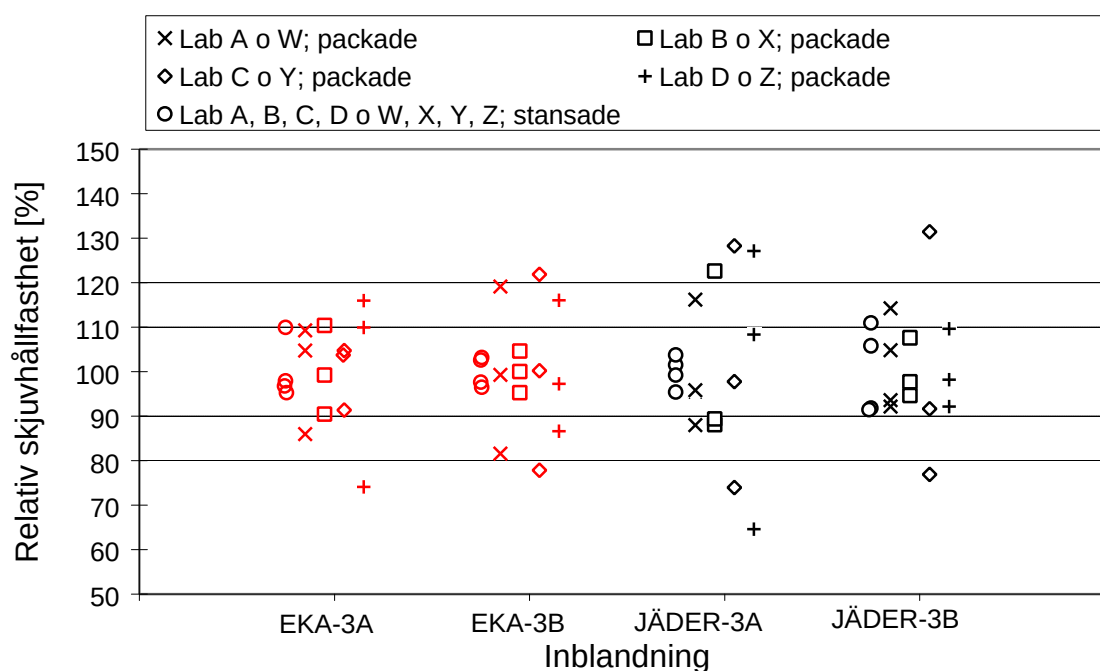
*Den naturliga CaO-halten i proven (innan tillsats av K/C) är framräknad på basis av uppmätt CaO-koncentration i den aktuella kalken och cementen.

5.3. De stabiliserade provkropparnas ytstruktur

Samtliga laboratorier åstadkom provkroppar med ungefär samma ytstruktur, men de provkroppar som stansats uppvisade en relativt slät mantelyta (i några fall var dock mantelytan "uppruggad") medan de provkroppar som packats uppvisade en mängd sprickor och håligheter. Sprickorna och håligheterna var dock endast 1 á 3 mm djupa.

5.4. Reproducerbarhet inom laboratorierna

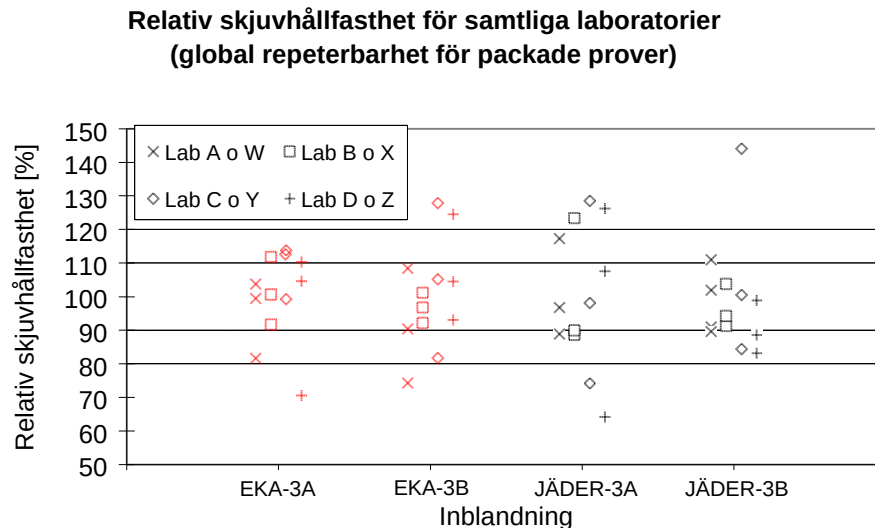
Varje laboratorium stansade en provkropp och packade ytterligare tre, med likadan sammansättning. Eftersom de stansade provkropparna tillverkats på ett avvikande sätt från de övriga har dessa inte inkluderats vid bestämningen av den lokala reproducerbarheten. Istället har alla stansade provkroppar med likadan sammansättning betraktats som tillverkade av ett laboratorium då den lokala reproducerbarheten beräknats, trots att dessa härrör från fyra olika laboratorier och fyra olika blandningar (dock med inbördes likadan sammansättning). Trots detta resulterar de stansade provkropparna i en spridning som understiger ca ± 10 %, medan de packade provkropparna medför en spridning på maximalt ± 35 %, se Figur 12. Vidare är reproducerbarheten bättre i lera från Eka än från Jäder.



Figur 12. Lokalt normaliserad skjuvhållfasthet vid enaxliga tryckförsök. Provkropparna som stansats betraktas som tillverkade av ett laboratorium för respektive blandning.

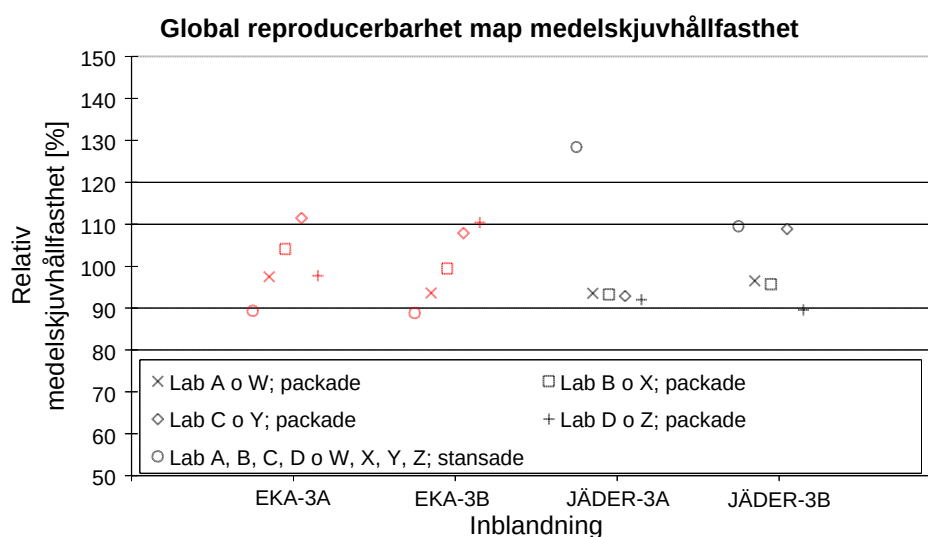
5.5. Reproducerbarhet mellan laboratorierna

Även vid denna jämförelse skiljs mellan de stansade och de packade provkropparna. Den globala reproducerbarheten för de stansade provkropparna sammanfaller med den lokala vilket presenterades i föregående avsnitt, medan de packade provkropparnas globala reproducerbarhet redovisas i Figur 13. Som framgår kan spridningen uppgå till ± 43 %. Vidare är den globala reproducerbarheten något bättre för Eka än för Jäder.



Figur 13. Globalt normaliserad skjuvhållfasthet för packade provkroppar vid enaxliga tryckförsök.

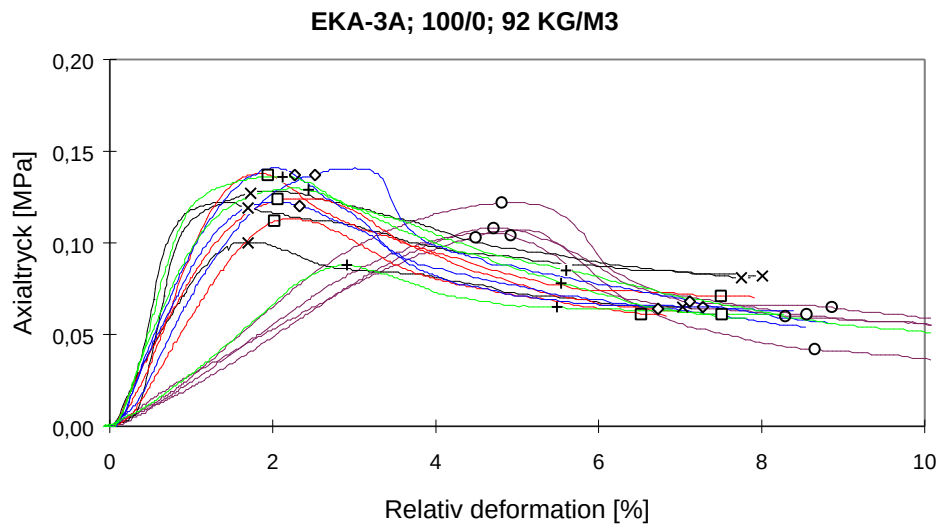
Genom att endast beakta varje laboratoriums medelhållfasthet för respektive blandning (tre packade provkroppar per laboratorium samt ett stansat prov från fyra laboratorier) kan effekten av enstaka prov med avvikande hållfasthet mildras. Tillförlitligheten i detta betraktelsesätt framgår av Figur 14. Som framgår understiger spridningen $\pm 10\%$ i samtliga fall om endast packade provkroppar jämförs. De stansade provkropparnas hållfasthet avviker i samtliga fall något från de packade, men avvikelserna är relativt liten i samtliga fall utom JÄDER-3A. I detta fall var dock de stansade provkropparna endast ca 80 mm höga efter trimning (motsvarande höjd för de packade provkropparna var ca 100 mm) vilket kan ha resulterat i för hög utvärderad hållfasthet på grund av ändyteffekter vid provning i den enaxliga tryckapparaten.



Figur 14. Globalt normaliserad medelhållfasthet vid enaxligt tryckförsök.

5.6. Spännings-töjningskurvans form

De packade provkropparnas arbetskurvor har genomgående samma form upp till brott, även om brotthållfastheten varierar. De stansade provkropparnas kurvor har ungefär samma form som de packade då lera från Jäder används (se Bilaga B), men de uppvisar en lägre styvhet då lera från Eka används, se Figur 15.



Figur 15. Erhållen spännings-töjningskurva vid enaxliga tryckförsök med lera från Eka (EKA-3A; × = Lab A/W packade; □ = Lab B/X packade ; ◇ = Lab C/Y; + = Lab D/Z packade; ○ = Lab A, B, C, D/W, X, Y, Z stansade).

6. Analys av resultat med nuvarande och modifierad metod

Laboratorierna har haft tillgång till lera som varit mycket likartad i både Etapp 1 och 3, åtminstone med avseende på naturlig vattenkvot och skrymdensitet, se Figur 3 och 11. Eftersom lagring och provning har skett på samma sätt, på SGI, anses det därmed vara säkerställt att uppmätta skillnader i hållfasthet huvudsakligen beror på tillverkningsmetoden vid framställandet av provkropparna. Dessutom anses att resultaten från Etapp 1 och 3 är jämförbara.

Betraktas hållfastheten i absoluta tal, bestämd med enaxligt tryckförsök, se Bilaga A, framgår att leran från Eka leder till samma hållfasthet i båda etapperna. Leran från Jäder resulterar dock i en lägre hållfasthet i Etapp 3 (en genomsnittlig minskning med ca 25 %), vilket eventuellt kan förklaras av att denna lera innehåller relativt mycket sulfid som oxiderat vid lagringen av de ostabiliserade lerproverna och därmed ändrat ursprungsmaterialets egenskaper. Eftersom studien fokuserar på reproducerbarheten inom och mellan laboratorierna anses detta dock inte ha någon avgörande betydelse.

Provkropparna som tillverkats "för hand" i Etapp 1 av laboratorium W och genom stansning i Etapp 3 (av samtliga laboratorier) har genomgående en mycket slät mantelyta medan de packade provkropparna uppvisar av sprickor och håligheter i varierande omfattning, se Figur 4. Däremot har provkropparna samma skrymdensitet oberoende av tillverkningsmetod, vilket tyder på att endast fördelningen av luftporer skiljer sig åt i provkropparna. Troligen är dessa mer jämnt fördelade i provkropparna med slät mantelyta, vilket är önskvärt med hänsyn till att homogena provkroppar eftersträvas.

Den lokala spridningen, som är ett mått på reproducerbarheten inom respektive laboratorium, understiger ± 10 % i 86 % av fallen och överstiger aldrig ± 22 % i Etapp 1, se Figur 5. För de packade provkropparna i Etapp 3 är den lokala spridningen mindre än ± 10 % i 58 % av fallen och den överstiger aldrig ± 35 %, se Figur 12. En trolig förklaring till den ökade spridningen är att laboratorierna inte var vana vid packningsutrustningen i Etapp 3.

Den globala spridningen, som är ett mått på reproducerbarheten mellan laboratorierna understiger ± 10 % i 37 % av fallen och överstiger aldrig ± 53 % i Etapp 1, se Figur 6. För de packade provkropparna i Etapp 3 är den globala spridningen mindre än ± 10 % i 54 % av fallen och den överstiger aldrig ± 43 %, se Figur 13. En trolig förklaring till den minskade spridningen är att laboratorierna använder samma packningsutrustning vilket innebär att systematiska metodavvikelser elimineras. För de stansade provkropparna i Etapp 3 är den globala spridningen mindre än ± 10 % i 94 % av fallen och den överstiger aldrig ± 12 %, se Figur 12. Den dramatiskt minskade spridningen jämfört med resultaten från packning förklaras av att stansningen är enkel att utföra medan packningsmomentet är mycket svårt att utföra på ett välkontrollerat sätt.

Om den globala spridningen istället baseras på medelhållfastheten för provserier från respektive laboratorium (tre provkroppar) understiger denna ± 10 % i 50 % av fallen och överstiger aldrig ± 35 % i Etapp 1, se Figur 7. För de packade provkropparna i Etapp 3 är motsvarande siffror 92 % och ± 12 %, se Figur 14. Med detta betraktelsesätt erhålls således en mycket god reproducerbarhet i Etapp 3, vilket förklaras av att samtliga laboratorier använde samma packningsmetod. Det kan dock konstateras att om man i Etapp 1 inte beaktar

resultaten från laboratorium W, vars tillverkningsmetod avvek avsevärt från de övrigas, minskar den globala spridningen avsevärt.

De packade och de stansade provkropparna resulterar i en medelhållfasthet som är av samma storleksordning, se Figur 14. Med lera från Eka erhålls dock en något högre hållfasthet med packade provkroppar medan det motsatta förhållandet råder med lera från Jäder. Detta kan bero på att det är svårare att packa lera med hög vattenkvot/sulfidhalt eftersom materialet då har en tendens att klibba fast vid stämpeln.

I Etapp 1 skilde sig arbetskurvans form åt för olika laboratorier och en klar tendens till systematiska skillnader fanns, se Bilaga B. Framförallt arbetskurvorna från Laboratorium W, som var "platta" och flacka, avvek från de övriga. Detta förklaras dock av att provkropparna som resulterade i de "platta" och flacka kurvorna tillverkats på ett avvikande sätt. I Etapp 3 var arbetskurvorna likartade för samtliga packade provkroppar, oberoende av laboratorium och inga systematiska avvikelser kunde skönjas, se Bilaga B. Även de stansade provkropparnas arbetskurvor var sinsemellan likartade, men de var flackare än de packade provkropparnas då lera från Eka användes. Detta beror troligen på att de packade provkropparnas täthet är större en bit in i provkropparna.

7. Slutsatser och rekommendationer

Dagens metod, eller snarare metoder, är inte tillfredsställande i så måtto att de ger upphov till systematiska avvikelser, som är för stora, mellan laboratorierna. Studien indikerar att om endast enkelprov utförs kan den uppmätta hållfastheten i sämsta fall avvika med ± 53 % från medelvärdet. Däremot kan konstateras att laboratorierna har en god reproducerbarhet om endast provkroppar inom respektive laboratorium jämförs. I detta fall är avvikelserna endast ± 22 % i sämsta fall.

Om laboratorierna tillverkar provkroppar enligt den utvecklade metoden med stansning, se Kapitel 4, är avvikelserna acceptabla och ingen systematisk avvikelse finns mellan laboratorierna. Avvikelsen mellan enskilda prov, baserat på hållfastheten, är i sämsta fall ± 12 %. Beaktas även resultaten som erhöles vid utprovningen av den nya metoden (se Kapitel 4.4) förefaller avvikelserna vara av samma storleksordning för alla material med en naturlig vattenkvot (innan stabilisering) i intervallet 40-500 %.

Tillverkas provkroppar med den utvecklade blandarutrustningen men med packning (se Kapitel 4) är avvikelserna acceptabla om medelhållfastheten från trippelprov används, men oacceptabla om resultatet från enskilda provkroppar betraktas. Baserat på hållfastheten på medelvärdet från tre provkroppar är avvikelserna i sämsta fall ± 12 %, men om enskilda prov studeras är motsvarande siffra ± 45 %.

Packade och stansade provkroppar har likadan densitet och vattenkvot. Även hållfastheten och styvheten är av samma storleksordning, men smärre avvikelser kan förekomma. Packade provkroppar har högre hållfasthet och är styvare då lera med ca 75 % (Eka) naturlig vattenkvot används medan stansade provkropparna är starkare och styvare då den naturliga vattenkvoten (innan stabilisering) är ca 110 % (Jäder).

Den referensmetod som föreslås för laboratorietillverkning av stabiliserade provkroppar inom projekt tillhörande Svensk Djupstabiliserings forskningsplan innebär att provkroppar tillverkas enligt de principer som beskrivs i Kapitel 4. Tillförlitligheten är då så hög att enskilda provkroppar kan användas vid jämförande studier. Vidare är denna procedur enkel att standardisera och kontrollera, den fungerar i alla jordar och den innebär en stor tidsvinst eftersom packningsmomentet elimineras. Nackdelarna är att antalet provkroppar som kan stansas per blandning helt styrs av blandarcyklernas diameter. Eftersom endast ca 50 % av det stabiliserade materialet utnyttjas vid stansningen föreslås att det resterande materialet används för tillverkning av packade provkroppar. Dessa provtrycks förslagsvis vid en gemensam tidpunkt mellan första och sista provningstillfället för de stansade provkropparna. Av praktiska skäl anses den framtagna prototypen vara för liten, varför en större utrustning bör tillverkas. Rekommenderad dimension och en detaljerad instruktion för handhavandet redovisas i Kapitel 8.

8. Förslag på referensmetod

8.1. Inledning

Baserat på de resultat som framkommit under studien föreslås att referensmetoden för laboratorietillverkning av stabiliserade provkroppar innefattar följande huvudmoment:

- Homogenisering av jordprover med samma utrustning som används vid inblandningen av stabiliseringsmedel,
- Tillsättning av stabiliseringsmedel, omedelbart efter homogeniseringen, i form av en vertikal sträng i den homogeniserade leran,
- Blandning av stabiliseringsmedel och jord,
- Formning av provkroppar genom stansning direkt i blandarcylindern, omedelbart efter avslutad inblandning.

8.2. Erforderlig utrustning

För genomförandet krävs följande utrustning:

- Blandarcylinder med 145 mm innerdiameter och 205 mm fri höjd. Med dessa dimensioner erhålls fyra stansade och fyra packade provkroppar per blandning. Såväl lock som botten skall vara avtagbara.
- Blandarverktyg som omsluter diametern 143 mm vid rotation och som har höjden 50 mm.
- Två uppsättningar rör, stänger och pluggar, för skapande av en vertikal sträng med stabiliseringsmedel i leran. Rörens innerdiameter skall vara 40 respektive 49 mm med godstjockleken 1 mm.
- Lämplig utrustning som kan åstadkomma rotationen 100 varv/minut och stigningen 2 mm/varv.
- Fyra kolvborrhylsor för stansning

Om provkroppar även skall tillverkas genom packning kan nuvarande packningsutrustning även fortsättningsvis användas, men en förbättrad kontroll av packningstrycket och packningstiden måste ske.

8.3. Utförande

8.3.1. Homogenisering av ostabiliserad lera

- Lera från 8 kolvborrhylsor delas i ca 45 mm tjocka skivor.
- Blandarcylindern fylls på genom att varva lera från olika prover. På detta sätt åstadkoms en grov homogenisering.
- Blandarverktyget förs ned till botten och cylinderns lock skruvas fast.
- Leran homogeniseras genom sex genomfarter av blandarverktyget, dvs upp-ned-upp-ned-upp-ned. Verktygets rotationshastighet skall vara 100 varv/minut och stigningen skall vara 2 mm/varv, vilket innebär att homogeniseringen tar drygt 4 minuter.
- Efter avslutad homogenisering tas locket av. Blandarverktyget skall dock lämnas kvar i sitt läge vid cylinderns botten.

8.3.2. Tillsättning av stabiliseringsmedel

- Den önskade mängden stabiliseringsmedel, uttryckt som kg stabiliseringsmedel per m³ ostabiliserad jord, hålls upp i lämpligt kärl. Om flera komponenter ingår, t.ex. kalk och cement, skall dessa blandas i torrt tillstånd innan de tillsätts jorden.
- Röret, med pluggen fixerad vid dess underkant, förs ned till blandarcylienderns botten.
- Pluggen dras försiktigt upp och röret fylls på med stabiliseringsmedel mha en tratt.
- Pluggen placeras mot stabiliseringsmedlets överyta i röret. Därefter dras röret försiktigt upp ur jorden samtidigt som pluggen hålls fixerad i vertikalled.
- Då tillsättningen är klar sätts locket på.
- Tidsåtgången från påbörjad uppdragning av KC-röret till påbörjad blandning skall dock vara 2,0 minuter.

Om mängden stabiliseringsmedel understiger 100 kg/m³ skall röret med innerdiametern 40 mm användas vid tillsättningen. Uppgår mängden stabiliseringsmedel till 100-150 kg/m³ används röret med diametern 49 mm och om mängden överstiger 150 kg/m³ används båda rören.

8.3.3. Blandning av stabiliseringsmedel och lera

- Stabiliseringsmedlet och leran blandas genom sju genomfarter av blandarverktyget, dvs upp-ned-upp-ned-upp-ned-upp. Verktygets rotationshastighet skall vara 100 varv/minut och stigningen skall vara 2 mm/varv, vilket innebär att blandningen tar knappt 5 minuter.
- Efter avslutad blandning tas locket och blandarverktyget bort.

8.3.4. Formning av provkroppar

- Fyra kolvborrhylsor placeras mot cylinderns periferi och trycks därefter ned i det stabiliserade materialet. För att underlätta detta moment bör någon form av styrning tillverkas.
- Då kolvborrhylsorna tryckts ned till botten skruvas blandarcylienderns infästning mot botten loss och cylindern lyfts försiktigt upp.
- Kolvborrhylsorna förs åt sidan, försluts och förvaras på önskat sätt fram till provningen.

Om provkroppar även skall tillverkas genom packning skall packningstrycket vara 100 kPa och ligga på under 10 sekunder.

8.4. Bestämning av hållfasthet

Provkropparnas hållfasthet och styvhet bestäms genom enaxligt tryckförsök (enligt SS 02 71 28). Stansade provkroppars reproducerbarhet är så bra att enskilda provkroppar kan användas vid jämförande studier. Eftersom de packade provkropparnas reproducerbarhet är sämre måste dock trippelprov utföras vid jämförande studier.

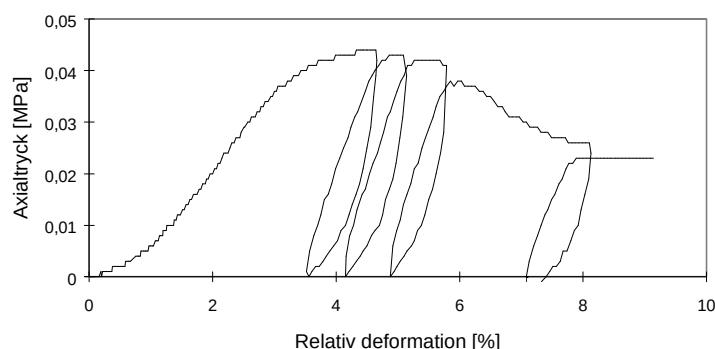
9. Förslag på fortsatt arbete

Syftet med detta projekt har varit att få fram en referensmetod för laborietillverkning av stabiliserade provkroppar. Några slutsatser om överensstämmelsen mellan hållfastheten bestämd i laboriet och den i fält kan dock inte dras, men naturligtvis är det av yttersta vikt att kunna översätta laborieresultat till fältförhållanden. Detta projekt har resulterat i att ett stort antal laborieresultat samlats och dessa borde utnyttjas i jämförande studier genom att tillverka och prova pelare på de platser där leran hämtats.

Den föreslagna blandarutrustningen uppvisar stora likheter med tillverkningsproceduren i fält. Av naturliga skäl är det dock mycket svårt att i fält kontrollera och styra sådana viktiga parametrar som den ostabiliserade jordens egenskaper, utmatad mängd stabiliseringsmedel, rotationshastighet, etc. Dessutom är bestämningen av pelarnas hållfasthet, genom sondering, en relativ grov metod. Slutligen är kostnaderna för laborietester en bråkdel av kostnaderna i fält. Med beaktande av detta är den föreslagna blandarutrustningen ett lämpligt redskap vid kvalitativa studier av blandarverktygets utformning, rotationshastighet och stigning.

På senare tid har stabilisering av torv börjat utföras. Eftersom den framtagna utrustningen visat sig fungera på högförmultnad torv vore det av intresse att se om metoden även fungerar i andra typer av torv med ännu högre vattenkvot. Visserligen finns andra metoder framtagna för tillverkning av laborieprovkroppar som innehåller torv, men den ideala situationen är naturligtvis att samma utrustning kan utnyttjas för alla typer av jordar. Eftersom det framtagna blandarverktyget dessutom liknar den utrustning som används i fält bör den även testas på torv.

Självklart bör man sträva efter att använda varje provkropp så effektivt som möjligt. I dag baseras antalet provkroppar på vid vilka hårdningstider hållfastheten skall bestämmas. En provkropp testas vid första tillfället, nästa prov vid andra tillfället, osv. Det vore dock av stort värde om en och samma provkropp kunde användas för att följa hållfasthetstillväxten med tiden. Detta skulle kunna åstadkommas genom att provkroppen belastas upp till brott, avlastas, lagras ytterligare en tid, belastas upp till brott, avlastas, lagras, osv. Huruvida detta verkligen fungerar är inte känt, men upprepade på- och avlastningar vid samma provtillfälle visar att hållfastheten inte påverkas nämnvärt av spänningshistorien om brottkompressionen inte överskrids för mycket, se Figur 16. För att kunna utföra denna typ av test krävs dock att spännings-töjningskurvan registreras av en dator och redovisas i realtid så att avlastningen kan utföras vid rätt tillfälle.



Figur 16. Arbetskurva för stabiliserat jordprov vid upprepade på- och avlastningar.

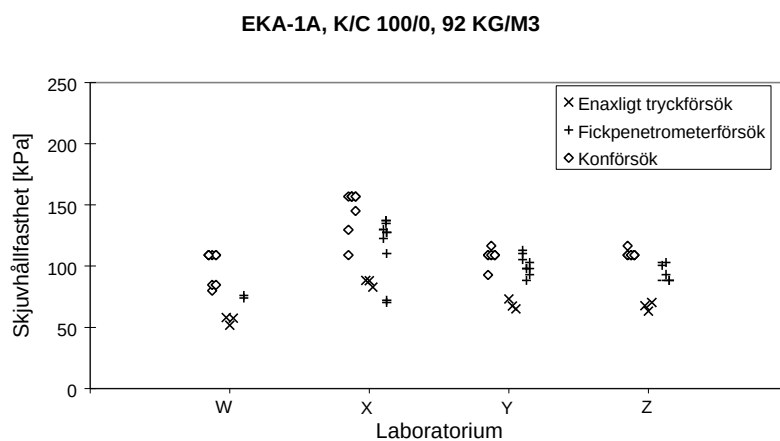
10. Referenser

Carlsten, P. & Ekström, J. (1995). Kalk- och kalkcementpelare - Vägledning för projektering, utförande och kontroll. SGF Rapport 4:95, Linköping.

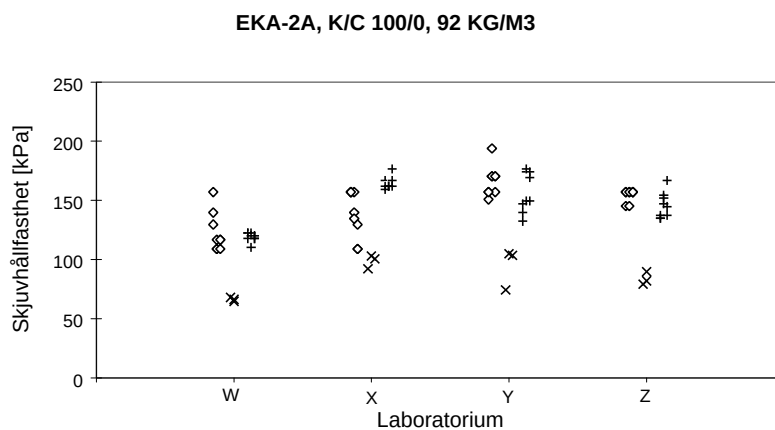
Larsson, S. (1997a). Inblandningsmekanismer vid djupstabilisering med kalk-, kalk/cementpelare och cementpelare. Svensk Djupstabilisering, Arbetsrapport 3.

Larsson, S. (1997b). Personlig kommunikation.

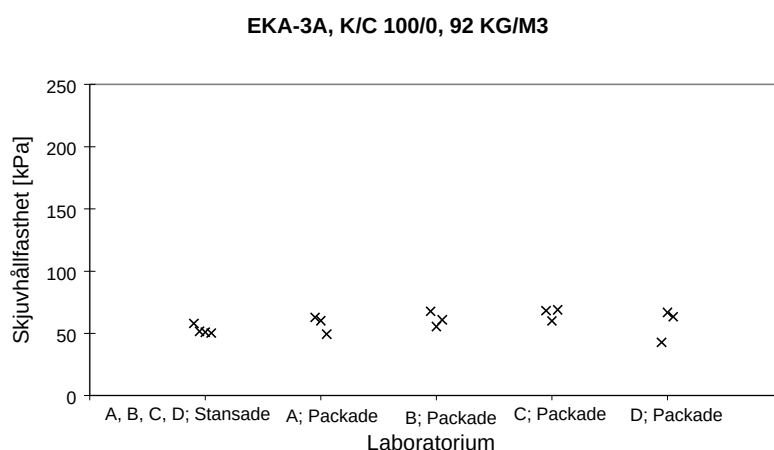
Bilaga A - Utvärderad skjuvhållfasthet



a)



b)



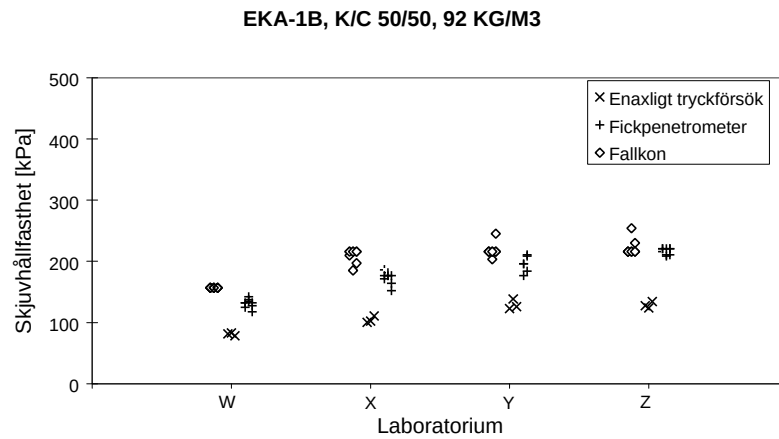
c)

Figur A1. Skjuvhållfasthet för stabiliserade prover från Eka med sammansättningen K/C 100/0, 92 kg/m³.

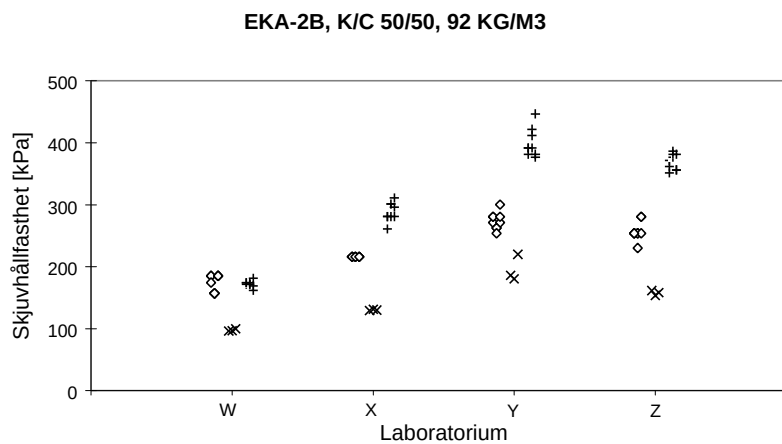
a) Nuvarande metod (Etapp 1), 28 dygn.

b) Nuvarande metod (Etapp 1), 56 dygn.

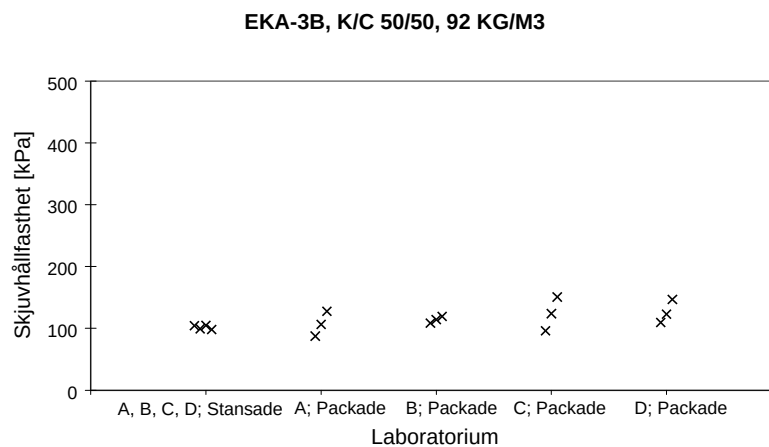
c) Föreslagen metod (Etapp 3), 28 dygn. Endast enaxliga tryckförsök.



a)



b)



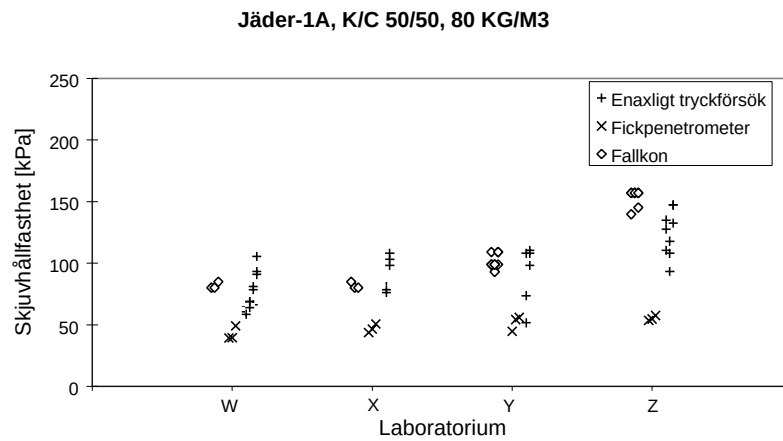
c)

Figur A2. Skjuvhållfasthet för stabiliserade prover från Eka med sammansättningen K/C 50/50, 92 kg/m³.

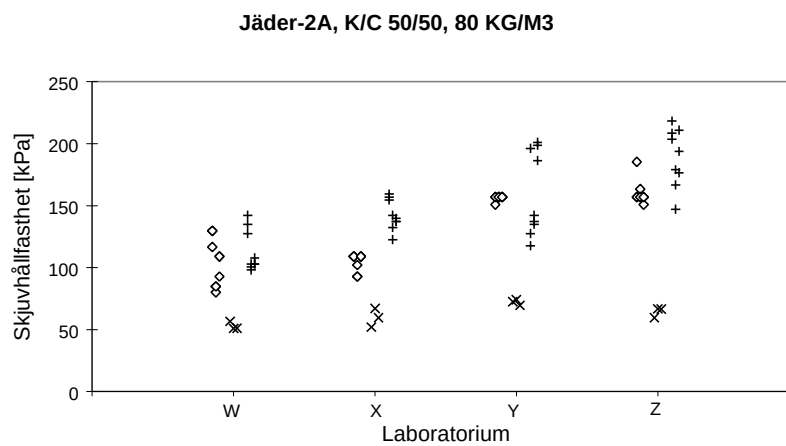
a) Nuvarande metod (Etapp 1), 28 dygn.

b) Nuvarande metod (Etapp 1), 56 dygn.

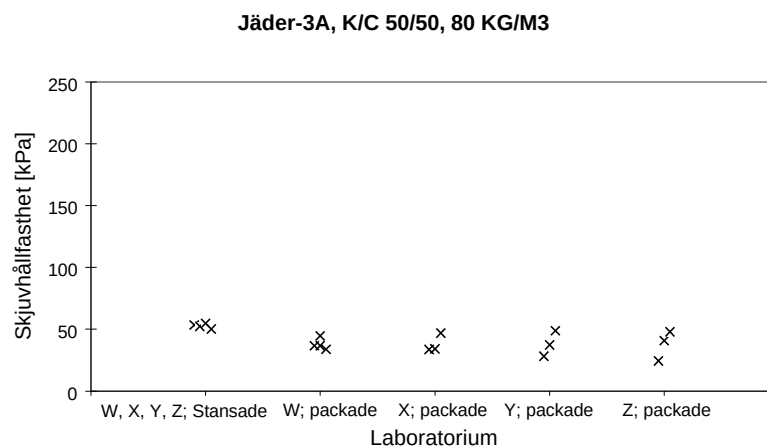
c) Föreslagen metod (Etapp 3), 28 dygn. Endast enaxliga tryckförsök.



a)



b)



c)

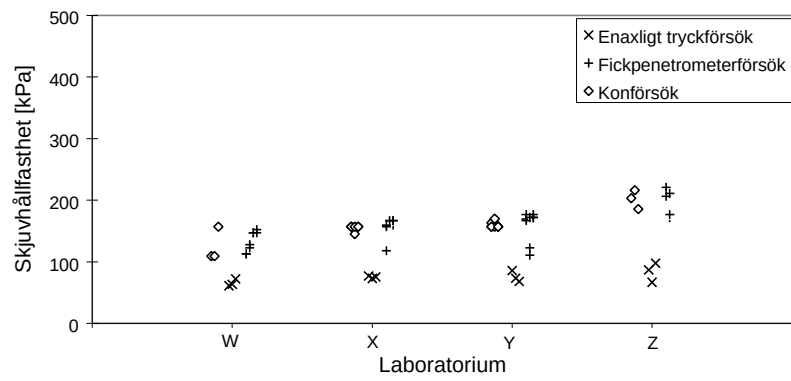
Figur A3. Skjuvhållfasthet för stabiliserade prover från Jäder med sammansättningen K/C 50/50, 80 kg/m³.

a) Nuvarande metod (Etapp 1), 28 dygn.

b) Nuvarande metod (Etapp 1), 56 dygn.

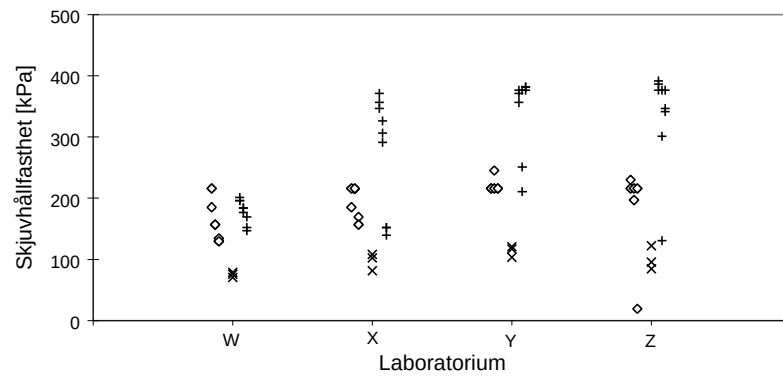
c) Föreslagen metod (Etapp 3), 28 dygn. Endast enaxliga tryckförsök.

Jäder-1B, K/C 50/50, 110 KG/M3



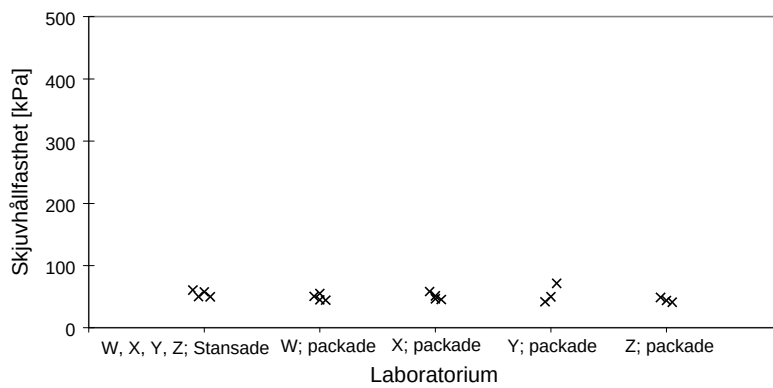
a)

Jäder-2B, K/C 50/50, 110 KG/M3



b)

Jäder-3B, K/C 50/50, 110 KG/M3



c)

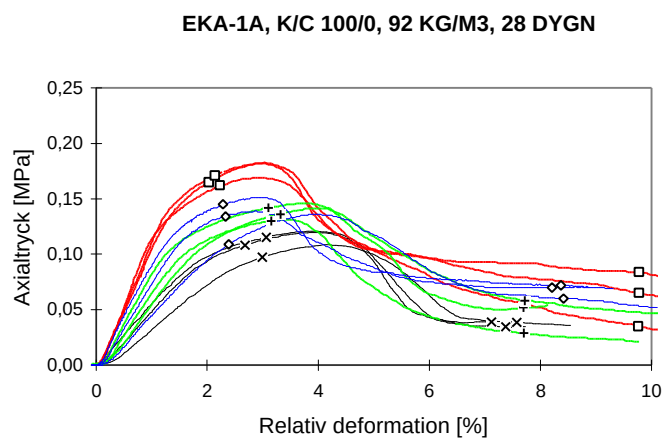
Figur A4. Skjuvhållfasthet för stabiliserade prover från Jäder med sammansättningen K/C 50/50, 110 kg/m³.

a) Nuvarande metod (Ettapp 1), 28 dygn.

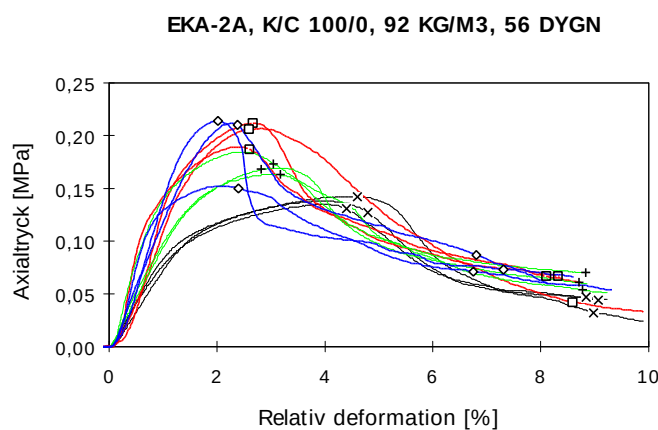
b) Nuvarande metod (Ettapp 1), 56 dygn.

c) Föreslagen metod (Ettapp 3), 28 dygn. Endast enaxliga tryckförsök.

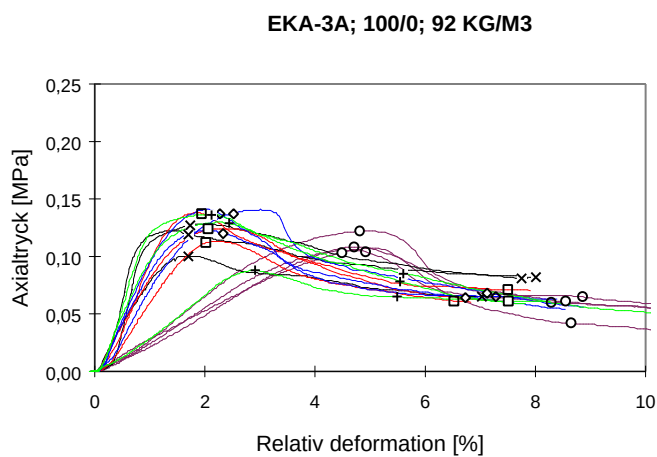
Bilaga B - Spännings-töjningskurvor vid enaxliga tryckförsök



a)



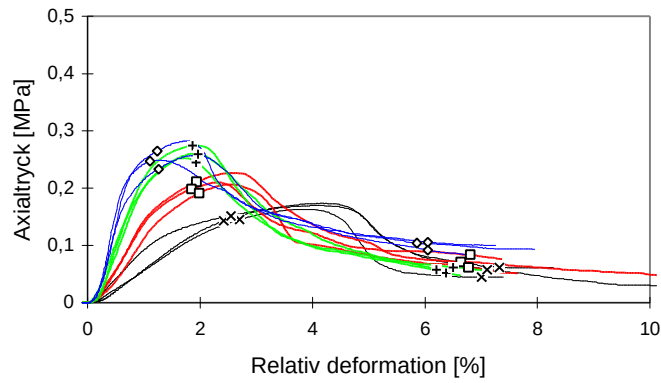
b)



c)

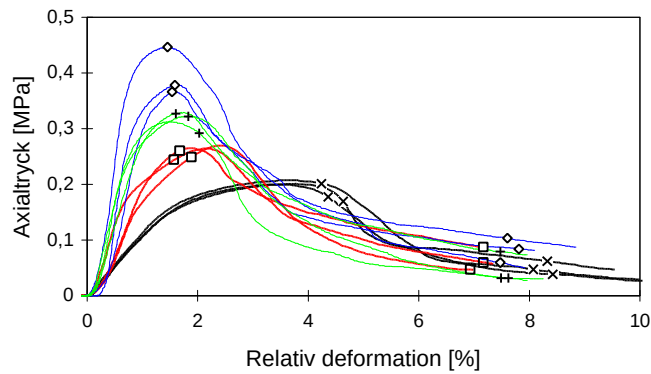
Figur B1. Spännings-töjningskurva för stabiliserade prover från Eka med sammansättningen K/C 100/0, 92 kg/m³ (× = Lab A/W packade; □ = Lab B/X packade; ◇ = Lab C/Y; + = Lab D/Z packade; ○ = Lab A, B, C, D/W, X, Y, Z stansade).
a) Nuvarande metod (Etapp 1), 28 dygn.
b) Nuvarande metod (Etapp 1), 56 dygn.
c) Föreslagen metod (Etapp 3), 28 dygn.

EKA-1A, K/C 50/50, 92 KG/M3, 28 DYGN



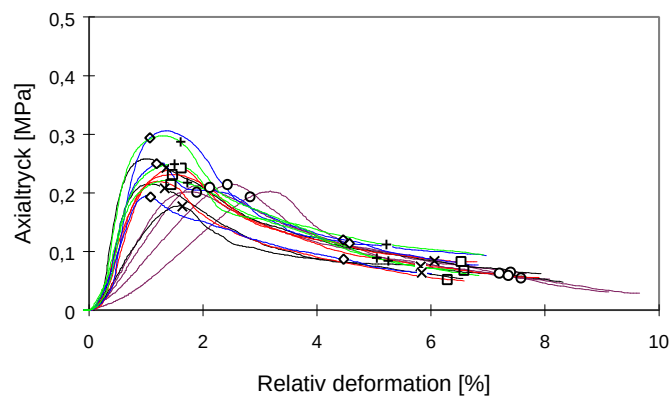
a)

EKA-2B, K/C 50/50, 92 KG/M3, 56 DYGN



b)

EKA-3B; 50/50; 92 KG/M3

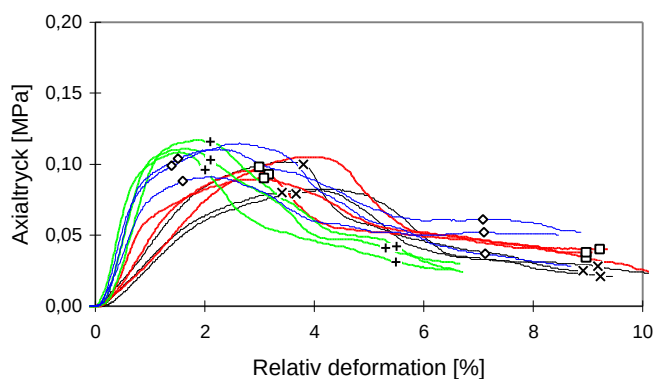


c)

Figur B2. Spännings-töjningskurva för stabiliserade prover från Eka med sammansättningen K/C 50/50, 92 kg/m³. (× = Lab A/W packade; □ = Lab B/X packade; ◇ = Lab C/Y; + = Lab D/Z packade; ○ = Lab A, B, C, D/W, X, Y, Z stansade).

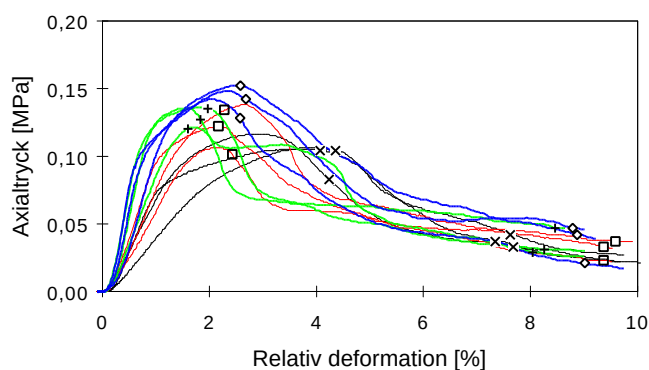
- a) Nuvarande metod (Etapp 1), 28 dygn.
- b) Nuvarande metod (Etapp 1), 56 dygn.
- c) Föreslagen metod (Etapp 3), 28 dygn.

JÄDER-1A, K/C 50/50, 80 KG/M3, 28 DYGN



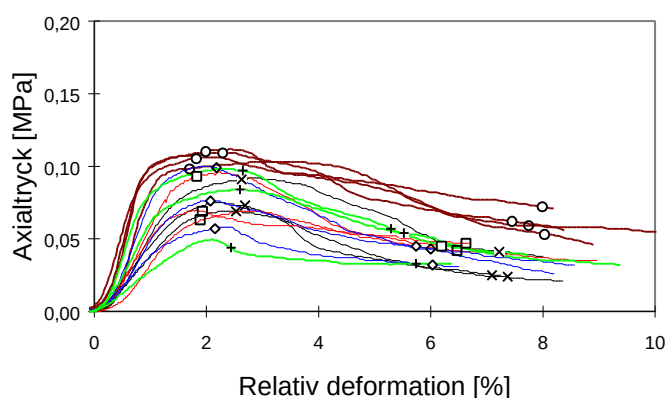
a)

JÄDER-2A K/C 50/50, 80 KG/M3, 56 DYGN



b)

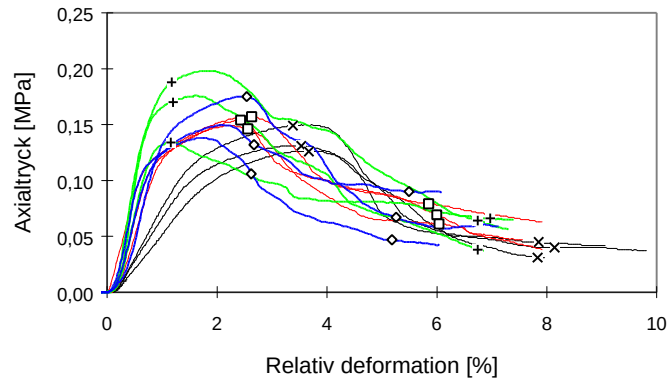
JÄDER-3A; 50/50; 80 KG/M3



c)

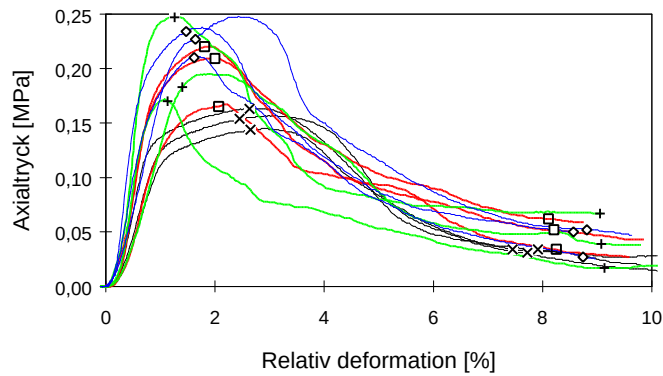
Figur B3. Spännings-töjningskurva för stabiliserade prover från Jäder med sammansättningen K/C 50/50, 80 kg/m³. (x = Lab A/W packade; □ = Lab B/X packade; ◇ = Lab C/Y; + = Lab D/Z packade; ○ = Lab A, B, C, D/W, X, Y, Z stansade).
a) Nuvarande metod (Etapp 1), 28 dygn.
b) Nuvarande metod (Etapp 1), 56 dygn.
c) Föreslagen metod (Etapp 3), 28 dygn.

JÄDER-1B, K/C 50/50, 110 KG/M3, 28 DYGN



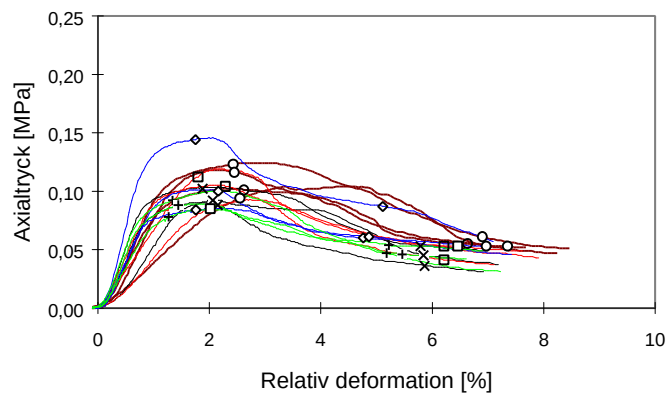
a)

JÄDER-2B K/C 50/50, 110 KG/M3, 56 DYGN



b)

JÄDER-3B; 50/50; 110 KG/M3



c)

Figur B4. Spännings-töjningskurva för stabiliserade prover från Jäder med sammansättningen K/C 50/50, 110 kg/m³. (x = Lab A/W packade; □ = Lab B/X packade; ◇ = Lab C/Y; + = Lab D/Z packade; ○ = Lab A, B, C, D/W, X, Y, Z stansade).
a) Nuvarande metod (Etapp 1), 28 dygn.
b) Nuvarande metod (Etapp 1), 56 dygn.
c) Föreslagen metod (Etapp 3), 28 dygn.

**Laboratorietillverkning av kemiskt
stabiliserade provkroppar**

**Tillverkning och testning av
prototyp i full skala
Preliminär slutrapport**

Datum: 1998-07-13
Objekt: 3-9711-583
Kontaktpersoner: Torbjörn Edstam

Innehållsförteckning

Text	Sida
1 Inledning och syfte	56
2 Genomförande	56
3 Resultat	58
4 Slutsatser och rekommendationer	60

BILAGA A. Manual för användning av tillverkningsutrustningen.

Laboratorietillverkning av kemiskt stabiliserade provkroppar

1 INLEDNING OCH SYFTE

Statens geotekniska institut har tidigare utvecklat en prototyp för laboratorietillverkning av kemsikt stabiliserade provkroppar. Under det projektet togs en utrustning fram som möjliggjorde tillverkning av en provkropp per blandning. Dessutom erfordrades ett flertal moment som gjorde att prototypens användning onödigt svår vid praktisk tillämpning.

Syftet med det här beskrivna projektet var att vidareutveckla den tidigare framtagna prototypen i syfte att göra den mer automatiserad och mer användbar i praktiken. De kriterier som ställdes upp var:

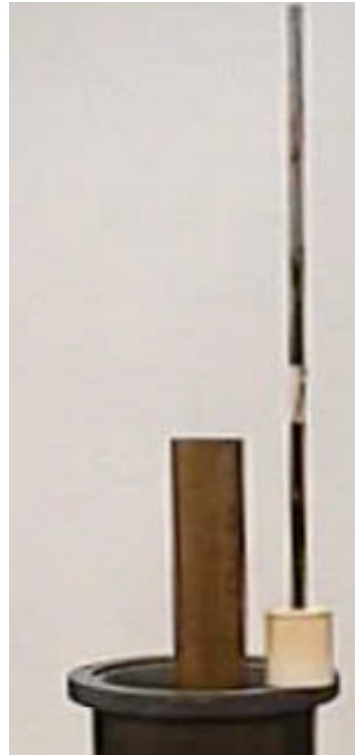
- att möjliggöra tillverkning av 4 st provkroppar per blandning,
- att göra drivutrustningen automatiserad (rotation, stigning, antal passager),
- att göra drivutrustningen flexibel (varierbar rotation, stigning, antal passager),
- bibehållen reproducerbarhet jämfört med vad som erhöles med den tidigare framtagna prototypen.

2 GENOMFÖRANDE

En modifierad tillverkningsutrustning, såväl i fråga om storlek som drivutrustning, tillverkades, se Figur 1. En noggrannare beskrivning av utrustningens handhavande framgår av Bilaga A.



a)



b)



c)



d)

*Figur 1. Den modifierade tillverkningsutrustningen.
a) blandarverktyg och blandarcylinder,
b) instrument för tillsättning av stabiliseringsmedel,
c) utrustning för stansning av provkroppar,
d) stativ och drivutrustning.*

I samband med detta utfördes två tester för att kontrollera att reproducerbarheten var lika god som vid testerna med den tidigare framtagna prototypen. Kontrollen utfördes genom att två olika inblandningar utfördes, med indata enligt Tabell 1. I samband med tillverkning av provkroppar bestående av lera från Eka tillverkades dessutom 4 st provkroppar enligt traditionellt förfarande (packning).

Tabell 1. Använt material vid kontroll av reproducerbarheten.

Lertyp	¹⁾ w _n [%]	Mängd stab.medel [kg/m ³]	Proportion kalk/cement [%/%]	Provålder [dygn]
Jäder	105	150	50/50	15
Eka	76	150	100/0	15

¹⁾ Angivna värden baseras på undersökningar utförda vid tester i projektet "X".

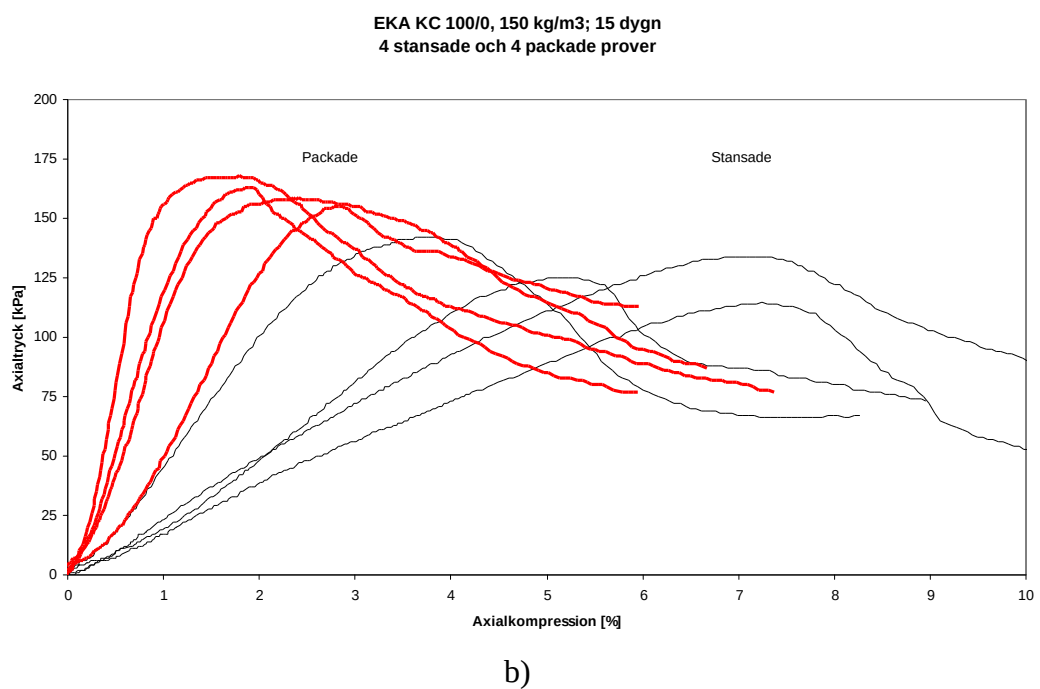
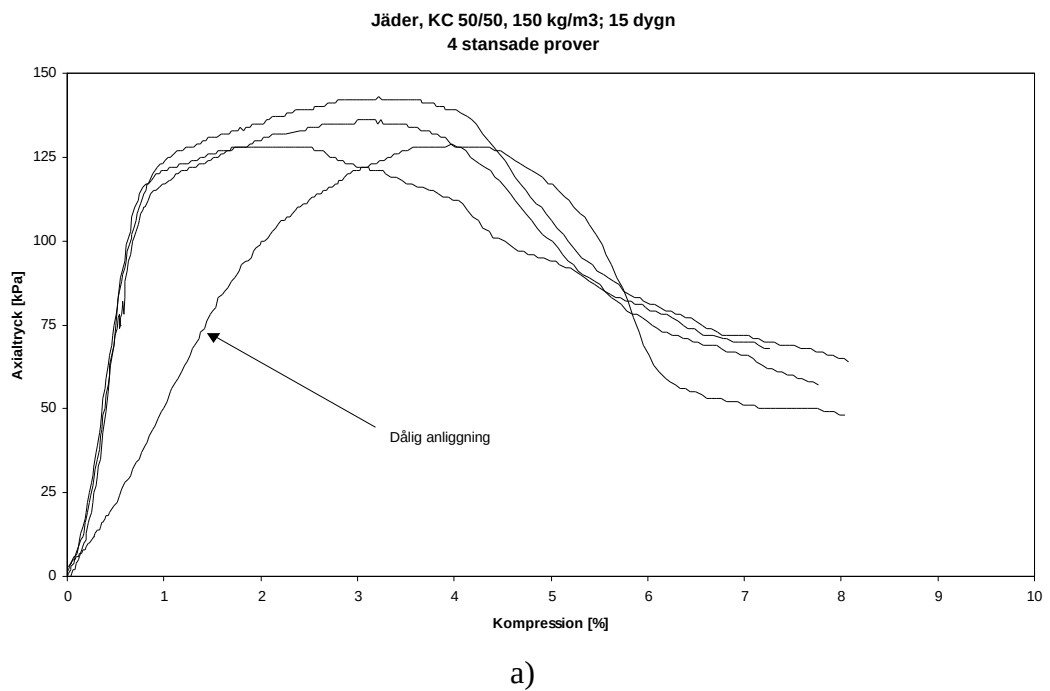
3 RESULTAT

Resultaten från enaxliga tryckförsök på provkropparna tillverkade vid de två inblandningsförsöken redovisas i Figur 2 a och b.

De stabiliserade provkropparna innehållande lera från Jäder, som tillverkats enligt den föreslagna referensmetoden (stansning), har uppnått en genomsnittlig tryckhållfasthet på 65,0 kPa, med ett största respektive minsta värde på 69,0 respektive 61,9 kPa. Detta motsvarar en maximal avvikelse inom intervallet –4,8 % till +6,1 %. Om styvheten betraktas ger tre av försöken i stort sett identiska värden, medan det fjärde indikerar en lägre styvhet. Denna avvikelse tros dock bero på att anläggningen mellan provkroppens överyta och kraftgivaren inte var helt tillfredsställande vid provningen.

De stabiliserade provkropparna innehållande lera från Eka, som tillverkats enligt den föreslagna referensmetoden (stansning), har uppnått en genomsnittlig tryckhållfasthet på 129,1 kPa med ett största respektive minsta värde på 142,2 respektive 114,7 kPa. Detta motsvarar en maximal avvikelse inom intervallet –11,2 % till +9,9 %. Om styvheten betraktas indikerar försöken en relativt stor spridning. Denna avvikelse tros dock bero på att kolvborrhylsor av låg kvalitet (röda hylsor) använts, vilket medfört att anläggningen mellan provkroppens överyta och kraftgivaren inte var helt tillfredsställande vid provningen.

De stabiliserade provkropparna innehållande lera från Eka, som tillverkats på traditionell sätt (packning), har uppnått en genomsnittlig tryckhållfasthet på 161,0 kPa med ett största respektive minsta värde på 167,9 respektive 154,6 kPa. Detta motsvarar en maximal avvikelse inom intervallet –4,0 % till 4,3 %. Om styvheten betraktas indikerar försöken en relativt stor spridning, dock mindre än vad som erhöles med stansade provkroppar. Vid tillverkning av de packade provkropparna användes kolvborrhylsor av hög kvalitet (gröna hylsor).



Figur 2. *Resultat från enaxliga tryckförsök.*
a) lera från Jäder
b) lera från Eka

Jämförs resultaten från de provkroppar som tillverkats enligt den föreslagna referensmetoden (stansning) med de som tillverkats på traditionellt sätt (packning) framgår att reproducerbarheten i detta fall var bäst då den traditionella metoden användes, men att i reproducerbarheten i bägge fallen var mycket god. Liknande resultat erhöles i vissa fall i samband med utvecklingen av den första prototypen. Det bör dock observeras att reproducerbarheten vid tillverkning enligt den

traditionella metoden kan vara betydligt sämre (± 20 à 30 %) då hållfastheten hos provkroppar tillverkade av olika laboratorier/personer jämförs. Så är dock inte fallet då tillverkning sker enligt den föreslagna referensmetoden (stansning). Om storleken på tryckhållfastheten hos provkropparna tillverkade enligt de olika metoderna jämförs framgår att de stansade provkropparna har en medelhållfasthet som är ca 10 % lägre än den totala medelhållfastheten (med beaktande av såväl packade som stansade provkroppar). Motsvarande avvikelse erhöles i den tidigare studien. Det bör dock påpekas att det inte finns något entydigt samband mellan hållfastheten bestämd i laboratoriet och den som erhålls i fält. Därmed går det inte att avgöra vilken hållfasthetsnivå som är "rätt". Även den väsentligt lägre styvheten de stansade provkropparna uppvisar, jämfört med de packade provkropparna, erhöles vid den tidigare studien.

4 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Följande slutsatser kan dras från detta projekt:

- Den tidigare framtagna referensmetoden fungerar lika bra med den nya, större utrustning som utvecklats i detta projekt.
- Erfarenheten att reproducerbarheten ligger i intervallet ± 10 %, som erhöles från försöken med den tidigare prototypen, tycks även gälla för den nya utrustningen.
- Hållfastheten som bestämts enligt den föreslagna referensmetoden (stansning) resulterar i en tryckhållfasthet som är av samma storleksordning som den som erhålls hos provkroppar som tillverkats enligt den traditionella metoden (packning).
- Provkropparnas styvhet kan bli lägre om de tillverkas enligt den föreslagna referensmetoden, jämfört med vad som erhålls då tillverkningen sker enligt den traditionella metoden.

Följande rekommendationer kan ges:

- Den föreslagna referensmetoden bör användas om provkroppar med reproducerbara egenskaper skall tillverkas.
- En likadan tillverkningsutrustning skall användas om provkroppar skall tillverkas på flera laboratorier. Om så önskas kan dock olika typer av drivutrustning användas, så länge den kan uppfylla de krav som ställs, se Bilaga A.

Manual för användning av tillverkningsutrustningen enligt ny referensmetod

1. Inledning

Denna manual inleds med en redogörelse för hur kontrollpanelen används. Därefter sker en genomgång, moment för moment i kronologisk ordning, av hur stabiliserade provkroppar tillverkas med tillverkningsutrustningen.

2. Användning av kontrollpanelen

Huvudströmbrytaren sitter till vänster, nästan nere vid golvet. Maskinen styrs via de knappar som finns på panelen till höger om maskinen. Följande möjligheter finns:

2.1. Uppstart och avslutning

Vid uppstart skall den röda huvudströmbrytaren på maskinens vänstra sida till vridas till läge "1". Tryck därefter ned den röda knappen **On/Standby**, som finns på manöverpanelen på maskinens högra sida, om den inte redan lyser. Innan maskinen är färdig att tas i bruk måste det inbyggda datorprogrammet "känna av" det övre respektive lägre vändläge som skall användas vid inblandningsprocessen. Detta åstadkoms genom att samtidigt hålla knapparna **Manuell** + **Prog.Start** nedtryckta. Släpp inte knapparna förrän maskinen stannat med oket i det övre vändläget, annars måste proceduren upprepas!! Observera att maskinen endast behöver "känna av" vendlägena då huvudströmbrytaren varit avslagen

Om maskinen skall stå inaktiv längre än ca 15 minuter skall den ställas i "viloläge" genom att den röda knappen **On/Standby** trycks ned. Återaktivering sker genom att trycka ned **On/Standby** igen.

Vid avslutning för dagen stängs huvudströmbrytaren av genom att den röda huvudströmbrytaren vrids till läge "0".

2.2. Nödstopp

Maskinen "tvärstannar" då knappen **Manuell** trycks in. Det finns även röd nödstoppsknapp på högerkanten av kontrollpanelen.

Observera att dessa knappar endast skall användas i allvarliga nödsituationer och ej om man endast vill stoppa programmet temporärt.

2.3. Manuell styrning av blandarvingens rörelse i vertikalled

Styrning sker genom att samtidigt hålla knapparna [Manuell] + [Upp] respektive [Manuell] + [Ned]. Maskinen stannar om knapparna släpps eller om det övre alternativt lägre extremläget nås.

2.4. Program för homogenisering av lera samt blandning av lera och stabiliseringsmedel

Homogenisering av lera samt blandning av lera och stabiliseringsmedel utförs med samma rotationshastighet (100 mm/varv) och stigning (2 mm/varv). Dessutom skall samma antal blandningscykler (4 st upp- respektive nedfarter) utföras i båda fallen. Därför skall ett fördefinierat program aktiveras då denna procedur skall utföras. I båda fallen innefattar proceduren en sekvens som utgörs av följande moment:

1. Placera oket i dess översta läge. I detta läge skall blandarvingen (med locket påträtt på stången om så önskas) monteras i maskinen. Placeringen av oket i dess översta läge utförs automatiskt då knappen [Prog.Start] trycks ned första gången.
2. Placera oket på en sådan nivå att blandarvingen hamnar i nivå med sitt övre vändläge, dvs nivån för vingens överkant sammanfaller med nivån för underkanten av blandarcylinderns lock. I detta läge skall blandarcylinderns lock skruvas fast i blandarcylindern. Observera att det är mycket viktigt att muttrarna som fäster locket dras ”i botten”. Placeringen av oket på denna nivå utförs automatiskt då knappen [Prog.Start] trycks ned andra gången.
3. Aktivera rotationen och stigningen, utför blandningscykeln och placera därefter vingen så att nivån på dess överkant sammanfaller med blandarcylinderns lock. Samtliga dessa moment genomförs automatiskt då knappen [Prog.Start] trycks ned tredje gången.
4. Placerar oket i dess översta läge. I detta läge skall blandarvingen (med locket påträtt på stången om så önskas) tas bort ur maskinen. Placeringen av oket i dess översta läge utförs automatiskt då knappen [Prog.Start] trycks ned fjärde gången. Tänk på att ta bort skruvarna som fäster locket vid blandarcylindern innan du trycker på knappen, annars försöker maskinen dra vingen genom locket vilket torde vara högst olämpligt!!

OBS 1! För att avbryta programmet temporärt, t.ex. för att dra åt någon skruv, och därefter fortsätta från det läge då det avbröts följs följande procedur: Programmet stoppas genom att trycka [On/Standby]. Utför önskat ingrepp. Återaktivera rotationen genom att åter trycka [On/Standby]. Därefter aktiveras vertikalrörelsen genom att trycka ned knappen [Prog.Start].

OBS 2!. Varje gång maskinens huvudströmbrytare stängts av måste avkänningen av referenslägen ske (se Kapitel 2.1) innan ovanstående program går att köra. Om avkänningen ej utförs kommer inte programmet att kunna aktiveras.

OBS 3! Om knappen [Manuell] trycks in kommer programmet att avbrytas omedelbart och nästa gång som knappen [Prog.Start] trycks in startar programmet om från början.

2.5. Manuell styrning av rotationen

Går ej. Maskinen roterar endast då det ovan beskrivna programmet aktiveras.

3. Ändring av rotationshastighet, stigning och antal blandningscykler

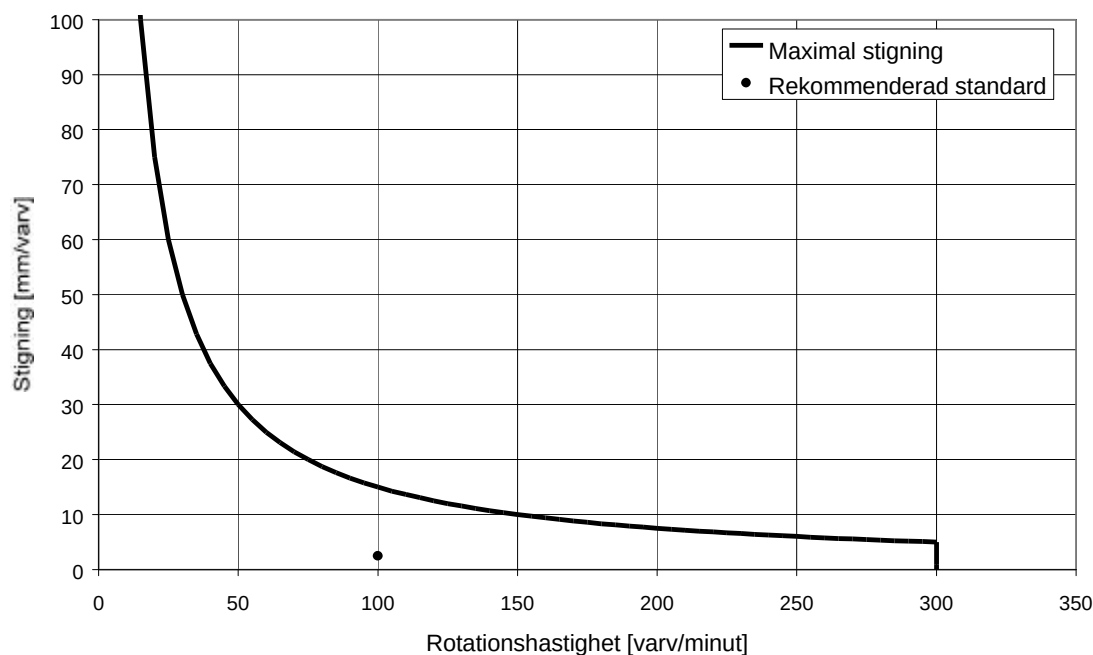
Då inblandning enligt referensmetoden skall utföras gäller att:

- rotationshastigheten skall vara 100 varv/minut
- stighastigheten skall vara 200 mm/minut (motsvarar stigningen 2 mm/varv)
- antalet blandningscykler skall vara 4 st

Om så önskas kan dock dessa parametrar ändras inom vissa intervall, nämligen:

- rotationshastighet: 0 – 300 varv/minut
- stigning: 0 – 1500 mm/minut
- antal blandningscykler: 0 – 99 st

Eftersom stighastigheten (mm/minut) och rotationshastigheten (varv/minut) endast kan varieras inom vissa gränser (dock oberoende av varandra) kommer den maximala storleken på stigningen (mm/varv) bero på rotationshastigheten. Möjliga kombinationer av rotationshastighet och stigning framgår av Figur 1.



Figur 1. Maximal stigning vid olika rotationshastighet.

Ändring av storleken på ovan angiva parametrarna sker via tangentbordet och displayen på maskinens högra sida. För att ändra någon/några av parametrarna skall följande procedur utföras:

1. Stega fram till önskat fönster (se Figur XX) mha piltangenterna $\downarrow$ och $\uparrow$.
2. Tryck ned knappen F2
3. Stega fram till önskad position med piltangenterna $\leftarrow$ och $\rightarrow$.
4. Ändra till önskad storlek på aktuell parameter.
5. Tryck enter ($\rightarrow$) för att spara och avsluta.

Pos.arb.rörelse
Hast (%):013
Antal ggn: 0004

a)

Rotation
Varvtal (%): 033

b)

Figur 2. Utseende på fönster vid ändring av parametrar som styr blandningen. Angivna storlekar motsvarar de värden som skall vara inmatade då blandning enligt referensmetoden sker. Observera att stig- och rotationshastigheten anges i procent av maximal kapacitet, medan blandningscyklerna anges i antal gånger.
a) Stighastighet och antal blandningscykler
b) Rotationshastighet

4. Tillverkning av stabiliserade provkroppar

4.1. Homogenisering av lera

1. Lera från 9 st kolvborrhylsor delas i ca 45 mm tjocka skivor.
2. Blandarcylindern fylls på genom att varva lera från olika kolvborrhylsor. På detta sätt åstadkoms en grov homogenisering.
3. Tryck ned knappen **Manuell**, släpp den och tryck därefter ned knappen **Prog.Start**.
4. Då maskinen stannat (med oket i sitt övre vändläge) skruvas blandarcylindern fast i bottenskivan (mha de stora "insexskruvarna"). Fäst därefter blandarvingen (med blandarcylinderns lock påträtt på blandarcylinderns stång) i oket.
5. Tryck ned knappen **Prog.Start**.
6. Då maskinen stannat (med blandarvingens överkant i nivå med underkanten hos blandarcylinderns lock) fästs locket mot blandarcylindern genom att skruva fast det (mha de små "insexskruvarna"). Skruva även i luftskruven.
7. Påbörja homogeniseringen genom att trycka ned knappen **Prog.Start**. Maskinen utför därefter homogeniseringen automatiskt, vilket tar ca 5 minuter.
8. Då blandningsrörelsen upphört skruvas skruvarna, som håller fast locket mot blandarcylindern, bort.
9. Tryck ned knappen **Prog.Start**.
10. Då maskinen stannat (med oket i sitt övre vändläge) monteras blandarvingen av. Därefter kan tillsättning av stabiliseringsmedel ske enligt nedan.

4.2. Tillsättning av stabiliseringsmedel

1. Den önskade mängden stabiliseringsmedel, uttryckt som kg stabiliseringsmedel per m³ ostabiliserad jord, hålls upp i lämpligt kärl. Om flera komponenter ingår, t.ex. kalk och cement, skall dessa blandas i torrt tillstånd innan de tillsätts jorden.
2. Röret, med pluggen fixerad vid dess underkant, förs ned till blandarcylinderns botten.
3. Pluggen dras försiktigt upp och röret fylls på med stabiliseringsmedel mha en tratt.
4. Pluggen placeras mot stabiliseringsmedlets överyta i röret.
5. Starta ett stoppur och drag därefter försiktigt upp röret ur jorden samtidigt som pluggen hålls fixerad i vertikalled.
6. Fäst blandarvingen (med blandarcylinderns lock påträtt på blandarcylinderns stång) i oket.
7. Tryck ned knappen **Manuell** och tryck därefter ned knappen **Prog.Start**.
8. Då maskinen stannat (med blandarvingens överkant i nivå med underkanten hos blandarcylinderns lock) fästs locket mot blandarcylindern genom att skruva fast det (mha de små "insexskruvarna"). Skruva även i luftskruven.

Obs 1! Tidsåtgången från påbörjad uppdragning av KC-röret till påbörjad blandning skall vara 2,0 minuter.

OBS 2! Om mängden stabiliseringsmedel understiger 100 kg/m³ skall röret med innerdiametern 40 mm användas vid tillsättningen. Uppgår mängden stabiliseringsmedel till 100-150 kg/m³ används röret med diametern 49 mm och om mängden överstiger 150 kg/m³ används båda rören (stabiliseringsmedlet fördelas då så att "brukpelarna" får lika stor höjd i respektive KC-rör).

Massan stabiliseringsmedel kan, under förutsättning av att 9 st helt fyllda kolvborrhylsor används, beräknas enligt följande:

$$m_{\text{stabiliseringsmedel}} = 3,00 \cdot \text{konc}_{\text{stabiliseringsmedel}}$$

där: $m_{\text{stabiliseringsmedel}}$ = total mängd stabiliseringsmedel som skall tillsättas [gram],
 $\text{konc}_{\text{stabiliseringsmedel}}$ = beställd stabiliseringsmedelskoncentration [kg/m³].

4.3. Blandning av stabiliseringsmedel och lera

1. Påbörja blandningen genom att trycka ned knappen **Prog.Start**. Maskinen utför därefter blandningen automatiskt, vilket tar ca 5 minuter.
2. Då blandningsrörelsen upphört skruvas skruvarna, som håller fast locket mot blandarcylindern, bort.
3. Tryck ned knappen **Prog.Start**.
4. Då maskinen stannat (med oket i sitt övre vändläge) monteras blandarvingen av. Därefter kan stansningen av provkropparna ske enligt Avsnitt 4.4.

4.4. Stansning av provkroppar

1. Fäst stansningsverktyget i oket.
2. Tryck upp kolvborrhylsorna så långt det går i styrhylsorna. Eventuellt kan lite fett behövas för att förhindra att kolvborrhylsorna trillar ned.
3. Tryck in knapparna **Manuell** + **Ned** och håll dessa intryckta till dess att den nedåtriktade rörelsen upphör. Kolvborrhylsorna har nu tryckts ned till blandarcylinderns botten.
4. Tryck in knapparna **Manuell** + **Upp** och håll dessa intryckta till dess att stansningsverktyget är så högt upp att det kan monteras av. Kolvborrhylsorna sitter nu kvar i blandarcylindern.
5. Montera bort blandarcylindern genom att skruva loss de stora ”insexskruvarna”. Därefter kan kolvborrhylsorna tryckas ut ur blandarcylindern enligt Avsnitt 4.5.

4.5. Uttryckning av provkroppar

1. Montera bort blandarcylinderns botten genom att skruva loss de små ”insexskruvarna” och bända loss botten.
2. Placera den bottenlösa blandarcylindern på uttryckaren
3. Fäst blandarcylindern mot uttryckaren mha de stora ”insexskruvarna”.
4. Tryck ut den stabiliserade jorden och kolvborrhylsorna

OBS ! Om så önskas kan den stabiliserade jord som blir över packas i hylsor på traditionellt sätt.

SVENSK DJUPSTABILISERING

Kompletterande kontroll av Blandaren

Slutrapport

Datum: 1999-04-12
Objekt: 1-9811-643
Kontaktpersoner: Torbjörn Edstam

Innehållsförteckning

Text	Sida	
1	INLEDNING	72
2	GENOMFÖRANDE	72
3	RESULTAT	73
3.1	De stabiliserade provkropparnas vattenkvot	73
3.2	De stabiliserade provkropparnas densitet	74
3.3	De stabiliserade provkropparnas hållfasthet	75
3.4	De stabiliserade provkropparnas ytstruktur	78
4	SLUTSATSER	80
Bilaga A	Ekvationer	
Bilaga B	Foton av provkroppar med defekt mantelyta	

Kompletterande kontroll av Blandaren

1 INLEDNING

Statens geotekniska institut (SGI) har tillsammans med Svensk Djupstabilisering (SD) i tidigare projekt utvecklat en referensmetod för laboratorietillverkning av stabiliserad jord.

Huvudsyftet med den nya referensmetoden är att ta fram en standardiserad tillverkningsprocedur som ger reproducerbara provkroppar (m.a.p. den enaxliga tryckhållfastheten).

I det första projektet (1-9610-543) togs en prototyp fram, som även testades utförligt. I nästa projekt (3-9711-583) tillverkades en modifierad prototyp (hädanefter benämnd "Blandaren"), vilken var ca 50 % större än den första prototypen. Kontrollen av denna prototyps funktionalitet inskränkte sig dock enbart till ett fåtal försök.

I samband med försök med Blandaren på senare tid väcktes farhågor att denna inte alltid uppfyllde målsättningen att tillverka reproducerbara provkroppar. Därför beslöts att genomföra ett omfattande försöksprogram där Blandarens funktionalitet kontrollerades. Denna rapport redovisar resultaten från denna kontroll.

2 GENOMFÖRANDE

Gyttja och lera från Holma mosse, belägen på Vikbolandet öster om Norrköping, användes vid studien. Dessa jordar valdes eftersom de delvis ingår i SD's projekt "Stabiliserad jords egenskaper", inom vilket Blandaren avses att användas. Gyttjan stabiliserades med en blandning av slagg och cement medan leran stabiliserades med en blandning av kalk och cement. De tillverkade provkropparna testades genom enaxliga tryckförsök då dessa uppnått åldern 7 respektive 28 dygn, se Tabell 1. Eftersom Blandaren endast tillåter tillverkning av 4 st stansade provkroppar per blandning skedde tillverkningen genom två blandningar per sammansättning. Som framgår är den naturliga vattenkvoten i princip lika stor för samtliga blandningar med gyttjig lera respektive lera, vilket tyder på den ostabiliserade jorden i samtliga fall kan betraktas som likvärdig. Totalt tillverkades och testades 64 st provkroppar, varav 32 st tillverkades genom stansning mha Blandaren och 32 st tillverkades genom packning (traditionell metod) genom att använda stabiliserad jord som blivit över från Blandaren. Fyra olika kombinationer av naturlig jord och stabiliseringsmedel testades, dvs 16 provkroppar per kombination. Eftersom hållfastheten undersöktes vid två tidpunkter (7 respektive 28 dygn) erhöles 8 st "grupper" och inom respektive grupp 8 st jämförbara hållfasthetsvärden (4 st stansade och 4 st packade provkroppar).

Tabell 1 Naturlig jords egenskaper samt data rörande stabiliseringen.

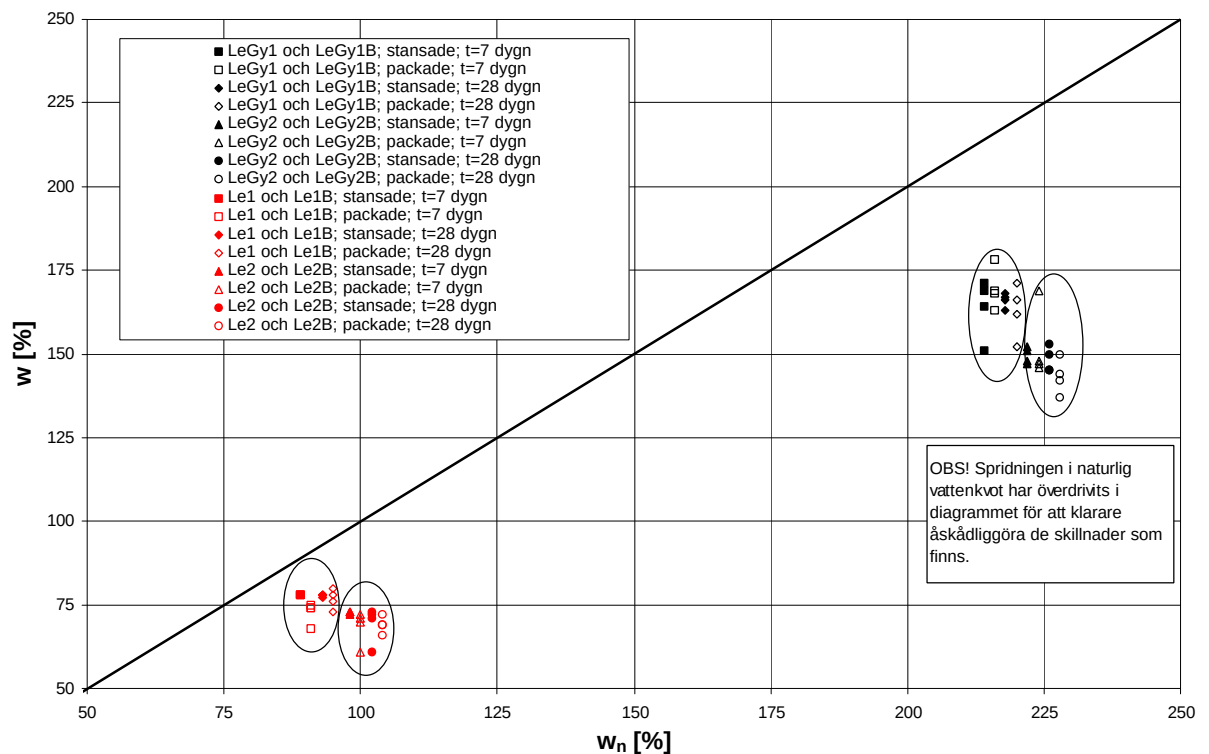
¹⁾ Benämning [-]	Jord [-]	Djup [m]	²⁾ w _N [%]	⁴⁾ ρ [t/m ³]	Tillsatsmedel [-]	Proportioner [%/%]	Mängd [kg/m ³]	Provålder [dygn]	³⁾ Provantal [st]
Le Gy 1	Lerig gyttja	3-5	218	1,23-1,26	Cement + Slagg	50/50	100	7, 28	4+4
Le Gy1B			218						4+4
Le Gy 2			219				150		4+4
Le Gy 2B			220						4+4
Le 1	Lera	7-9	91	1,46-1,54	Kalk + Cement	50/50	100	7, 28	4+4
Le 1B			91						4+4
Le 2			91				150		4+4
Le 2B			92						4+4

- 1) Sammansättningen för material 1 och 1 B respektive 2 och 2B är likadana, men dessa måste av praktiska skäl tillverkas i två separata blandningar.
- 2) Den naturliga vattenkvoten bestämdes efter homogenisering i Blandaren.
- 3) 4 st stansade och 4 st packade provkroppar.
- 4) Densiteten har hämtats från uppgifter redovisade i projektet 3-9705-238.

3 RESULTAT

3.1 De stabiliserade provkropparnas vattenkvot

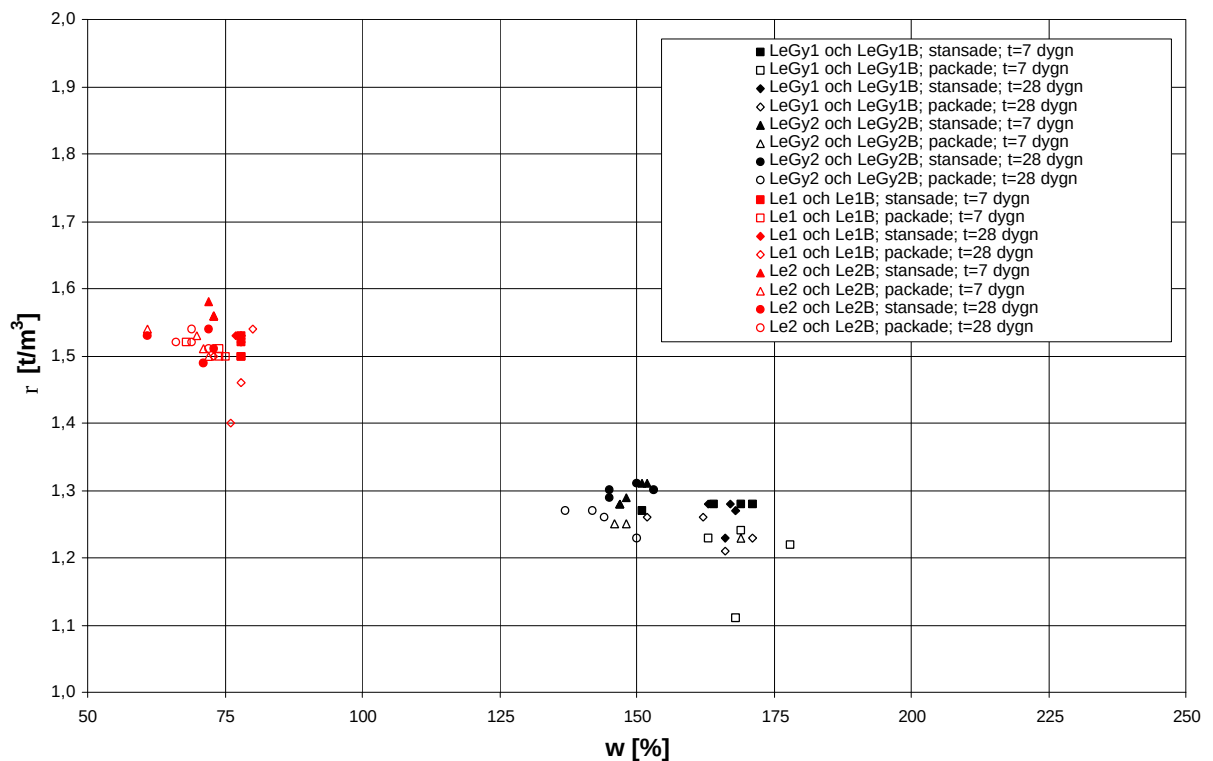
Jordens vattenkvot före och efter stabiliseringen redovisas i Figur 1. Som framgår minskar vattenkvoten ca 50-75 procentenhet i den leriga gyttjan pga stabiliseringen. Motsvarande värde för lera är ca 15-25 procentenheter. I båda fallen finns en viss spridning, men de uppmätta värdena stämmer mycket väl med de teoretiska (se Bilaga A). Någon tydlig tendens till större vattenkvotsminskning med ökande lagringstid (7 respektive 28 dygn) kan ej ses.



Figur 1. Jordens vattenkvot för och efter stabiliseringen. (OBS! Den naturliga vattenkvoten varierar mindre än vad som framgår i diagrammet, jfr Tabell 1).

3.2 De stabiliserade provkropparnas densitet

Sambandet mellan den stabiliserade jordens vattenkvot och densitet framgår av Figur 2. De stabiliserade provkropparnas densitet har bestämts genom att väga dessa innan de tryckts ut ur kolvborrhylsorna (korrigerat mht kolvborrhylsans tyngd) och mäta höjden på respektive provkropp. I volymen ingår således eventuella sprickor och håligheter vilket troligen förklarar den spridning som kan ses. Noterbart är att de extremt låga densiteter som i några fall erhållits genomgående avser provkroppar som packats. För den stabiliserade leriga gyttjan syns tydligt att provkropparna som tillverkats genom packning har en lägre densitet än de som tillverkats genom stansning. Orsaken till detta diskuteras i kapitel 3.3. En jämförelse med den naturliga jordens densitet (se Tabell 1) visar en förväntad tendens till ökad densiteten pga tillsatsen av stabiliseringsmedel. Ökningen är enbart ca $0,05 \text{ t/m}^3$ vilket stämmer väl överens med den teoretiska ökningen (se Bilaga A) som är $0,05\text{-}0,10 \text{ t/m}^3$.



Figur 2. Den stabiliserade jordens vattenkvot och densitet.

3.3 De stabiliserade provkropparnas hållfasthet

De stabiliserade provkropparnas absoluta skjuvhållfasthet redovisas i Figur 3, medan den normaliserade hållfastheten redovisas i Figur 4. Vid normaliseringen har de uppmätta hållfasthetsvärdena inom respektive jämförbar grupp (definierad av jord, stabiliseringsmängd, tillverkningsmetod och ålder) normaliserats mht gruppens medelhållfasthet, medelvärdet.

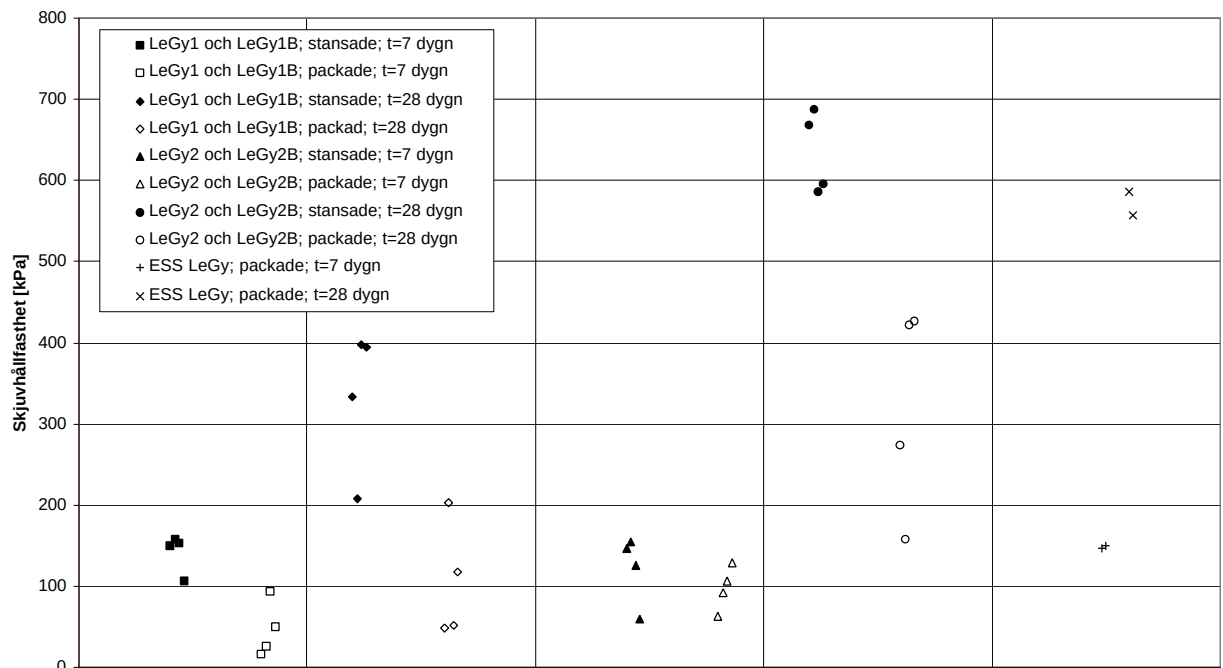
Som framgår är den hållfasthet som erhållits genom stansning i den stabiliserade leriga gyttjan i flertalet fall avsevärt större än den som erhållits genom packning. Däremot resulterar stansning och packning i ungefär samma hållfasthet för den stabiliserade leran. Orsaken till detta beteende är troligen att den leriga gyttjan är svårpackad pga fastklibbning mot packningsstämplan, ett problem som ofta förekommer vid packning av material med en naturlig vattenkvot överstigande ca 100 %.

Även spridningen i hållfasthet är avsevärt mindre vid stansning av den stabiliserade leriga gyttjan, jämfört med packning. Däremot resulterar de två metoderna i ungefär lika stor spridning för den stabiliserade leran.

Vidare kan konstateras att stansning av den stabiliserade leran och stansning av den gyttjiga leran resulterar i ungefär samma spridning.

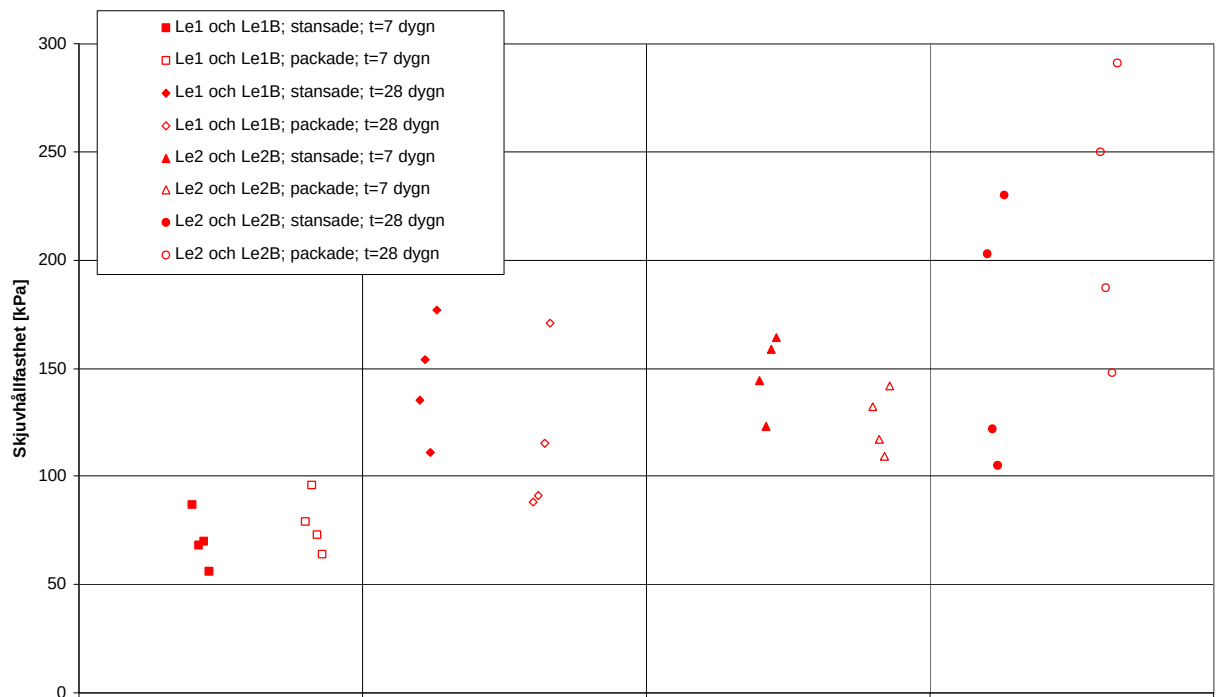
Sammanfattningsvis kan konstateras att stansning resulterar i mindre spridning än packning. Med den prototyp som idag finns framtagna förefaller dock ”felet” kunna uppgå till ca ± 20 à 30 % vid provning av enbart en slumpvis utvald provkropp som tillverkats genom stansning.

Enaxliga tryckförsök på gyttja



a)

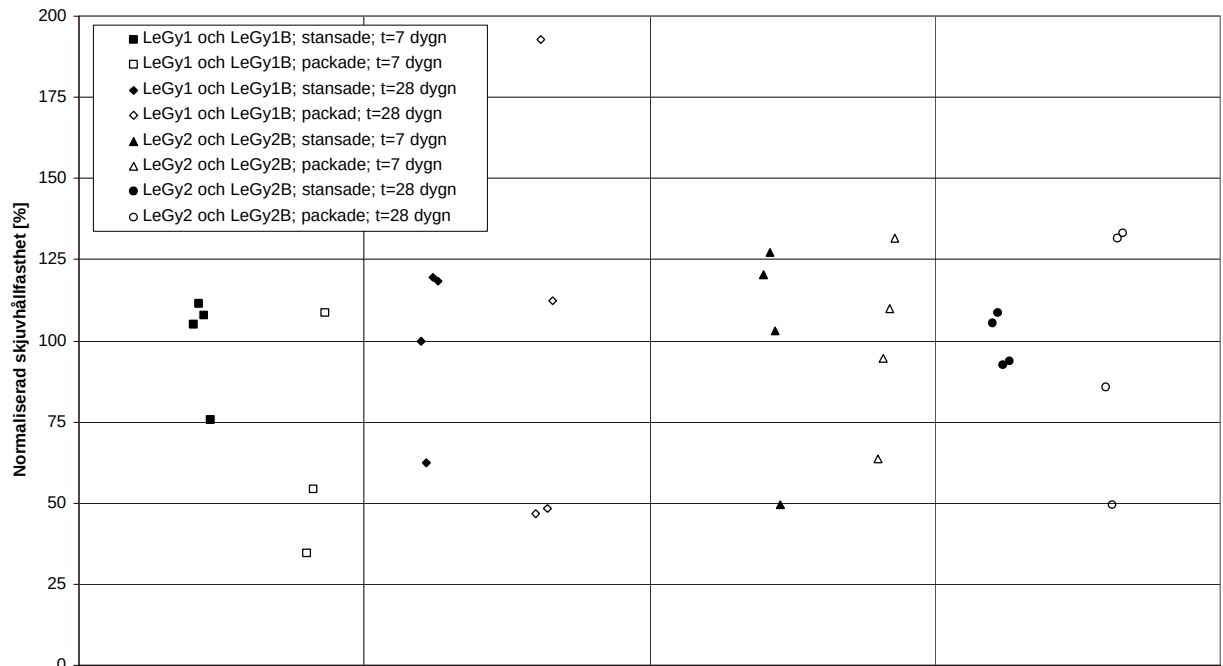
Enaxliga tryckförsök på lera



b)

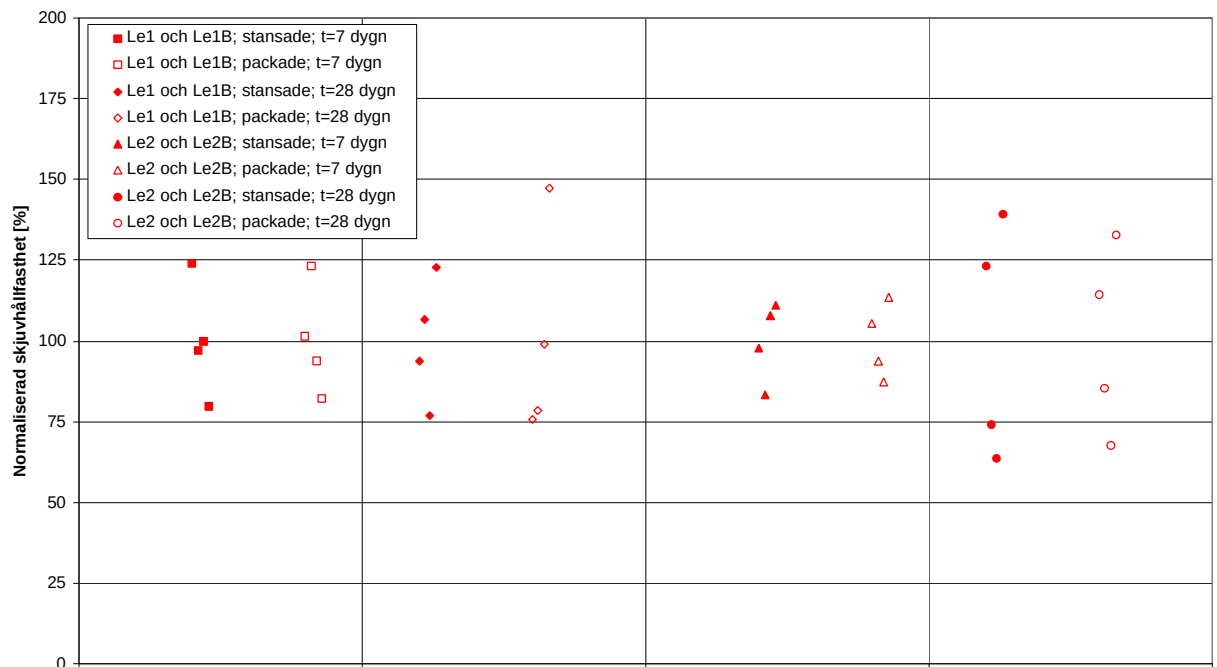
Figur 3. Den stabiliserade jordens skjuvhållfasthet bestämd genom enaxliga tryckförsök
a) Lerig gyttja
b) Lera

Enaxliga tryckförsök på gyttja



a)

Enaxliga tryckförsök på lera



b)

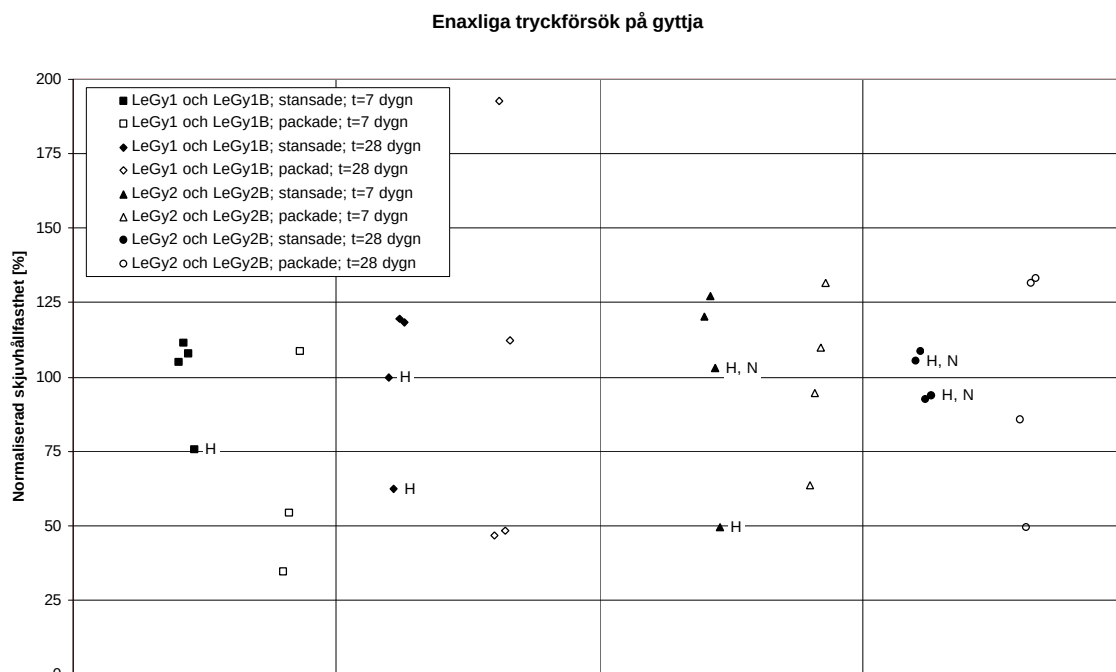
Figur 4. Den stabiliserade jordens normaliserade skjuvhållfasthet baserad på resultaten i Figur 3.
a) Lerig gyttja
b) Lera

3.4 De stabiliserade provkropparnas ytstruktur

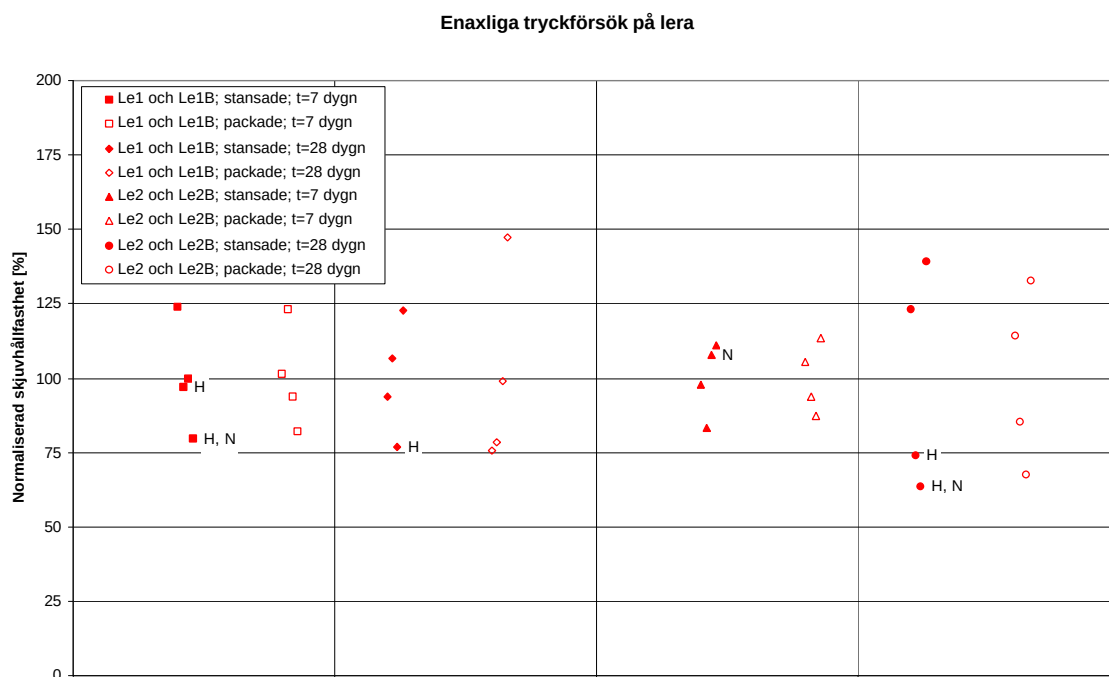
Som framgår av kapitel 3.3 förefaller ”felet” kunna uppgå till ca ± 20 à 30 % vid provning av enbart en provkropp. Vid provning med den mindre prototypen, som ligger till grund för den nu testade utrustningen, var ”felet” dock enbart ± 5 à 15 %.

Någon helt tillfredsställande förklaring till denna ”felskillnad” finns inte, men vid studium av provkropparnas ytstruktur (innan provning) framgår att de stansade provkropparna med en extremt låg hållfasthet i samtliga fall uppvisar en varierande grad av hål och/eller sprickor, jfr Figur 5 och Bilaga B. Effekten av håligheter och/eller sprickor på mantelytan är sannolikt liten om dessa är av ytlig karaktär, men om dessa är djupare blir effekten desto större. Som framgår av Figur 5 förefaller dock de sprickor och/eller håligheter som finns på mantelytan indikera en tillräcklig förekomst av inre sprickor och/eller håligheter för att menligt påverkar hållfastheten. Totalt uppvisar 12 av 32 st stansade provkroppar en defekt mantelyta och av dessa resulterar 7 st i en hållfasthet som är minst 20 % lägre än den genomsnittliga hållfastheten. I två fall har provkroppar med slät mantelyta lägre hållfasthet än provkroppar med defekt mantelyta, men i dessa fall är spridningen avsevärt mindre än i övriga fall. Bortses ifrån provkroppar med defekt mantelyta blir ”felet” maximalt ca ± 15 % vid provning av enbart en provkropp, men det bör påpekas att antalet jämförbara provkroppar i huvuddelen av fallen då endast är 2 eller 3 st.

Sammantaget kan konstateras att i samtliga fall då låg hållfasthet erhållits har mantelytan varit defekt, men en defekt mantelyta innebär inte nödvändigtvis ett provkroppen har låg hållfasthet.



a)



b)

Figur 5. Den stabiliserade jordens normaliserade skjuvhållfasthet, med prover med hål och/eller sprickor markerade (H = Dokumenterade hål och/eller; N = misstänkt hål noterat vid stansning).

a) Lerig gyttja

b) Lera

4 SLUTSATSER

- De stansade provkropparna ger högre hållfasthet än de packade för stabiliserad lerig gyttja. Däremot resulterar de två tillverkningsmetoderna i ungefär samma hållfasthet för den stabiliserade leran.
- De stabiliserade provkropparna som tillverkats genom packning uppvisar betydligt större spridning vad det gäller densiteten, framförallt för den stabiliserade leriga gyttjan. Däremot resulterar de två tillverkningsmetoderna i ungefär samma vattenkvot.
- De stansade provkropparna uppvisar mindre hållfasthetsspridning än de packade för stabiliserad lerig gyttja. Däremot resulterar de två tillverkningsmetoderna i ungefär samma hållfasthetsspridning för den stabiliserade leran.
- En förklaringen till ovanstående observationer är att det är svårt att tillverka provkroppar genom packning för lerig gyttja och liknande material med hög (>100 %) vattenkvot eftersom det stabiliserade materialet då är mycket klabbigt.
- De stansade provkropparna uppvisar en hållfasthetsspridning som uppgår till ± 20 à 30 % för båda materialen. Denna spridning är dubbelt så stor som den som erhöles vid testning av en prototyp som var ca 30 % mindre än den nu använda utrustningen. Studium av fotografier av provkropparna visar att extremt låga hållfasthetsvärden i samtliga fall beror på förekomst av sprickor och/eller håligheter.
- Uppmätta förändringar av densitet och vattenkvot stämmer väl överens med de teoretiskt beräknade.

A.1 Den stabiliserade jordens skrymdensitet:

Antas att den stabiliserade jordens densitet utgörs av ”summan” av den naturliga jordens skrymdensitet och stabiliseringsmedlets kompaktdensitet gäller sambandet:

$$r_{\text{stabiliserad}} = \frac{r_{\text{lera}} + k_{\text{stab}}}{1 + \frac{k_{\text{stab}}}{r_{\text{s,stab}}}}$$

där: ρ_{lera} = den ostabiliserade jordens skrymdensitet [t/m^3],
 k_{stab} = koncentrationen av stabiliseringsmedel [t/m^3 ostabiliserad lera],
 $\rho_{\text{s,stab}}$ = stabiliseringsmedlets kompaktdensitet [t/m^3].

A.2 Den stabiliserade jordens vattenkvot

Den stabiliserade jordens vattenkvot kan beräknas som:

$$w_{\text{stab}} = \frac{w_n - \alpha \cdot \frac{k_{\text{stab}} \cdot (1 + w_n)}{r_{\text{lera}}}}{1 + \frac{k_{\text{stab}} \cdot (1 + w_n)}{r_{\text{lera}}}}$$

där: ρ_{lera} = den ostabiliserade jordens skrymdensitet [t/m^3],
 k_{stab} = koncentrationen av stabiliseringsmedel [t/m^3 ostabiliserad lera],
 w_n = den ostabiliserade jordens vattenkvot [-],
 α = relativ vattenförbrukning pga kemisk reaktion mellan vatten och stabiliseringsmedel [-]. SGI Rapport 48 indikerar att denna parameter kan sättas till ca 0,3.

BILAGA B: Foton på stansade provkroppar med defekt mantelyta



Le Gy 1; stansad; 7 dygn; $\tau_{\text{normaliserad}}=75\%$



Le Gy 1; stansad; 28 dygn; $\tau_{\text{normaliserad}}=62\%$



Le Gy 1; stansad; 28 dygn; $\tau_{\text{normaliserad}}=100\%$



Le Gy 2; stansad; 7 dygn; $\tau_{\text{normaliserad}}=103\%$



Le Gy 2; stansad; 7 dygn; $\tau_{\text{normaliserad}}=49\%$



Le Gy 2; stansad; 28 dygn; $\tau_{\text{normaliserad}}=105\%$



Le Gy 2; stansad; 28 dygn; $\tau_{\text{normaliserad}}=94\%$



Le 1; stansad; 7 dygn; $\tau_{\text{normaliserad}}=97\%$



Le 1; stansad; 7 dygn; $\tau_{\text{normaliserad}} = 80 \%$



Le 1; stansad; 28 dygn; $\tau_{\text{normaliserad}} = 77 \%$



Le 2; stansad; 28 dygn; $\tau_{\text{normaliserad}} = 74 \%$



Le 2; stansad; 28 dygn; $\tau_{\text{normaliserad}} = 64 \%$

SVENSK DJUPSTABILISERING (SD)

**Referensmetod för
laboratorietillverkning av stabiliserade
provkroppar**

**Förnyad kontroll av den Lilla
Blandaren**

Slutrapport

Datum: 1999-10-08
Objekt: 3-9905-312
Kontaktpersoner: Torbjörn Edstam

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	90
2	GENOMFÖRANDE	90
3	RESULTAT	90
3.1	De stabiliserade provkropparnas vattenkvot	90
3.2	De stabiliserade provkropparnas densitet	91
3.3	De stabiliserade provkropparnas hållfasthet	92
3.4	De stabiliserade provkropparnas ytstruktur	95
4	SLUTSATSER	95
5	FORTSATT ARBETE	95

Bilagor

Bilaga A: Foton på de stabiliserade provkropparna

Referensmetod för laboratorietillverkning av stabiliserade provkroppar

Förnyad kontroll av Lilla Blandaren

1 INLEDNING

Efter att tveksamhet uppstått rörande reproducerbarheten hos den stora prototypen av Blandaren (Stora Blandaren), se ”Kompletterande kontroll av Blandaren - Slutrapport”, daterad 990412, genomförde SGI under maj-juni 1999 förnyade tester av den lilla prototypen (Lilla Blandaren). Resultaten av denna undersökning redovisas i denna rapport. Delar av resultaten har tidigare redovisats i ”Förnyat test av den lilla prototypen av Blandaren – Förhandsrapport”, daterad 990609.

2 GENOMFÖRANDE

Den lera respektive leriga gyttja ifrån Holma och de stabiliseringsmedel som använts vid de tidigare testerna användes även vid denna studie. Två olika typer av inblandningar genomfördes och för varje inblandning tillverkades fyra provkroppar enligt Tabell 1. Innan inblandningsförsöken påbörjades homogeniserades respektive jord i stora hinkar för att likartad sammansättning skulle erhållas i respektive provkropp.

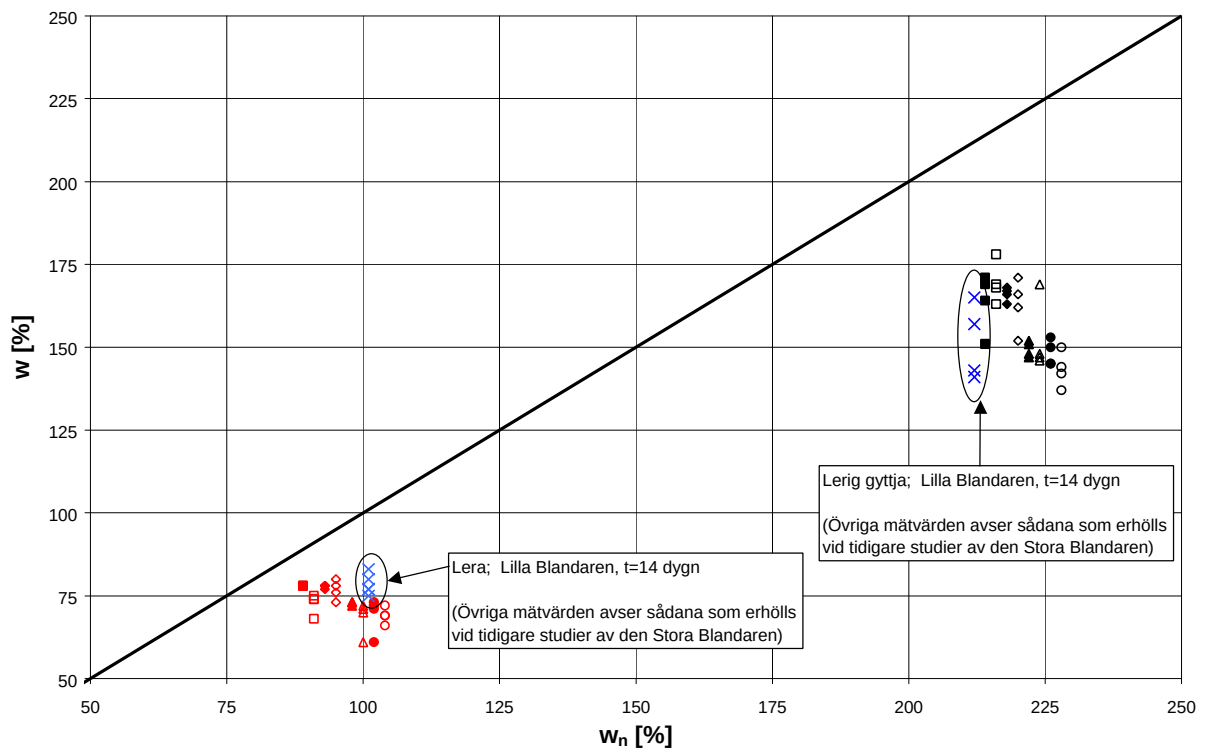
Tabell 1. Data rörande stabiliseringen.

Jord	Djup [m]	w _N [%]	Stabiliseringsmedel	Proportioner [% / %]	Stabiliseringsmängd [kg/m ³]	Provålder [dygn]
Lera	7-8	101	kalk/cement	50/50	100	14
Gyttjig lera	3-5	212	slagg/cement	50/50	100	14

3 RESULTAT

3.1 De stabiliserade provkropparnas vattenkvot

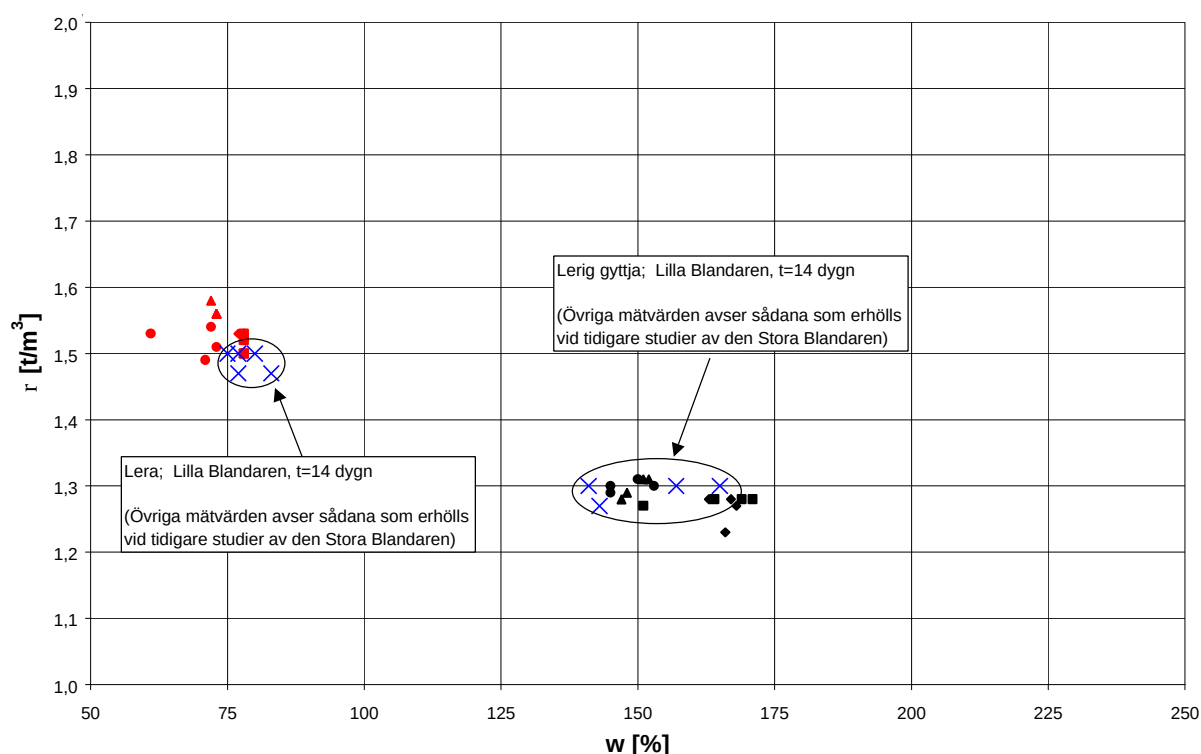
Jordens vattenkvot före och efter stabiliseringen redovisas i Figur 1. Som framgår minskar vattenkvoten ca 50-75 procentenhet i den leriga gyttjan pga stabiliseringen. Motsvarande värde för leran är ca 15-25 procentenheter. De värden som erhållits i denna undersökning stämmer väl överens med de som erhållits vid den tidigare undersökningen av den Stora Blandaren.



Figur 1. Jordens vattenkvot före och efter stabiliseringen. Inringade mätvärden avser resultatet av den aktuella undersökningen. Övriga mätvärden härrör sig till den tidigare studien av den Stora Blandaren.

3.2 De stabiliserade provkropparnas densitet

Sambandet mellan den stabiliserade jordens vattenkvot och densitet framgår av Figur 2. De värden som erhållits i denna undersökning stämmer väl överens med de som erhållits vid den tidigare undersökningen av den Stora Blandaren.



Figur 2 Den stabiliserade jordens vattenkvot och densitet. Inringade mätvärden avser resultatet av den aktuella undersökningen. Övriga mätvärden härrör sig till den tidigare studien av den Stora Blandaren.

3.3 De stabiliserade provkropparnas hållfasthet

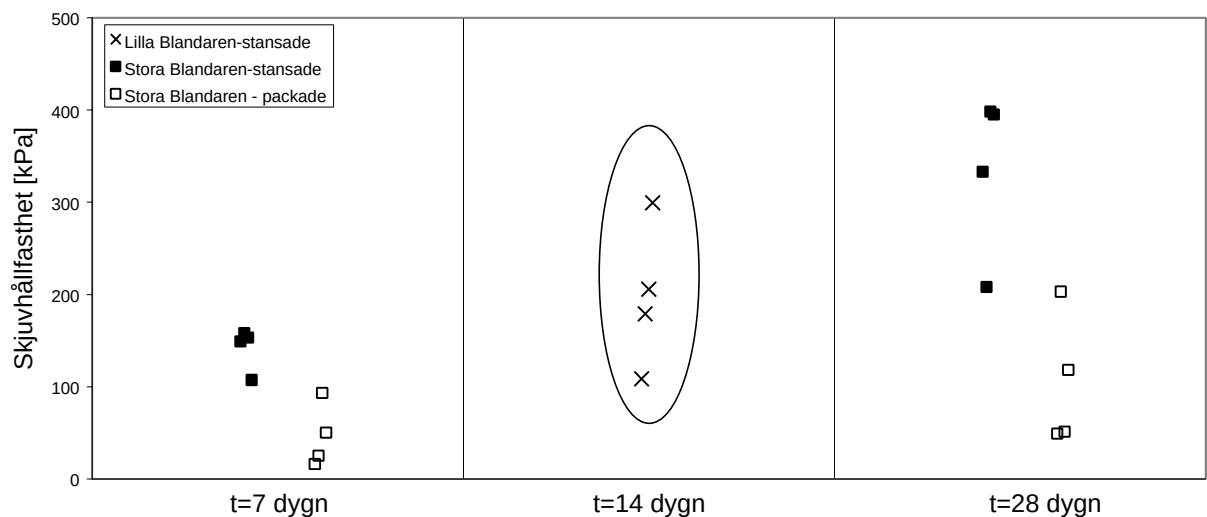
De stabiliserade provkropparnas absoluta och normaliserade skjuvhållfasthet redovisas i Figur 3a, b och Figur 4a, b. I figurerna redovisas såväl de resultat som erhöles i denna undersökning som de som erhöles vid den tidigare studien av den Stora Blandaren. Vid normaliseringen har de uppmätta hållfasthetsvärdena inom respektive jämförbar grupp (definierad av jord, stabiliseringsmängd, tillverkningsmetod och ålder) normaliserats mht gruppens medelhållfasthet.

Som framgår av Figur 3b är spridningen för stansade provkroppar innehållande stabiliserad gyttja ca $\pm 50\%$ då den Lilla Blandaren använts. Motsvarande siffra för den Stora Blandaren är ca $\pm 20-30\%$. Provkroppar tillverkade genom packning (inblandningsfasen skedde mha Stora Blandaren) uppvisar en spridning på ca $\pm 70-100\%$. Som framgår av Figur 3a kan man dra relativt säkra slutsatser om hur lagringstiden påverkar hållfastheten i den stabiliserade gytthan. Detta förutsätter dock att antalet provkroppar är så stort att den "sanna" trenden inte överskuggas av den inneboende osäkerhet som finns hos provkropparna. I detta fall torde trippelprov vara erforderligt för att klargöra den "sanna" trenden. Utnyttjas enbart enkelprov eller dubbelprov är sannolikheten dock stor att felaktiga slutsatser dras.

Som framgår av Figur 4b är spridningen för stansade provkroppar innehållande stabiliserad lera ca $\pm 10-15\%$ då den Lilla Blandaren använts. Motsvarande siffra för den Stora Blandaren är ca $\pm 20\%$. Provkroppar tillverkade genom packning (inblandningsfasen skedde mha Stora Blandaren) uppvisar en spridning på ca $\pm 20-40\%$. Som framgår av Figur 4a kan man dra relativt säkra slutsatser om hur lagringstiden påverkar hållfastheten i den stabiliserade leran. Detta förutsätter

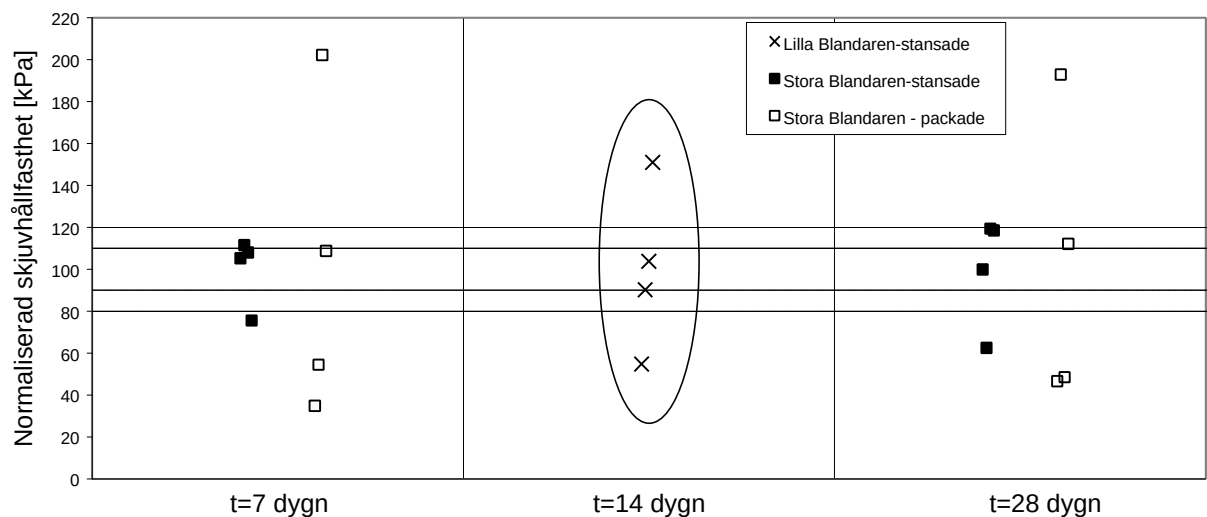
dock att antalet provkroppar är så stort att den "sanna" trenden inte överskuggas av den inneboende osäkerhet som finns hos provkropparna. I detta fall torde dubbelprov vara erforderligt för att klargöra den "sanna" trenden. Utnyttjas enbart enkelprov är sannolikheten dock stor att felaktiga slutsatser dras.

Enaxliga tryckförsök på stabiliserad gyttja i Holma



a)

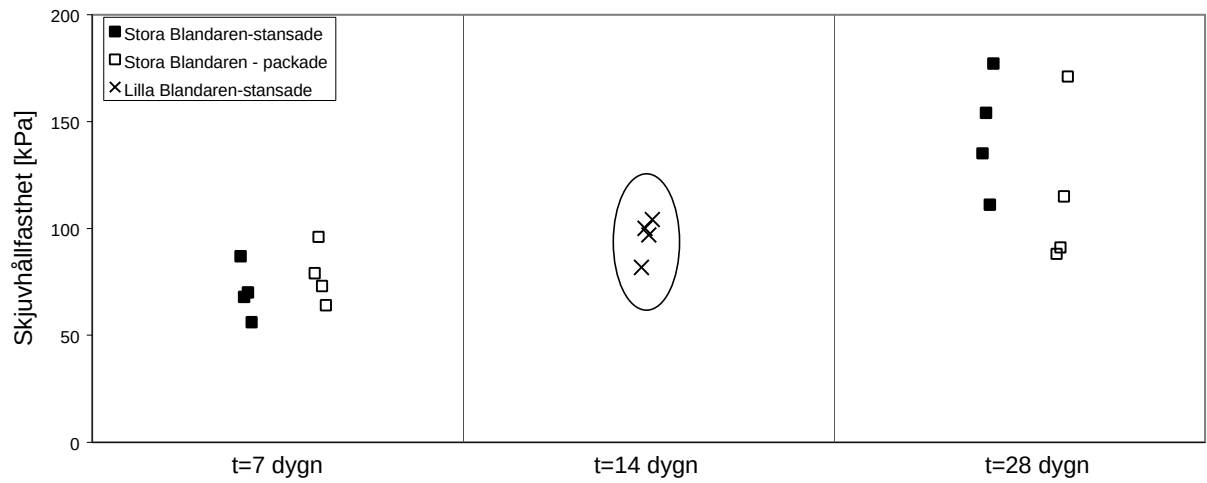
Enaxliga tryckförsök på stabiliserad gyttja i Holma



b)

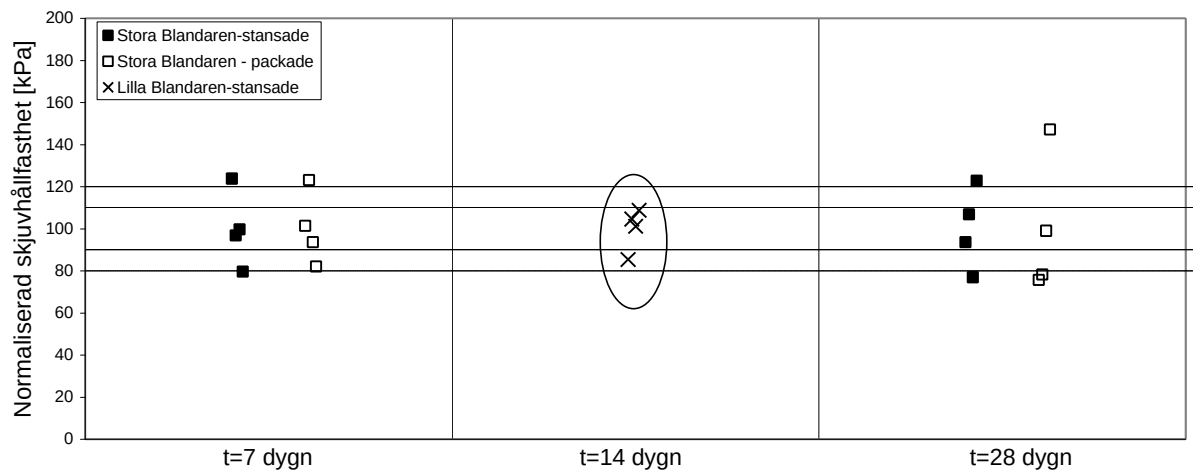
Figur 3. Den stabiliserade gyttjans hållfasthet bestämd genom enaxliga tryckförsök. Inringade mätvärden avser resultatet av den aktuella undersökningen. Övriga mätvärden härrör sig till den tidigare studien av den Stora Blandaren.
a) Absolut hållfasthet
b) Normaliserad hållfasthet.

Enaxliga tryckförsök på stabiliserad lera i Holma



a)

Enaxliga tryckförsök på stabiliserad lera i Holma



b)

Figur 4. Den stabiliserade lerans hållfasthet bestämd genom enaxliga tryckförsök. Inringade mätvärden avser resultatet av den aktuella undersökningen, medan övriga mätvärden härrör sig till den tidigare omnämnda studien med den Stora Blandaren

a) Absolut hållfasthet

b) Normaliserad hållfasthet.

3.4 De stabiliserade provkropparnas ytstruktur

De tillverkade provkropparnas ytstruktur framgår av Bilaga A. I samtliga fall är mantelytan huvudsakligen mycket slät, men 2 st provkroppar av totalt 8 st (dvs 25 %) innehåller små hål/sprickor (en provkropp bestående av stabiliserad gytta och en provkropp bestående av stabiliserad lera). Vid den tidigare undersökningen av den Stora Blandarens reproducerbarhet konstaterades att sprickor och/eller håligheter kunde observeras i 12 st stansade provkroppar av totalt 32 st (dvs knappt 40 %).

Effekten av håligheter/sprickor är svårbedömd. Den defekta provkroppen av stabiliserad gytta uppvisar den lägsta hållfastheten (endast 55 % av medelhållfastheten). Provkroppen av stabiliserad lera påverkas dock inte av ytdefekten (den relativa hållfastheten är 105 %). Liknande observationer gjordes vid studien av den Stora Blandaren. Således tycks en defekt mantelyta vara en indikation på att hållfastheten kan vara nedsatt, men så är inte alltid fallet.

4 SLUTSATSER

Den Stora Blandaren och den Lilla Blandaren ger ungefär samma reproducerbarhet hos stabiliserade provkroppar innehållande den lera och gytta som använts i denna studie. Den erhållna reproducerbarheten är dock inte tillräcklig för att möjliggöra studier där slutsatserna baseras på enkelprovning. Snarare är dubbel- eller trippelprovning att föredra.

En förklaring saknas till varför den Lilla Blandaren fungerar för de jordar som testades vid utvecklingen av den nya metoden (lera ifrån Göteborgstrakten och sulfidhaltig lera ifrån Mälardalen), men inte fungerar för den typ av jordar som ingår i den nu aktuella undersökningen (lera och lerig gytta ifrån Vikbolandet).

Ett visst samband finns mellan låg hållfasthet och defekt ytstruktur, nämligen att samtliga provkroppar med låg hållfasthet har defekt ytstruktur. Däremot gäller inte det omvända, dvs samtliga provkroppar med defekt ytstruktur har inte låg hållfasthet. Den Lilla Blandaren resulterar i betydligt färre provkroppar med defekt mantelyta än vad den Stora Blandaren gör.

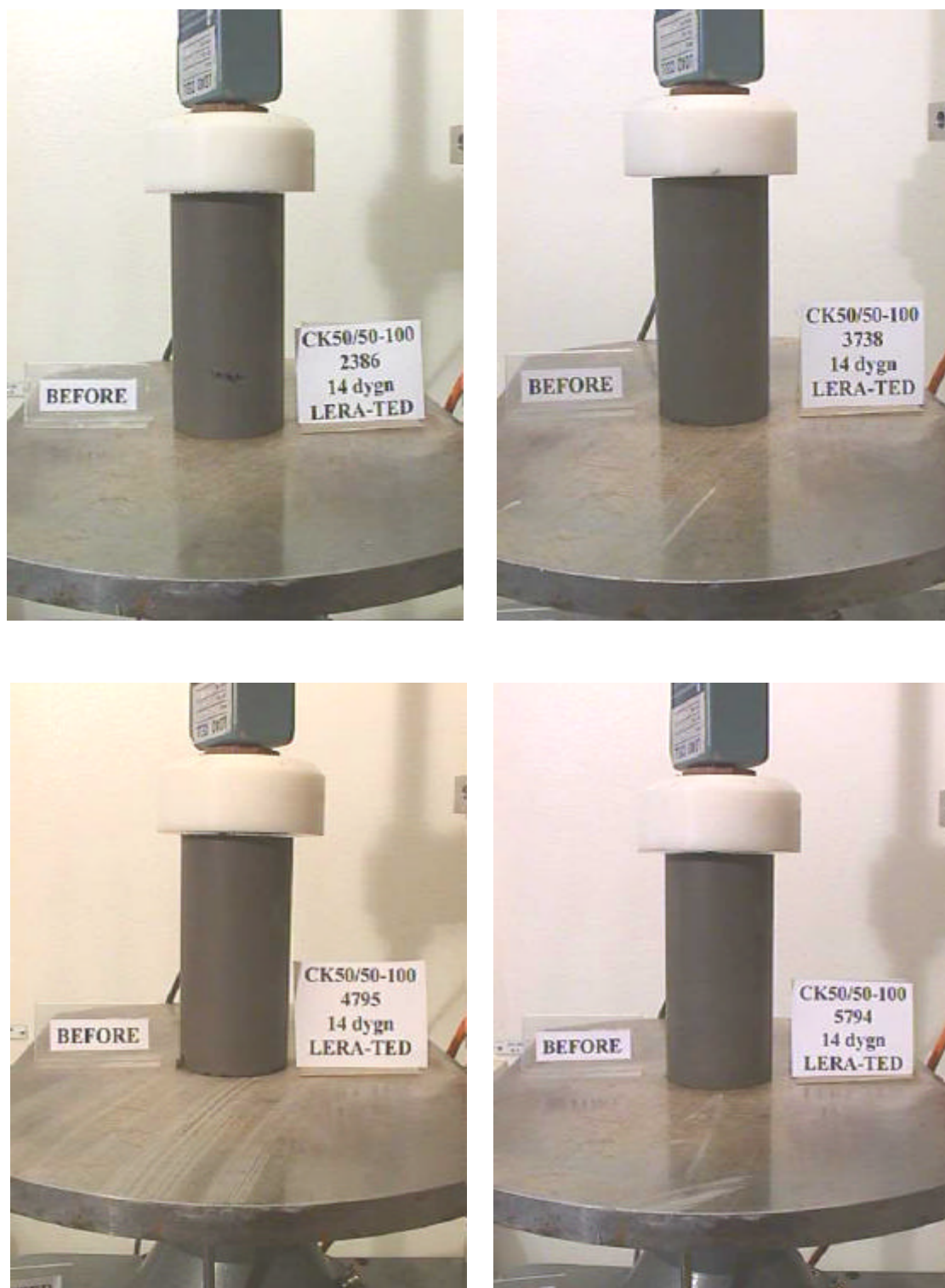
5 FORTSATT ARBETE

Någon självklar lösning för att förbättra reproducerbarheten finns inte. Den otillfredsställande reproducerbarheten kan bero på att blandningen av stabiliseringsmedel och naturlig jord inte är tillräcklig för att skapa ett sammanhängande "skelett" av stabiliseringsmedel. En annan möjlig orsak är att provkropparna innehåller sprickplan och hål.

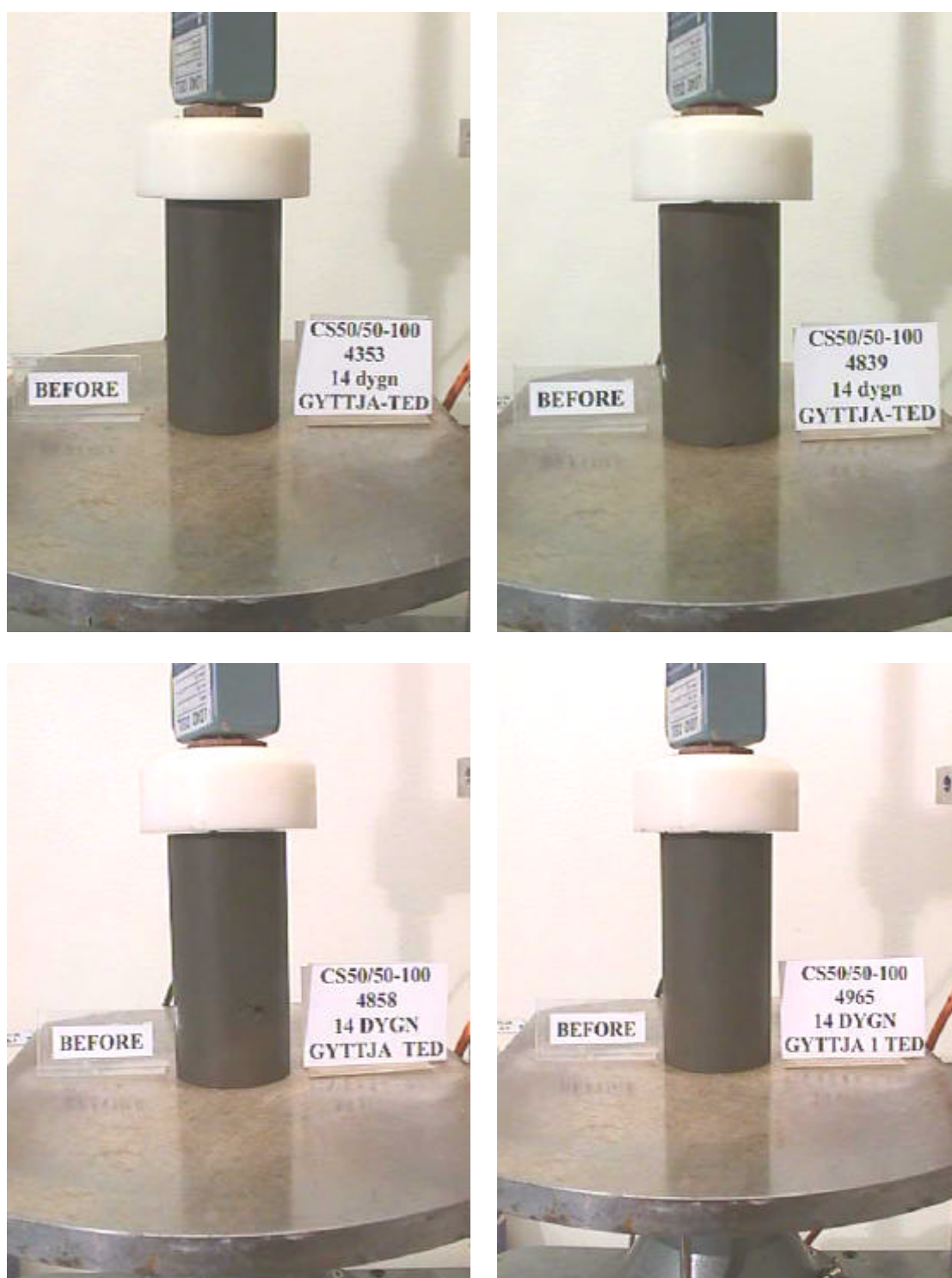
För att åtgärda dessa problem erfordras dock modifieringar av tillverkningsutrustningen/processen och därefter genomförande av relativt omfattande provserier för att kunna kvantifiera den därmed erhållna reproducerbarheten.

En framgångsrik slutprodukt i form av en helt tillförlitlig laboratorietillverkningsmetod kan dock aldrig garanteras.

BILAGA A



Figur 1. Ytstruktur hos provkroppar bestående av stabiliserad lera.



Figur 2. Ytstruktur hos provkroppar bestående av stabiliserad gyttja.

Publikationer utgivna av Svensk Djupstabilisering

Arbetsrapport

- 1 **Arlandabanan, Norra Böjen. Sättningar hos järnvägsbank på kc-pelare.** 1998
Ulf Stjerngren, Jacobson & Widmark
- 2 **KC-förstärkning för schakt inom spont, Filipstad Brygge, Oslo.** 1998
Phung Doc Long, Stabilator AB & Håkan Bredenberg, Stabilator AB
- 3 **Inblandningsmekanismer vid djupstabilisering med kalk-, kalk/cementpelare och cementpelare** 1998
Stefan Larsson, Tyréns
- 4 **Undersökning av KC-pelare med avseende på dess ”homogenitet”.** 1998
Roland Tränk, SGI
- 5 **Bestämning av egenskaper i cellstabiliserad torv.** 1998
Nenad Jelusic, Vägverket Region Mitt, Torbjörn Edstam, SGI & Yvonne Rogbeck, SGI
- 6 **Rörelser och portryck vid kalkpelarinstallation. Redovisning av mätresultat.** 1998
Åke Johansson, SGI
- 7 **Masstabilisering av väg 590, Askersund.** 1998
Yvonne Rogbeck, SGI
- 8 **KC-pelarförstärkning av instabil slänt. E4, delen Nyland - Ullånger, Västernorrlands län. Åtgärder och mätningar.** 1998
Leiv Viberg, SGI, Bertil Eriksson, Vägverket Produktion Mitt & Stefan Johansson, Vägverket Produktion Mitt
- 9 **Grunnforsterkning med kalksementpælar** 1999
Stein Christensen, Arnstein Watn, Steinar Nordal, Arnfinn Emdal, Torbjørn Lund & Thomas Kristiansen
- 10 **Dimensioneringsvägledning för djupstabilisering** 1999
Översättning av Finska Vägverkets klarlägganden 18/1997
- 11 **Historik och svenska erfarenheter av kalkstabilisering av vägterrasser** 1999
Stefan Gustafsson, Scandiaconsult
- 12 **Undersökning i fält av stabiliseringseffekt i organisk jord och lera** 2000
Tobias Hansson, Hercules Grundläggning AB, Yvonne Rogbeck, SGI, & Leif Säfström, Vägverket Region Mälardalen
- 13 **Utvärdering av verksamheten inom Svensk Djupstabilisering** 2000
Vetenskaplig uppläggning. Måluppfyllelse av FoU-plan
- 14 **Stabilisering av torv i laboratoriemiljö – utveckling av referensmetod** 2000
Fredrik Larsson & Stefan Mårtensson, LTU
- 15 **Djupstabilisering med kalk-cementpelare – Provfält** 2000
Lars O Johansson, SGI

Rapport

- 1 **Erfarenhetsbank för kalk-cementpelare.** 1997
Torbjörn Edstam
- 2 **Kalktypens inverkan på stabiliseringsresultatet. En förstudie.** 1997
Helen Åhnberg & Håkan Pihl
- 4 **Provbanks på kalk/cementpelarförstärkt gyttja och sulfidhaltig lera i Norrala** 1999
Rolf Larsson



Svensk Djupstabilisering

c/o SGI, 581 93 Linköping
Tel: 013-20 18 61, Fax: 013- 20 19 14
<http://www.swedgeo.se/sd>