



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Rapport No 48
Report

Cement och kalk för djupstabilisering av jord

En kemisk - fysikalisk studie av
stabiliseringseffekter

HELEN ÅHNBERG
SVEN-ERIK JOHANSSON
ARNE RETELIUS

CHRISTER LJUNGKRANTZ
LARS HOLMQVIST
GÖRAN HOLM

LINKÖPING 1995



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Rapport No 48
Report

Cement och kalk för djupstabilisering av jord

En kemisk - fysikalisk studie av
stabiliseringseffekter

HELEN ÅHNBERG
SVEN-ERIK JOHANSSON
ARNE RETELIUS

CHRISTER LJUNGKRANTZ
LARS HOLMQVIST
GÖRAN HOLM

Detta projekt har delvis finansierats med medel från Statens råd för
byggnadsforskning (BFR), anslag 890637-1.

LINKÖPING 1995

Rapport	Statens geotekniska institut 581 93 Linköping
Beställning	Biblioteket Tel. 013-20 18 04 Fax. 013-20 19 14
ISSN	0348-0755
ISRN	SGI-R--95/48--SE
Upplaga	600
Tryckeri	Roland Offset, Linköping, augusti 1995

Förord

Osläckt kalk har länge använts för att stabilisera lös lera. Med kalkpelarmetoden, som började tillämpas under senare delen av 1970-talet, blev det möjligt att utföra stabilisering ner till 10 meters djup, senare även till 15 à 20 meter. Kalkens effekt är dock liten i vissa jordtyper som ibland förekommer i lagerprofilen och därmed begränsas metodens användbarhet.

Cement har också länge använts för stabilisering av lös jord. Det har då främst gällt friktionsjord. Kunskapen om cements stabiliserande funktion och effekt i kohesionsjord har dock varit begränsad och uppfattats som otillräcklig. Erfarenheter av försök, som utfördes i mitten av 1980-talet med inblandning av cement i lösa jordar, visade på stora möjligheter att utvidga kalkpelarmetodens användbarhet till att omfatta fler jordtyper. Samtidigt iaktogs att i vissa fall väsentligt högre hållfastheter än med kalk uppnåddes vid stabiliseringen.

Detta är bakgrunden till att föreliggande forskningsprojekt år 1989 initierades av BPAs Anläggningsavdelning i Göteborg (nuvarande LC Markteknik AB). Projektet har utförts i samarbete med Cementa AB och Statens geotekniska institut. Avsikten med projektet har varit att erhålla kunskap om hur lösa jordar påverkas i stabiliserande avseende genom inblandning av cement, kalk och olika blandningar av dessa bindemedel. För att öka förståelsen och kunskapen om orsakerna till de stabiliserande effekterna ägnas ett betydande utrymme åt att översiktligt beskriva bakomliggande relativt komplexa kemisk- fysikaliska förhållanden och processer.

Projektet har, förutom av nämnda parter, stötts finansiellt av Statens råd för byggnadsforskning med ca 20 procent av projektkostnaden.

Förhoppningen är att denna rapport kommer att ge geotekniker och markprojektörer svar på de vanligaste frågorna kring cements och kalk-cements påverkan på sådana egenskaper som skjuvhållfasthet och kompressionsmoduler i våra vanligaste lösa jordtyper i Sverige.

Det är med stor glädje som deltagarna i projektet också kan konstatera att samtidigt med att arbetet med projektet pågått har djupstabilisering av lös jord med

kalk-cement blivit en mycket vanlig metod för förstärkning av lös mark. Bland annat har omfattande arbeten med upprustning och utbyggnad av vägar och järnvägar påbörjats under de senaste tre-fyra åren och med de allt högre kraven på jämnhet och sättningsfrihet, som framför allt snabbtågstrafiken ställer på framtidens järnvägsbankar, har behovet av en tillförlitlig och ekonomisk förstärkningsmetod för våra lösa jordar ökat starkt.

Linköping i november 1994

Lars Holmqvist (projektledare) Lime Column Markteknik AB

Helen Åhnberg	Statens geotekniska institut
Sven-Erik Johansson	Cementa AB
Arne Retelius	Cementa AB
Christer Ljungkrantz	Cementa AB
Göran Holm	Statens geotekniska institut

Innehåll

FÖRORD

SUMMARY	8
SAMMANFATTNING	14
1. INLEDNING	20
2. PROJEKTUPPLÄGGNING	26
3. JORDAR OCH STABILISERINGSMEDEL	28
3.1 Allmänt	
3.2 Jordar	
3.3 Stabiliseringsmedel	
3.3.1 Kemisk-fysikaliska egenskaper	
3.3.2 Reaktivitet	
3.3.3 Flytbarhet	
4. KEMISK - FYSIKALISKA PROCESSER	34
4.1 Kemiska reaktioner och strukturförändringar	
4.1.1 Cementets reaktion med vatten	
4.1.2 Kalkens reaktion med vatten	
4.1.3 Jordens reaktioner med kalk och cement	
4.1.4 Jonbyte och strukturförändring	
4.2 Inverkande faktorer	
4.2.1 Temperatur	
4.2.2 Organiska ämnen	
4.2.3 Sulfider	
4.2.4 Inblandning/homogenitet	
4.3 Beständighet	
4.3.1 Stabiliserande reaktionsprodukter	
4.3.2 Ettringit	
4.3.3 Karbonatisering	

5. FYSIKALISK LABORATORIEPROVNING AV STABILISERAD JORD	45
5.1 Provningsprogram och provberedning	
5.1.1 Provningsprogram	
5.1.2 Provberedning	
5.2 Provningsmetoder	
5.2.1 Hållfasthetsprovning	
5.2.2 Kompressionsförsök	
5.2.3 Permeabilitetsförsök	
5.2.4 Temperaturmätningar	
5.3 Resultat	
5.3.1 Densitet	
5.3.2 Temperaturförlopp	
5.3.3 Hållfasthetsegenskaper enligt enaxliga tryckförsök	
5.3.4 Odränerad skjuvhållfasthet vid olika spänningsförhållanden	
5.3.5 Dränerad skjuvhållfasthet vid olika spänningsförhållanden	
5.3.6 Kompressionsmodul	
5.3.7. Elastisitetsmodul vid olika spänningsförhållanden	
5.3.8 Elastisitetsmodul enligt enaxliga tryckförsök	
5.3.9 Deformationer vid långtidsförsök med konstant last	
5.3.10 Permeabilitet	
5.4 Vidare analys och diskussion av resultat	
5.4.1 Hållfasthetsegenskaper	
5.4.2 Deformationsegenskaper	
5.4.3 Permeabilitet	
6. KEMISK LABORATORIEPROVNING AV STABILISERAD JORD SAMT GRÄNSZON STABILISERAD/OSTABILISERAD JORD	124
6.1 Bakgrund	
6.1.1 Allmänt	
6.1.2 Hypoteser	
6.2 Provberedning	
6.2.1 Tillverkning av provkroppar	
6.2.2 Lagring	
6.3 Provningsmetoder	
6.4 Resultat	
6.4.1 Vattenfasen	
6.4.2 Den fasta fasen	
6.4.3 Gränszon	

6.4.4 Beständighet

6.5 Vidare analys och diskussion av resultat

7. FÄLTFÖRSÖK	144
7.1 Allmänt	
7.2 Försöksplatser	
7.3 Geotekniska förhållanden	
7.4 Utförda försök	
7.4.1 Försöksytor och instrumentering	
7.4.1 Mätningar	
7.4.2 Sondering	
7.5 Resultat	
7.5.1 Temperatur	
7.5.2 Hållfasthet	
7.5.3 Permeabilitet	
7.6 Analys och diskussion av resultat	
7.6.1 Temperatur	
7.6.2 Skjuvhållfasthet	
7.6.3 Permeabilitet	
8. SLUTSATSER	161
REFERENSER	165
BILAGOR	171

Summary

The development potential of cement stabiliser in deep stabilisation, whether in the form of pure cement or cement/lime mix, requires more detailed study of lime-cement and cement columns regarding their strength, stiffness, permeability and interaction with surrounding soil. This report aims at an in-depth description of the chemical-physical processes and a survey and analysis of the effects of adding pure cement (Slite SH P), a mix of 75 % cement and 25 % quick lime, and quick lime alone on ten types of soil commonly found in Sweden.

Tests have mainly been performed on laboratory prepared samples, although a small number of tests have also been conducted in the field on columns installed in two types of soil. The types of laboratory test and field test performed in different soils are summarised in **Table 1**.

The choice of stabiliser was based on the results of pilot experiments in which the effect of mixing nine different binders in three types of soil was studied (Holmqvist et al., 1991). The results showed that of the different types of cement, SH cement produced the largest increase in strength for all types of sample. Both Std and SH cement resulted in considerably higher strength than pure quick lime, but about the same or slightly higher effect was achieved in some cases with a certain proportion of lime in the stabiliser. To achieve high strength within a short time after making the columns, the optimal mix was judged to be approximately 60-90 % cement and 40-10 % lime.

Differences in stabilisation effect when using cement as stabiliser compared with lime may be due to different strength developing reactions. Adding lime reduces the water content, whereupon flocculation occurs through ion exchange and a coarser structure forms in the soil. A reaction takes place between Ca(OH)_2 and minerals in the soil which has pozzolanic properties, resulting in a gradual increase in strength. These reactions continue for a long time. Cement on the other hand has the property of reacting with water to generate strength-enhancing

Table 1. Overview of types of test.

Type of test	Soil									
	clayey silt	silty clay	clay	clay (quick)	clay (marine)	clay (sulphurous)	organic clay	clayey gyttja	gyttja	peat *)
<i>Laboratory tests</i>										
Unconf. compr. tests	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Densities	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Direct shear tests	*		*					*		
Triaxial tests	*		*					*		
Oedometer tests	*		*					*		
Permeability tests	*		*					*		
<hr/>										
Heat generation	*		*					*		
Reactivity	*		*					*		
Volume change	*		*			*		*		
<i>Field tests</i>										
Temp. measurement			*							
Penetration tests								*		
Permeability tests			*					*		

*) Not tested with lime

products, primarily CSH gel (calcium-silica hydrate), which can fill the voids between the soil particles. At the same time, cement gives rise to pozzolanic reactions with the soil, although these produce a smaller quantity of strength-enhancing substances than the corresponding amount of lime. The pozzolanic reactions may continue for a long time, while the cement may largely have stopped reacting with the water after 1-3 months. The SH cement used in the tests gives a somewhat faster reaction than Std cement, but the total reactions in the long term, and thereby also the strength increase, will be of the same order of size.

There is nothing to suggest that there is any difference in long term stability between the various types of stabiliser. The reaction products are considered to be stable at pH over 5 and a surplus of calcium ions. However, if the reaction products are exposed to acid water or flowing water with a low ion content (soft water), there is a risk that they will be dissolved. On the other hand, the low permeability of the clay leads to slow water transport and thereby very slow leaching even at low pH values.

In the *boundary zone* between cement-stabilised soil and unstabilised soil, ocular inspection revealed a very thin layer of softer clay. The chemical tests showed changes in ion content at the transition between stabilised and unstabilised soil, but no clear cause of the deterioration in strength was found in these relatively limited investigations.

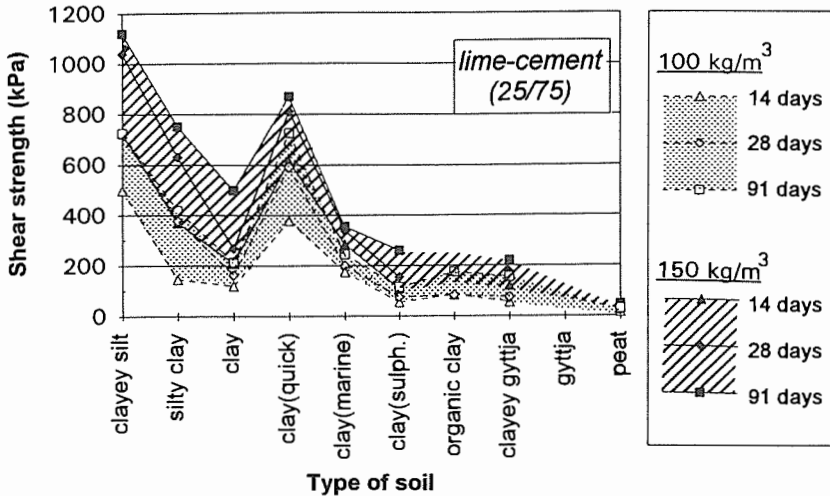


Figure 1. Examples of shear strength levels in different soils stabilised with a certain quantity of lime-cement 14-91 days after mixing.

Strength increases with *homogenisation* when adding the various stabilisers. The results of varying the mixing times between 1 and 7 minutes showed that strength increased with mixing time in the case of clayey silt and clay, while no clear effect of this nature was found in clayey gytja. The measured increase corresponded at most to a doubling of the strength. In practice, varying mixing tools and times are required for different types of binder, binder quantity and soil type.

The stabilisation effect varied very significantly with the *type of soil* being stabilised. The reactivity of the soil may be more or less pronounced depending on the content of clay minerals and their pozzolanicity. In addition, strength development may be hindered by the presence of retarding substances, in particular certain organic substances. Figure 1 contains examples of the strength levels achieved in the different soils when adding a certain amount of lime-cement. High strength was achieved with cement or mixes of lime and cement in all the types of soil tested. The effect of lime alone was very good, especially in quick clay and in marine clay with a high salt content, while it was very limited in organic and sulphidic soils.

Lime-cement, and to an even higher degree pure cement, led to very pronounced *strength development with time* during the first month, after which the rate of increase generally slackened off. With lime as stabiliser, a certain hardening

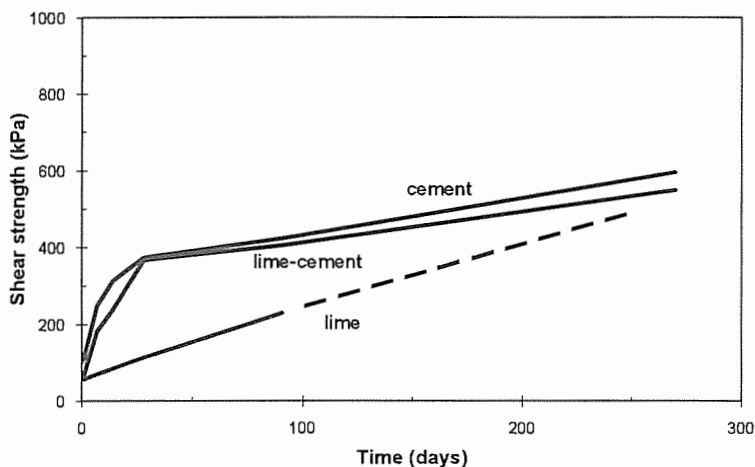


Figure 2. Comparison of strength development with time after mixing for lime, lime-cement and cement stabilised soil. Mean strength development for all tested soils except gyttja and peat.

momentarily occurred. Subsequently, there was normally no significant change during the first week or so after mixing. The pozzolanic reactions then began to take place on a more noticeable scale, leading to relatively slow but long-lasting strength development. An exception to this was clay with a high salt content and quick clay, where the strength increased also during the first week and within three months was as high as with cement or lime-cement. **Figure 2** shows the differences in strength development with time for the various stabilisers, based on means from tests of all soils except gyttja and peat.

Strength development is also influenced by *temperature*. To take account of the higher temperature which is found in soils at least during the first days after stabilisation with lime, the samples with lime were stored at 20 °C, while those with lime or lime-cement were stored at 8 °C. When using lime as stabiliser, the slaking heat causes the temperature to increase and the pozzolanic reactions to begin sooner. In mixes of lime and cement, the slaking heat of the lime also causes the reaction speed of the cement to increase. The temperature reached for a certain combination and quantity of stabiliser can be calculated with the aid of computer programs. The temperature calculations based on type and quantity of stabiliser, column pattern and water content in the soil were in relatively good agreement with the results of the temperature measurements. However, retarding substances may lead to a delay in heat development.

With cement or lime-cement, an increasing effect was obtained with an increased

quantity of binder, which is often not the case with lime alone. **Figure 3** shows examples of how strength varied with the quantity of cement added. A very significant factor for the strength achieved when a mix of cement and water hardens is the ratio between the quantities of water and cement, or water-cement ratio. Even with similar water-lime ratios, considerable differences were found between the soils owing to differing chemical and physical properties, although the differences had decreased somewhat. No corresponding dependence on water-lime ratio was obtained with lime alone.

Triaxial compression tests and oedometer tests showed a *stress dependence* in both drained and undrained shear strength and in various deformation moduli. The results showed no general difference in behaviour during loading for the various stabilisers. The difference lay in the strength level and magnitude of the modulus achieved for a certain quantity and type of stabiliser added.

From the measured values of *drained shear strength*, it was possible to evaluate effective friction angles in the order of size of 34-44° and effective cohesion intercepts of an average of 35 % of the undrained shear strength.

The stiffness of stabilised soil increases approximately proportionally to shear strength. From the drained triaxial compression tests, it was possible to evaluate elasticity *moduli* (secant moduli) in the order of size of 100 - 400 times the undrained shear strength at a load corresponding to 50 % of the failure load. The relationship between modulus and shear strength varied with the consolidation stress used and the strength level of the material. The results showed no difference between the stabilisers in this respect. The compression moduli evaluated from the oedometer tests varied considerably with increasing stress level, but initially gave values in the order of size of 60 - 300 times the undrained shear strength. Elasticity moduli have also been evaluated from the unconfined compression tests. However, this type of modulus should be used with caution in drained conditions. Measured drained moduli in the triaxial compression tests were both higher and lower than corresponding undrained moduli, depending on the consolidation stress applied.

The results of field tests showed low *permeabilities* of the columns, somewhat higher than those obtained in the laboratory prepared samples, but considerably lower than those assumed in calculating settlement processes. This applied to all column types, including those using lime as stabiliser. The results may indicate that this was due to high homogeneity of the column material where no drainage layers or cracks occurred, or that no influence of a possibly more permeable

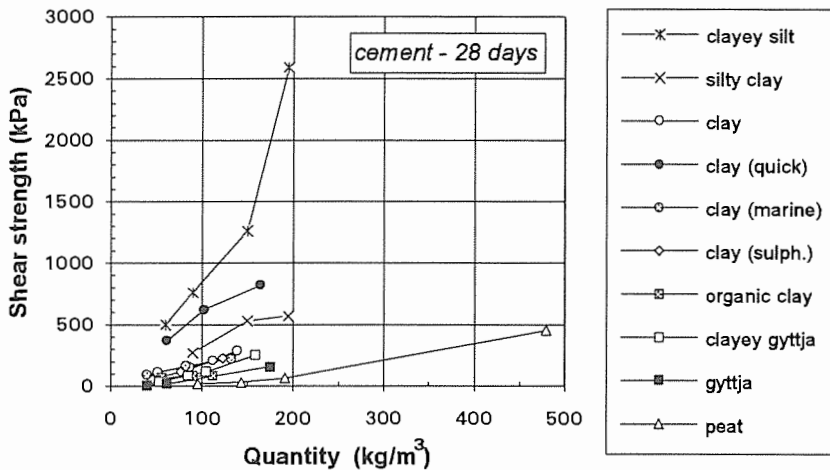


Figure 3. Examples of measured shear strength according to unconfined compression tests with varying quantities of cement.

macrostructure can be detected in this type of test. The results of the permeability measurements showed the highest permeability in the lime columns, where permeability was two or three times as high as in unstabilised soil. The lime-cement columns had on average somewhat higher permeability than unstabilised soil, while the cement columns has approximately the same or somewhat lower permeability than the unstabilised soil.

Comparatively large differences in evaluated shear strength were found when *comparing field tests and laboratory tests*. The agreement was relatively good in the case of shear strength at levels of 100 - 200 kPa, but at lower and higher strengths the laboratory tests showed lower and higher shear strengths respectively compared to measurements in columns. The results are influenced by a number of differences between laboratory and field conditions, such as the presence of a certain confining stress in the field, which is mainly influential at relatively low strength levels, different homogeneity and water saturation level of the material, and changes in behaviour of the material with increasing strength level. The outcome speaks for further comparisons between the results of field and laboratory tests, as well as further calibration of the sounding method over a wider range of strengths than in earlier calibrations.

Depending on the intended function of the soil improvement, the design may make use of carefully chosen parameters based on laboratory tests alone, but normally such tests should be complemented with field tests on test columns and/or tests on production columns.

Sammanfattning

Den stora utvecklingspotential för djupstabilisering av lösa jordar som användning av cement som stabiliseringsmedel utgör, i form av ren cement eller blandning tillsammans med kalk, har krävt att frågor om kalk-cement- och cementpelares egenskaper med avseende på hållfasthet, styvhet, permeabilitet och samverkan med omgivande jord närmare studeras. Rapporten ger en fördjupad beskrivning av de kemisk-fysikaliska processerna och en beskrivning och analys av effekterna av inblandning av ren cement Slite SH P, en blandning av främst 75% cement och 25 % osläckt kalk, samt enbart osläckt kalk i tio olika och i Sverige vanligen förekommande jordarter.

Försök har i huvudsak utförts på laboratorietillverkade prover men ett mindre antal provningar har också utförts i fält på pelare installerade i två olika typer av jord. Utförda typer av laboratorieförsök och fältförsök i olika jordar sammanfattas i **Tabell 1**.

Valet av stabiliseringsmedel baserades på resultaten av en inledande försöksstapp där effekten av inblandning av nio olika bindemedel i tre olika typjordar studerades (Holmqvist m fl, 1991). Resultaten visade att SH-cement gav den största hållfasthetsökningen av de olika provade cementtyperna för samtliga typer av prover. Både Std och SH-cement gav väsentligt högre hållfasthet än ren osläckt kalk. Ungefär samma eller ibland högre hållfasthet uppnåddes med viss andel kalk i stabiliseringsmedlet. För att nå hög hållfasthet inom kort tid efter pelartillverkning bedömdes den optimala blandningen ligga i intervallet 60 - 90 % cement och 40 - 10 % kalk.

Skillnader i stabiliseringseffekt vid användande av cement som stabiliseringsmedel jämfört med kalk kan kopplas till olika *hållfasthetsuppbyggande reaktioner*. Vid inblandning av kalk minskar vattenkvoten, en flockulering sker genom jonbyte och en grövre struktur byggs upp hos jorden. En reaktion sker mellan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ och mineraler i jorden som har puzzolana egenskaper vilket ger en med tiden ökande hållfasthet. Dessa reaktioner pågår under lång tid. Cement å andra sidan har förmågan att vid reaktion med vattnet i jorden generera hållfasthetshöjande produkter, huvudsakligen sk CSH-gel (kalciumsilikathydrat), som kan

Tabell 1. Översikt över utförda typer av provningar.

Typ av provning	Jordar									
	lerig silt	siltig lera	lera	lera (kvick)	lera (salt-haltig)	lera (sulfid-haltig)	gyttjig lera	lerig gyttja	gyttja	torv *)
<u>Laboratorieprovning</u>										
Enaxliga tryckförsök	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Densiteter	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Direkta skjuvförsök	*		*					*		*
Triaxialförsök	*		*					*		*
Ödometerförsök	*		*					*		*
Permeabilitetsförsök	*		*					*		*
Värmeutveckling	*		*					*		
Reaktivitet	*		*					*		
Volymförändring	*		*			*		*		
<u>Fältprovning</u>										
Temperaturmätning			*							
Sondering								*		
Permeabilitetsförsök			*					*		

*) Ej provad med kalk

fylla ut hålrummen mellan partiklarna i jorden. Cement ger också upphov till puzzolanreaktioner med jorden men dessa ger mindre mängd hållfasthetsuppbyggande ämnen än motsvarande mängd kalk. De puzzolana reaktionerna kan pågå under lång tid, medan cementet till större delen kan ha reagerat färdigt med vatten efter 1 à 3 månader. Det använda cementet, SH-cement, ger ett något snabbare reaktionsförlopp än Std-cement men de totala reaktionerna på lång sikt, och därmed också hållfasthetsökningen, blir av samma storleksordning.

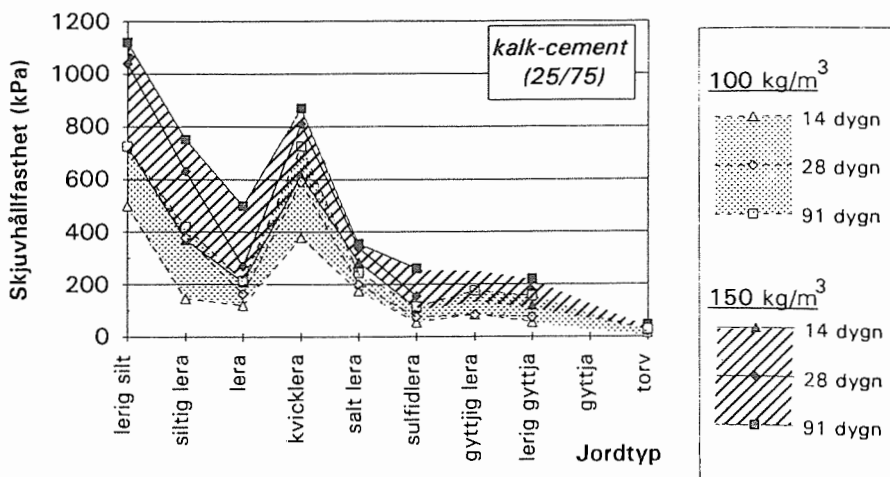
Det finns inget som tyder på att det skulle vara någon skillnad i långtidsstabilitet mellan de olika stabiliseringsmedlen. Reaktionsprodukterna anses vara stabila vid pH över ca 5 och överskott på kalciumjoner. Om reaktionsprodukterna utsätts för surt vatten eller strömmande vatten med låg jonhalt (mjukt vatten) finns det dock en risk att de löses upp. Lerans täthet ger emellertid långsam vatten-transport och därmed mycket långsam urlakning även vid låga pH-värden.

I **gränzonen** mellan cementstabiliserad jord och ostabiliserad jord kunde oklart konstateras ett mycket tunt skikt av lösare lera. De kemiska provningarna visade på förändringar i joninnehåll vid övergången mellan stabiliserad och ostabiliserad jord men någon klar orsak till försämring av hållfasthet kunde inte påvisas i dessa relativt begränsade undersökningar.

Hållfastheten ökar med ökande **homogenisering** vid inblandning av de olika

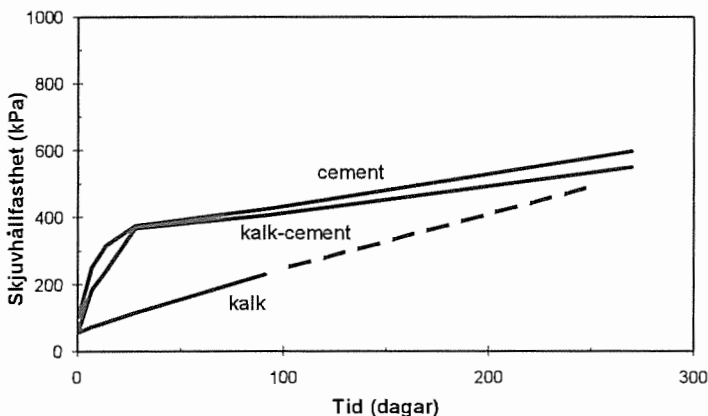
stabiliseringsmedlen. Resultat av varierande blandningstider 1 - 7 minuter visade att hållfastheterna ökade med ökande blandningstid för lerig silt och lera, medan någon tydlig sådan effekt däremot inte kunde noteras för lerig gyttja. Uppmätt ökning motsvarade som mest en dubblering av hållfastheten. I praktiken krävs varierande blandningsverktyg och -tid vid olika bindemedelstyp, bindemedelsmängd och jordtyp.

Stabiliseringseffekten varierade högst väsentligt med *typen av jord* som stabiliserades. Reaktiviteten hos jorden kan vara mer eller mindre utpräglad beroende på innehåll av lermineraler och puzzolanitet hos dessa. Hållfasthetstillväxten kan dessutom hindras vid eventuell förekomst av retarderande ämnen, framförallt olika organiska ämnen. I **Figur 1** visas exempel på de varierande hållfasthetsnivåer som kunde uppnås i de olika jordarna vid tillsats av en viss mängd kalk-cement. Hög hållfasthet kunde åstadkommas med cement eller blandningar av kalk och cement i samtliga provade typer av jordar. Effekten av enbart kalk var mycket god i framförallt kvicklera och i marin lera med hög salthalt, men däremot mycket begränsad i organiska jordar och sulfidhaltiga jordar.



Figur 1. Exempel på skjuvhållfasthetsnivåer som uppnåtts i olika jordar vid stabilisering med viss mängd kalk-cement 14 - 91 dygn efter inblandning.

Kalk-cement, och i än högre grad ren cement, gav en kraftig *hållfasthetstillväxt med tiden* under den första månaden, varefter tillväxttakten som regel avtog. Med kalk som stabiliseringsmedel uppnåddes momentant ett visst hårdnande. Därefter uppstod som regel inte någon större förändring under den första veckan eller något mer efter inblandning, varefter de puzzolana reaktionerna mer märk-

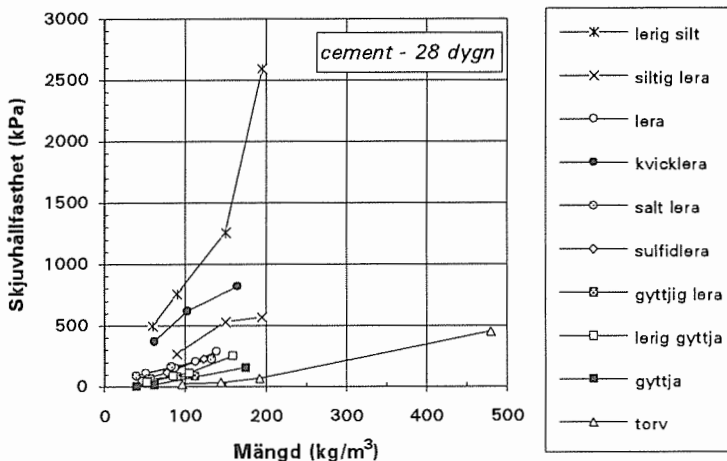


Figur 2. Jämförelse av hållfasthetsutveckling med tiden efter inblandning för kalk-, kalk-cement- och cementstabiliserad jord. Medelutveckling för samtliga provade jordar utom gyttja och torv.

bart kom igång och medförde en relativt långsam men långvarig hållfasthetstillväxt. Undantaget var lera med hög salthalt och kvicklera där hållfastheten ökade också under första veckan och redan efter tre månader var lika hög som med cement eller kalk-cement. I **Figur 2** visas skillnader i hållfasthetstillväxt med tiden för de olika stabiliseringsmedlen baserat på medelvärden från provningar av samtliga jordar utom gyttja och torv.

Hållfasthetstillväxten påverkas också av *temperaturen*. För att ta hänsyn till den högre temperatur som åtminstone de första dyggen erhålls i jorden vid stabilisering med kalk, förvarades provkropparna med kalk vid 20 °C, medan de med cement och kalk-cement förvarades vid 8 °C. Vid användning av kalk som stabiliseringsmedel medför släckningsvärmets att temperaturen ökar och puzzolanreaktionerna kommer igång snabbare. Vid blandningar av kalk och cement gör kalkens släckningsvärme att också cementets reaktionshastighet ökar. Vilken temperatur som uppnås för en viss kombination och mängd stabiliseringsmedel kan beräknas med hjälp av datorprogram. Utförda temperaturberäkningar baserade på typ och mängd stabiliseringsmedel, pelarmönster och vattenkvoten i jorden gav relativt god överensstämmelse med resultaten av temperaturmätningarna i fält. Eventuella retarderande ämnen kan dock ge en fördröjning av värmeutvecklingen.

Med cement eller kalk-cement erhöles en ökande effekt med ökande *mängd bindemedel*, vilket ofta inte var fallet med kalk. I **Figur 3** visas exempel på hur hållfastheten varierade med mängden inblandad cement. En faktor som för ce-



Figur 3. Exempel på uppmätt skjuvhållfasthet enligt enaxliga tryckförsök vid varierande mängd cement.

mentbaserade bindemedel har stor betydelse är vattenkvoten. Avgörande för vilken styrka en blandning av cement och vatten skall uppnå vid hårdnandet är kvoten mellan mängden vatten och mängden cement, det så kallade vattencementtalet (vct). Även vid lika vct visade sig skillnaderna mellan de olika jordarterna vara betydande beroende på olika kemiska och fysikaliska egenskaper, men skillnaderna hade dock krympt något. Ett dylikt vct-beroende erhöles inte med enbart kalk.

Utförda triaxial- och ödometerförsök visade på ett *spänningsberoende* hos både den dränerade och den odränerade skjuvhållfastheten samt hos olika deformationsmoduler. Resultaten visade inte på någon principiell skillnad i beteende vid belastning för de olika stabiliseringsmedlen. Skillnaden låg i vilken hållfasthetsnivå och storlek på modul som kunde uppnås för en viss mängd och typ av tillsatt stabiliseringsmedel.

Ur uppmätta värden på *dränerad skjuvhållfasthet* kunde effektiva friktionsvinklar av i storleksordningen 34-44° och kohesionsintercept av i medeltal 35 % av den odränerade skjuvhållfastheten utvärderas.

Styvheten hos stabiliserad jord ökade ungefär proportionellt med ökande skjuvhållfasthet. Ur de dränerade triaxialförsöken utvärderades elasticitetsmoduler (sekantmoduler) som var i storleksordningen 100 - 400 gånger den odränerade skjuvhållfastheten vid en belastning motsvarande 50 % av brottlasten. Förhållandet mellan modul och skjuvhållfasthet varierade med använd konsoliderings-

spänning och hållfasthetsnivå hos materialen. Resultaten visade inte på någon skillnad mellan de olika stabiliseringsmedlen i detta avseende. De ur ödometerförsöken utvärderade kompressionsmodulerna varierade betydligt med ökande spänningsnivå, men gav initieellt värden i storleksordningen 60 - 300 gånger den odränerade skjuvhållfastheten. Elasticitetsmoduler har utvärderats också ur de enaxliga tryckförsöken. Eventuell användning av denna typ av moduler bör dock göras under beaktande av att de inte utförs under dränerade förhållanden. Uppmätta dränerade moduler i triaxialförsöken kunde vara både högre och lägre än motsvarande odränerade moduler beroende på använd konsolideringsspanning.

Resultaten av provningar i fält visade på låga *permeabiliteter* hos pelarna, något högre än de som erhöles i de laboratorietillverkade proverna men betydligt lägre än de som antas vid beräkningar av sättningsförlopp. Detta gällde samtliga pelartyper, också de som utförts med kalk som stabiliseringsmedel. Resultaten kan tolkas som att detta berodde på hög homogenitet hos pelarmaterialet i samtliga fall utan förekomst av dräneringsskikt, alternativt att inverkan av en eventuell mer permeabel makrostruktur inte går att detektera vid denna typ av försök. Resultaten av permeabilitetsmätningarna visade på högst permeabilitet hos kalkpelarna. Permeabiliteten var här två till tre gånger så hög som den hos ostabiliserad jord. Kalk-cementpelarna hade i medeltal något högre permeabilitet än ostabiliserad jord medan cementpelarna hade ungefär samma eller något lägre permeabilitet än denna.

Förhållandevis stora skillnader kunde konstateras mellan utvärderad skjuvhållfasthet enligt *fältförsök jämfört med laborieförsök*. Överensstämmelsen var relativt god vid skjuvhållfastheter runt 100 - 200 kPa, men vid lägre och högre hållfastheter visade laborieförsöken på lägre respektive högre skjuvhållfastheter än vad provningar i pelare ger. Ett antal skillnader mellan laborieförsök och fältförhållanden påverkar resultaten, såsom förekomst av viss omgivande spänning i fält, som framförallt inverkar vid relativt låga hållfasthetsnivåer, olika homogenitet och vattenmättnadsgrad hos materialen samt ett förändrat beteende hos materialen med ökande hållfasthetsnivå. Resultaten talar för att fortsätta jämförelser mellan resultat av fält- och laborieförsök samt ytterligare kalibrering av sonderingsmetoden bör utföras för ett större hållfasthetsregister än vad som tidigare gjorts.

Beroende på avsedd funktion hos förstärkningen kan dimensionering utföras med försiktigt valda parametrar baserade på enbart laborieförsök, men normalt bör laborieförsök kompletteras med fältförsök på provpelare och/eller kontroll av produktionspelare.

Kapitel 1.

Inledning

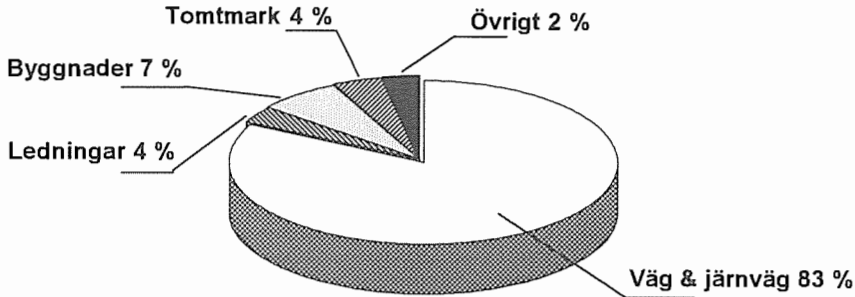
Lösa oorganiska lerjordar har sedan mitten på 1970-talet kunnat stabiliseras enligt den i Sverige uppfunna (Paus 1979) och utvecklade kalkpelarmetoden. Fram till mitten på 1980-talet användes enbart kalk som bindemedel vid all stabilisering enligt metoden. Kalken som används är finmald, 0-0,2 mm, hårdbränd och osläckt med CaO-halt > 80 %. Med detta bindemedel erhålls en ökning av jordens hållfasthet med 5-20 gånger och ett styvare deformationsbeteende inom loppet av 1 à 2 månader efter installation i jorden.

Denna påtagliga förbättring av jordens hållfasthet och deformationsegenskaper tillsammans med andra inte minst praktiska fördelar ute på arbetsplatserna i kombination med en konkurrenskraftig ekonomi, gjorde metoden tidigt till ett mycket intressant alternativ vid val av lämplig förstärkningsåtgärd. Det var framför allt vid behov av att begränsa och utjämna sättningar i ren oorganisk jord under fyllningar för t ex vägbankar, som kalkpelarmetoden allt oftare valdes samtidigt som de positiva erfarenheterna blev fler. Metoden kom snart även att tillämpas för att förbättra stabiliteten i mark i samband med schaktning för olika ändamål.

Under 1980-talet utvidgades tillämpningarna till att omfatta även grundläggning av lätta byggnader med utbredda laster typ platta på mark. Metoden typgodkändes av Planverket 1979.

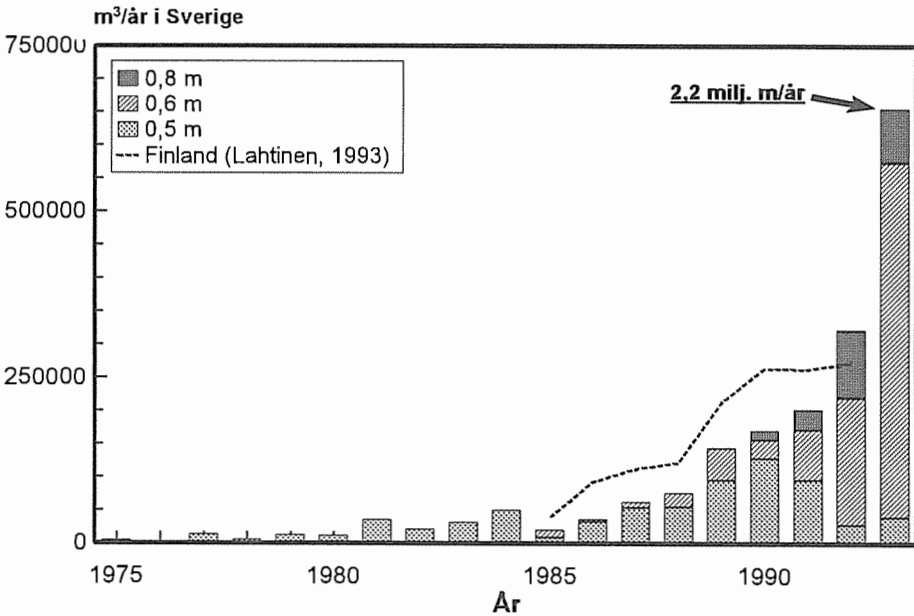
Under senare delen av 1980-talet började blandningar av kalk och cement användas som bindemedel vid djupstabilisering av lösa jordar. Flera projekt hade dittills också utförts med enbart cement som bindemedel. Provning både i laboratorium och i fält visade att med en del eller enbart cement i bindemedlet kunde väsentligt högre hållfasthet erhållas hos den lösa jorden än om enbart kalk användes. Även i jordar med visst organiskt innehåll och med vattenkvoter upp till 120 à 150 %, där ren kalk endast ger begränsad effekt, visade det sig att cement eller en blandning av kalk och cement kunde ge god effekt.

Figur 1.1 - 1.3 visar dels fördelningen av olika tillämpningar av djupstabilisering av jord enligt kalkpelarmetoden under början av 1990-talet, dels utvecklingen av volymen stabiliserad jord per år och fördelningen på olika pelardiametrar, dels utvecklingen av de olika typer av bindemedel som använts i Sverige under perioden 1975 till 1993.



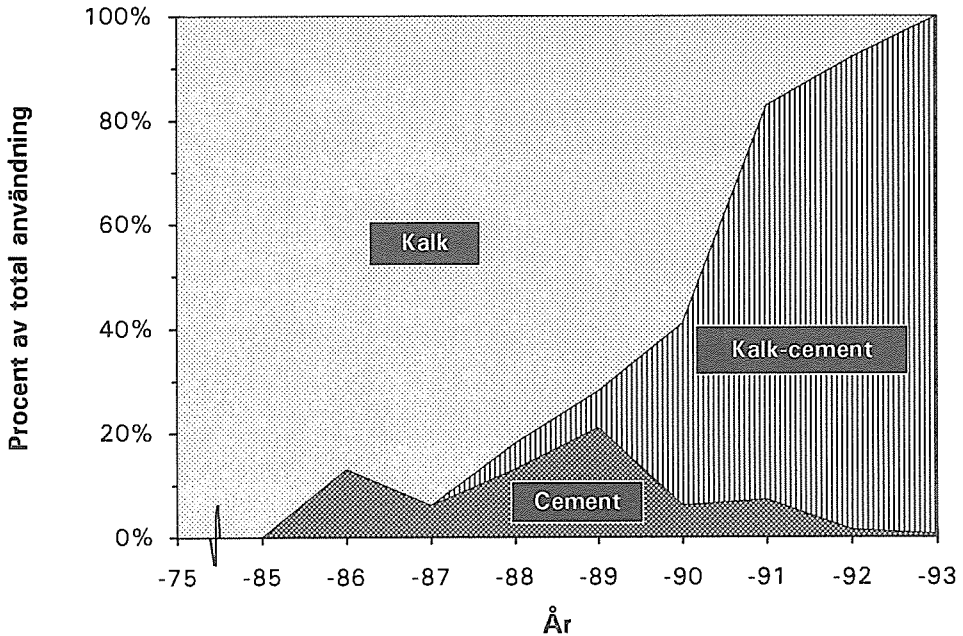
Figur 1.1. Olika användningsområden av djupstabilisering enligt kalkpelarmetoden under början av 1990-talet.

Figure 1.1. Applications at the beginning of the 1990s (data from 1991-92).



Figur 1.2. Pelarproduktion under perioden 1975 - 1993.

Figure 1.2. Column production during the period 1975 - 1993.



Figur 1.3. Fördelningen av använd typ av stabiliseringsmedel 1975-93.

Figure 1.3. Distribution of type of stabiliser, 1975-93.

Under 1980-talet utvecklades även maskinutrustningarna. Tidigare utfördes pelarna med diameter 0,5 meter och maximalt 10 meter djupa. Med större pelardiameter visade det sig att hållfastheten utvecklades något snabbare och ekonomin förbättrades ytterligare på grund av effektivare maskinutnyttjande (Holm m fl 1984). Vid tillverkning av pelare med diameter upp till 800 mm sker utmatning av stabiliseringsmedlet på samma sätt som tidigare för kalkpelare med mindre diameter, men ett blandningsverktyg används som särskilt utformats för bindemedel av typ cement eller kalk-cement. Vid uppschaktning har man funnit att bindemedlet varit väl inblandat och till synes jämt fördelat i jorden. De större *c/c*-avstånd som grövre pelare erbjuder, kan dock inte alltid utnyttjas för de belastningar som vanligen förekommer i dessa sammanhang, om god lastöverföring till pelarna skall uppnås.

I och med att många olika kombinationer av diametrar och bindemedel började förekomma vid utförande av djupstabiliseringar uppstod inte minst ute på arbetsplatserna behov av en praktisk och koncentrerad beteckningsmall för dessa. En pelare med diameter 600 mm, bindemedel av blandad kalk och cement, sammanlagt 23 kg per meter pelare och i blandningsproportioner 50 % vardera betecknas ofta 600KC23(50/50).

Kalkpelare provas traditionellt med den så kallade kalkpelarsonden, KPS-provning, som innebär att en speciell vingförsedd sond trycks ner i pelaren. Metoden är främst ändamålsenlig för kalkpelare med längder under 5-6 meter och med skjuvhållfasthet upp till ca 150-200 kPa, vilket vanligtvis varit fullt tillräckligt. Om pelarna är längre eller har högre hållfasthet, upp till 400-500 kPa, som kan bli fallet med cement- eller kalk-cementpelare, kan provningen i fält i stället utföras med omvänd sondering. Utförs provningen enligt den så kallade FOPS-metoden, installeras den vingförsedda sonden under pelaren med ett speciellt för ändamålet utformat inblandningsverktyg omedelbart före och i direkt samband med att kalkpelarmaskinen påbörjar tillverkningen av pelaren. Därmed kan sonden placeras centriskt under pelaren. För pelare med hög hållfasthet har också kärnborring visat sig vara en lämplig metod.

Under slutet av 1980-talet avtog användningen av enbart kalk eller enbart cement som bindemedel vid djupstabilisering av jord. Det konstaterades att cementpelare blev avsevärt styvare än kalkpelare samtidigt som cementpelarna inte samverkade med omgivande jord i samma utsträckning som dessa. Det var i syfte att kombinera cementets goda hållfasthetshöjande egenskaper med kalkens goda samverkan med omgivande jord, som man alltmer började blanda de båda bindemedlen. Av inte minst praktisk/ekonomiska skäl valdes proportionerna 50 % vardera. Ett av de första projekten med kalk-cementpelare i Sverige utfördes vintern 1988 för ny motorväg E4 vid Lövsta och Borgs kyrka ca 1 mil söder om Norrköping där pelartypen 600KC23(50/50) valdes. Erfarenheterna från detta och många därefter utförda projekt har varit mycket positiva. I endast ett fåtal projekt har avsett resultat inte uppnåtts.

Med den högre hållfasthetshöjande effekt, som cement eller blandningar av cement och kalk har i förhållande till kalk, kan samma eller högre hållfasthetsnivå uppnås i jorden med en mindre specifik mängd bindemedel än med enbart kalk. För att denna effekt skall erhållas, har det dock visat sig att cement och kalk-cement kräver ett mer omsorgsfullt inblandningsarbete. Vid traditionellt utförande av kalkpelare används normalt 25 mm stigning per varv med standardverktyg och ca 80-90 kg kalk per m³ jord. På lämpliga jordar, dvs leror med vattenkvo-ter 50-90 %, uppnås erfarenhetsmässigt ökning av skjuvhållfastheten från 10-15 kPa till 50-150 kPa mätt med kalkpelarsond (KPS-provning) inom en månad. För pelare som utförs med kalk-cement anges vanligtvis inblandningsmängder på 75-100 kg per m³ jord med en maximalt tillåten stigning av 15-18 mm per varv för standardverktyg eller 25-35 mm med effektivare specialverktyg. En översiktlig inventering av ett flertal genomförda provningar av kalk-cementpelare inom vissa större genomförda entreprenader i Sverige (väg E6, Mälarbanan,

Svealandsbanan m fl) visar att uppmätta skjuvhållfastheter kan variera relativt starkt men att nivåer mellan 50-250 kPa vanligen uppnås i de jordar som behandlas och att dessa provningar ofta har utförts redan efter en till två veckor efter inblandning. Provningar har till en del utförts med traditionell KPS-metod men huvudsakligen med omvänd sondering av typ FOPS-metoden. De jordar, som vanligen förekommer i dessa sammanhang, kan karaktäriseras av vattenkvoter, som varierar mellan 40 och 150 %. Erfarenhetsmässigt har således kalk-cement jämfört med enbart kalk visat sig med fördel kunna användas i mer varierande jordtyper och ge bättre resultat på kortare tid med tillsats av i princip oförändrad specifik mängd bindemedel men med ett något ökat inblandningsarbete.

Den stora utvecklingspotential för kalkpelarmetoden, som cementinblandning i jord innebär, har krävt att bland annat frågor om kalk-cementpelares och cementpelares egenskaper beträffande hållfasthet, deformation och samverkan med omgivande jord, egenskapernas utveckling med tiden, pelarnas funktion under belastning m m närmare studeras liksom de traditionella beräkningsmetodernas giltighet för dessa ”nya” pelartyper.

Det i rapporten beskrivna forskningsprojektet har därför haft till syfte att öka kunskaperna om och närmare klarlägga cement/kalk-baserade bindemedels verkningssätt och påverkan på olika lösa organiska och oorganiska jordars hållfasthets- och deformationsegenskaper m m i samband med djupstabilisering.

Projektet har utförts i två etapper. I Etapp I studerades effekten av inblandning av olika cementtyper och olika blandningar av kalk och cement liksom av ren kalk på tre vanliga och typiska jordar som ofta är aktuella för stabilisering. Resultaten från Etapp I har tidigare redovisats (Holmqvist mfl, 1991).

I Etapp II av projektet, som denna rapport behandlar, har syftet varit att lämna en fördjupad beskrivning av de kemisk-fysikaliska processerna och att ge en detaljerad beskrivning och analys av effekterna av inblandning av ren cement (Slite SH P), en blandning av främst 75% cement och 25 % osläckt kalk, samt enbart osläckt kalk i tio olika och för svenska förhållanden typiska jordarter.

De hållfasthetsnivåer som erhållits vid provningarna och redovisas i rapporten får inte tolkas som absoluta och direkt tillämpbara i fält utan bör betraktas som relativa. De hållfasthetsnivåer som uppmäts i fält med provsondering kan erfarenhetsmässigt uppvisa betydande avvikelser från laborativvärden, varför laborativprovning normalt bör kompletteras med förprovning av provpelare med

aktuell maskinutrustning och förfarande eller tidig kontroll av produktionspelare.

Kapitel 2.

Projektuppläggning

Projektet har varit uppdelat i en inledande etapp och en huvudetapp, Etapp I respektive Etapp II.

För att inom ramen för projektet kunna utföra så många provningar som möjligt av olika bindemedel i olika jordar och utföra dessa under väl kontrollerade och likartade betingelser och för att minimera spridning och osäkerhet i resultaten har provningarna i till övervägande del utförts på laboratorium.

I Etapp I studerades nio olika bindemedels effekter på tre olika vanligen förekommande typjordar, lerig silt, oorganisk lera och lerig gyttja (Holmqvist m fl, 1991). Bindemedlen bestod av fyra olika typer av cement (Standard-, Snabb-, Klinker- och Anläggningscement), fyra olika blandningsförhållanden mellan cement (Std) och osläckt kalk samt ren osläckt kalk. Provningarna utfördes huvudsakligen som enaxliga tryckförsök. Resultaten av dessa inledande prov visade att både Std och SH-cement gav väsentligt högre hållfasthet än ren osläckt kalk, men att ungefär samma eller ibland högre effekt ibland uppnåddes med viss andel kalk i stabiliseringsmedlet. Ren osläckt kalk gav genomgående lägst effekt.

SH-cement gav den bästa hållfasthetsökningen fram till 2 -3 veckors ålder för samtliga provade bindemedelsmängder och härdningstemperaturer i alla tre typjordarna. Vid lagring av prover i 8 °C gav SH-cement högst hållfasthetsnivå också efter 3 månader, medan bilden är mer splittrad vid lagring i den högre temperaturnivån 20 °C. SH-cement bedömdes vara det ur hållfasthetssynpunkt lämpligaste oblandade stabiliseringsmedel för de tre jordtyperna.

Ökad hållfasthet erhöles med ökande andel cement i stabiliseringsmedlet utom för 100 % cement som i vissa fall gav sämre värden. Jämförelser av hållfasthetsnivåer för blandningar med 70 - 90 % cement visade att hållfastheten efter en vecka var upp till dubbelt så hög vid 20 °C jämfört med vid 8 °C. För att

skapa höga temperaturer i pelare behöver en betydande del av stabiliseringsmedlet bestå av kalk. För att därför nå hög hållfasthet inom kort tid efter pelartillverkning bedömdes den optimala blandningen ligga i intervallet 60 - 90 % cement och 40 - 10 % kalk.

I Etapp I upprättades också efter litteraturstudier en hypotes kring cements verkningssätt och funktion i jord samt ett utkast till provningsprogram för klargörande av kemiskt verkningssätt.

Utvärderingen av resultatet från Etapp I av projektet utgjorde underlag för uppläggning av Etapp II. I Etapp II har effekterna av tre olika bindemedel - ren Slite SH P, ren osläckt kalk och en blandning av 75 % Slite SH P och 25 % osläckt kalk - fysikaliskt provats på laboratorium på tio olika, vanligen förekommande jordarter. Proven har avsett de tidsmässiga förändringarna av hållfasthets- och deformationsegenskaper samt permeabilitet och temperaturutveckling för de olika typerna och halterna av bindemedel. Effekterna har studerats under provningstid från 1 till 270 dygn och under olika temperaturförhållanden.

För provning av den teoretiska funktionsmodellen, som uppställdes i Etapp I, har ett omfattande provprogram genomförts på laboratorium rörande kemiska reaktioner med koppling till resultaten från hållfasthetsförsöken. Proven avsåg de olika jordarnas reaktivitet, volymförändringar och sulfatsvällning.

Gränzonen mellan jord stabiliserad med cement och omgivande ostabiliserade jord har ägnats speciell uppmärksamhet.

Bindemedlens energiutveckling i olika jordtyper har också studerats och en modell uppställts, enligt vilken förväntad temperaturutvecklingen kan beräknas.

Ett begränsat antal fullskaleförsök utfördes vid två provningsplatser med syfte att kunna göra jämförelser mellan resultat rörande hållfasthet och permeabilitet hos stabiliserad jord i laboratorium och på pelare i fält. Syftet var också att kunna mäta temperaturer för kalibrering av värmemodellen.

Kapitel 3.

Jordar och stabiliseringsmedel

3.1 ALLMÄNT

Under projektets inledande etapp provades ett antal olika typer av cement och kombinationer av cement och kalk för stabilisering av tre relativt skilda typer av jordar. I den andra etappen utvidgades försöken till att omfatta 10 jordar med mer gradvis övergång i egenskaper. Jordarna valdes från det spektrum av lösa jordar i Sverige som ofta kräver någon form av förstärkningsåtgärder vid bygande. De utgjordes av jordar av varierande kornfördelning, dvs med olika stort siltinnehåll, leror med inget eller obetydligt organiskt innehåll men med varierande innehåll av andra ämnen samt jordar med varierande halt av organiskt innehåll.

För försöken användes den typ av cement och det blandningsförhållande kalk:cement som bedömdes kunna ge bäst stabiliseringseffekt i respektive jord. Då resultaten av laboratorieförsöken i Etapp I visat på bäst effekt av snabbcement i de tre jordtyperna, valdes denna typ av cement för provning av samtliga jordar i Etapp II. Resultaten av försöken i Etapp I visade vidare att cement blandat med en mindre mängd (10 - 25 %) kalk i vissa fall kunde ge ungefär lika hög eller högre hållfasthet än ren cement. För försöken i Etapp II valdes att använda ren osläckt kalk, ren cement samt en blandning kalk:cement där kalken utgjorde 25 % av blandningen.

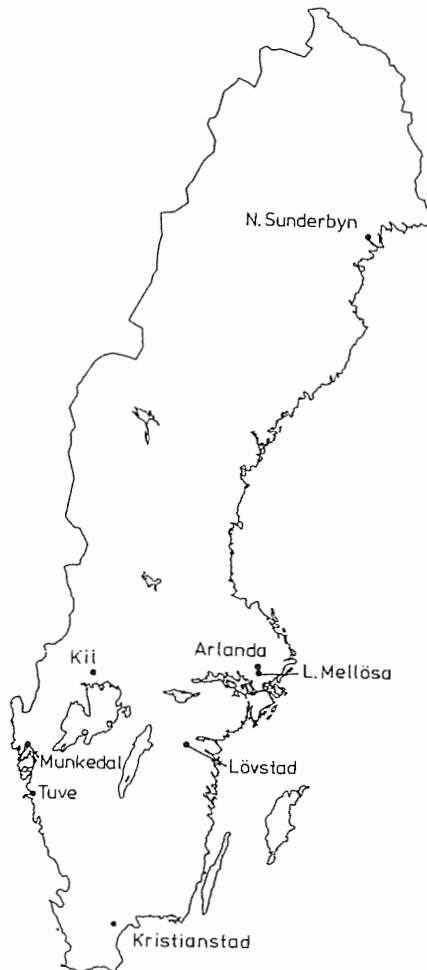
3.2 JORDAR

De 10 jordarna togs från ett antal olika platser i landet, se **Figur 3.1** som visar ursprungsjordarnas geografiska läge. Jordarna benämndes enligt följande

- Lerig silt (*leSi*) från Kil
- Siltig lera (*siLe*) från Kil
- Lera (*Le*) från L Mellösa
- Kvikclera (*Le(kvick)*) från Munkedal

- Salthaltig lera (*Le(salt)*) från Tuve
- Sulfidhaltig lera (*suLe*) från N Sunderbyn
- Gyttjig lera (*gyLe*) från Lövstad
- Lerig gyttja (*leGy*) från Lövstad
- Gyttja (*Gy*) från Kristianstad
- Torv (*T*) från Arlanda

Karakteristiska skillnader mellan de olika jordarna framgår närmare av sammanställningen av geotekniska egenskaper i **Tabell 3.1**.



Figur 3.1. Provtagningsplatser.

Figure 3.1. Sampling sites.

Tabell 3.1 beskrivning av försöksjordarnas geotekniska egenskaper.

Jord	Prov- tagnings- djup (m)	Densitet ρ (t/m ³)	Vatten- kvot w_N (%)	Flytgräns w_L (%)	Odränerad skjuv- hållfasthet τ_{fu} (kPa)	Sensiti- vit S_t	Orga- nisk halt (%)	pH	Lerhalt (%)	BET-yta (m ² /kg)	Domi- nerande lerminera 1	Övrigt
leSi	0,5-1	1,95	29	30	30	30	<0,1	6,2	18	16700	illit	
siLe	2,5-7	1,95	31	30	30	65	0,6	6,9	29	14200		
Le	7,5-10,5	1,55	78	70	15	18	1,3	7,4	65	29600	illit	karbonat 3 % sulfid 0,1 %
Le(kvick)	8-12,5	1,65	60	45	32	290	1,1	8,1	60	31700		
Le(salt)	4,5-7,5	1,55	87	80	20	12	1,5	7,7	70	43700		klorid 1 %, karbonat 1 %
suLe	6-7,5	1,45	88	89	21	15	3,5	7,8	50	11700		sulfid 1,2 %
gyLe	2,3-3,3	1,35	141	106	7	10	4,7	6,4	70	34300		
leGy	1,3-2,3	1,35	155	135	7	11	7,7	5,5	65	35000	illit	
Gy	2-3,5	1,10	340	380	7	7	30	5,6	50			
T	0,6-1	0,96	900				75	6,4				höghumiferad (H10)

Den salthaltiga leran hade en salthalt av 1 %. Salthalter på 1 - 3 % bedöms normalt som höga och kan förekomma hos leror som avsatts i saltvatten och som inte utsatts för urlakning.

Sulfidhalten i leran som karakteriserades som sulfidhaltig var 1,2 %. Höga sulfidhalter, 1 - 3 %, återfinns normalt endast i sulfidjordar, sk svartmocka, från norra delen av Sverige. Hos leror i södra Sverige är sulfidhalten normalt lägre än 1 %.

3.3 STABILISERINGSMEDEL

3.3.1 Kemisk-fysikaliska egenskaper

Till Etapp II valdes ett snabbhårdnande cement, Slite SH. Det är ett finmalt cement med hög reaktivitet och snabb hållfasthetsutveckling. Cementet är ett rent portlandcement utan tillsatser. Portlandcement är typbeteckningen för det vanligaste cementet för byggändamål.

Kalken var en finmald osläckt kalk med hög reaktionshastighet med vatten, Köping HB 0-0,1 mm. Osläckt kalk är det vanligaste produktnamnet på bränd kalksten, men även benämningen bränd kalk förekommer. Kemisk sammansättning och fysikaliska egenskaper återfinns i **Tabell 3.2**.

Tabell 3.2. Kemisk sammansättning och fysikaliska egenskaper för stabiliseringsmaterialen.

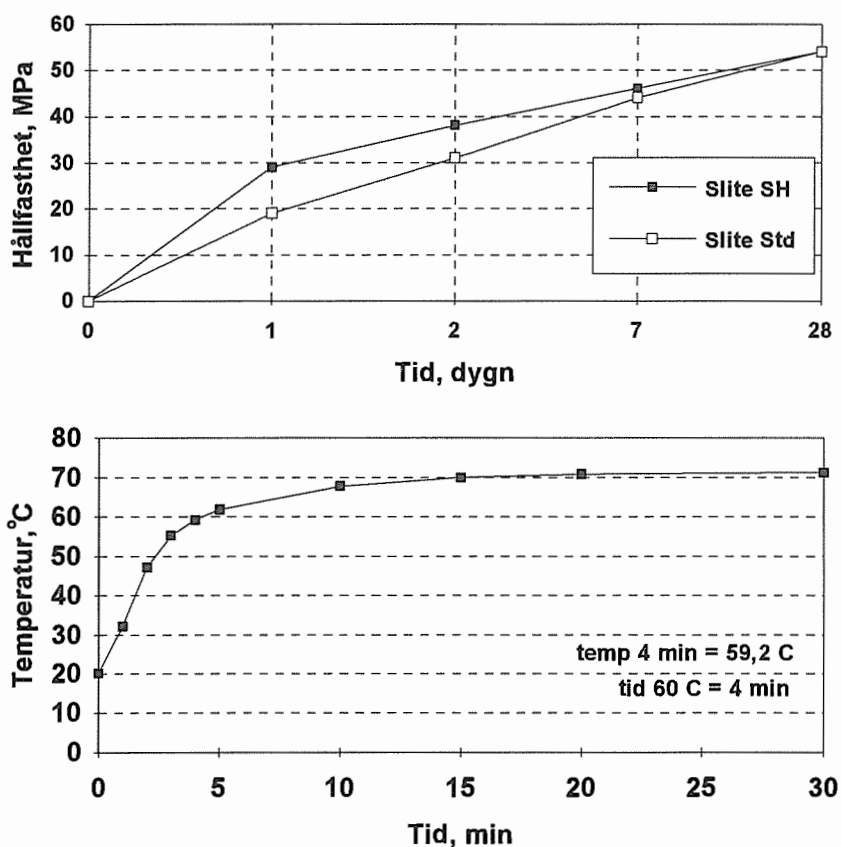
Kemisk sammansättning			Fysikaliska egenskaper		
	Slite SH cement	Köp HB 0-0,1 kalk	sikt, mm	Slite SH % passerande	Köp HB 0-0,1 % passerande
CaO %	63,1	95,0	0,25	100	100
SiO ₂	20,5	2,2	0,125	100	99
Al ₂ O ₃	4,5	1,0	0,09	100	98
Fe ₂ O ₃	2,3	0,5	0,064	97	95
MgO	4,0	1,5	0,032	70	85
Na ₂ O	0,25	0,2	0,016	46	
K ₂ O	1,4	0,2	0,08	29	
SO ₃	3,1	0,04	0,04	16	
			densitet t/m ³		
			skrym	1,3	0,9-1,3
			kompakt	3,15	3,3

anm. spec yta för Slite SH=500 m²/kg (blaine)

3.3.2 Reaktivitet

Cementets reaktivitet och karaktär beskrivs bl.a. med hållfasthetsutvecklingen. Den bestäms i cementbruk enligt standardiserade provningsmetoder. Hållfastheten enligt EN 196-1 (motsvarar svensk normprovning) för Slite SH redovisas i **Figur 3.2a**. Motsvarande värden för Slite Std redovisas som jämförelse. Standardcement har långsammare hållfasthetsutveckling än SH-cement, speciellt efter kort tid.

Den osläckta kalkens reaktivitet provas genom mätning av temperaturhöjningen vid reaktion med vatten i en termos under standardiserade förhållanden. En släckningskurva enligt DIN 1060 för den aktuella kalken visas i **Figur 3.2b**.



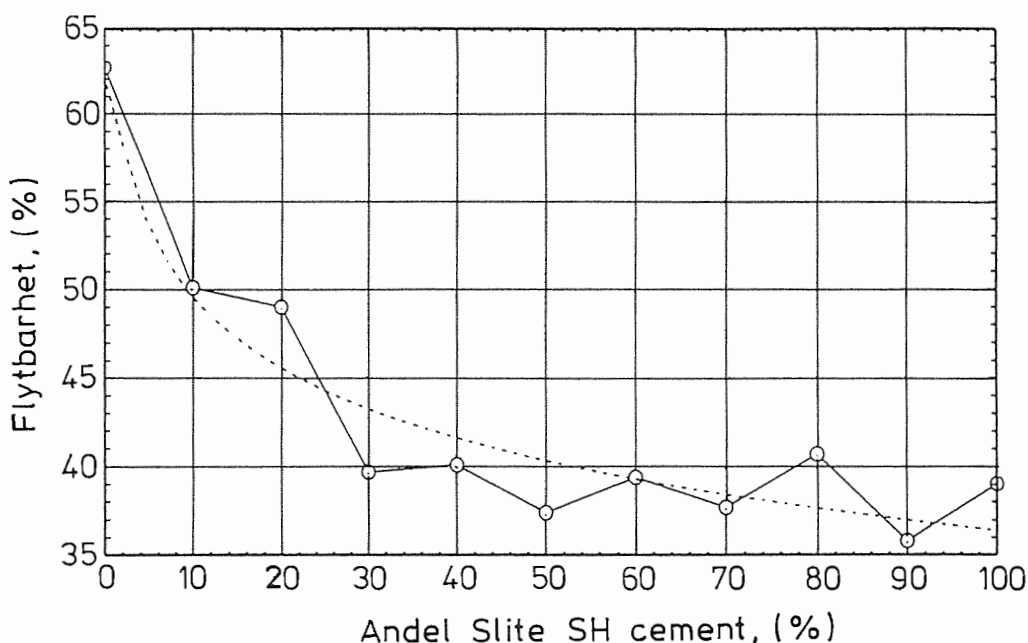
Figur 3.2. a) Hållfasthetsutveckling för cement och b) släckningskurva för osläckt kalk.

Figure 3.2. a) Strength development for cement and b) slaking curve for quick lime.

Kalkens reaktivitet påverkas av kornstorlek och bränningsgrad. För jordstabilisering används finmald kalk. Bränningsgraden inverkar på kristallstorleken av CaO. I en hårdbränd kalk är kristallerna större vilket ger en lägre reaktivitet. Den kalkkvalitet som används för djupstabilisering i Sverige idag är hårdbränd (HB).

3.3.3 Flytbarhet

Flytbarheten är ett mått på pulvrets rörlighet i rör och munstycke. Den bestäms genom att man mäter hur stor andel av stabiliseringsmedlet som passerar en sikt (maskvidd 0,5 mm) efter ett visst antal väldefinierade skakningar (von Imse, 1972). Typiska värden för Köpingkalk HB 0-0,1 mm för stabiliseringsändamål är $80 \pm 10 \%$. För Slite SH- och Std-cement är motsvarande värde $44 \pm 5 \%$. I **Figur 3.3** visas flytbarheten för blandningar av kalk och cement, som använts i denna undersökning. Blandningar med 50/50 kalk/cement, som är vanligast idag, fungerar bra i moderna maskiner trots värden kring 40 % enligt denna metod.



Figur 3.3. Flytbarhet för blandningar av cement och kalk i denna undersökning.

Figure 3.3. Flowability of mixes of cement and lime in this study.

Kapitel 4.

Kemisk - fysikaliska processer

4.1 KEMISKA REAKTIONER OCH STRUKTURFÖRÄNDRINGAR

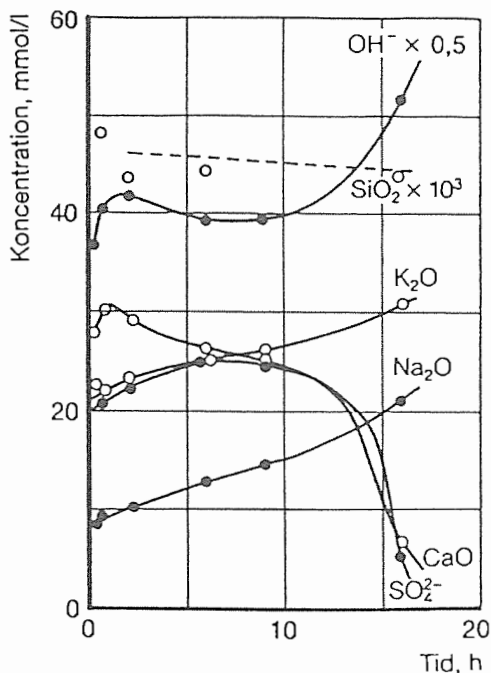
4.1.1 Cementets reaktion med vatten

Vanligt byggcement är av typ portlandcement. Det tillverkas genom sammalning av cementklinker och gips, som tillsätts som bindetidsregulator. Cementklinkern framställs i ugnar genom hopsintring av kalksten och lera vid hög temperatur ca 1450 °C. Den kemiska sammansättningen kan variera mellan olika portlandcement beroende på råmateriallets ursprung. En kemiska analys för ett typiskt portlandcement ses i Tabell 3.2. Ämnena redovisas som enskilda oxider, men i cementet föreligger de som sammansatta mineral. De reaktiva mineralen i cement finns uppställda i Tabell 4.1. Andra viktiga mineral i cement är Na- och K-sulfat samt gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$).

TABELL 4.1. Cementmineral.

Förkortning	Formel	Namn	ca halt %
C_3S	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Trikalciumsilikat	57
C_2S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Dikalciumsilikat	14
C_3A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Trikalciumaluminat	8
C_4AF	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$	Trikalciumaluminatferrit	7

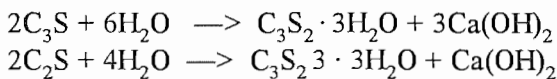
När cementet kommer i kontakt med vatten startar genast flera reaktioner. Kalci-umsilikaterna bildar kalciumhydroxid, som tillsammans med lättlösliga alkali-sulfater ger ett högt pH, ca 13. Vattenfasen innehåller de första timmarna höga halter av Ca-, Na- och K-joner med sulfat och hydroxid, som motjoner. Efter omkring ett halvt dygn är vattenfasen i huvudsak en alkalihydroxidlösning, Figur 4.1.



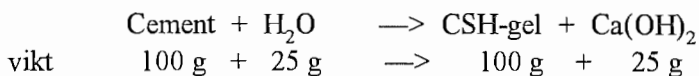
Figur 4.1. Kemisk sammansättning av vattenfasen efter blandning av cement och vatten (Taylor 1990).

Figure 4.1. Chemical composition of the water phase after mixing cement and water (Taylor 1990).

Kalciumsilikatens reaktioner med vatten beskrivs i formlerna nedan. Beteckningar se Tabell 4.1.



Kalciumsilikathydratet $C_3S_2 \cdot 3H_2O$ ger hållfastheten i betong och kallas normalt CSH-gel. Av 100 g cement bildas dessutom ca 25 g $Ca(OH)_2$.



CSH-gelen bildas på cementkornens ytor. Den växer till och fyller ut utrymmet mellan kornen. Porositeten minskar och kornen binds ihop vilket ger hållfasthet.

Kalciumaluminatet C_3A reagerar med gips och bildar ettringit:

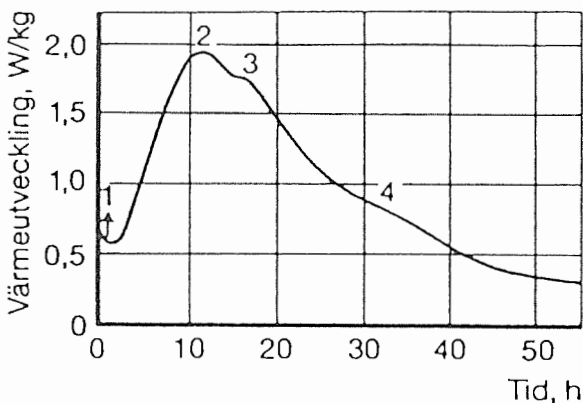


Ettringiten omvandlas till monosulfat $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 11H_2O$ när sulfathalten i vattenfasen minskar. Det sker efter ungefär ett dygn. Om sulfater tillförs senare kan monosulfatet åter bilda ettringit. Ettringit består av nålformiga kristaller, som ger en viss hållfasthet. Bildas ettringit efter att cementet har hårdnat kan kristallerna ge expansion och sprickor.

Cementets reaktionshastighet vid olika tidpunkter illustreras med värmeutvecklingskurvan i **Figur 4.2**. Omedelbart efter blandningen med vatten avges värme när lösliga salter löses upp. Värmemängden är dock liten och först efter några timmar kommer cementets fortsatta reaktion igång och uppnår ett maximum efter ca 10 timmar. Därefter avtar värmeavgivningen snabbt, men fortsätter så länge cementet reagerar med vatten. (Barnes 1983, Taylor 1990, Soroka 1970)

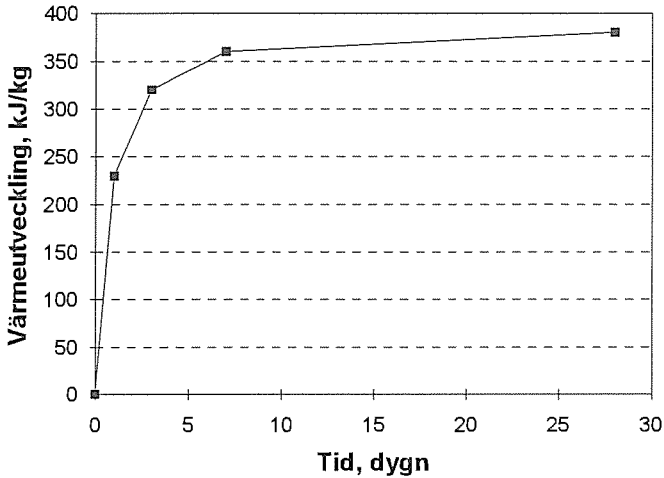
Efter 3 dygn har ungefär hälften av cementet reagerat, efter 7 dygn 60 % och efter 3 mån 90 %. Hastigheten påverkas av bl.a. cementets finmalningsgrad, vattenhalten och temperaturen. Den ackumulerade värmeutvecklingen visas i **Figur 4.3**.

Den totala värmeutvecklingen från ett normalt portlandcement är ca 450 kJ/kg (Boynton 1980).



Figur 4.2 Värmeutveckling (isoterm) för cement vid 20 °C (Taylor 1990).

Figure 4.2. Heat development (isotherm) of cement at 20 °C (Taylor 1990).



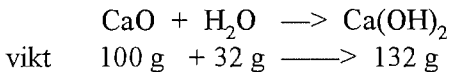
Figur 4.3. Ackumulerad värmeutveckling under adiabatiska förhållande för ett standardcement.

Figure 4.3. Accumulated heat development under adiabatic conditions for a standard cement.

4.1.2 Kalkens reaktion med vatten

Osläckt kalk tillverkas genom bränning av högvärdig kalksten vid ca 900 °C och består till ca 95 % av CaO. Kalken reagerar med vatten under stark värmeutveckling och bildar Ca(OH)₂. Vattenfasen blir mättad av kalciumhydroxid och pH stiger till ca 12,5.

Reaktion med vatten (släckning)

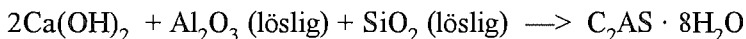


Reaktionen sker omedelbart och når sitt maximum efter ca 5 min. Släckningsskurvan för en finmald kalk som används för jordstabilisering har visats i Figur 3.2b. Reaktionshastigheten påverkas av korstorlek och kalkens bränning. Totala värmeutvecklingen är 1163 kJ/kg (Boynton 1980).

4.1.3 Jordens reaktion med kalk och cement.

De flesta jordarter innehåller aluminium- och kiselhaltiga mineral. Vissa av dessa har puzzolana egenskaper. Det innebär att de kan reagera med Ca(OH)₂ och bildar reaktionsprodukter som ger hållfasthet.

Puzzolanreaktionen kan schematiskt beskrivas



Mineralet $\text{C}_2\text{AS} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ heter strätlingit och är ett av många, som kan bildas av de ingående ämnena. Andra reaktionsprodukter som finns rapporterade är $\text{C}_4\text{A} \cdot x\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_4\text{A} \cdot \text{CaCO}_3$, $\text{CS} \cdot \text{H}_2\text{O}$ och hydrogarnet, som är en serie av mineral från $\text{C}_3\text{A} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ till $\text{C}_3\text{AS} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. (Taylor 1990)

Mängden $\text{Ca}(\text{OH})_2$ har alltså betydelse för hur mycket bindande material som bildas. Enligt reaktionsformeln ovan så ger 35 g $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ca 100 g strätlingit. Med 10 % stabiliseringsmedel i en lera bildas 2,5 och 13 g $\text{Ca}(\text{OH})_2$ per 100 g torrt material med cement respektive kalk. Detta ger vid fullständig reaktion

med cement $2,5/35 \cdot 100 = 7$ g strätlingit

och

med kalk $13/35 \cdot 100 = 37$ g strätlingit

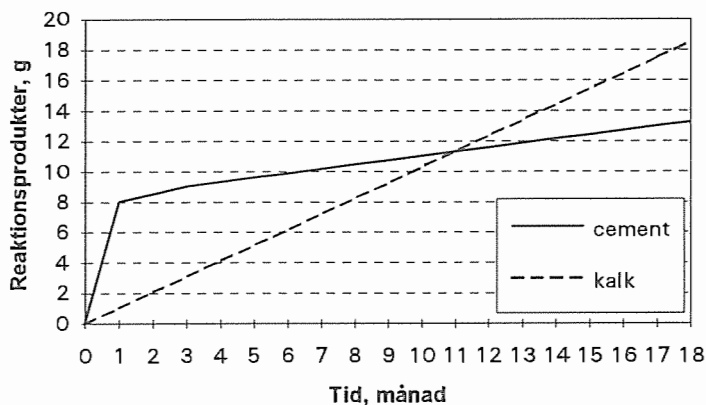
Om all $\text{Ca}(\text{OH})_2$, som bildas vid kalkens eller cementets reaktion med vatten, reagerar med lermineralen så kan kalken genom puzzolanreaktionen teoretiskt bilda ca 5 ggr mer bindande material jämfört med cementet. För cementet gäller dock att det bindande materialet (CSH) i huvudsak bildas vid cementets reaktion enligt 4.1.1.

Flera undersökningar visar att $\text{Ca}(\text{OH})_2$ förbrukas eller omvandlas, men även med hög temperatur (60 °C) och efter lång tid (månader) är det svårt att påvisa större mängder reaktionsprodukter från puzzolanreaktionerna. Det beror delvis på att reaktionerna är mycket långsamma, men också på att $\text{Ca}(\text{OH})_2$ karbonatiserar och blir inaktiv om proverna har tillgång till luft. Man har från prover i fält påvisat reaktionsprodukter efter några år. (Za-Chien Moh 1965, Diamond mfl. 1964, Eades & Grim 1960, Herzog & Mitchell 1963).

Mängden reaktionsprodukter är ett mått på hur mycket bindande material, som bildas. Hållfastheten uppnås dels genom att partiklarna binds samman och dels genom att hålrummen fylls och ger ett tätare material. Mängden bindande material är därför ett indirekt mått på materialets hållfasthet.

Kalkstabiliserad jord ger låg hållfasthet de första månaderna jämfört med cementstabiliserad jord. På lång sikt blir emellertid hållfastheten i vissa jordar högre med kalk. Detta har flera samverkande orsaker, men kan delvis förklaras

av följande modell. Antag att puzzolanerna förbrukat 50 % av tillgänglig Ca(OH)_2 efter 18 mån och att 90 % av cementet reagerat efter 3 månader. Antagandet förutsätter att kalken får reagera vid förhöjd temperatur och att lermine-
ralet är reaktivt. Mängden bildade reaktionsprodukter med inblandning av 10 % ren kalk respektive 10 % ren cement kan då beräknas och resultatet illustreras i **Figur 4.4**.



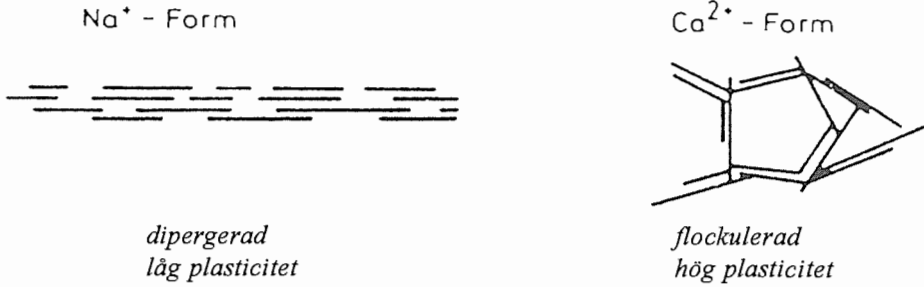
Figur 4.4. Mängd bildade reaktionsprodukter med 10 g stabiliseringsmedel per 100 g torrt material. Principfigur.

Figure 4.4. Quantity of reaction products created with 10 g stabiliser per 100 g dry material. General diagram.

4.1.4 Jonbyte och strukturförändring

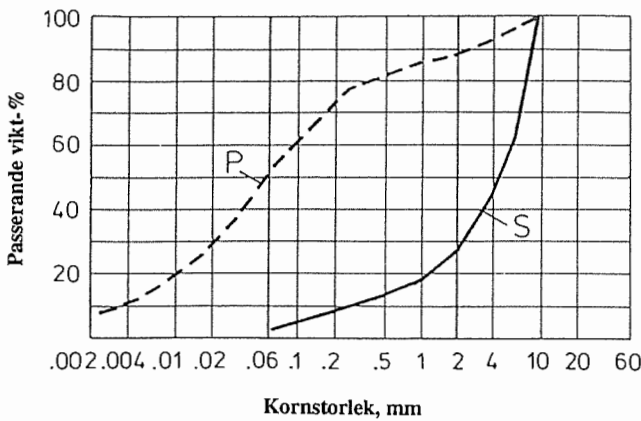
Leror består i huvudsak av platta korn av aluminiumsilikater, som är separerade av tunna vattenskikt. På ytan av kornen finns en anrikning av positiva joner, vanligen kalium eller natrium. I normalt tillstånd är ytladdningarna och vattenfasens sammansättning anpassade så att lerstrukturerna är stabila, **Figur 4.5**. Lerans struktur kan förändras genom att koncentrationen av lösta joner i vattenfasen förändras. Om man byter ut de positiva jonerna (katjonerna) mot joner av annan laddning eller storlek så stör man strukturen i leran. Tillsats av kalciumjoner gör att leran flockulerar och får en annan struktur och den skenbara kornstorleksfördelningen ändras, **Figur 4.6** (Müller-Vonmoos 1983).

Vid stabilisering med kalk byter man ut Na- och K-joner i leran mot Ca-joner. Mängden joner, som går att ersätta, kallas lerans jonbyteskapacitet. Skillnaden i jonbyteskapacitet mellan olika leror beror på partiklarnas totala yta och geologiska ursprung. Kalciumkoncentrationen i stabiliserad lera stiger snabbt till en tillräckligt hög nivå för att jonbytet skall starta omedelbart. Behovet av Ca-joner motsvarar ca 0,1 g Ca(OH)_2 / kg lera (Assarsson 1977).



Figur 4.5. Illustration av effekt av jonbyte. Illit och kaolinit.(Müller-Vonmoos 1983).

Figure 4.5. Illustration of the effect of ion exchange. Illite and kaolinite. (Müller-Vonmoos 1983).



Figur 4.6. Kornkurva före (P) och efter (S) kalkstabilisering (Caprez 1983).

Figure 4.6. Grading curve before (P) and after (S) lime stabilisation. (Caprez 1983).

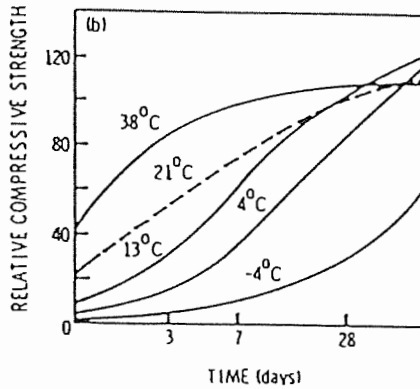
Inblandning av cement ger leran initiiellt en lösare konsistens än då kalk användes. Detta orsakas av att cementets tidiga reaktioner ger höga halter av Na-, K- och sulfatjoner i vattenfasen, Figur 4.1 (Taylor 1990). Detta minskar eller förhindrar jonbytet med Ca-joner eftersom vattenfasen redan innehåller Na- och K-joner. Vidare har sulfathalten betydelse eftersom denna minskar den möjliga koncentrationen av Ca-joner i lösningen.

Inblandning av cement och kalk ger ett högt pH, som starkt påverkar jonstyrkan och jonbalansen i vattenfasen. Ett högt pH är också förutsättningen för puzzolanreaktionerna.

4.2 INVERKANDE FAKTORER

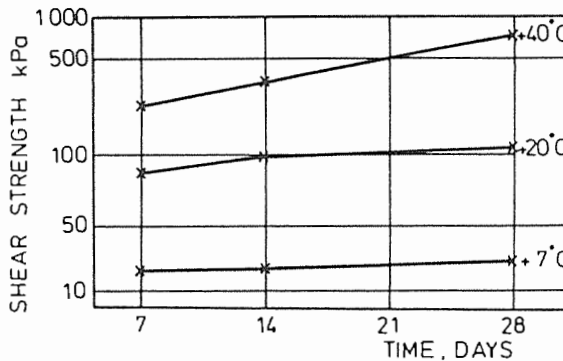
4.2.1 Temperatur

Temperaturen i marken är i Sverige normalt ca 8 °C. Vid denna låga temperatur reagerar cementet relativt långsamt och kalkens reaktioner med jordpartiklarna är ännu långsammare. Temperaturberoendet för cementreaktionen ses i **Figur 4.7** och för puzzolanreaktionen i **Figur 4.8**.



Figur 4.7. Hållfasthetsutveckling för cement vid olika temperaturer (Barnes 1983).

Figure 4.7. Strength development of cement at various temperatures. (Barnes 1983).



Figur 4.8. Temperaturens inverkan på skjuvhållfastheten vid kalkstabilisering. (Kujala 1984).

Figure 4.8. Influence of temperature on shear strength in lime stabilisation. (Kujala 1984).

Värmeutvecklingen direkt efter inblandningen gör att marktemperaturen stiger. Cementet ger endast en måttlig temperaturhöjning på 5-10 °C medan kalkens släckningsvärme kan öka marktemperaturen med 40-50 °C. Lokalt kan kalken

ge temperaturer upp emot 100 °C med ångbildning som följd, speciellt om finmald lösbränd kalk används.

Den höga temperaturen medför avdunstning och därmed sänkning av vattenhalten, men också att puzzolanreaktionerna kommer igång. Vid blandningar av cement och kalk gör kalkens släckningsvärme att cements reaktionshastighet ökar. Under tiden som temperaturen är hög bildar cementet en stor mängd reaktionsprodukter som ger tidig hållfasthet.

4.2.2 Organiska ämnen

Flera organiska ämnen kan retardera puzzolan- och cementreaktionerna. Vanligast är ämnen med syragrupper, exempelvis humussyror, som reagerar med $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Reaktionsprodukterna faller ut på partiklarna som svårösliga föreningar och fördröjer fortsatt reaktion eftersom Ca-jonhalten sjunker. Detta kan också medföra att pH tillfälligt sjunker och att reaktionerna avstannar. Sura jordar kan alltså ge långsammare hållfasthetsutveckling.

Cement ger ofta bättre effekt än kalk i jordar med gytta eller i torv. Kalken kräver att det finns lerpartiklar som $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kan reagera med och ge bindande mineral. I jordar med höga halter av organiska ämnen är mängden lerpartiklar låg och det bildas endast små mängder reaktionsprodukter. Cementet kan bilda bindande material utan samverkan med lerpartiklarna. Detta medför att man får hållfasthetstillväxt även i jordar med höga halter av organisk material om inte reaktionerna blir retarderade.

4.2.3 Sulfider

Jordar med hög sulfidhalt ger ofta långsam hållfasthetstillväxt vid djupstabilisering. Sulfider kan förekomma i oorganiska eller organiska föreningar. Oorganiska sulfider ex.vis. FeS_2 , har ingen retarderande effekt på cement eller puzzolanreaktionerna. Låga hållfastheter erhålls dock oftast i sulfidhaltiga gyttyr eller leror med högt organiskt innehåll. Det organiska innehållet medför låg hållfasthet speciellt med kalk, se avsnitt 4.2.2. Sulfidhaltiga organiska ämnen kan eventuellt också innehålla syragrupper, som har retarderande effekt.

4.2.4 Inblandning/homogenitet

Det är viktigt att stabiliseringsmedlet blir homogent inblandat i jorden. Det finns dock några skillnader i verkningssätten för kalk och cement, som påverkar blandningsbehovet.

Vid inblandning av kalk sker omedelbart en kraftig värmeutveckling, speciellt i

områden med ansamlingar av kalkkorn. Värmen torkar materialet samtidigt som en del av vattnet förbrukas vid släckningen av kalken. Detta tillsammans med jonbytesreaktionen gör att materialet blir grövre, torrare och svårare att bearbeta och kalken kan bli ojämnt fördelad.

Inblandning av cement ger inga stora omedelbara förändringar i materialet. Med cement finns bättre möjligheter till en jämn inblandning med rätt verktyg och blandningsarbete.

På mikronivå sker i ett senare skede reaktionerna med kalk genom att $\text{Ca}(\text{OH})_2$ löses i vattnet och transporteras till lerpartiklarna. Efterhand som materialet blir tätare försvåras transporten av vätska och joner, så det är viktigt på sikt att kalken är väl fördelad i materialet. Cementets funktion bygger till stor del på att det bindande materialet bildas kring cementkornen. Dessa måste därför vara väl fördelade för att ge en jämn hållfasthet i pelaren.

Hållfastheten ökar generellt med ett materials homogenitet. Cementet kan inom rimlig tid ge högre hållfasthet än kalk, men måste vara väl inblandad för att utnyttjas fullt ut.

4.3 BESTÄNDIGHET

4.3.1 Stabiliserande reaktionsprodukter

För att reaktionsprodukterna skall bildas krävs ett pH över ca 10. Det gäller för CSH och CASH, som bildas vid cement- resp puzzolanreaktionerna. Reaktionsprodukterna är stabila vid pH över ca 5 och överskott på kalciumjoner. Ifall reaktionsprodukterna utsätts för surt vatten ($\text{pH} < 4,5$) löses de upp, liksom om de utsätts för strömmande vatten med låg jonhalt. Om materialet uppnått ökad hållfasthet så har pH varit högt och kan sjunka om exempelvis surt vatten tillförs utifrån. Lerans täthet ger emellertid långsam vattentransport och därmed mycket långsam urlakning även vid låga pH. Om pelaren passerar genom ett lager av material med högre permeabilitet och strömmande vatten finns risk för urlakning i detta område. Man kan också tänka sig att pH sjunker genom att syragrupper i organiskt material förbrukar OH-joner och bildar organiska salter. Det mesta av det organiska materialet bör dock redan ha reagerat vid det höga pH som uppstår vid inblandningen.

Det finns inget som tyder på att det skulle vara skillnad i långtidsstabilitet för CSH och CASH under likvärdiga förhållanden.

4.3.2 Ettringit

Ettringit, ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), bildas av $Ca(OH)_2$, aluminatkomponent och sulfat. Aluminatkomponenten kan komma från lermineralet eller cementet. Ettringiten kännetecknas av långa nålformiga kristaller och av att den bildas under volymsutvidgning. Den bildas vid pH över 10 och är stabil ner till pH ca 7.

Den mängd ettringit som bildas vid cementets reaktion med vatten ger ingen expansion i materialet eftersom den begränsas av cementets sammansättning. Ytterligare ettringit kan bildas om sulfater tillförs utifrån. Om mängden av ettringit blir tillräcklig kan materialet expandera. Omgivande jords täthet hindrar emellertid tillförsel av sulfater och pelarens porositet (hålrum) minskar risken för skadliga effekter på grund av expansion. För stabiliserade sulfidhaltiga jordar kan man tänka sig oxidation av sulfid till sulfat med ettringitbildning, som följd. Detta kräver dock tillgång på syre i jorden.

Eftersom ettringiten endast är en liten del av reaktionsprodukterna har stabiliteten ingen avgörande betydelse för hållfastheten. Det är skillnad om man jämför med jord som stabiliserats med en gips-kalkblandning där ettringiten till stor del bestämmer den tidiga hållfastheten.

4.3.3 Karbonatisering

Koldioxid, (CO_2), i luften eller löst i vatten reagerar med $Ca(OH)_2$ och bildar $CaCO_3$. Mängden $Ca(OH)_2$ som är tillgänglig för puzzolanreaktionerna minskar därmed. Denna reaktion har endast betydelse i ytskiktet där tillgången på CO_2 är tillräckligt stor. Koldioxiden bryter inte ner befintlig CSH eller CASH.

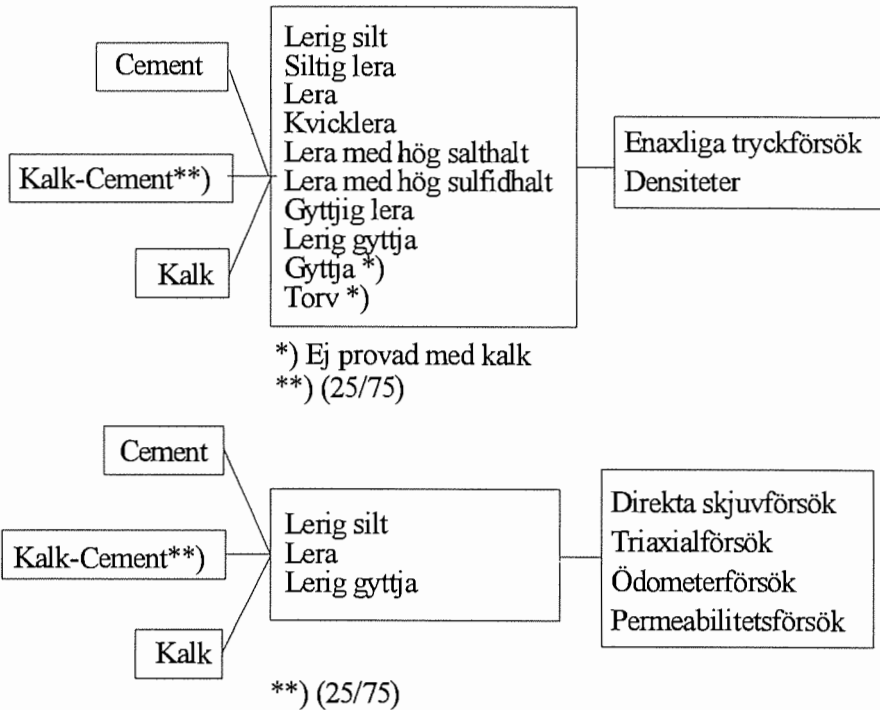
Kapitel 5.

Fysikalisk laboratorieprovning av stabiliserad jord

5.1 PROVNINGSPROGRAM OCH PROVBEREDNING

5.1.1 Provningsprogram

I programmet ingick att prova tre bindemedel med inblandning i tio olika jordarter. Kombinationerna av bindemedel, jordarter och utförda laboratieförsök framgår av **Figur 5.1**.



Figur 5.1. Principöversikt över provade kombinationer av bindemedel, jordarter och utförda provningar.

Densitetsbestämning och enaxliga tryckförsök utfördes på samtliga blandningar i projektet, 1-91 dygn efter inblandning. Stabiliserad lerig silt, lera och lerig gyttja provades dessutom ytterligare en gång, 270 dygn efter inblandning. På dessa tre stabiliserade jordar utfördes också ett antal direkta skjuvförsök, triaxialförsök, ödometerförsök och permabilitetsförsök vid ett eller två tillfällen. Omfattningen av det utökade provningsprogrammet framgår närmare av Tabell 5.1.

Tabell 5.1. Utökad provningsprogram för lerig silt, lera och lerig gyttja.

Blandning			Direkta skjuvförsök	Triaxialförsök				Kompres-sionsförsök	Permeabili-tetsförsök	Enaxliga tryckförsök	
			Konsoliderings-spänning $\sigma'_{vc} = 25, 100, 250, 400$ kPa		Konsolideringsspänning σ'_{3c}						
Jord	Stabilise-ringsmedel	Tillsats-mängd % ¹⁾	14, 91 dygn		60 dygn		115 dygn		14 och 91 dygn	14 och 91 dygn	1, 14, 28, 91 270 dygn
			dränerat	odränerat	dränerat	odränerat	dränerat	odränerat			
Siltig lera	cement	6 %	×								×
		10 %	×	×			20, 160	20, 160	×	×	×
	kalk	6 %	×								×
		10 %	×	×					×	×	×
kalk-cement (25/75)	10 %	×	×	20, 80, 160	20, 80, 160	20, 160	20, 160	×	×	×	
Lera	cement	6 %	×								×
		10 %	×	×			20, 160	20, 160	×	×	×
	kalk	6 %	×								×
		10 %	×	×			20, 160	20, 160	×	×	×
kalk-cement (25/75)	10 %	×	×			20, 80, 160	20, 80, 160	×	×	×	
Lerig gyttja	cement	10 %	×								×
		16 %	×	×			20, 160	20, 160	×	×	×
	kalk	10 %	×								×
		16 %	×	×					×	×	×
kalk-cement (25/75)	16 %	×	×	20, 80, 160	20, 80, 160	20, 160	20, 80, 160	×	×	×	

¹⁾ % av torr vikt

Mängderna bindemedel varierade enligt Tabell 5.2. I tabellen finns angivet viktprocent och kg/m³. Som framgår av tabellen var mängden bindemedel omräknat till kg/m³ olika för olika jordarter jämfört med angivelserna i viktprocent, som beräknas på den torra jordmassan.

Tabell 5.2. Bindemedelsmängder i % och kg/m³ för de olika jordarterna (t ex 6/90 anger 6 % respektive 90 kg/m³)

Jordarter	Bindemedelssorter		
	Cement % / kg/m ³	Kalk-Cement (25%-75%) % / kg/m ³	Kalk % / kg/m ³
Lerig silt	4/60, 6/90, 10/150, 13/195	4/60, 6/90, 10/150, 13/195	4/60, 6/90, 10/150, 13/195
Siltig lera	6/90, 10/150, 13/195	6/90, 10/150, 13/195	6/90, 10/150, 3/195
Lera	6/52, 10/87, 13/113, 16/139	6/52, 10/87, 13/113, 16/139	6/52, 10/87, 3/113, 6/139
Kvicklera	6/62, 10/103, 16/165	6/62, 10/103, 16/165	6/62, 10/103, 16/165
Lera m hög salthalt	6/40, 10/83, 16/133	6/40, 10/83, 16/133	6/40, 10/83, 16/133
Lera m hög sulfidhalt	6/46, 10/77, 16/123	6/46, 10/77, 16/123	6/46, 10/77, 16/123
Gyttjig lera	10/56, 16/90, 20/112	10/56, 16/90, 20/112	10/56, 16/90, 20/112
Lerig gyttja	10/53, 16/85, 20/105, 30/159	10/53, 16/85, 20/105, 30/159	10/53, 16/85, 20/105, 30/159
Gyttja	10/25, 16/40, 25/62, 70/175	10/25, 16/40, 25/62	-----
Torv	100/96, 150/144, 200/192 500/480	100/96, 150/144, 200/192	-----

Inblandningstiden var huvudsakligen 5 minuter. För lerig silt, lera och gyttja provades dessutom hållfastheten vid 1, 3 och 7 minuters blandningstid och då med bindemedlen cement och kalk-cement.

Lagringstemperaturerna var huvudsakligen 8 °C vid stabilisering med cement och kalk-cement och 20 °C med kalk. Vid stabilisering med en bindemedelsmängd kalk-cement härdades prover dessutom vid 20 °C. Några prover med kalkstabiliserad lera härdades också vid 40 °C.

5.1.2 Provberedning

Inblandning av stabiliseringsmedel och inpackning i kolvborrhylsor utfördes enligt av SGI utarbetade rutiner (Åhnberg & Holm 1986).

Provberedningen kan beskrivas enligt följande:

1. Samtliga delprover som skall höra till respektive jordmaterial blandas.
2. Material tas undan för vattenkvotsbestämning. Resten av materialet täcks och ställs i fuktrum.

3. Naturlig vattenkvot bestäms. Mängd stabiliseringsmedel som skall inblandas beräknas.
4. Stabiliseringsmedel och jord blandas i 5 min till en homogen blandning.
5. Blandningen packas i kolvborrhylsor i 5-6 lager/hylsa. Normalt packningstryck är 400 kPa. Trycket hålls kvar i ca 5 sekunder. Mellanlägg (plast) + lock sätts på.

Erfarenheter från blandningsarbetet finns sammanfattade i **Tabell 5.3**.

Tabell 5.3. Erfarenheter från provberedningen.

Jordart	Inpackningstryck (kPa)	Kommentarer
Lerig silt	400	Blandningen blev mycket styv(torr) och svårblandad med enbart kalk. Vattenkvoten var relativt låg vilket innebar att "överskotts"vattnet blev för litet för att få en bra konsistens. Med cement blev blandningen smidigare och man fick ej den momentana tillstyvnadseffekt, som kalk ger.
Siltig lera	400	Motsvarande kommentarer som för lerig silt.
Lera	400	"Kladdig" blandning med enbart cement. Med kalk uppstod inte denna effekt.
Kvicklera	400	Mycket lös konsistens innan bindemedelstillsats, därefter styvare.
Lera med hög salthalt	400	Motsvarande kommentarer som för lera.
Lera med hög sulfidhalt	200-300	"Kladdig" vid blandning med enbart cement. Något bättre med enbart kalk
Gyttjig lera	200	Mycket "kladdig" med cement. Något bättre med enbart kalk.
Lerig gyttja	200-300	"Kladdig" med enbart cement. Bättre med kalk.
Gyttja	Handpackad	Svårpackad och mycket "kladdig" med såväl kalk som cement
Torv	Handpackad	Svårpackad och mycket "kladdig". Något bättre med cement + sand.

Materialen uppträdde olika under blandningsarbetet. Beroende på typ av jord och typ av stabiliseringsmedel erhöles ett mer eller mindre lättblandat material. Det kunde konstateras att kalk hade en snabb upptorkande effekt, som kunde vara till både fördel och nackdel för inblandning och inpackning av prover beroende på jordtyp och mängden tillgängligt vatten. Cementets reaktion var "lugnare" och medgav en effektiv inblandning, speciellt om konsistensen var relativt

lös, medan inpackningen däremot kunde försvåras något av den ibland kladdiga konsistensen i vissa jordtyper.

De negativa effekter, som kan uppstå i den använda typen av laboratorieblandare och inpackningsmetodik, uppträder sannolikt inte i fält på grund av ett helt annat blandningsförfarande. I fält utförs å andra sidan normalt ett betydligt mindre blandningsarbete än på laboratoriet, vilket kan ge ett mer inhomogent stabiliserat material.

5.2 PROVNINGSMETODER

5.2.1 Hållfasthetsprovning

■ *Enaxliga tryckförsök*

De olika blandningarna undersöktes med avseende på ett antal olika egenskaper. Den stabiliserade jordens hållfasthet undersöktes för samtliga blandningar genom enaxliga tryckförsök 1, 7, 14, 28 och 91 dygn efter inblandning. För de tre jordarna lerig silt, lera och lerig gyttja utfördes tryckförsök också 270 dygn efter inblandning. Tryckförsöken utfördes med en vertikal deformationshastighet av 1 mm/min på prover med storleken $\emptyset 50 \times 100$ mm, varvid skjuvhållfastheten utvärderades på normalt vis för kohesionära material som halva värdet av den maximala tryckspänningen. Sprickbild och skjuvplan hos de tryckta proverna ritades av för dokumentation av olikheter i brottfigur.

Enaxliga tryckförsök är relativt enkla att utföra och bedömdes vara de mest lämpliga att använda i det omfattande provningsprogrammet med jämförande provning av samtliga typer av blandningar. Försöken är relativt snabba och utvärderad skjuvhållfasthet bedöms normalt motsvara en odränerad skjuvhållfasthet hos jordmaterial utan att hänsyn tas till sidotryck från omgivande jord.

■ *Direkta skjuvförsök*

Hållfastheten hos stabiliserad lerig silt, lera respektive lerig gyttja undersöktes för några av blandningarna också genom direkta skjuvförsök 14 och 91 dygn efter inblandning. Skjuvförsöken utfördes med en horisontell deformationshastighet av 0,001 mm/min på prover med storleken $\emptyset 50 \times 20$ mm. Skjuvhållfastheten utvärderades vid brott alternativt vid skjuvdeformationer motsvarande 0,15 radianer. Dränerade försök utfördes för blandningar med två olika mängder stabiliseringsmedel medan odränerade försök utfördes på prover från endast en av dessa blandningar.

Skjuvförsöken är också relativt enkla att utföra, men då de tar längre tid i anspråk utfördes dessa på ett begränsat antal jordar med varierande stabiliseringsmedel, mängder och tidpunkter. Provkropparna konsolideras och provas vid olika normalspänningar och utvärderad odränerad eller dränerad skjuvhållfasthet antas normalt gälla för motsvarande spänningsnivå på aktuellt djup under markytan.

■ *Triaxialförsök*

Ett antal triaxialförsök utfördes på stabiliserad lerig silt, lera och lerig gyttja för en viss mängd stabiliseringsmedel. Proverna konsoliderades anisotropt vid 2 - 3 olika spänningsnivåer med ett förhållande mellan horisontell och vertikal effektivspänning av 0,8. För att få god vattenmättnad användes ett relativt högt porvattentryck av 300 - 400 kPa vid konsolideringen. Både dränerade och odränerade försök utfördes, till största delen ca 115 dygn efter inblandning. Blandningar med kalk-cement och lerig silt respektive lerig gyttja provades dock vid ytterligare ett tillfälle ca 60 dygn efter inblandning. Använd vertikal deformationshastighet var 0,017 mm/min och provstorleken \emptyset 50 x 100 mm.*)

Triaxialförsök medger en provning av stabiliserad jord under förhållanden som mer avspeglar de som råder i fält, men kräver samtidigt en större och mer kvalificerad arbetsinsats än de ovan nämnda metoderna. Med tillgänglig utrustning kunde endast ett prov per dygn provas vilket innebar att antalet försök också i viss mån måste begränsas för att inte få onödigt stor spridning i resultat på grund av tillväxt i hållfasthet med tiden.

Provningarnas omfattning och uppläggning framgår närmare av **Tabell 5.1**.

*) *Anm.:* I samband med triaxialförsök på jord används ofta portrycksfaktorn B som ett mått på vattenmättnadsgraden. Ett högt B-värde pekar då på en hög mättnadsgrad och värdet 1,0 motsvarar fullständig vattenmättnad. B-värdet är dock också beroende av jordmaterialets kompressibilitet och i mycket fasta jordar erhålls normalt inte värden i storleken 1,0. I den aktuella försöksserien erhöles B-värden varierande mellan 0,3 och 1,0 trots att vattenmättnadsgraden genomgående var hög. B-värdet var således ingen bra indikator för vattenmättnadsgrad i de stabiliserade jordarna. Provning av B-värdet innebär att provet momentant utsätts för en allsidig tryckökning. Blir portrycksresponsen (B-värdet) då låg medför detta att provet utsätts för en effektivspänningsökning, vilket kan försvåra tolkningen av den efterföljande provningen. B-värdet är således inte en relevant parameter för stabiliserad jord och utvärderingen av detta bör undvikas.

5.2.2 Kompressionsförsök

Kompressionsmoduler hos stabiliserad lerig silt, lera och lerig gyttja undersöktes genom ödometerförsök, typ CRS, 14 och 91 dygn efter inblandning. Försöken begränsades till en tillsatsmängd för respektive stabiliseringsmedel, se Tabell 5.1. Försöken utfördes under dränerade förhållanden med förhindrad sido-deformation och med en konstant vertikal deformationshastighet av 0,002 mm/min. Provdimensionen var $\text{Ø}50 \times 20$ mm.

Deformationsegenskaperna studerades också utifrån de spänning-deformations-samband som erhöles vid de enaxliga tryckförsöken respektive triaxialförsöken.

CRS-försök används normalt för utvärdering av de moduler som används vid beräkning av konsolideringssättningar i lös jord. Utvärdering av E-moduler ur spännings-deformationssamband vid triaxial- eller enaxliga tryckförsök kan göras dels för att beräkna sättningar vid lägre horisontalspänningar och viss sidodeformation hos jorden dels för att skapa en uppfattning om kompressionsmodulens storlek och variation med tiden vid stabilisering, då denna kan förväntas variera på motsvarande sätt som E-modulen. Då sättningar i verkligheten alltid sker under dränerade förhållanden kan emellertid moduler utvärderade ur enaxliga odränerade tryckförsöken aldrig användas direkt för beräkning av sättningar utan att först en bedömning görs av troliga spänningar i jorden och inverkan av dränerade förhållanden.

För att få en uppfattning om inverkan av krypeffekter efter pålastning och konsolidering av stabiliserad jord utfördes dessutom ett mindre antal kompletterande triaxialförsök med konstant belastning av prover under längre tid. De senare försöken utfördes på kalk-cementstabiliserad siltig lera samt en kalk-cementstabiliserad lera från västra Sverige (ej densamma som användes i projektet i övrigt) som konsoliderades för låga spänningar ($\sigma'_3 = 20$ kPa, $K_0 = 0,8$) och därefter belastades med ca 1/3 - 1/2 av sin brottlast.

5.2.3 Permeabilitetsförsök

Permeabiliteten hos stabiliserad lerig silt, lera och lerig gyttja undersöktes genom permeabilitetsförsök 14 och 91 dygn efter inblandning. Försöken begränsades till en tillsatsmängd för respektive stabiliseringsmedel, se Tabell 5.1. Prover med dimensionen $\text{Ø} 50 \times 50$ mm placerades under ett allsidigt celltryck av ca 20 kPa och utsattes för ett porövertryck motsvarande ca 20 kPa vid provets underkant. Genomströmningen av vatten mättes vid provets överkant och efter en mättningsperiod som varierade mellan ett par dagar och upp till drygt en månad,

beroende på typ av jord och stabiliseringsmedel, utvärderades ett relativt konstant värde på permeabiliteten.

Vid utförande av CRS-försöken, se ovan, erhöles också ett mått på permeabiliteten hos proverna. Proverna vid dessa försök var emellertid inte helt vattenmättade varför storleken på dessa permeabilitetsvärden kan förväntas skilja sig från dem enligt permeabilitetsförsöken.

5.2.4 Temperaturmätningar

I Etapp I utfördes ett antal temperaturmätningar i stabiliserad lerig silt, lera och lerig gyttja omedelbart efter inblandning och fram till dess temperaturen sjunkit till normal rumstemperatur (Holmqvist m fl, 1991). Dessa mätningar som omfattade stabiliseringsmedlen cement, kalk och kalk-cement redovisas till en del också i denna rapport, men då med koppling till övriga undersökningar som utförts i Etapp II. Stabiliserad jord packades i termosflaskor direkt efter det blandningsarbetet avslutats och första temperaturregistreringen kunde göras ca 7 à 10 minuter efter inblandningsstart. Temperaturmätningarna utfördes för en tillsatsmängd per stabiliseringsmedel.

5.3 RESULTAT

5.3.1 Densitet

Densiteterna för jordarterna vid inblandning med de olika typerna av bindemedel har sammanställts i Bilagorna 5.1 - 5.10.

Jämförelser kan göras med ursprunglig jorddensitet, med ökande mängd bindemedel och med typ av bindemedel. Vid tillverkning av prover konstaterades att konsistensen hos blandningarna kunde bli mycket olika, jämför **Tabell 5.3**. Detta kan i sin tur orsaka varierande resultat vad gäller blandningens homogenitet. Erfarenheten från blandning av vanlig betong är att vissa konsistenser kan vara avgörande för blandningens homogenitet. Med den typ av laboratorieblandare som användes, kan alltför styva och sega blandningar ibland vara svåra att få helt homogena. Blandningar med "kladdig" konsistens kan vara svåra att packa in i hylsor vilket medför att "luftfickor" ibland förekommer i proven. Skillnader i densitet uppstod mellan blandningar med olika mängd och typ av bindemedel. Inom respektive jordart med en bestämd bindemedelsmängd förekom dessutom spridning i densiteterna mellan de olika provkropparna. Motsvarande högre eller lägre skjuvhållfasthetsvärden kan dock inte konstateras för enstaka avvikande densitetsvärden hos proverna.

Normalt bör densiteten vara något högre med bindemedel eftersom viss vattenvolym ersätts med fasta strukturer. Den angivna densiteten hos ursprunglig jord representerar emellertid ett bedömt medelvärde från ett begränsat antal prover i det aktuella jordlagret och kan därför förväntas avvika något från verklig medeldensitet hos jordmaterialet. Resultaten visar med några få undantag på ungefär samma densitet hos stabiliserad som hos ursprunglig jord. Densiteten var något lägre efter stabilisering av de siltiga jordarna, den salthaltiga leran och den leriga gyttjan och något högre för stabiliserad lera, kvicklera, sulfidlera och torv.

En svag tendens till ökande densitet med ökande mängd bindemedel kan märkas för de flesta blandningarna. Den tydligaste ökningen med ökande mängd bindemedel finns hos kalkstabiliserade leror utan organiskt innehåll. Följande mer markanta trender eller avvikelser kan märkas :

- Lerig silt. Med kalk-cement blev det en betydande minskning av densiteten med doseringen 13 % (150 kg/m³). Med enbart kalk blev det en markant minskning av densiteten med ökande tillsats av kalk från ca 1,9 t/m³ till ca 1,6 t/m³.
- Lera med hög sulfidhalt. Stora spridningar i densitet erhöles med alla tre bindemedlen vilket tyder på svårigheter att blanda helt homogent.
- Torv. I torv prövades bindemedelsmängder från 48 kg/m³ till 480 kg/m³, huvudsakligen med tillsatts av cement och kalk-cement men ett par blandningar gjordes också med tillsats av sand + cement. Samtliga densiteter blev högre än ursprunglig jorddensitet och klart ökande med ökande mängd bindemedel.

5.3.2 Temperaturförlopp

Genom att mäta temperaturstegringen direkt efter inblandning av stabiliseringsmedlet kan man konstatera om jorden innehåller ämnen som inverkar retarderande på reaktionen. Temperaturstegringen bestäms av bindemedelstyp och -mängd i förhållande till mängden vatten och torrsubstans. Den maximala temperaturen kan alltså beräknas om man känner blandningens sammansättning och termosens värmeläckage. Om jorden innehåller retarderande ämnen blir temperaturmaximum lägre och förskjutet i tiden. Ett antal begränsade provningar gjordes i Etapp I för att illustrera metodens möjligheter. Materialens utgångstemperatur var 8 °C. Blandning och lagring gjordes vid 20 °C, men kan naturligtvis även göras vid 8 °C för bättre jämförelse med verkliga förhållanden.

I **Figur 5.2 a-c** kan man se att leran har en fördröjande effekt på temperaturutvecklingen jämfört med lerig silt. Detta kan bero på vattenhalten eller på retarderande ämnen, och kan endast verifieras med beräkningar eller jämföras med mätningar på prover med kända egenskaper. Man kan också bedöma hur olika bindemedelsblandningar påverkar temperaturutvecklingen. Detta illustreras tydligast för blandningarna med lerig silt i **Figur 5.2 a**. Med denna typen av mätningar kan man bedöma hur mycket kalk, som skall ingå i stabiliseringsmedlet, för att en önskad starttemperatur skall uppnås. Som tidigare nämnts vet vi att temperaturen har stor inverkan på puzzolanreaktionernas hastighet. Om starttemperaturen blir låg på grund av retarderande ämnen har detta speciellt stor betydelse vid stabilisering med kalk.

5.3.3 Hållfasthetsegenskaper enligt enaxliga tryckförsök

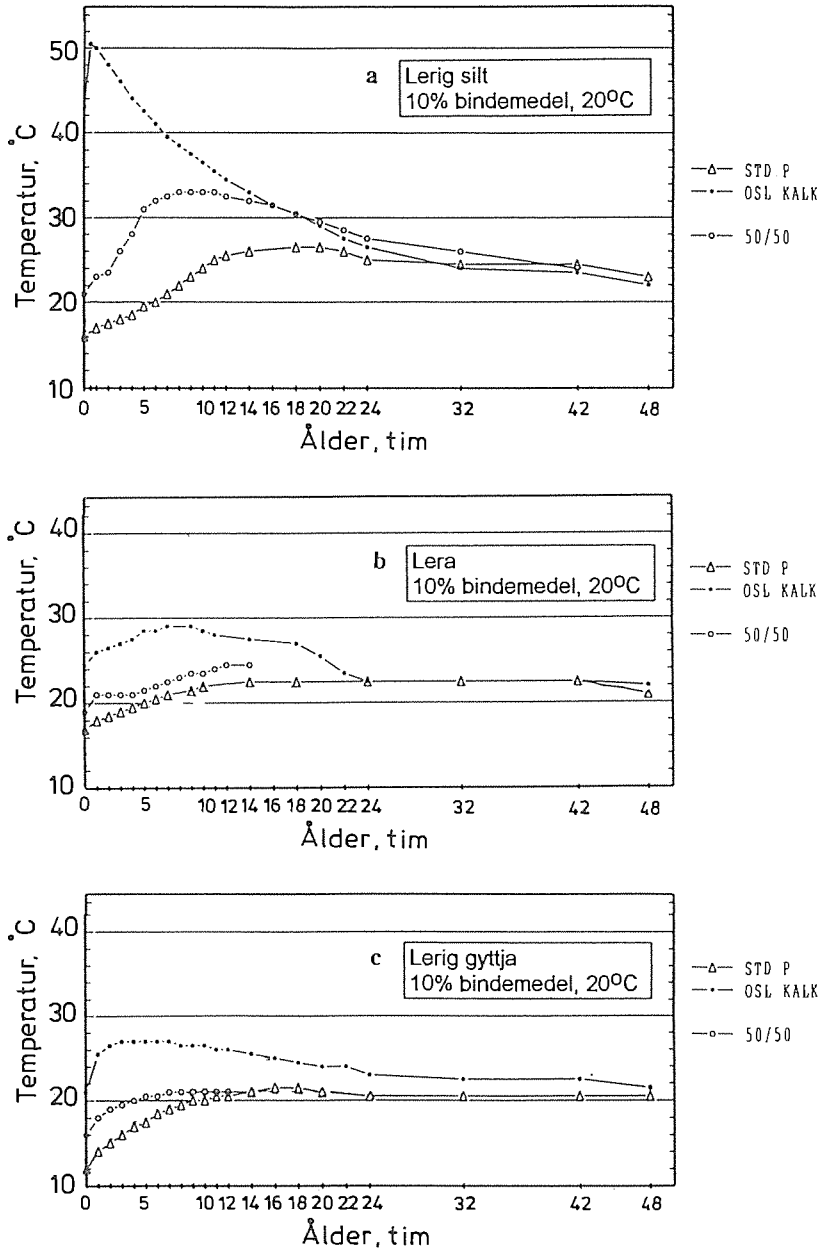
Samtliga resultat från de enaxliga tryckförsöken redovisas som stapeldiagram i Bilaga 5.11 - 5.20.

Såsom brukligt inom geotekniken redovisas resultaten från de enaxliga tryckförsöken i form av skjuvhållfasthet. Det antas att skjuvhållfastheten är lika med halva tryckhållfastheten q_c , dvs $\tau = 0,5 \cdot q_c$. Antagandet förutsätter att brott uppkommit i provkropparna genom skjuvning längs ett plan som lutar 45° mot tryckriktningen. De tryckta cylindrarna uppvisade dock endast i ungefär hälften av fallen ett sådant brott, oavsett om de stabiliserats med kalk eller cement. Redovisning av tryckhållfasthetsvärden är således mer relevant.

Hållfasthetsutveckling - tidig hållfasthet

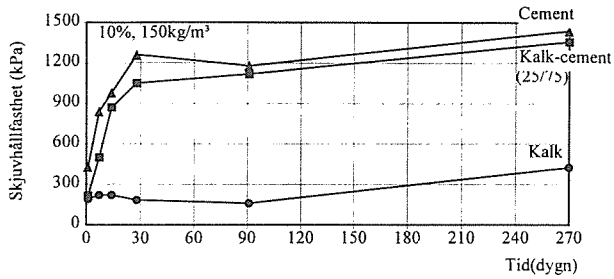
Hållfasthetsprovningar gjordes vid 1, 7, 14, 28, och 91 dygns ålder. I några fall provades dessutom vid 270 dygn men då endast med en mängd bindemedel. I **Figur 5.3** redovisas hållfasthetstillväxten för samtliga jordar vid 10 - 25 % inblandning av kalk, kalk-cement eller cement. I Bilaga 5.11 - 5.20 och **Figur 5.4** finns samtliga resultat, även vid andra bindemedelsmängder, redovisade.

I det studerade intervallet är det en generell iakttagelse att cement ger bäst tidig hållfasthet och att kalkens hållfasthetsuppbyggnad är långsammare men pågår under längre tid. Detta är också i linje med vad som kan förväntas med hänsyn till de olika reaktionsmekanismerna. För att ta hänsyn till den högre temperatur som åtminstone de första dyggen erhålls i jorden vid stabilisering med kalk, förvarades provkropparna med kalk vid 20°C , medan de med cement och kalk-cement förvarades vid 8°C . Cementreaktionens hastighet är liksom puzzolanreaktionen temperaturberoende. Vid jordstabilisering kan det därför vara gynnsamt att skapa en förhöjd starttemperatur för cementreaktionen med hjälp av kalk och



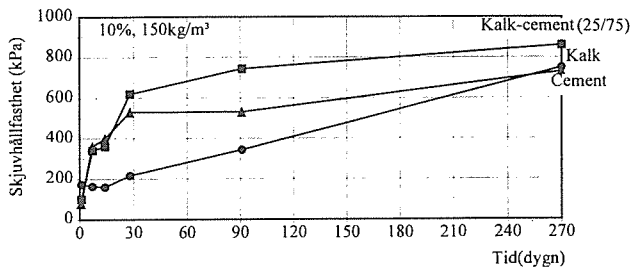
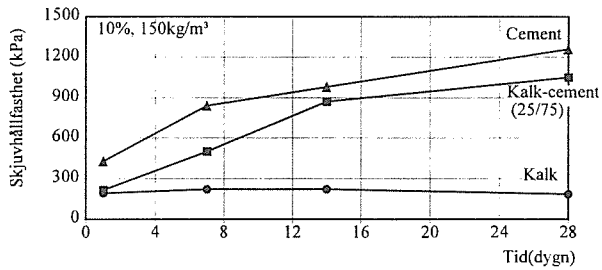
Figur 5.2 a-c. Temperaturutveckling med olika bindemedel och jordarter (termosmetod).

Figure 5.2 a-c. Temperature development with different binders and soil types (thermos method).



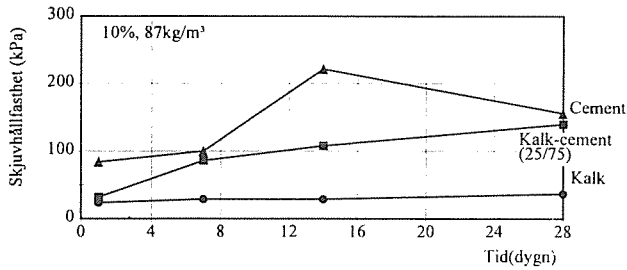
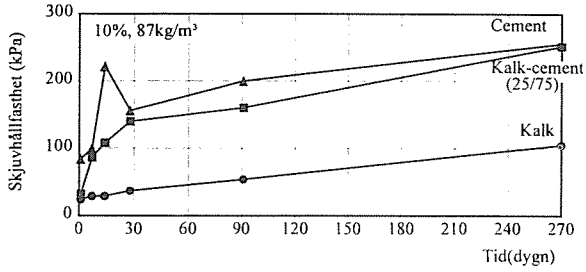
Figur 5.3. Hållfasthetsutveckling hos stabiliserad lerig silt.

Figure 5.3. Strength development in stabilised clayey silt.



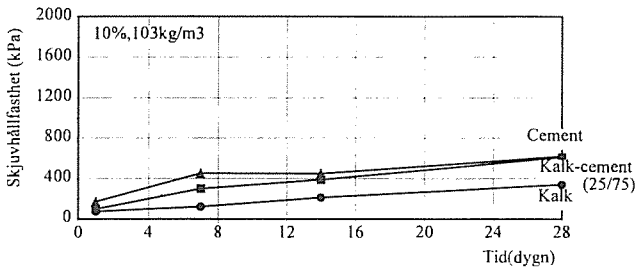
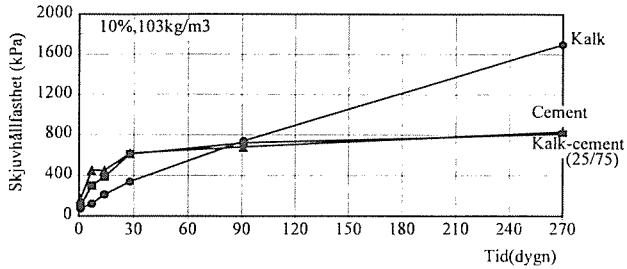
Figur 5.3. Hållfasthetsutveckling hos stabiliserad siltig lera.

Figure 5.3. Strength development in stabilised silty clay.



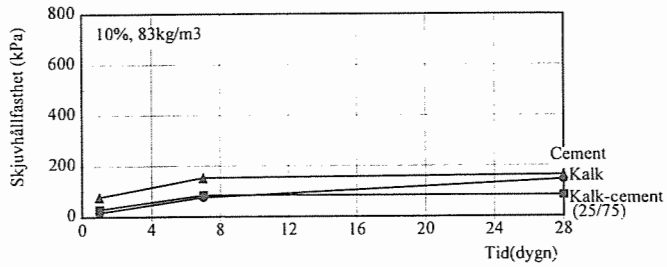
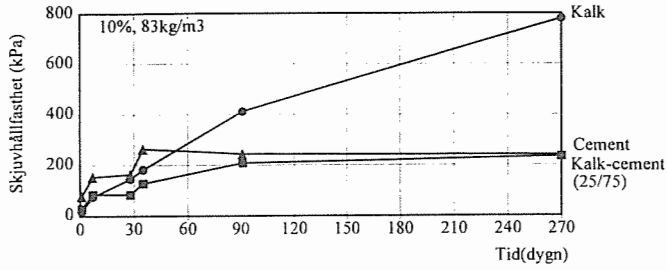
Figur 5.3. Hållfasthetsutveckling hos stabiliserad lera.

Figure 5.3. Strength development in stabilised clay.



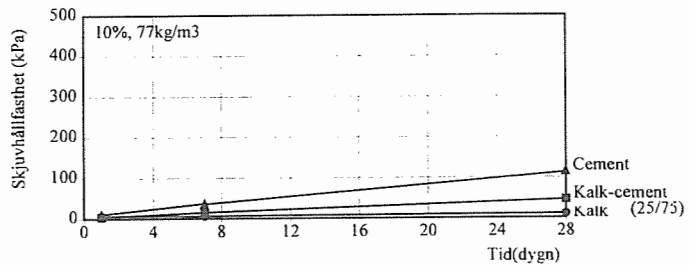
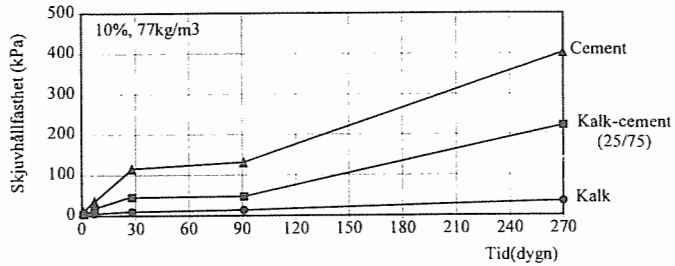
Figur 5.3. Hållfasthetsutveckling hos stabiliserad kvicklera.

Figure 5.3. Strength development in stabilised quick clay.



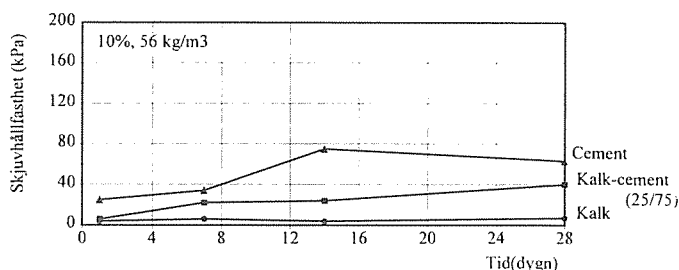
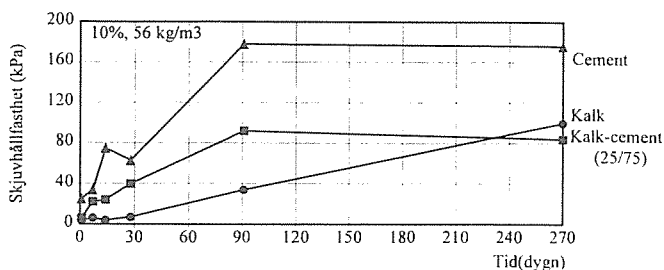
Figur 5.3. Hållfasthetsutveckling hos stabiliserad lera med hög salthalt.

Figure 5.3. Strength development in stabilised clay with high salt content.



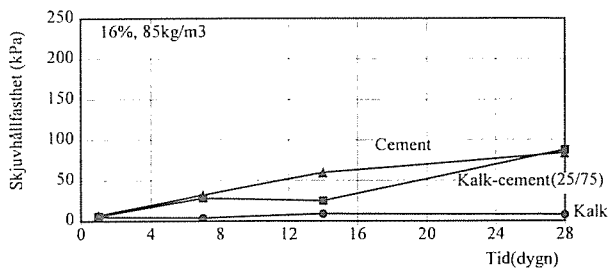
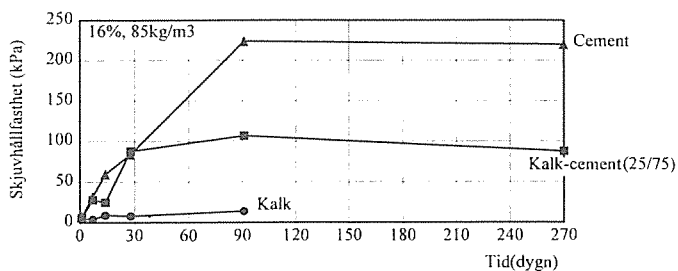
Figur 5.3. Hållfasthetsutveckling hos stabiliserad lera med hög sulfidhalt.

Figure 5.3. Strength development in stabilised clay with high sulphide content.



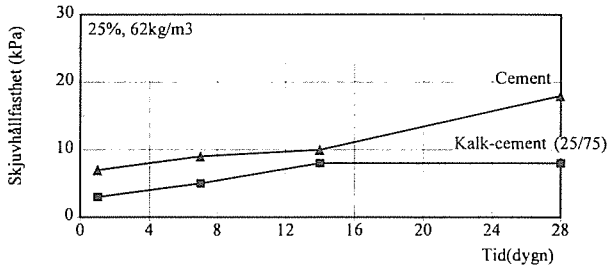
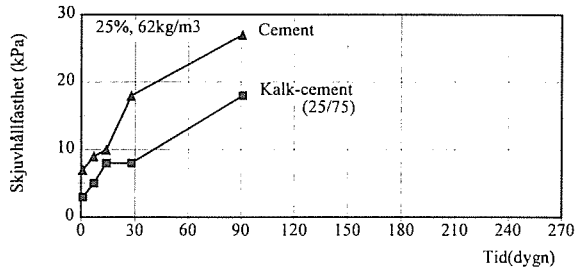
Figur 5.3. Hållfasthetsutveckling hos stabiliserad gyttjig lera.

Figure 5.3 Strength development in stabilised gyttja clay.



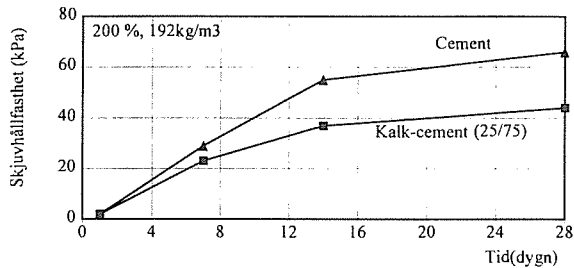
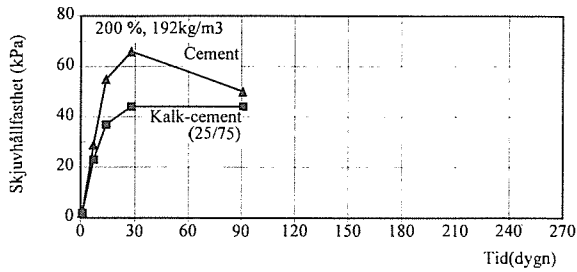
Figur 5.3. Hållfasthetsutveckling hos stabiliserad lerig gyttja.

Figure 5.3. Strength development in stabilised clayey gyttja.



Figur 5.3. Hållfasthetsutveckling hos stabiliserad gyttja.

Figure 5.3 Strength development in stabilised gyttja.



Figur 5.3. Hållfasthetsutveckling hos stabiliserad torv.

Figure 5.3. Strength development in stabilised peat.

därmed få en ännu snabbare tidig hållfasthetstillväxt hos cement-jordblandningen än vad de vid 8 °C lagrade proven givit.

Vid jämförelser med värden från kalkstabiliserade prover vid 90 dygn och än mer vid 270 dygn måste generellt påpekas att dessa lagrats vid 20 °C under periodens hela längd. Denna temperatur överstiger klart den som normalt erhålls vid dessa tidpunkter i fält. Hållfasthetstillväxten har därför varit betydligt snabbare än vad som kan förväntas vid temperaturer motsvarande dem som normalt uppnås i fält.

Vid beskrivning av hållfasthetstillväxtens förlopp kan de studerade jordarna indelas i fem grupper enligt nedan.

■ *Lerig silt, siltig lera och lera*

Dessa jordar kännetecknas av snabb hållfasthetstillväxt under de första dygna med cement eller kalk-cement. I **Figur 5.5** visas vid åldern 7 och 14 dygn uppnådd stabiliseringseffekt, d v s förhållandet mellan hållfastheterna för stabiliserad och ostabiliserad jord. Bindemedelsmängden är 10 %.

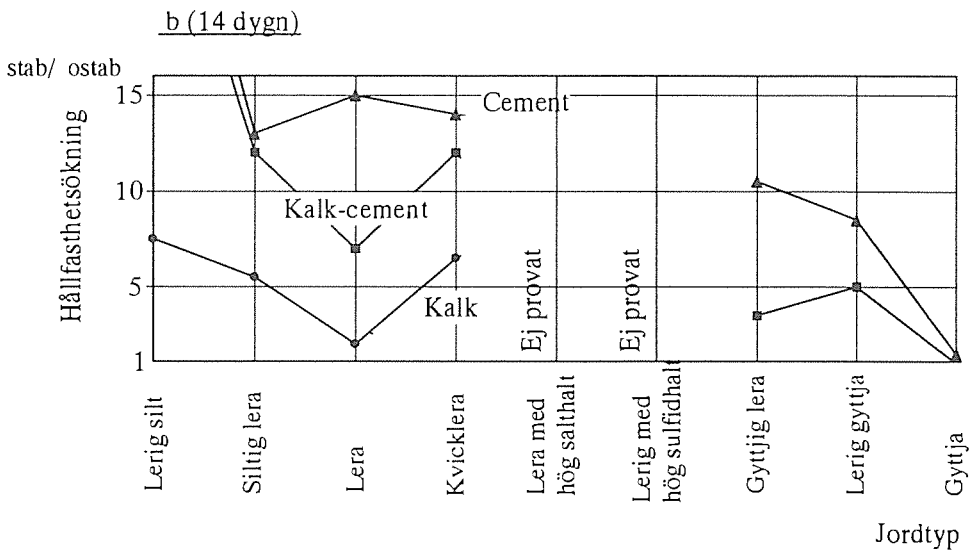
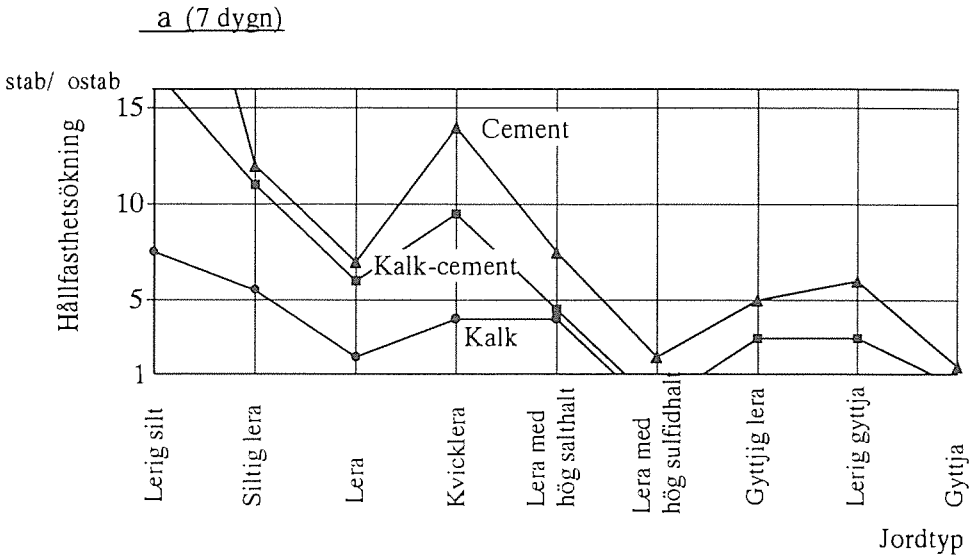
Tiden från 28 till 270 dygn innebar en långsam men stabil hållfasthetstillväxt på hög nivå för cement och kalk-cement. Kalken hade också en stabil, med cement och kalk-cement parallell utveckling, men på en lägre nivå, utom i den siltiga lera där kalken vid 270 dygn uppnått ungefär samma hållfasthet som cement. (Jämför dock också kommentarer rörande avvikande värden under avsnittet ”Hållfasthet och jordtyp” nedan.)

■ *Kvicklera och lera med hög salthalt*

Dessa jordtyper uppvisade mycket snabb hållfasthetstillväxt för tiden upp till 14 à 28 dygn med alla tre bindemedlen, allra snabbast med cement. För tiden därefter och till 270 dygn var tillväxten relativt långsam för cement och kalk-cement medan kalken visade en kraftig hållfasthetstillväxt och nådde vid 270 dygn en mycket hög nivå, ungefär dubbla hållfastheten eller mer jämfört med cement eller kalk-cement.

■ *Lera med hög sulfidhalt*

Denna jordtyp hade för alla tre bindemedlen en obetydlig hållfasthetstillväxt under den första veckan. Hållfastheten vid inblandning av kalk eller kalk-cement var t o m lägre än den hos ostabiliserad, ostörd jord, se **Figur 5.5**. Därefter vidtog en relativt snabb tillväxt upp till 270 dygn för främst cementproven. Hållfastheten vid denna tidpunkt var i paritet med vad som nåddes i leror utan sulfid.



Figur 5.5. Stabiliseringseffekt (stab/ostab) vid 7 dygn (a) och 14 dygn (b). Bindemedelsmängd 10 %. Värdet < 1 betyder att hållfastheten hos provet varit lägre än den ostabiliserade jordens.

Figure 5.5. Stabilisation effect (stabilised/unstabilised) at 7 days (a) and 14 days (b). Binder proportion 10%. Values less than 1 indicate that the strength of the sample was lower than that of the unstabilised soil.

Prov med enbart kalk har en mycket svag tillväxt under hela mätperioden om 270 dygn och når endast ca 10 % av cementprovets hållfasthet.

■ *Gyttjig lera, lerig gyttja och gyttja*

Den tidiga hållfasthetstillväxten var relativt god med cement, sämre med kalk-cement och obefintlig med kalk. I intervallet 28 till 270 dygn gav alla tre bindemedlen en tillväxt, ju högre andel gyttja desto mer gynnsamt blir det att använda cement. Cement gav en kraftig tillväxt mellan 28 och 91 dygn.

■ *Torv*

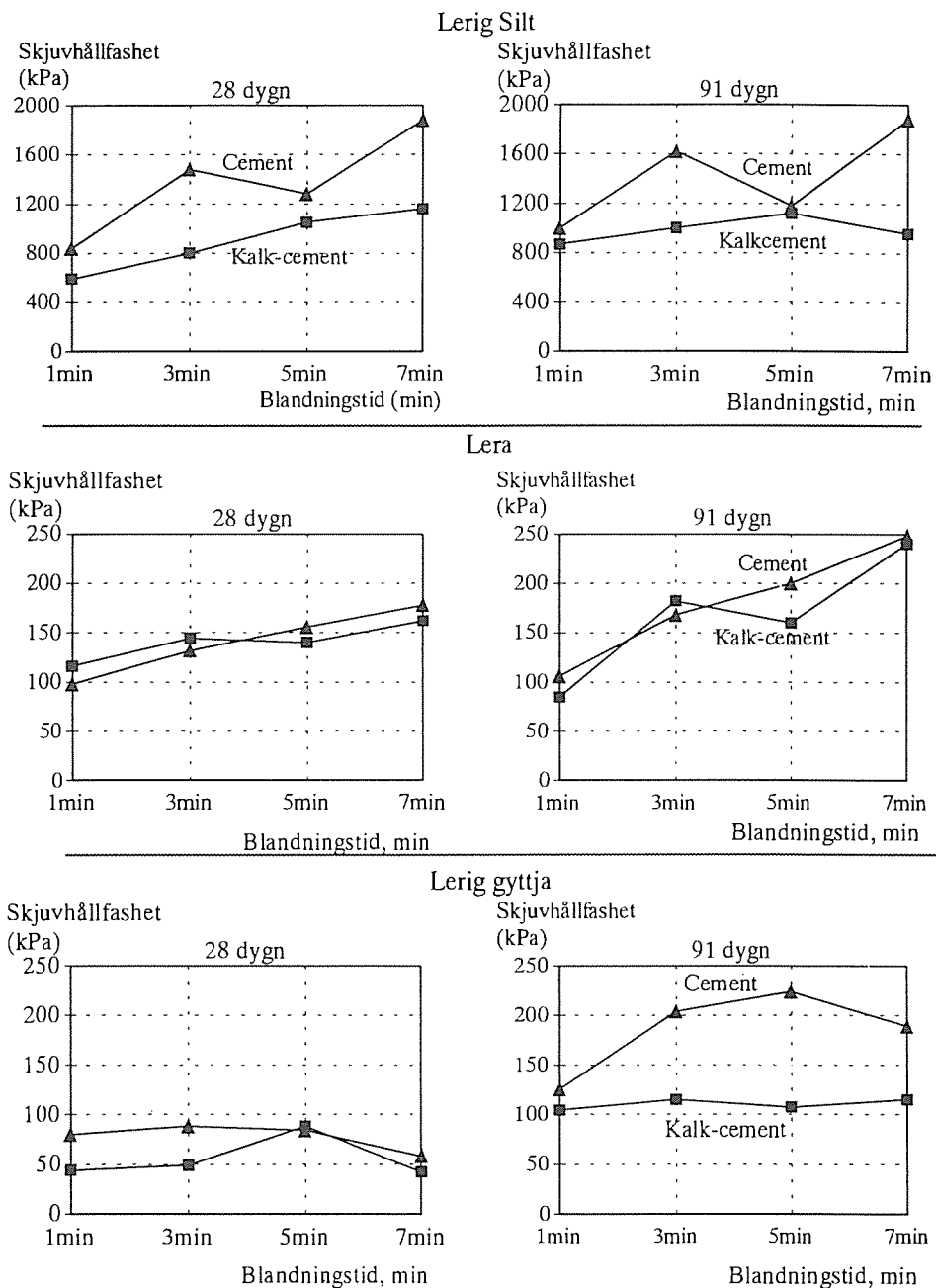
Med torv har endast blandningar med cement och kalk-cement provats eftersom kalk enligt erfarenhet inte kan stabilisera detta organiska material. Med enbart cement, i mängder upp till ca 190 kg/m³ (200 %), erhöles redan efter ca 14 dagar en hållfasthetsnivå, ca 30 - 50 kPa, utöver vilken ingen nämvärd utveckling sker upp till 90 dygns ålder. 270 dygns prov har ej gjorts på torv. Med högre cementhalt, 480 kg/m³ (500 %), erhöles en fortlöpande hållfasthetstillväxt under hela mätperioden och vid 90 dygn uppnåddes en mycket god hållfasthet. Med kalk-cement i mängder upp till 190 kg/m³ erhöles ungefär samma bild som med cement, men med en något lägre hållfastheten.

Hållfasthet och blandningstid

Den normala blandningstiden vid inblandning var 5 minuter i samtliga jordarter. I jordarterna lerig silt, lera och lerig gyttja utfördes dessutom blandning i 1, 3 och 7 minuter för att utröna hur kortare eller längre blandningstid inverkar på hållfastheten hos blandningar med cement. Med kalk tillämpades dock endast 5 min.

I **Figur 5.6** visas uppnådda hållfastheter efter 28 och 91 dygn vid de olika blandningstiderna. I dessa kan man se att hållfastheterna ökade med ökande blandningsarbete utom för lerig gyttja där den sjönk något när blandningstiden förlängdes utöver 5 minuter. För laboratoriearbete med den typ av blandare som användes framgår att lämplig blandningstid för att uppnå effektiv inblandning var ungefär 5 minuter.

Blandningsarbetet i verkliga pelare är mycket viktig för att optimal kvalitet skall uppnås. Med cement ingående i bindemedlet har förlängd blandningstid stor betydelse eftersom man får en jämnare inblandning samtidigt som bindemedlet utnyttjas effektivare. Blandningen med kalk-jord blir i vissa jordarter väldigt styv vilket försvårar inblandningen. I praktiken krävs varierande blandningsarbete vid olika bindemedelstyp, bindemedelsmängd och jordtyp. En effektivise-



Figur 5.6. Hållfastheter vid 28- och 91 dygn med olika blandningstider.

Figure 5.6. Strengths at 28 days and 91 days with different mixing times.

ring av verktygens blandningsarbete skulle kunna leda till en i många fall markant förbättring av pelarnas hållfasthet.

Hållfasthet och jordtyp

Som väntat varierar hållfastheten mycket kraftigt beroende på jordtyp. **Figur 5.7** visar hållfastheten vid 28 och 91 dygns ålder hos jordar som stabiliserats med 10 % bindemedel. Räknat per m³ jord motsvarar detta ca 150 kg/m³ i silten, ca 80-90 kg/m³ i lerorna och ca 50 kg/m³ i leriga gytjtjan.

En jämförelse kan också göras mellan uppnådd skjuvhållfasthet vid en viss mängd tillsatt bindemedel för de olika jordarna. I **Figur 5.8** visas utvärderad hållfasthet för en tillsatsmängd motsvarande 100 kg/m³ (ca 28 kg/m³ pelare 0,6 m) efter 28 dygn. Värdena är interpolerade med avseende på resultat från olika mängder. I **Figur 5.9** visas effekten av olika tillsatsmängder 2 veckor till 3 månader efter inblandning.

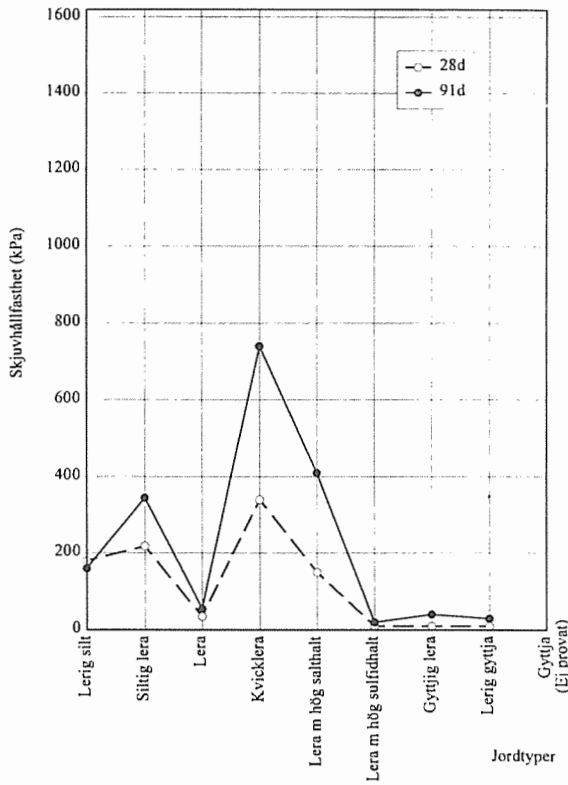
Med större procentuell andel bindemedel, 70 %, motsvarande 175 kg/m³, uppnåddes vid stabilisering med cement mycket god effekt även i ren gytjtja, ca 150 kPa efter 28 dygn.

Även i torv uppnåddess betydande effekt med cement. Inblandning av ca 200 kg/m³ gav en hållfasthet av ca 50 kPa. Med ca 500 kg/m³ erhöles hållfastheter uppemot 500 kPa.

En sammanställning av värdena för de ingående lertyperna med 10 % bindemedel har gjorts i **Tabell 5.4**:

Tabell 5.4. Uppmätt skjuvhållfasthet i kPa 28 och 91 dygn efter inblandning med 10 % bindemedel.

Jordtyp	Kalk		Kalkcement (25/75)		Cement	
	28 d	91 d	28 d	91 d	28 d	91 d
Siltig lera	216	344	620	744	530	531
Lera	37	54	140	160	156	200
Kvicklera	340	740	610	720	620	680
Lera m hög salth	146	412	84	208	164	244
Lera m hög sulfidh	10	14	45	48	116	132
Gyttjig lera	6	34	40	92	63	178

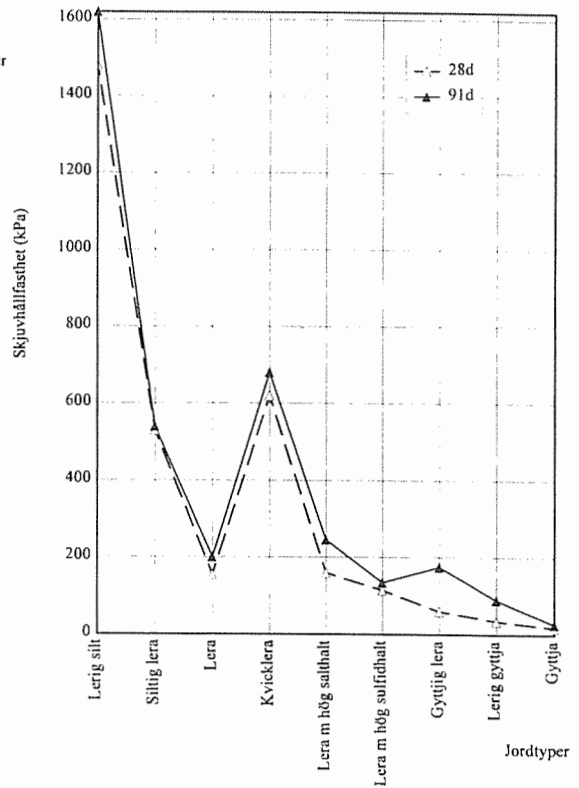


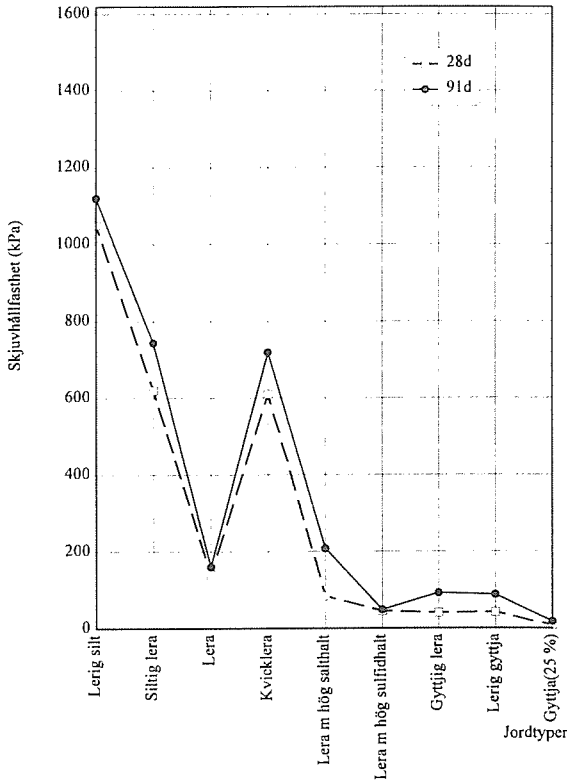
Figur 5.7.a. Skjuvhållfasthet i olika jordar vid stabilisering med 10 % kalk.

Figure 5.7.a. Shear strength in different soils in stabilisation with 10% lime.

Figur 5.7.b. Skjuvhållfasthet i olika jordar vid stabilisering med 10 % cement (25 % i gytja).

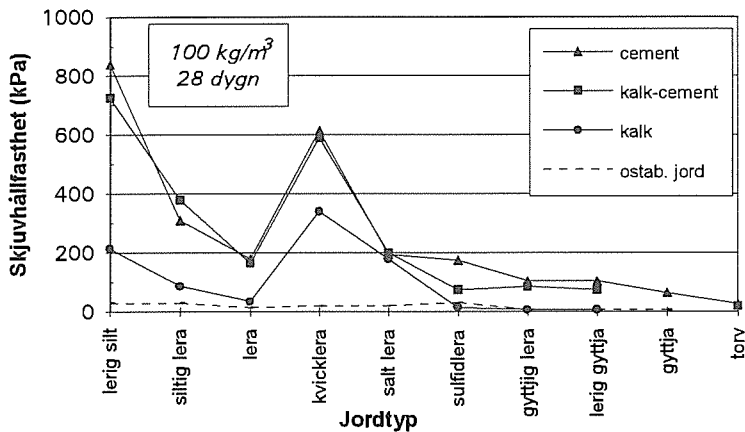
Figure 5.7.b. Shear strength in different soils in stabilisation with 10% cement (25% in gytja).





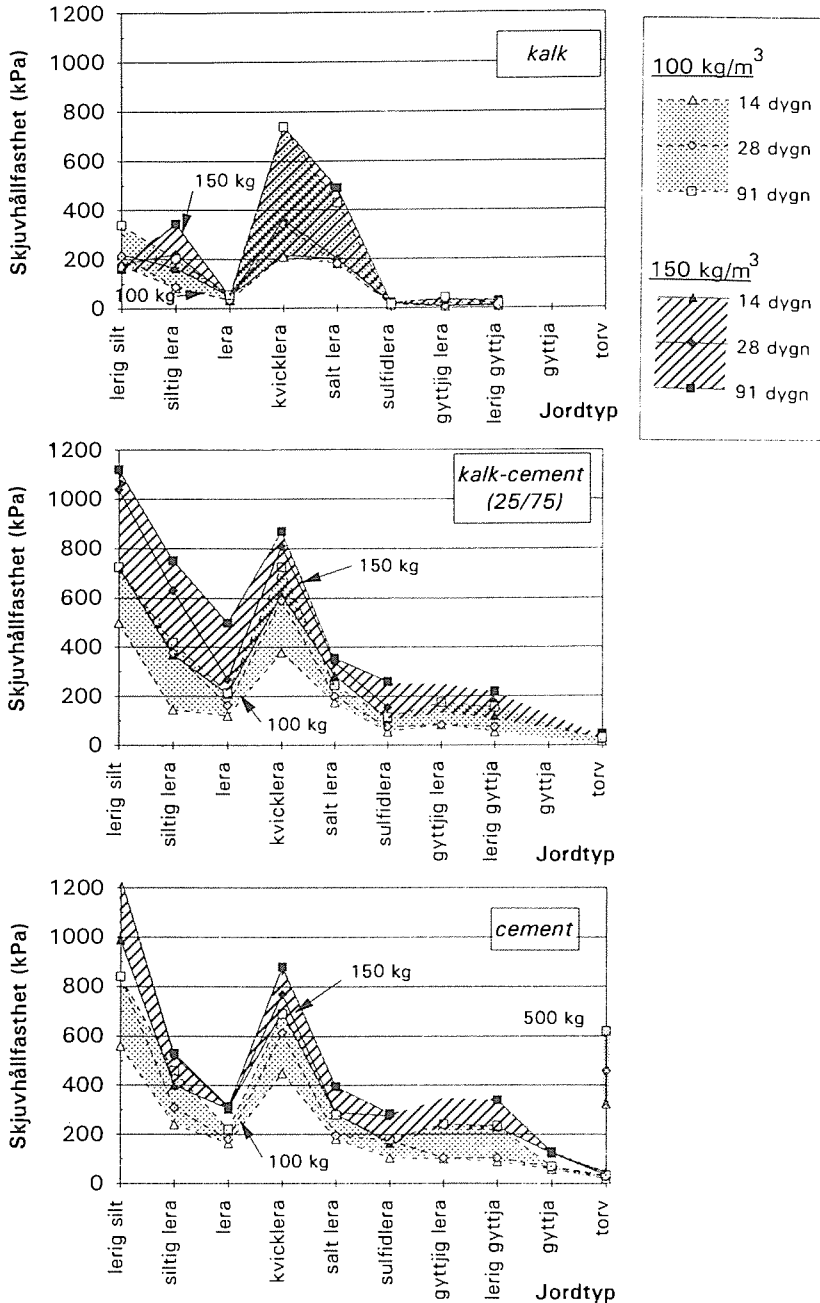
Figur 5.7.c. Skjuvhållfasthet i olika jordar vid stabilisering med 10 % kalk-cement (25 % i gyttja).

Figure 5.7.c. Shear strength in different soils in stabilisation with 10% lime-cement (25% in gyttja).



Figur 5.8. Utvärderad skjuvhållfasthet hos olika stabiliserade jordar 28 dygn efter inblandning, samt skjuvhållfastheten hos respektive jord i ostabiliserat, "ostört", tillstånd.

Figure 5.8. Evaluated shear strength of various stabilised soils 28 days after mixing, and shear strength of each soil in unstabilised (undisturbed) condition.



Figur 5.9. Utvärderad skjuvhållfasthet vid stabilisering med olika mängd stabiliseringsmedel per m³ jord 14 - 91 dygn efter inblandning.

Figure 5.9. Evaluated shear strength in stabilisation with different quantities of stabiliser 14 - 91 days after mixing.

Av sammanställningen framgår att variationen även i jordar som klassas som "lera" är mycket stor. Speciellt gäller detta vid inblandning av enbart kalk där bästa och sämsta resultat inom varje ålder skiljer sig med en faktor 50. Detta ställer således stora krav på jordartsbestämning, framförallt bör sulfidhaltig jord och jord med organiskt material (gyttja) inte stabiliseras med enbart kalk.

Bindemedel i form av kalk-cement och speciellt vid rent cement har betydligt mindre variation mellan lertyperna. Kalk-cementet gav en faktor 15 mellan bästa och sämsta resultat, medan cementet gav faktorn 10 vid 28 dygn och 5 vid 91 dygn.

En avvikelse som behöver kommenteras är att den siltiga leran uppvisar sämre hållfasthet med cement än med kalk-cement. Cement ligger för övriga jordar generellt högre. Orsaken har inte kunnat fastläggas men kan möjligen sammanhänga med ett mindre väl utfört blandningsarbete för cementprovet.

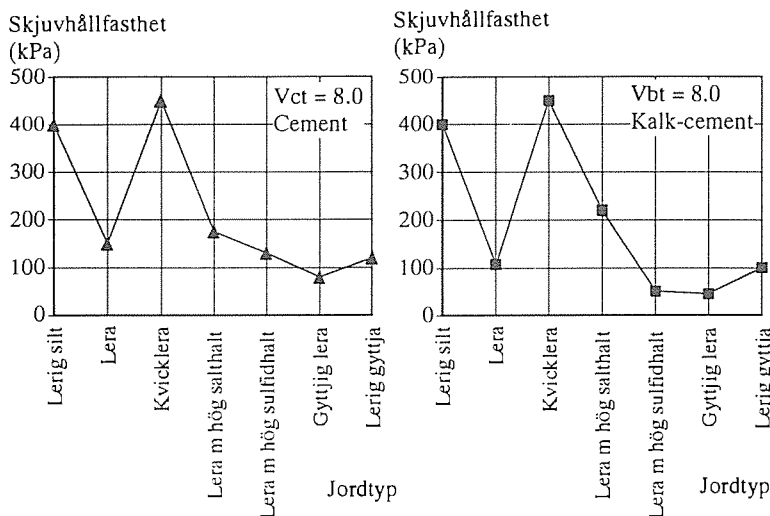
I avsnitt 4 och 6 diskuteras kemiska och fysikaliska skillnader mellan de olika lerornas sammansättning och hur dessa påverkar stabiliseringseffekten. Härutöver finns en faktor som för cementbaserade bindemedel har stor betydelse, nämligen vattenkvoten. Avgörande för vilken styrka en blandning av cement och vatten skall uppnå vid hårdnandet är kvoten mellan mängden vatten och mängden cement, det så kallade vattencementtalet (vct) eller vatten-bindemedelstalet (vbt).

Nedan, under rubriken "Hållfasthet och vattenbindemedelstal", redovisas vbt:s betydelse för hållfastheten hos kalk-cement- och cementstabiliserade prover. Det kan därför vara intressant att neutralisera effekten av olika vattenkvot och studera hur hållfastheterna för de olika jordarna ser ut vid ett visst givet vbt. I **Figur 5.10** redovisas en sådan jämförelse. Med hjälp av diagrammen i avsnitt "Hållfasthet och vattenbindemedelstal" nedan har hållfastheten vid $vbt = 8$ kunnat uppskattas för samtliga jordar utom siltig lera, där mätvärden nära vbt 8 saknas. Åldern är 28 dygn.

Av **Figur 5.10** framgår att även vid lika vbt är skillnaderna mellan de olika jordarterna betydande beroende på olika kemiska och fysikaliska egenskaper, men har dock krympt. Ett dylikt vbt-beroende erhålls inte med enbart kalk.

Hållfasthet och typ av bindemedel

Valet av bindemedel påverkar kraftigt vilken hållfasthet som uppnås. Med enbart cement eller kalk-cement (25/75) uppnås i de flesta provade jordarter betyd-



Figur 5.10. Hållfasthet vid lika vattenbindemedelstal. Ålder 28 dygn.

Figure 5.10. Strength with equal water-binder ratios. Age 28 days.

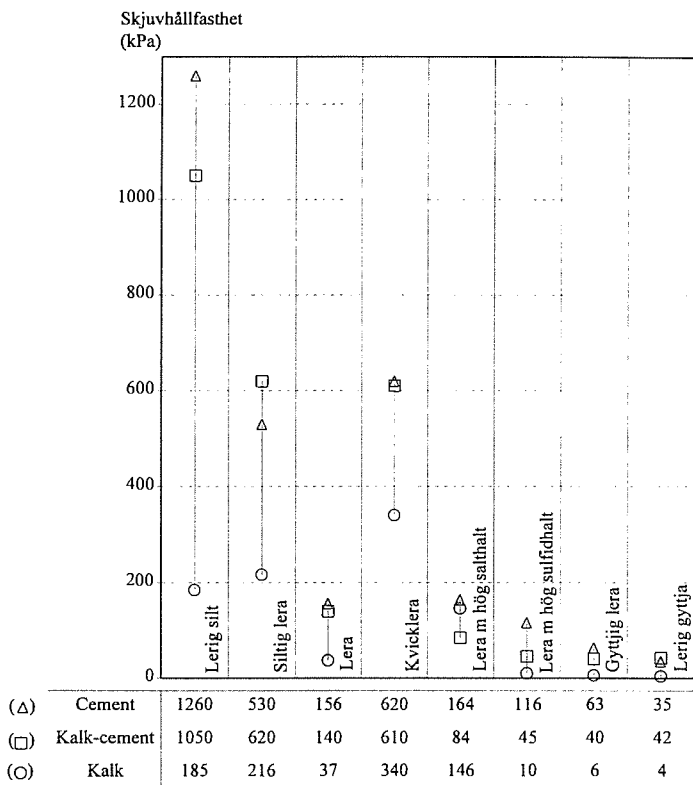
ligt högre hållfastheter jämfört med kalk. Skillnaden mellan cement, alternativt kalk-cement, och kalk är dock mycket olika beroende på jordtyp.

Kalk-cement, och i än högre grad ren cement, ger en kraftig hållfasthetstillväxt under den första månaden, varefter tillväxten som regel avtar något.

Med kalk som stabiliseringsmedel uppnås en viss tillstyvnad momentant som därefter som regel inte förändras i någon större utsträckning under den första veckan eller något mer efter inblandning. Undantaget är lera med hög salthalt och kvicklera där hållfastheten ökade också under denna period och redan efter tre månader var lika hög som med cement eller kalk-cement. Under den därefter följande tidsperioden upp till 9 månader ökade hållfastheten stabilt. Man måste dock här beakta att härdningstemperaturen för kalk var 20 °C, vilket för detta tidsperspektiv är betydligt högre än vad som normalt gäller i fält.

Med undantag av leran med hög salthalt och kvickleran uppnåddes i tidsintervallet en till tre månaders ålder ca 3 - 10 gånger så stor hållfasthet med cement eller kalk-cement som med kalk.

I **Figur 5.11** redovisas hållfastheten vid 28 dygns ålder med 10 % kalk, kalk-cement eller cement. Av figuren framgår att ren cement och blandningar med kalk-cement i den valda proportionen 25/75 i de flesta fall inte skiljer sig markant åt hållfasthetsmässigt.



Figur 5.11. Hållfasthet vid 28 dygn med 10 % bindemedel.

Figure 5.11. Strength at 28 days with 10% binder.

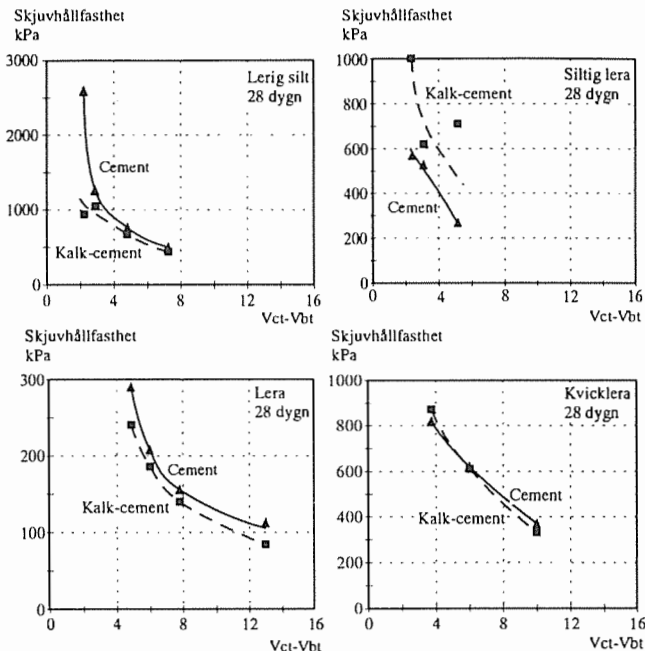
Med cement eller kalk-cement erhålls en ökande effekt med ökande mängd bindemedel, vilket ofta inte är fallet med kalk, jämför avsnitt "Hållfasthet och vatten-bindemedelstal" nedan.

Hållfasthet och vatten-bindemedelstal

Vid utvärderingarna av effekten av inblandning av cement och kalk-cement har klara samband erhållits mellan vattencemental(vct) respektive vattenbindemedelstal(vbt) och den uppnådda hållfastheten i jorden. Vct och vbt uttrycker vikten av den aktuella vattenmängden i förhållande till cement- respektive kalk-cementmängden. Detta förhållande är ett uttryck för bindemedlets "styrka" och ger vid olika värden följaktligen också olika hållfastheter i den förstärkta jorden. I betongsammanhang är vct eller vbt ett mycket ofta använt uttryck. Dock är vct-vbt då storleksmässigt i regel mycket mindre än de värden som har använts

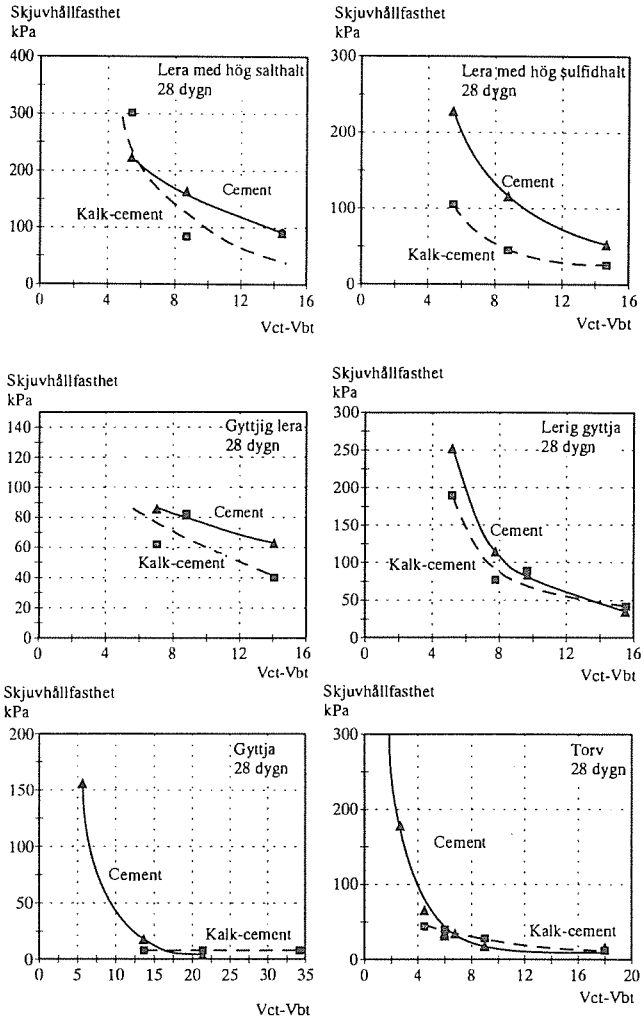
för de i denna undersökning stabiliserade jordarna. För de stabiliserade jordarna varierade vct-vbt mellan 2 och 16 medan värdena i vanlig betong sällan kommer över 1,0 och oftast är emellan 0,40 och 0,70. Trots att vct-vbt i jordarna är ca 4 - 30 gånger större tyder resultaten på att begreppet också är användbart vid jordförstärkning. Olika vct- och vbt-kurvor måste dock upprättas beroende på vilken jordtyp, som förstärks. Hållfastheten i jordarna påverkas också av andra faktorer som innehåll av organiska ämnen, kornstorlek, inblandningens effektivitet etc. Vct- alternativt vbt-diagram kan med fördel användas vid stabilisering med cement eller kalk-cement. Mängden tillsatt kalk har inte fullt så stor inverkan på hållfastheten, jämför Bilaga 5.21 - 5.23, vilket också medfört att endast svaga samband mellan vct-vbt och hållfasthet kunnat observeras.

I **Figur 5.12** visas olika vct-vbt diagram för respektive jordart. I varje diagram finns två kurvor, en för enbart cement och en för kalk-cement (25 /75). Provningsåldern är 28 dygn. Utifrån dessa kurvor kan en bedömning göras om vilken bindemedelsmängd man behöver per meter pelare för att uppnå en viss hållfasthet enligt laboratorieförsök då man känner vattenmängden i jordtypen.



Figur 5.12. Vct-vbt diagram för cement- och kalkstabiliserad jord 28 dygn efter inblandning.

Figure 5.12. Strength in cement and lime-cement stabilised soils at different water binder ratios. Age 28 days.



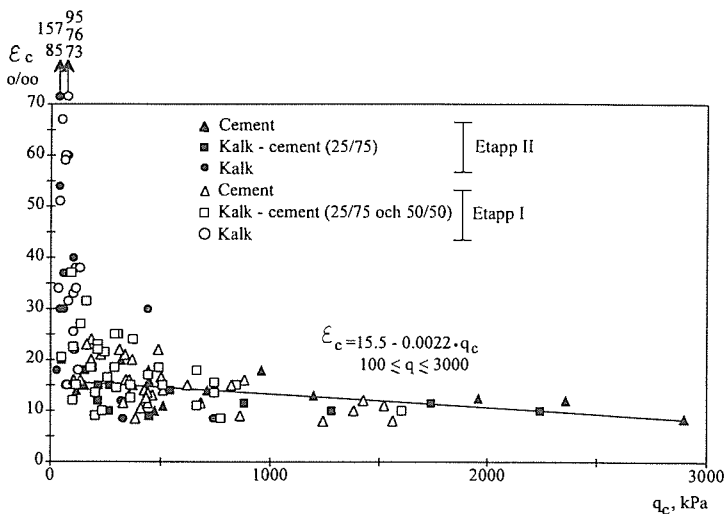
Figur 5.12. (forts) Vct-vbt diagram för cement- och kalkstabiliserad jord 28 dygn efter inblandning

Figure 5.12.(cont.) Strength in cement and lime-cement stabilised soils at different waterbinder ratios. Age 28 days.

I diagram 1 visas kurvor för *lerig silt*, med för cement högsta hållfastheten ca 2500 kPa vid vct ca 2 och 500 kPa vid vct nära 8. För kalk-cement blev motsvarande värden 1000 kPa respektive 500 kPa. I *siltig lera* var det omvänt förhållande med kalk-cement något starkare än med cement. Orsaken till detta förhållande är oklar, jämför dock kommentar på sidan 70. Maximal hållfasthet vid vct-vbt ca 2 var 1000 kPa för kalk-cement och ca 600 kPa för cement. I *lera*, i diagram 3, uppnåddes ett entydigt vct-vbt-samband. Kurvorna med kalk-cement och cement är nästan identiska. Vid vct-vbt ca 4 blev hållfastheten 250-300 kPa och medan den vid vct-vbt ca 12 minskade till ca 100 kPa. Jämnheten tyder också på att blandningen varit mycket homogen. Hållfastheterna i *kvickleran* i diagram 4 var identiska för enbart cement- och kalk-cementblandningarna med nästan rätlinjiga kurvor mellan 800 - 400 kPa och motsvarande vct från fyra till tio. I *lera med hög salthalt*, som visas i diagram 5 var hållfastheterna på ungefär samma nivå som i lera vid det låga vct-vbt=4 medan ca 100 kPa uppnåddes vid vct-vbt på ca 14. Viss ojämnhet mellan mätvärdena uppmättes för kalkcement. I *lera med hög sulfidhalt* i diagram 6 gav enbart cement betydligt högre värden vid låga vct medan vid vct-vbt = 15 hållfastheterna var på ungefär samma nivå, ca 50 kPa. Vid vct-vbt =5 gav enbart cement dubbelt så höga värden jämfört med kalk-cement, drygt 200 kPa mot 100 kPa. *Gyttig lera*, diagram 7, uppvisade inom provat område, vct-vbt 7 - 14, flacka kurvor. Mätresultat saknas för vct-vbt mindre än 7, jämför dock lerig gyttja nedan. För *lerig gyttja* i diagram 8 påminner kurvorna om de som uppnåddes i lera fast på ca 50 kPa lägre nivå och de är dessutom nästan identiska med kurvorna för gyttjig lera i intervallet vct-vbt 7 - 14. Vid vct-vbt under 7 ökade hållfastheten markant. För *gyttja*, diagram 9, finns de flesta data för vct-vbt större än ca 14, där hållfastheterna överlag är låga, mindre än 20 kPa. Ett värde med vct 6 visar på möjligheten att även vid denna jordart nå betydande effekt med cement. *Torv*, diagram 10, ger i vct-vbt intervallet 4 - 18 hållfastheten 15 - 50 kPa. Med cement och vct mindre än 4 ökar hållfastheten kraftigt och når 450 kPa vid vct 2.

Brottdeformation

I **Figur 5.13** har brottdeformationen ϵ_c redovisats som funktion av tryckhållfastheten q_c . Observera att det är tryckhållfastheten och inte skjuvhållfastheten som anges på horisontalaxeln. I figuren redovisas också resultat framkomna i projektets Etapp I. Som framgår av figuren varierade den kalkstabiliserade jordens brottöjning kraftigt, mellan ca 1,5 och 10 % inom q_c - intervallet 20 - 100 kPa. För cement och kombinationer av cement / kalk var spridningen mindre, dock fortsatt relativt stor, mellan ca 0,8 och 3 % inom q_c - intervallet 100 - 500 kPa. Vid högre hållfastheter låg brottöjningen kring 1,0 % med relativt liten spridning. Värden under 0,8 % har inte uppmätts.



Figur 5.13. Samband mellan tryckhållfasthet och brottdeformation. Resultat från Etapp I och II.

Figure 5.13. Relation between compressive strength and failure deformation. Results from Stages I and II.

5.3.4 Odränerad skjuvhållfasthet vid olika spänningsförhållanden

Den odränerade skjuvhållfastheten vid varierande spänningsförhållanden undersöktes genom direkta skjuvförsök och triaxialförsök. Tanken var att utföra ett större antal av de relativt sett något enklare direkta skjuvförsöken och komplettera och kalibrera dessa mot ett mer begränsat antal triaxialförsök. De två försökstyperna visade sig emellertid ge relativt stora skillnader i skjuvhållfasthetsvärden. En trolig orsak till detta är att skjuvningen i de *direkta skjuvförsöken*, som vid provning av ostabiliserad lös lerjord normalt sker i form av en vinkeldeformation, till övervägande delen resulterade i glidning mellan provkroppar och över-/underliggande stämplor, ofta med lokalt brott i anslutning till anliggningspunkten mellan prov och klämring.

Med hänsyn till att utvärderad skjuvhållfasthet enligt skjuvförsöken bedöms som mindre trovärdig görs här inte någon närmare beskrivning av resultaten i absoluta termer. Jämförelser mellan effekten av de olika stabiliseringsmedlen visar att efter den kortare härdningstiden, 14 dygn, var hållfastheten störst hos cementstabiliserade prover, ungefär samma eller något lägre hos kalk-cementstabiliserade prover och lägst hos kalkstabiliserade prover. Vid det senare provningstillfället, 91 dygn efter inblandning, visar resultaten på högre hållfasthet hos kalk-ce-

mentstabiliserad lera jämfört med cementstabiliserad lera och ungefär samma eller något högre hållfasthet hos cementstabiliserad jämfört med kalk-cementstabiliserad lerig silt och lerig gyttna. Kalk som stabiliseringsmedel gav genomgående lägst hållfasthet.

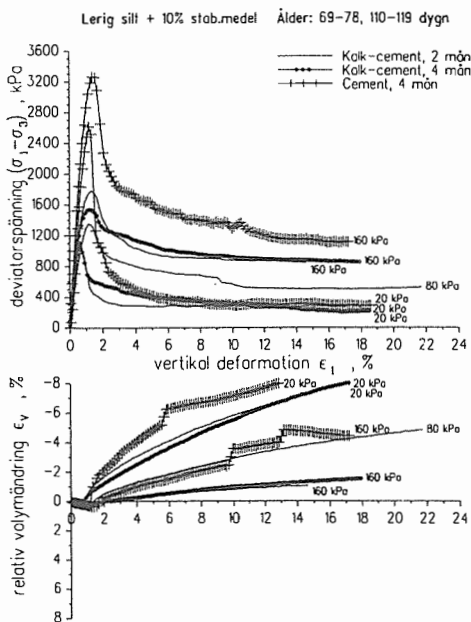
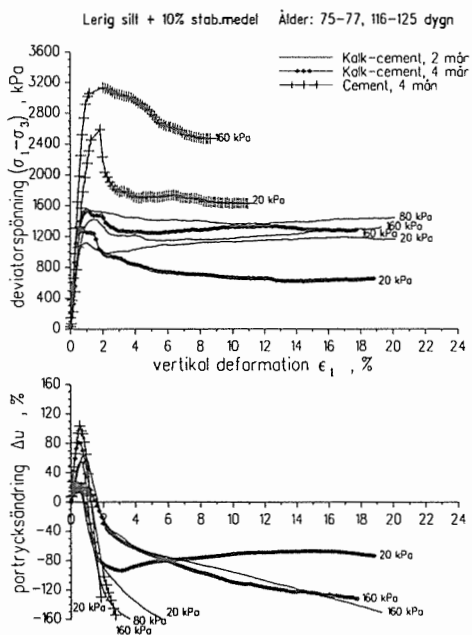
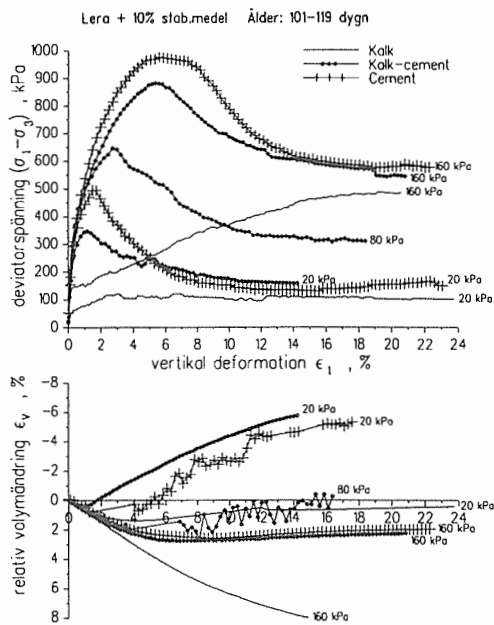
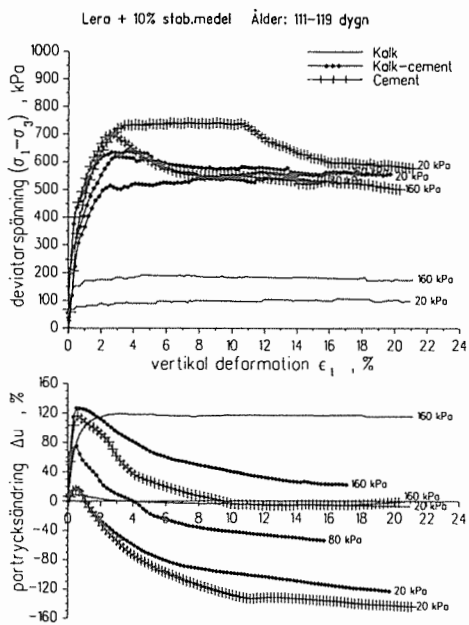
Resultat av samtliga odränerade skjuvförsök visas i Bilaga 5.25.

Resultat av de *odränerade triaxialförsöken* visas i **Figur 5.14 a**, där uppmätt deviatorspänning q , dvs skillnad mellan vertikal- och horisontalspänning, och förändring i portryck u redovisas mot vertikal deformation. Av figuren framgår att de olika materialen uppträder något olika beroende på typ av jord men också på uppnådd hållfasthetsnivå och använd konsolideringsspänning.

Efter en inledande portrycksökning vid ökad belastning sker i nästan samtliga fall en portrycksminskning innan brott inträffar. I samtliga fall med låga konsolideringsspänningar ($\sigma'_3 = 20$ kPa) var portrycksändringarna negativa vid brott eller alldeles därefter, vilket tyder på att den stabiliserade jorden tenderar att dilatara vid brott. Det enda fallet där portrycksminskning inte inträffade var vid högre konsolideringsspänning hos den kalkstabiliserade leran med dess relativt låga hållfasthet.

Användning av ren cement medförde en markant högre uppmätt skjuvhållfasthet jämfört med kalk-cement vid stabilisering av den leriga silten och något högre hållfasthet vid stabilisering av leran. Vid stabilisering av den leriga gyttnan gav emellertid kalk-cement en något högre skjuvhållfasthet än cement vid provningstillfället 4 månader efter inblandning. Triaxialförsöken visade på motsvarande sätt som de enaxliga tryckförsöken på en klart lägre skjuvhållfasthet vid användning av kalk jämfört med övriga stabiliseringsmedel för leran. Resultaten visade vidare på ett spänningsberoende hos den cement- respektive kalk-cementstabiliserade leriga silten med ökande hållfasthet vid ökande konsolideringsspänning. Stabiliserad lera och lerig gyttna visade däremot på skjuvhållfastheter som i stort sett är oberoende av konsolideringsspänningen inom de provade spänningsnivåerna. Uppmätt skjuvhållfasthet hos de tre stabiliserade jordarna vid olika konsolideringsspänning har sammanställts i **Figur 5.15**.

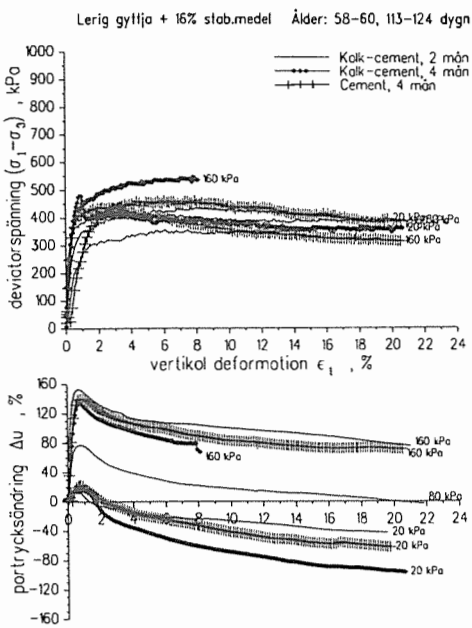
Brott inträffade vid relativt små deformationer, ca 1 à 2 %, för den siltiga leran medan brottdeformationen var något högre, ca 1 - 8 %, för den leriga gyttnan och 3 - 17 % för de olika blandningarna med lera. Något enhetligt mönster vad gäller ökande eller minskande brottdeformation med ökande konsolideringsspänning går inte att fastställa. För den stabiliserade leriga silten gäller att brottde-



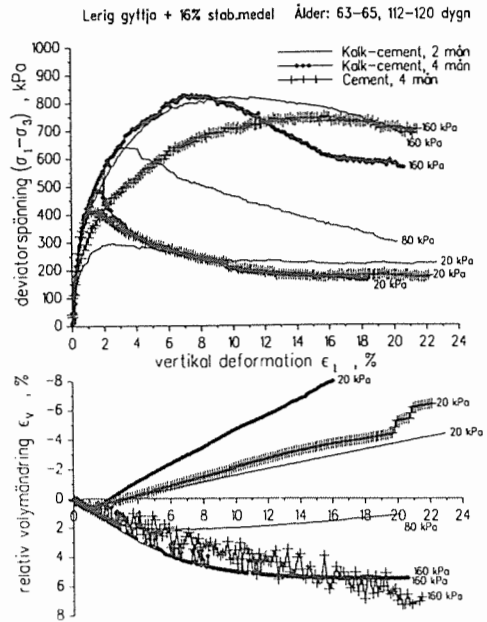
a. odränerade försök

b. dränerade försök

Figur 5.14a, b.



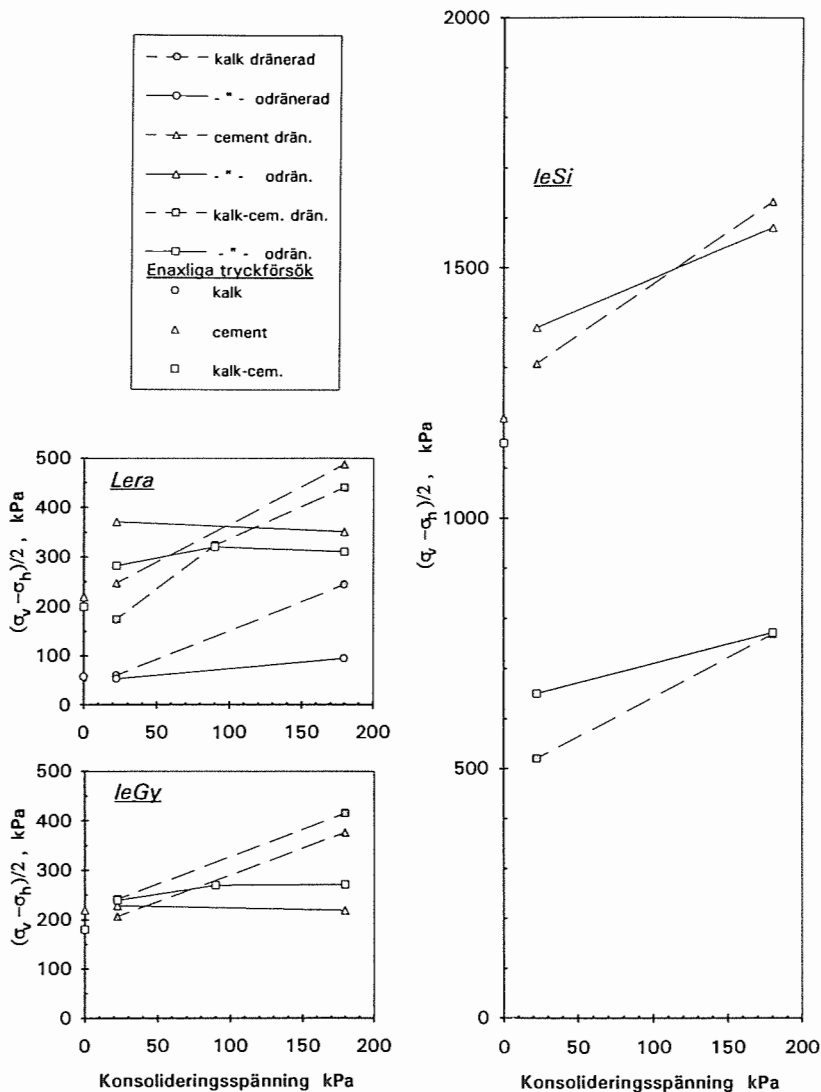
a. odränerade försök



b. dränerade försök

Figur 5.14 a, b. (forts) Resultat av triaxialförsök. Uppmätt deviatorspänning, portrycksändring respektive relativ volymändring vid $\sigma'_{3c} = 20$ kPa, 80 kPa respektive 160 kPa.

Figure 5.14 a, b. (cont.) Results of triaxial compression tests. Measured deviator stress, pore pressure change and relative volume change at $\sigma'_{3c} = 20$ kPa, 80 kPa and 160 kPa respectively.

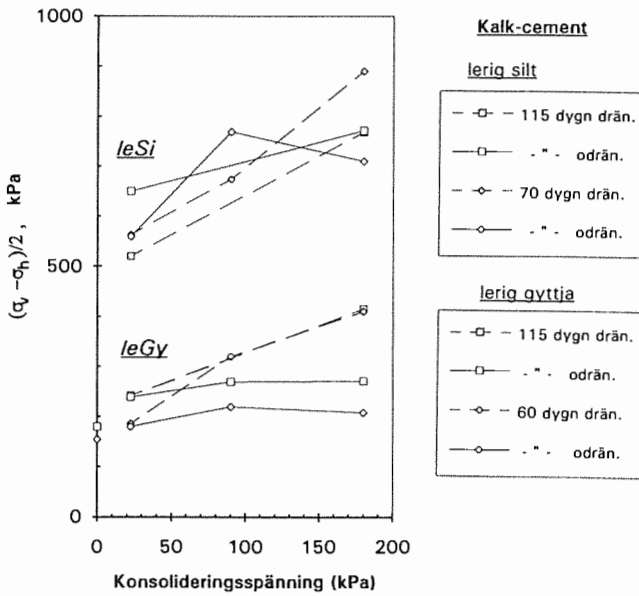


a. 4 månader efter inblandning av 10 % stabiliseringsmedel i lera och lerig silt samt 16 % stabiliseringsmedel i lerig gyttja.

a. Four months after mixing 10 % stabiliser in clay and clayey silt, and 16 % stabiliser in clayey gyttja.

Figur 5.15 Skjuvhållfasthet enligt odränerade och dränerade triaxialförsök vid olika konsolideringsspänning.

Figure 5.15. Shear strength according to undrained and drained triaxial compression tests with different consolidation stress.



b. 2 månader respektive 4 månader efter inblandning av 10 % respektive 16 % kalk-cement i lerig silt och lerig gyttja.

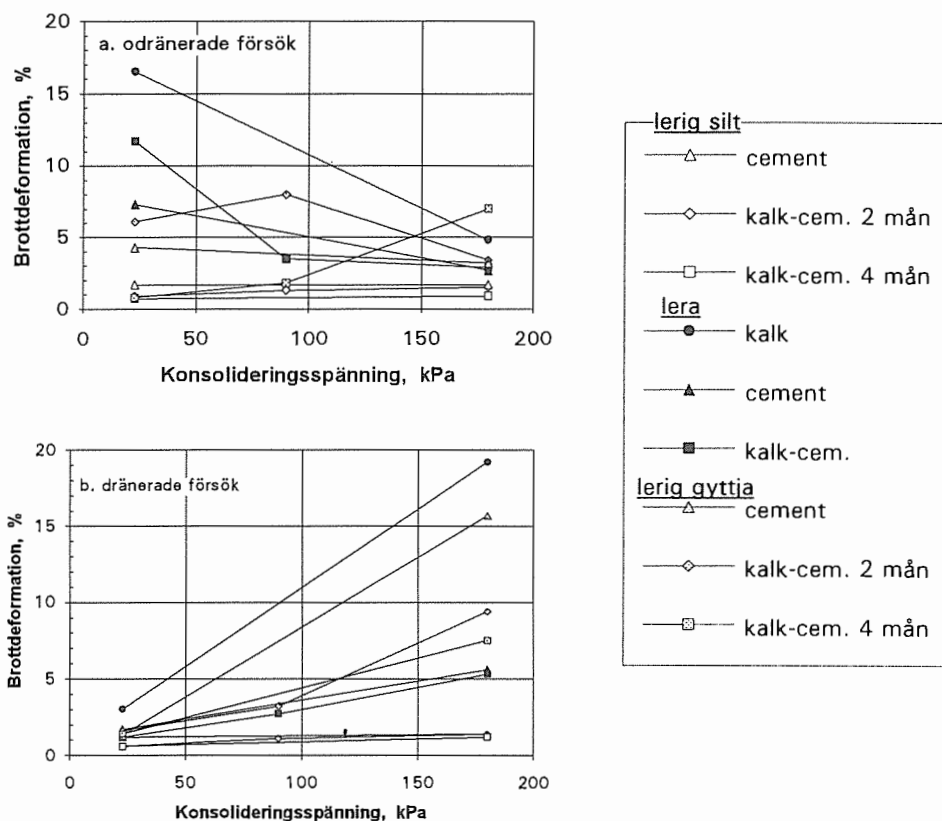
b. Two and four months after mixing 10 % stabiliser and 16 % lime-cement in clayey silt and clayey gyttja.

Figur 5.15 (forts). Skjuvhållfasthet enligt odränerade och dränerade triaxialförsök vid olika konsolideringsspänning.

Figure 5.15 (cont). Shear strength according to undrained and drained triaxial compression tests with different consolidation stress.

formationerna var genomgående små. För leran minskade brottdeformationerna med ökande konsolideringstryck, vilket kan härledas till en gradvis övergång från tendens till dilatant uppträdande, där provet eftersträvar att öka i volym vid låga spänningar till tendens till kontraktant uppträdande vid höga spänningar. I det odränerade fallet medför detta att vid låga konsolideringsspänningar minskar portrycken med deformationerna och brottet blir segt. Vid högre spänningar minskar denna dilatansseffekt och det odränerade brottet blir sprödare. I den stabiliserade leriga gyttjan är spridningen i resultat för stor för att någon tendens skall kunna urskiljas. Resultaten av de dränerade försöken antyder dock att ett samband liknande det för lera skulle kunna förväntas. **Figur 5.16 a.**

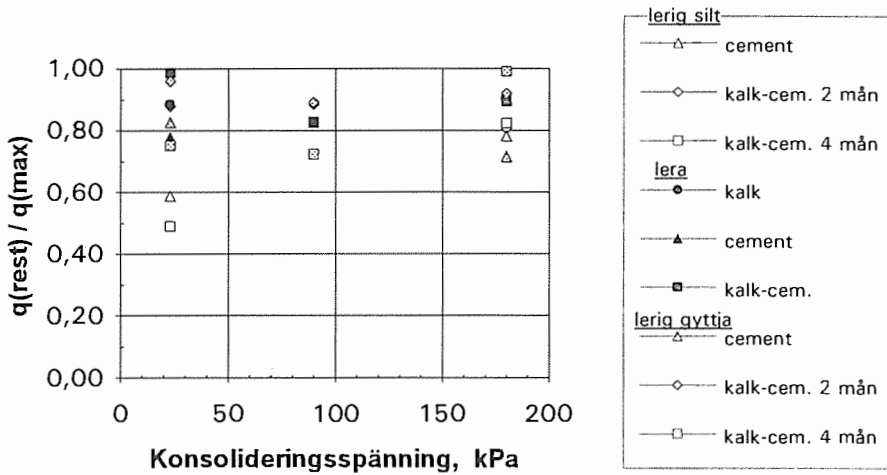
Skjuvhållfasthetsreduktionen efter brott och vid stora deformationer var relativt måttlig utom för den cement- och kalk-cementstabiliserade leriga silten vid låg



Figur 5.16. Uppmått vertikal deformation vid brott för odränerade respektive dränerade försök vid olika konsolideringsspänning.

Figure 5.16. Measured vertical deformation at failure for undrained and drained tests with different consolidation stress.

konsolideringsspanning. Uppmätt kvarstående hållfasthet vid ca 20 % axiell deformation är där 50 à 60 % av brotthållfastheten. I övriga fall är uppmätt hållfasthet vid ca 20 % deformation minst 0,7 - 1,0 gånger brotthållfastheten, se **Figur 5.17**. Angivna värden utgör uppskattade minimivärden av relationen mellan resthållfasthet vid stora deformationer och brotthållfasthet såsom de utvärderats och redovisats i t. ex. **Figur 5.14**, där beräkning av skjuvhållfasthet görs med antagande av samma skjuvarea efter brott som vid brott. I verkligheten minskar anliggningsytan mellan övre och undre provdelen vilket vid större deformationer innebär att skjuvhållfastheten kan antas vara ca 15 à 25 % högre än den angivna (Mulabdi'c, 1992).



Figur 5.17. Kvoten mellan resthållfasthet vid stora deformationer och brotthållfasthet hos olika blandningar vid odränerade triaxialförsök.

Figure 5.17. Ratio between strength in large deformations after failure and failure strength with different mixes in undrained triaxial compression tests.

5.3.5 Dränerad skjuvhållfasthet vid olika spänningsförhållanden

Dränerad skjuvhållfasthet hos de stabiliserade jordarna undersöktes på motsvarande sätt som den odränerade genom direkta skjuvförsök och triaxialförsök vid varierande spänningsförhållanden. Liksom för de odränerade försöken uppstod vid de *dränerade direkta skjuvförsöken* problem med glidning och lokala brott vid anliggningsytorna mellan prov och apparatur och resultaten avviker också i betydande utsträckning från de som erhöles vid triaxialförsöken. Med hänsyn till att de direkta skjuvförsöken bedöms ge missvisande resultat redovisas dessa huvudsakligen i relativa termer.

Inblandning av kalk gav genomgående lägst hållfasthet jämfört med de två övriga stabiliseringsmedlen. Två veckor efter inblandning var hållfastheten för den stabiliserade leran ungefär lika stor vid användning av kalk-cement som vid användning av cement. Den cementstabiliserade leriga silten respektive leriga gytthan hade dock högre hållfasthet än när kalk-cement användes för stabilisering. Efter längre tid, 3 månader efter inblandning, gav kalk-cement ungefär samma eller högre hållfasthet i alla tre jordtyperna. En sammanställning av samtliga dränerade direkta skjuvförsök finns redovisad i Bilaga 5.26 - 5.27.

Resultaten ger relativt rätlinjiga samband mellan dränerad skjuvhållfasthet och antagen normalspänning, dvs ansatt vertikalspänning, men antydan till krökta brottgränskurvor förekommer. Under antagande av rätlinjigt samband mellan skjuvhållfasthet τ_f och effektiv normalspänning σ' kan den dränerade skjuvhållfastheten beskrivas med sambandet $\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \phi'$. Samtliga fall visar på ett anmärkningsvärt litet kohesionsintercept c' , som högst ca 40 kPa, vilket skiljer sig från vad som erhöles vid triaxialförsöken, se nedan. Kalkstabilisering gav i samtliga fall såväl lägst utvärderad friktionsvinkel ϕ' som lägst kohesionsandel. Några genomgående skillnader kan däremot inte utvärderas mellan cement och kalk-cement, varken vad gällde storlek på friktionsvinkel eller på kohesionsintercept. Den stabiliserade leriga silten gav för alla tre stabiliseringsmedlen en högre friktionsvinkel jämfört med leran och den leriga gytthan där friktionsvinklarna var relativt likartade för respektive stabiliseringsmedel. En viss ökning av friktionsvinkeln med tiden kan spåras för kalk-cement och cement som stabiliseringsmedel. Jämförelser mellan stabilisering med 10 - 16 % kalk respektive cement och ca 60 % av denna mängd visar på skillnader endast för fallet cement. Skillnaderna är emellertid inte entydiga. Några förändringar av c' med ändrad mängd stabiliseringsmedel kan däremot inte noteras.

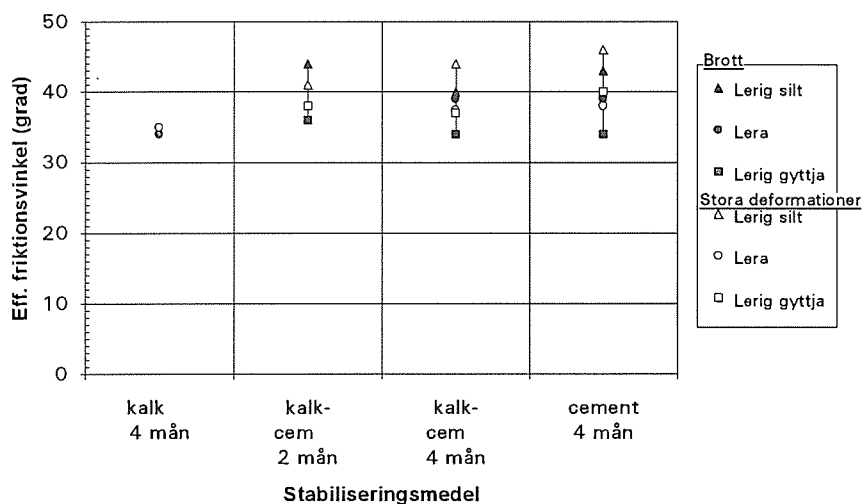
Resultat av de *dränerade triaxialförsöken* har sammanställts i **Figur 5.14 b** där deviatorspänning och relativ volymändring redovisas mot vertikal deformation. Volymminskning anges som positiv förändring. I enlighet med vad de negativa portrycksändringarna vid de odränerade försöken antyder, uppförde sig materialet dilatant vid brott i nästan samtliga fall. Den kalkstabiliserade leran som konsoliderats med den högre spänningen 160 kPa uppträdde kontraktant genom hela försöket. Detsamma gäller för den leriga gytthan men är i detta fall mindre markant. För övriga prover skedde endast en mindre volymminskning initiiellt varefter materialets volym ökade med ökande deformation från något före det brott inträffar. De stabiliserade materialen uppträdde mer dilatant vid låga konsolideringsspanningar än vid höga.

Brott inträffade vid mycket små deformationer, 0,5 - 1,5 %, hos den stabiliserade silten, medan deformationen vid brott var av mer varierande storlek, 1 - 19 % hos den stabiliserade leran och 1 - 16 % hos den stabiliserade leriga gytthan. Brottdeformationen ökade mer eller mindre kraftigt med ökande konsoliderings-spänning, se **Figur 5.16 b**. Vid den lägre konsoliderings-spänningen var brottdeformationen 3 % eller lägre för samtliga blandningar. För den relativt sett lösare kalkstabiliserade leran uppträder en markant brytpunkt i spänning-deformation-skurvan där sk flytning inträffar, framförallt vid den högre konsoliderings-spänningen. Skjuvspänningen vid denna punkt är avsevärd lägre än brottspänningen, i storleksordningen ungefär lika med eller något lägre än den odränerade skjuvhållfastheten, och den vertikala deformationen är liten. Skjuvspänningen ökar därefter till en nivå ungefär lika med kvarstående hållfasthet vid stora deformationer hos övriga blandningar med motsvarande konsoliderings-spänning, och brott inträffade vid förhållandevis stora deformationer.

I **Figur 5.15** har utvärderad dränerad skjuvhållfasthet vid olika spänningsnivåer sammanställts tillsammans med odränerade skjuvhållfasthet. Som framgår av figuren är den dränerade skjuvhållfastheten klart spänningsberoende med ökande hållfasthet med ökande konsoliderings-spänning. Den dränerade skjuvhållfastheten var något lägre eller ungefär lika med den odränerade vid låga spänningar och högre eller lika med den odränerade vid höga konsoliderings-spänningar. Liksom för det odränerade fallet gav cement högre hållfasthet än kalk-cement hos stabiliserad lera och lerig silt vid provningstillfället 4 månader efter inblandning medan det omvända gällde för lerig gytta. Vid jämförelser mellan olika resultat måste dock beaktas dels svårigheterna med att skapa helt homogena likvärdiga prover dels att de odränerade triaxialförsöken utfördes upp till en vecka efter de dränerade.

Spänningsvägar för samtliga försök registrerades och en friktionsvinkel ϕ' och ett kohasionsintercept c' utvärderades vid såväl brott som stora deformationer utgående från resultaten av de dränerade försöken. En sammanställning av odränerade försök i samma diagram som dränerade försök för respektive blandning, visar att effektivspänningsvägarna vid de odränerade försöken anslöt sig relativt väl till resultaten från de dränerade försöken, se Bilaga 5-28 - 5-30. Det skall dock observeras att då proverna inte med säkerhet var helt vattenmättade bör dessa resultat tolkas med försiktighet. Utvärderingen av parametrar vid stora deformationer är också osäker då de i hög grad påverkas av antaganden om areakorrekationer.

Utvärderad friktionsvinkel vid brott ϕ'_f varierar mellan 34° och 44° , se **Figur 5.18** där friktionsvinklarna vid brott respektive stora deformationer sammanställts för samtliga försök. Friktionsvinkeln var lägst, $34^\circ - 36^\circ$, i den stabiliserade leriga gyttjan och den kalkstabiliserade leran, något högre eller $37^\circ - 39^\circ$ i den cement- och kalk-cementstabiliserade leran och högst, $40^\circ - 44^\circ$, i den stabiliserade leriga silten. Den utvärderade friktionsvinkeln vid stor deformation ϕ'_{1s} avviker endast obetydligt från den vid brott.

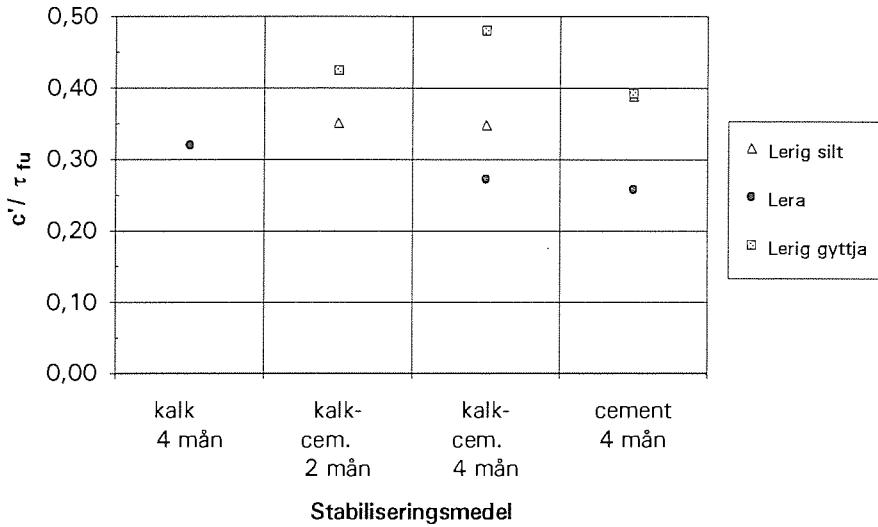


Figur 5.18. Uppmätt friktionsvinkel ϕ'_f och ϕ'_{1s} enligt dränerade triaxialförsök på kalk-, kalk-cement- respektive cementstabiliserad jord.

Figure 5.18. Measured friction angle ϕ'_f and ϕ'_{1s} according to drained triaxial compression tests on lime, lime-cement and cement stabilised soil.

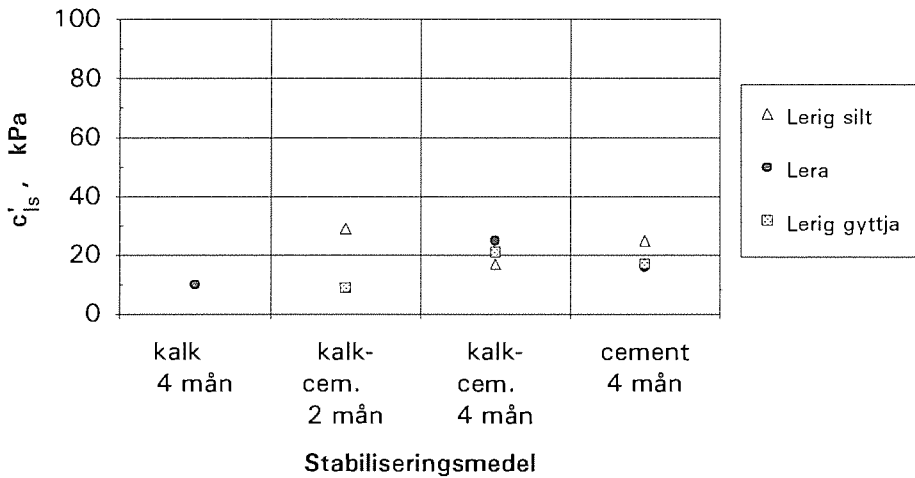
Det utvärderade värdet på c' ökar med ökande skjuvhållfasthet hos materialet och motsvarar en faktor 0,25 - 0,48 gånger den utvärderade odränerade skjuvhållfastheten, se **Figur 5.19** där förhållandet mellan c' och odränerad skjuvhållfasthet samt $c'_{\text{large strain}}$ visas för de olika blandningarna. Vid stora deformationer är utvärderat värde på c'_{1s} lågt, mindre än 30 kPa i samtliga fall.

Resterande hållfasthet vid stora deformationer vid olika spänningsnivåer visas i **Figur 5.20**. Av figuren framgår att skillnaden i resthållfasthet mellan de olika stabiliseringsmedlen i respektive jord var relativt liten vid samtliga spänningsnivåer. Minskningen i hållfasthet efter brott var således störst i material med hög brotthållfasthet. Minskningen var också relativt sett störst vid låga spänningsnivåer. Vid 20 kPa konsolideringsspänning var uppmätt resthållfasthet 10 - 85 % av maximal skjuvhållfasthet, se **Figur 5.21**.



a. Förhållande mellan c' och odränerad skjuvhållfasthet.

a. Relation between c' and undrained shear strength.

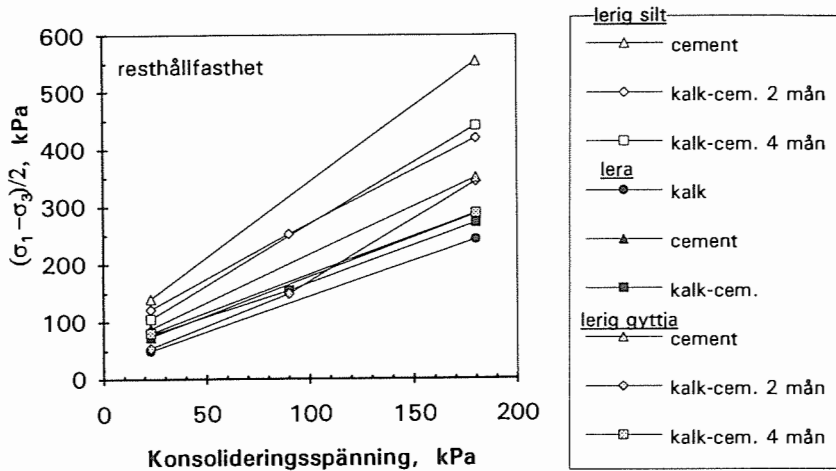


b. Utvärderat c' vid stora deformationer, c'_{ls}

b. Evaluated c' in large deformations, c'_{ls}

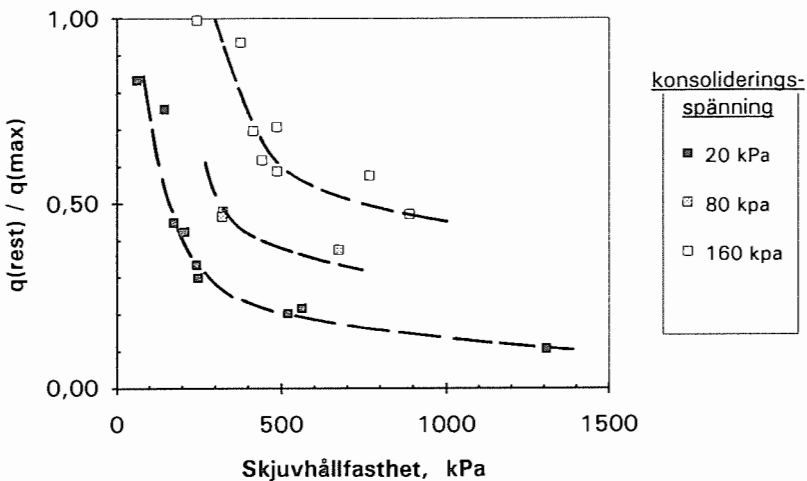
Figur 5.19. Kohesionsintercept c' enligt triaxialförsök på stabiliserad jord.

Figure 5.19. Cohesion intercept c' according to triaxial compression tests on stabilised soil.



Figur 5.20. Dränerad resthållfasthet vid stora deformationer vid olika konsolideringsspänning enligt triaxialförsök på olika typer av stabiliserad jord.

Figure 5.21. Drained strength in large deformations after failure and different consolidation stress according to triaxial compression tests on different types of stabilised soil.



Figur 5.21. Förhållande mellan resthållfasthet vid stora deformationer och maximal skjuvhållfasthet enligt dränerade triaxialförsök vid olika konsolideringsspänning.

Figure 5.21. Relation between strength in large deformations after failure and maximum shear strength according to drained triaxial compression tests at different consolidation stresses.

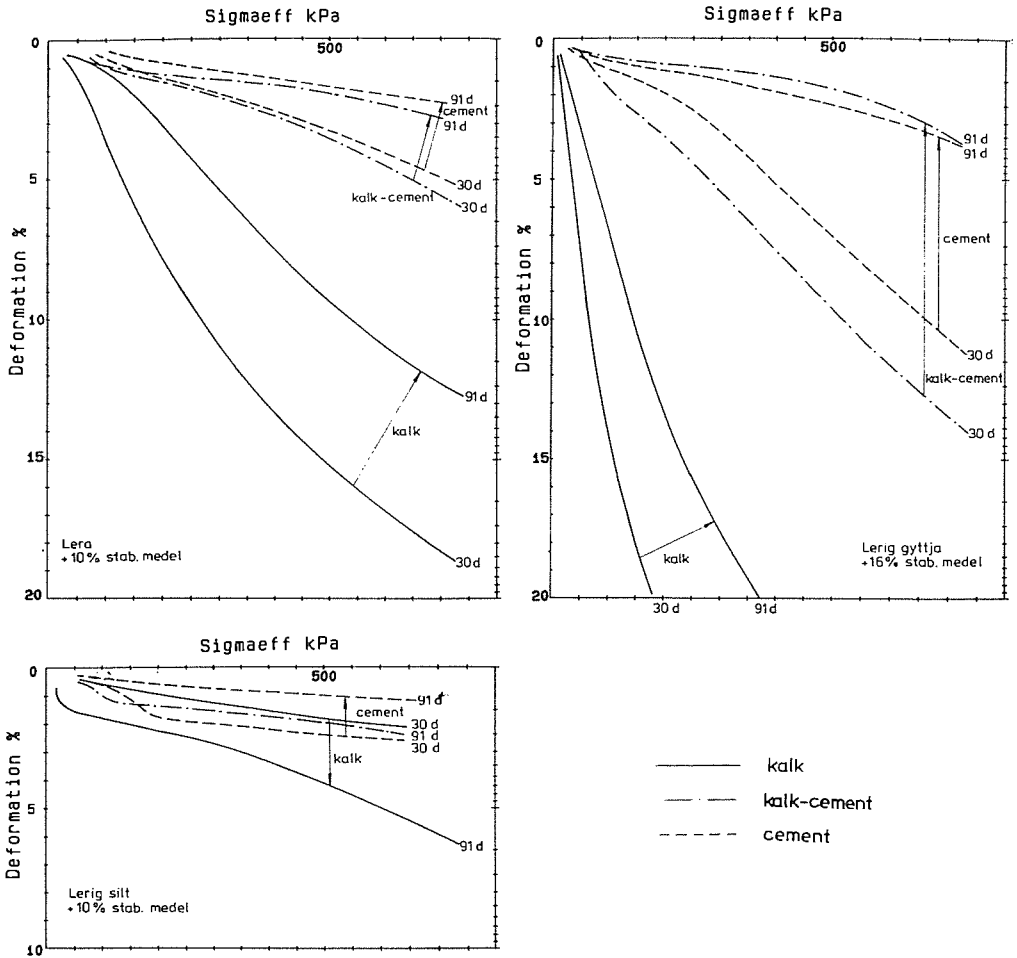
5.3.6 Kompressionsmodul

Kompressionsmodulen hos stabiliserad jord undersöktes genom *ödometarförsök (CRS)* 2 veckor och 3 månader efter inblandning. I **Figur 5.22** visas resultaten av samtliga CRS-försök på de tre stabiliserade jordarna lerig silt, lera och lerig gyttja. Av figuren framgår att materialens kompressibilitet minskade med tiden efter stabilisering och att den blev olika stor beroende på använt stabiliseringsmedel. Kalk gav genomgående den högsta kompressibiliteten (minst styvhet) jämfört med kalk-cement och cement, medan skillnaden var relativt liten mellan de senare två medlen.

Vid utvärdering av kompressionsmodulen måste hänsyn tas till egendeformationer i provningsutrustningen, vilka har betydelse framförallt vid provning av fasta material med låg kompressibilitet. Hänsyn måste också tas till de ojämnheter som normalt uppstår vid över- och underytor vid utskärning/preparering av provkroppar. Dessa ojämnheter inverkar på resultaten i varierande grad främst genom en ökad initiell kompressibilitet. I **Figur 5.23** visas en sammanställning av utvärderade kompressionsmoduler vid olika effektivspänningar. Vid utvärderingen har hänsyn tagits till uppskattad inverkan av ojämnheter hos proven samt inverkan av egendeformationer enligt utförda kalibreringar av utrustningen. Av figuren framgår att utvärderad modul var ungefär konstant upp till en viss spänningsnivå varefter materialet i de flesta fall uppträdde mer kompressibelt och modulen minskade ned till ett minimivärde. I de fall en lägre modul uppmättes initieellt har uppmätt ungefär konstant värde på kompressionsmodulen vid högre spänningsnivå (alternativt uppmätt maximalt värde) extrapoleras bakåt för att gälla också vid lägre spänningar. Vid ytterligare spänningsökningar kan det för de lösare materialen konstateras att modulen förblev konstant låg upp till en viss spänningsnivå varefter den ökade ungefär linjärt med ökande effektivspänning.

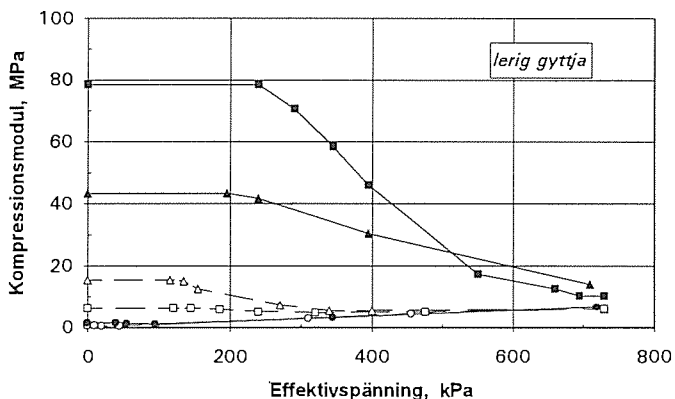
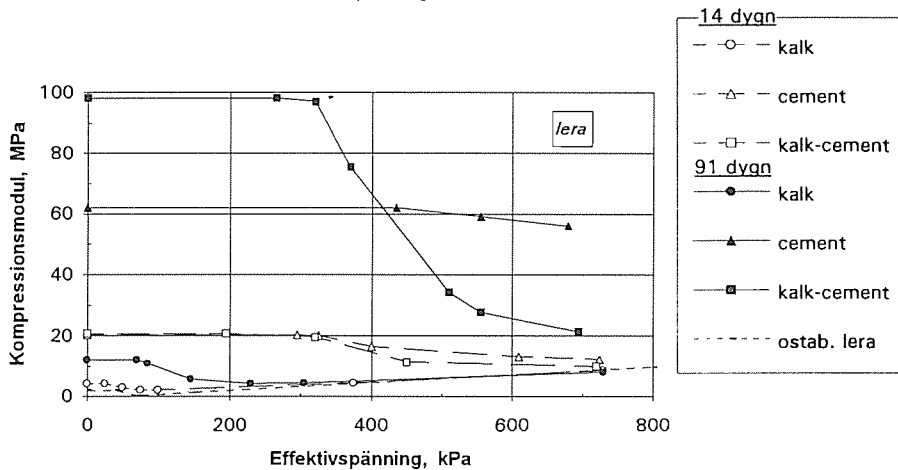
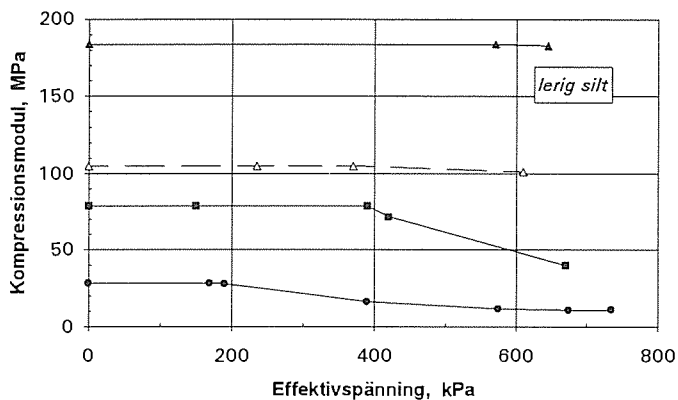
Den ur ödometerförsöken utvärderade initiella modulen bedöms, på ovan nämnda grunder, inte vara helt relevant för beskrivning av modulen utan kan istället betraktas som en undre gräns för värdet på modulen. Detta gäller främst vid låga spänningar. I verkligheten sker dessutom belastning från ett visst initieellt portal och spänningstillstånd i den stabiliserade jorden som inte helt kan efterliknas i dessa försök.

Med ökande spänningar närmade sig modulerna varandra för att vid höga spänningar bli ungefär desamma för respektive jord oberoende av vilket stabiliseringsmedel som användes. Detta var en genomgående trend i samtliga försök men kan främst observeras i resultaten från lerig gyttja och huvuddelen av de försök som utfördes med leran. I försöken med lerig silt var kompressibiliteten



Figur 5.22. Resultat av CRS-försök 2 veckor respektive 3 månader efter stabilisering.

Figure 5.22. Results of CRS tests two weeks and three months after stabilisation.



Figur 5.23. Utvärderad koppressionsmodul vid olika effektivspänningsnivåer.

Figure 5.23. Evaluated compression modulus at different effective stress levels.

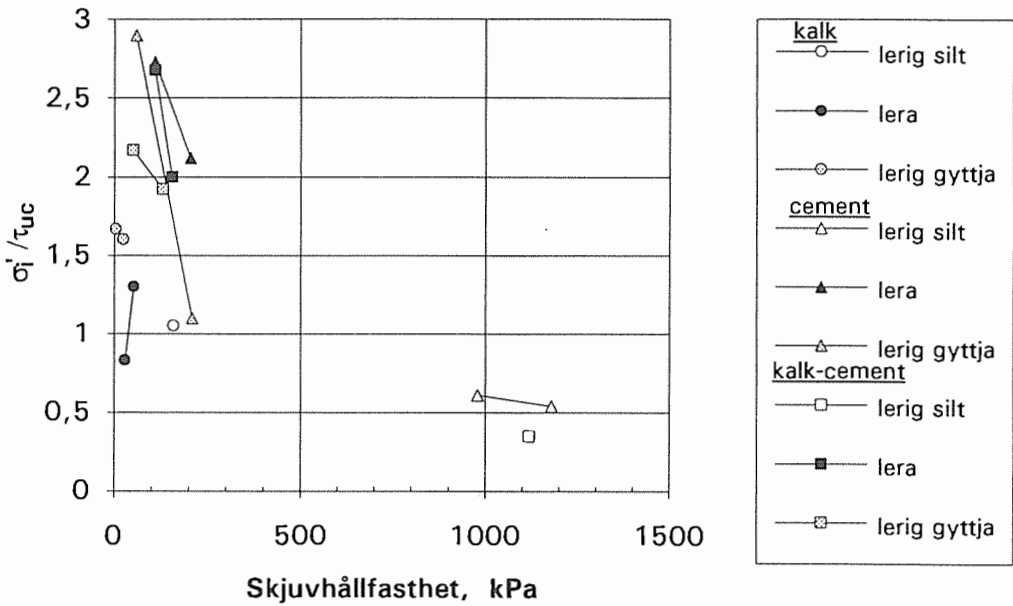
fortsatt låg upp till högsta spänningsnivån utom för fallet med kalk som stabiliseringsmedel. En övergång till samma modul sker troligen vid högre spänningar än de som användes vid försöken.

Kompressionsmodulens variation kan beskrivas genom en initiell modul M_i , ett värde på effektivspänningen upp till vilken modulen var ungefär konstant σ'_i , en minskning i modul med ökande spänning M_i' ($= dM/d\sigma'$), ett lägsta värde på modulen M_{\min} samt slutligen en ökning i modul med ökande spänningar M' .

Den initiella modulen M_i och den minsta modulen M_{\min} liksom också värdet på gränsspänningen σ'_i ökade med ökande skjuvhållfasthet hos materialet. Gränsspänningen uppnåddes vid en effektivspänning motsvarande 0,8 - 1,6 gånger odränerad skjuvhållfasthet i de prover som stabiliserats med kalk. För de prover som stabiliserats med kalk-cement eller cement var denna spänning i storleksordningen 2 - 2,9 gånger odränerad skjuvhållfasthet då denna var ca 100 kPa eller lägre och minskade ned till 0,3 à 0,6 gånger skjuvhållfastheten vid en skjuvhållfasthetsnivå kring 1000 kPa, se **Figur 5.24**.

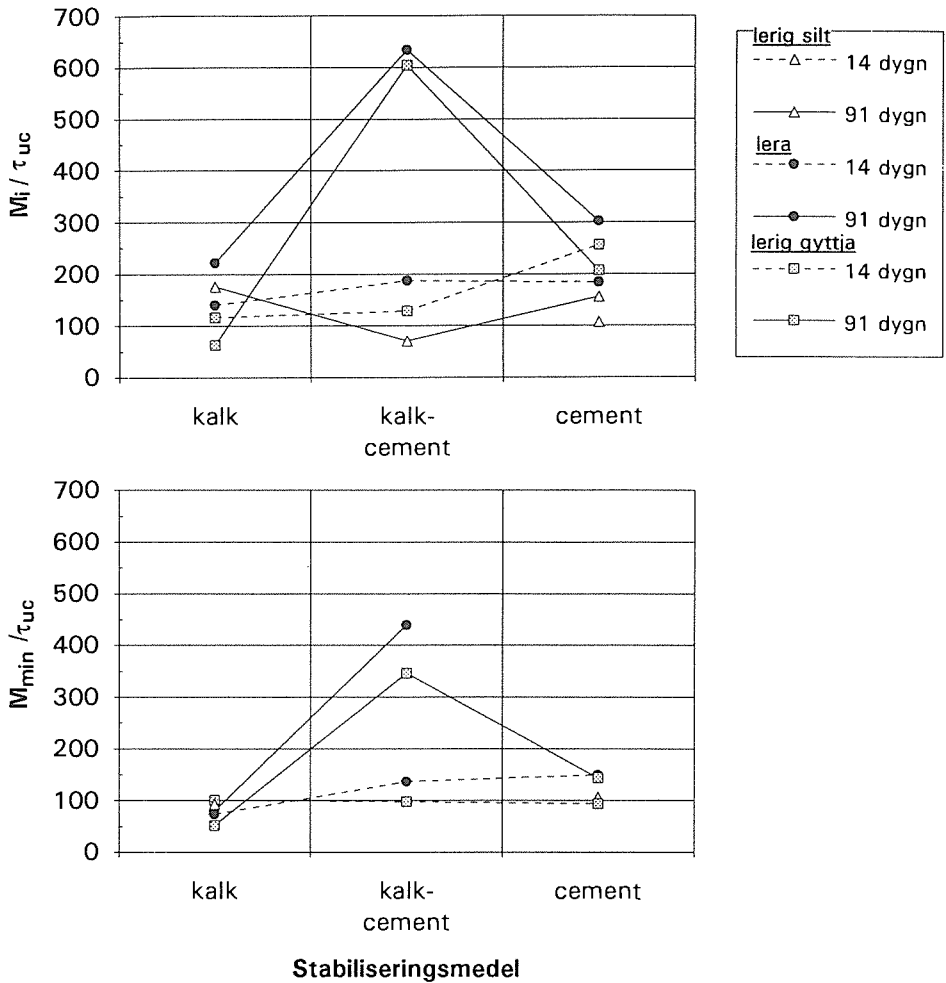
I **Figur 5.25** har kvoten mellan initiell modul respektive lägsta modul och odränerad skjuvhållfasthet sammanställts för de olika stabiliseringsmedlen. Spridningen i resultat är relativt stor. Förhållandet mellan initiell modul M_i och skjuvhållfasthet var som regel något lägre för kalk än för cement med värden på modulen motsvarande 60 - 220 gånger skjuvhållfastheten för kalk och 100 - 300 gånger skjuvhållfastheten för cement. För kalk-cement var motsvarande faktor 70 - 200 utom för prover med lera och lerig gyttja efter den längre härdningstiden där kompressibiliteten avvek kraftigt från övriga resultat med moduler som var drygt 600 gånger skjuvhållfastheten. Det utvärderade lägsta värden hos modulen, M_{\min} , varierar i förhållande till skjuvhållfastheten på motsvarande sätt som M_i men med lägre kvoter, i huvudsak mellan 50 och 150.

Minskningen i modul, M_i' , från dess initiella nivå ned till dess minsta värde var mer eller mindre kraftig beroende på typ av stabiliseringsmedel och därmed på storleken hos den initiella modulen. I de cementstabiliserade proverna erhöles ofta ingen påtaglig minskning eftersom gränstrycket σ'_i inte uppnåddes i försöken. För kalk- och kalk-cementstabiliserade prover kunde cementeringseffekterna genomgående brytas ned i försöken varvid kompressionsmodulen minskade till sin miniminivå. Minskningen var i princip proportionell mot initialmodulen, **Figur 5.26**. En ökande härdningstid medför i princip en högre initialmodul och därmed en större relativ nedbrytning men också ett större gränstryck σ'_i .



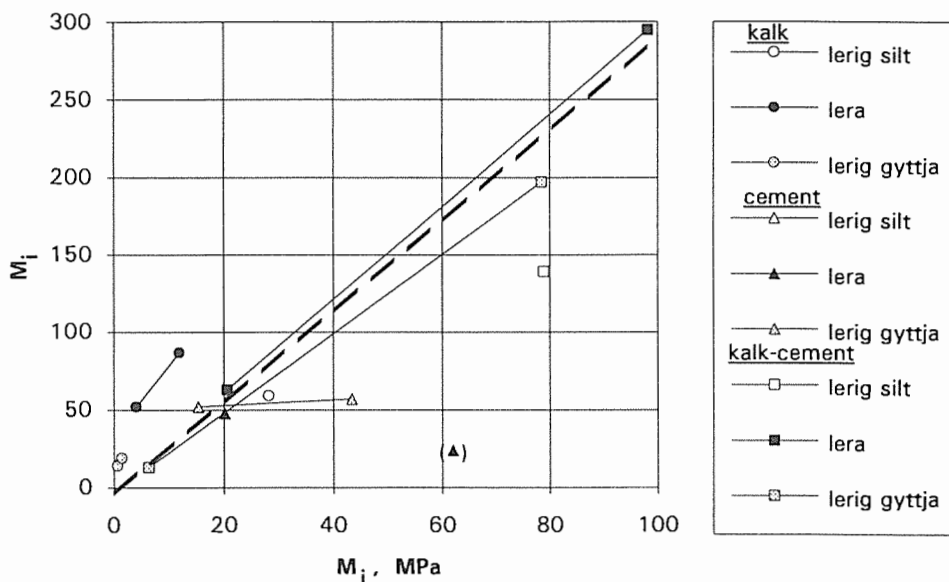
Figur 5.24. Kvoten mellan gränsspänning σ'_i enligt CRS-försök och uppmätt skjuvhållfasthet enligt enaxliga tryckförsök, 14 och 91 dagar efter inblandning.

Figure 5.24. Ratio between unit stress σ'_i according to CRS tests and measured shear strength according to unconfined compression tests 14 and 91 days after mixing.



Figur 5.25. Förhållandet mellan initiell respektive minsta modul enligt CRS-försök och uppmätt skjuvhållfasthet enligt enaxliga tryckförsök för olika stabiliseringsmedel.

Figure 5.25. Relation between initial and smallest modulus according to CRS tests and measured strength according to unconfined compression tests for different stabilisers.

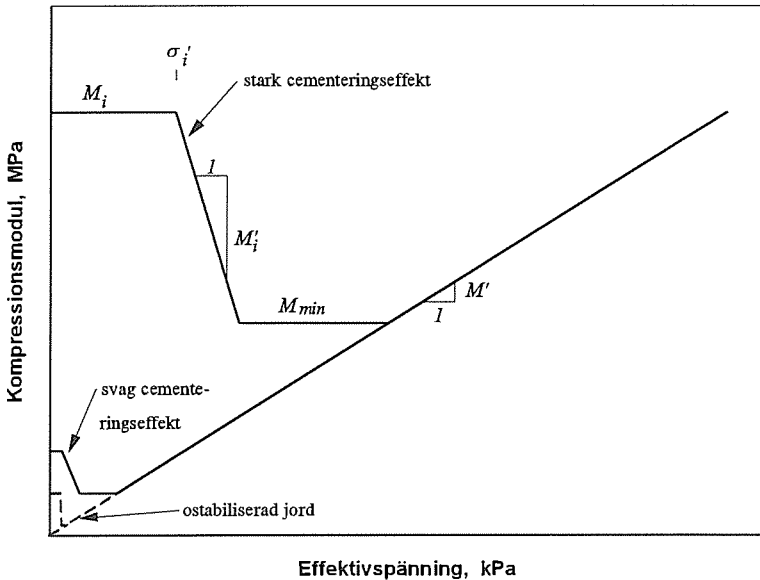


Figur 5.26. Förändring i modul, M'_i enligt CRS-försök vid varierande värde på den initiala modulen för olika stabiliseringsmedel.

Figure 5.26. Change in modulus M'_i according to CRS tests with varying values of the initial modulus for different stabilisers.

Den vid högre spänningar uppmätta ökningen i modul, M'_i , var ca 8 respektive 13 hos stabiliserad lerig gyttja och stabiliserad lera och kan uppskattas till ca 29 eller något lägre hos den stabiliserade silten, dvs samma storleksordning som för ostabiliserade jordar.

Modulens spänningsberoende i stabiliserad jord kan relateras till den hos en ostabiliserad jord. I ett okonsoliderat (omrört) tillstånd ökar jordens kompressionsmodul i princip linjärt från noll med ökande spänning. Med ökande överlagringstryck och tid konsoliderar jorden och får en förhöjd modul för spänningsökningar upp till förkonsolideringsspanningen. En liknande effekt erhålls vid tillsats av kalk eller cement då en cementering av jorden medför en mer eller mindre kraftig höjning av modulen för spänningar under en viss gränsspänning, jämförbar med ett förkonsolideringstryck. Resultaten från kompressionsförsöken visar på att de cementeringseffekter som erhöles av stabiliseringsmedlen vid mycket höga spänningar till slut fullständigt bröts ned och kompressibiliteten blev lik den hos en jord utan vare sig cementerings- eller förkonsolideringseffekter. Storleken av dessa gränsspänningar bestämdes av jordtyp och använt stabiliseringsmedel. **Figur 5.27.**



Figur 5.27. Kompressionsmodulens variation med spänningsnivå hos material med olika starka cementeringskrafter. Principfigur.

Figure 5.27. Variation in compression modulus with stress level of materials with varying cementation strength. General diagram.

5.3.7 Elasticitetsmodul vid olika spänningsförhållanden

De stabiliserade jordarnas deformationsegenskaper kan också bedömas utifrån uppmätta spännings-deformationssamband vid triaxialförsöken. En utvärdering har gjorts av elasticitetsmodulen, E-modulen, för de *triaxialförsök* som utfördes under dränerade förhållanden. Då E-modulen varierar, minskar, med ökande deviatorspänning har dels värdet på den initiella modulen, E_0 utvärderats, dels värdet vid en spänningsökning motsvarande 50 % av den vid brott, E_{50} .

Den initiella modulen har utvärderats enligt Kondner (1963), genom att plotta värdet av kvoten mellan uppmätt vertikal kompression, ϵ_1 , och uppmätt spänningsökning, $\Delta(\sigma_1' - \sigma_3')$ mot värdet på den uppmätta vertikala kompressionen. I princip erhålls ett linjärt samband för spänningar under brott. Med antagande av ett hyperbelformigt spännings-deformationssamband kan initiella variationer förorsakade av faktorer som ojämnheter i provtytor eller av oavsiktliga variationer i spänning och portryck separeras och utvärdering av E_0 göras genom extrapolering av det linjära sambandet ned till en deformation motsvarande noll procent. E-modulens variation med ökande vertikal deformation, uttryckt som sekantmodul, kan därefter beskrivas genom uttrycket

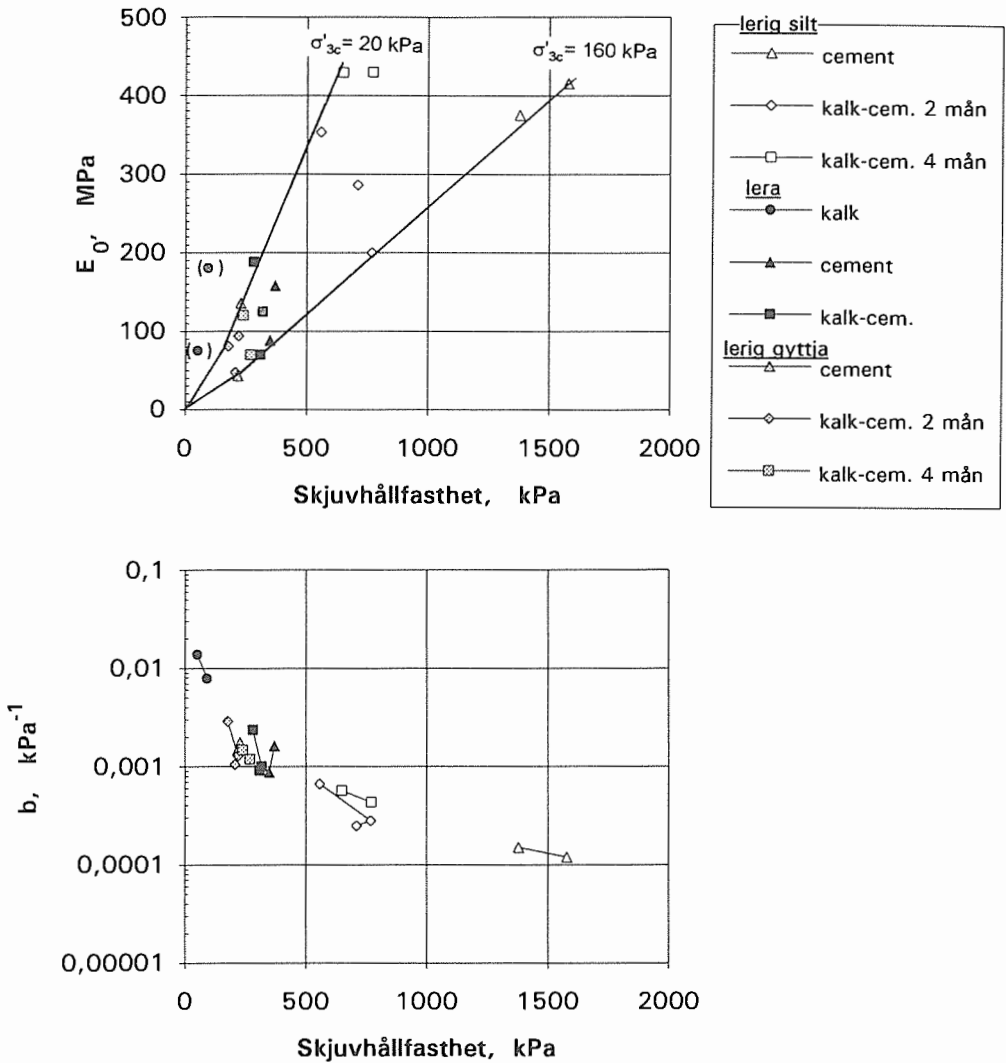
$$E = E_0 / (1 + bE_0\varepsilon_1)$$

Värdet på b beskriver linjens lutning, dvs förändringen i modul med vertikal relativ deformation. Utvärderade värden på E_0 och b har sammanställts i **Figur 5.28**. Av figuren framgår att värdet på E_0 ökade med ökande härdningstid och därmed uppmätt odränerad skjuvhållfasthet hos materialet. Storleken hos modulen var emellertid också spänningsberoende på så sätt att förhållandet mellan modul och skjuvhållfasthet minskade med ökande konsolideringsspanning vilket avspeglar den gradvisa övergången från dilatant mot kontraktant uppträdande. Förändringen i E -modul med ökande deformation, dvs värdet på b , minskade med ökande skjuvhållfasthet hos materialet. Någon skillnad i beteende för de olika materialen kan inte noteras.

Liksom vid ödometerförsöken påverkas utvärderingen av moduler av att ojämnheter i provytor ibland resulterade i något för låga värden. Inverkan förefaller dock inte ha varit lika stor i triaxialförsöken som i ödometerförsöken, vilket dels kan bero på bättre trimning av prover men framförallt på att provhöjden var avsevärt större i triaxialförsöken varför effekten av ojämnheter minskat procentuellt i motsvarande grad.

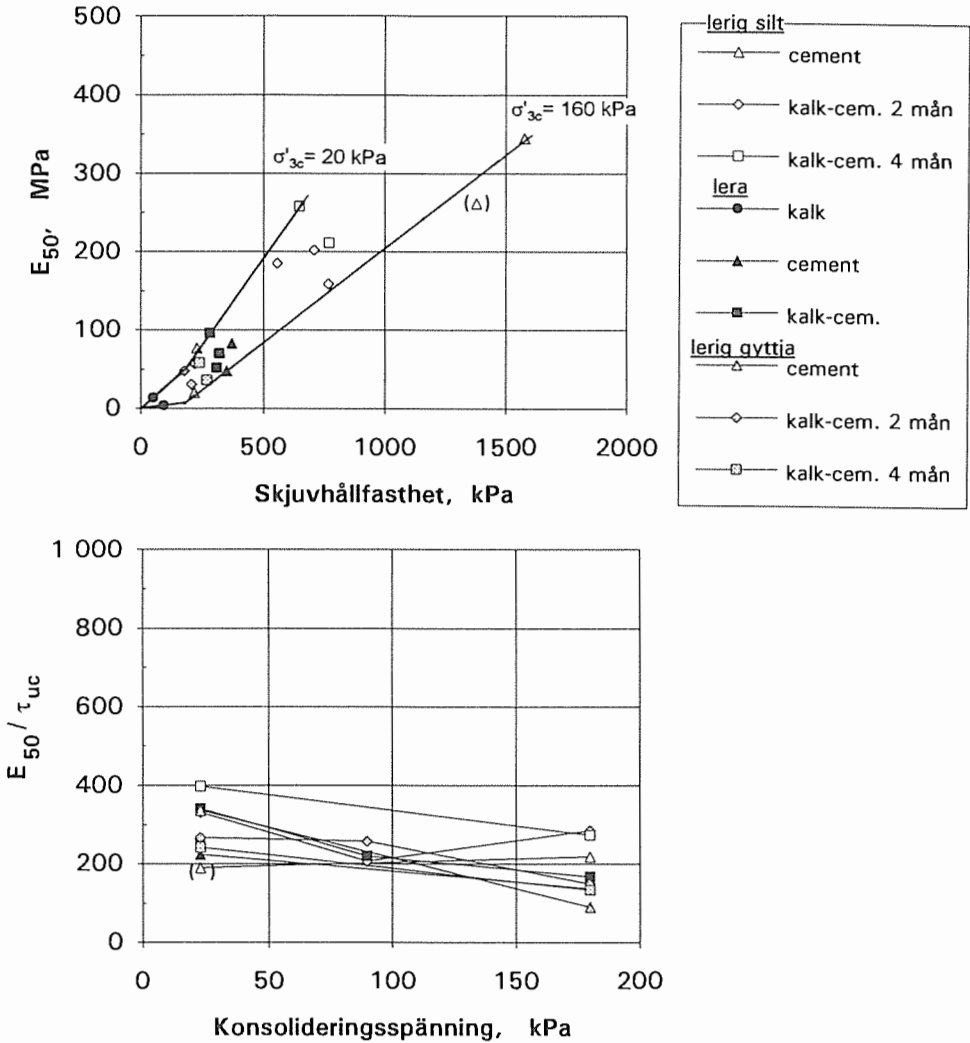
Modulen E_{50} ökade med ökande härdningstid och därigenom ökande skjuvhållfasthet hos materialen. Resultaten visar ett relativt linjärt samband mellan modul och odränerad skjuvhållfasthet $E_{50} \approx 200_{fu}$, se **Figur 5.29**, men det uppmätta förhållandet mellan dessa värden är olika för material med låg skjuvhållfasthet, upp till ca 150 à 200 kPa, jämfört med material med högre skjuvhållfasthet. Kvoten mellan sekantmodul E_{50} och odränerad skjuvhållfasthet ökade därvid något med ökande skjuvhållfasthet hos materialet. Styvheten hos materialet varierade också beroende av använd konsolideringsspanning på så sätt att modulen som ovan nämnts minskade med ökande konsolideringsspanning. Kvoten E_{50}/τ_{fu} var 200 - 400 vid en låg konsolideringsspanning σ'_{3c} av 20 kPa, och ca 100 - 300 vid konsolideringsspanningen 160 kPa.

En uppskattning av kompressibiliteten hos olika material görs ibland genom utvärdering av moduler vid odränerade försök, t ex vid enaxliga tryckförsök (se vidare avsnitt 5.3.7). I **Figur 5.30** redovisas uppmätt förhållande mellan sekantmodulen E_{50} enligt dränerade och odränerade triaxialförsök. Av figuren framgår att modulen under dränerade förhållanden var 1 - 1,5 gånger högre jämfört med odränerade vid låga konsolideringsspanningar, men betydligt lägre vid höga konsolideringsspanningar. Detta avspeglar åter den gradvisa övergången från dilatant mot kontraktant uppträdande hos materialet.



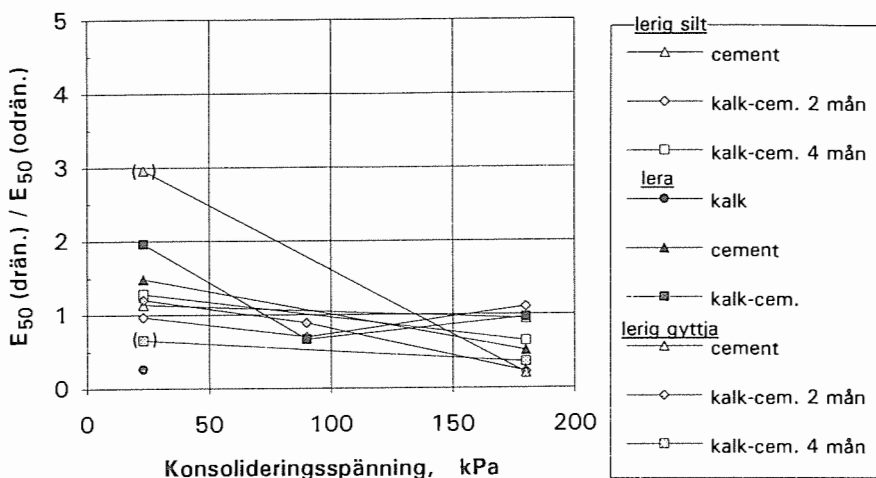
Figur 5.28. Utvärderad initial modul E_0 och förändringsfaktor b enligt dränerade triaxialförsök på stabiliserad jord vs odränerad skjuvhållfasthet hos materialen.

Figure 5.28. Evaluated initial modulus E_0 and parameter b according to drained triaxial compression tests on stabilised soil compared with undrained shear strength of the material.



Figur 5.29. Förhållande mellan sekantmodul E_{50} enligt dränerade triaxialförsök och uppmätt odränerad skjuvhållfasthet hos de stabiliserade jordarna vid olika konsolideringsspänning.

Figure 5.29. Relation between secant modulus E_{50} according to drained triaxial compression tests and measured undrained shear strength in the stabilised soils at different consolidation stress.



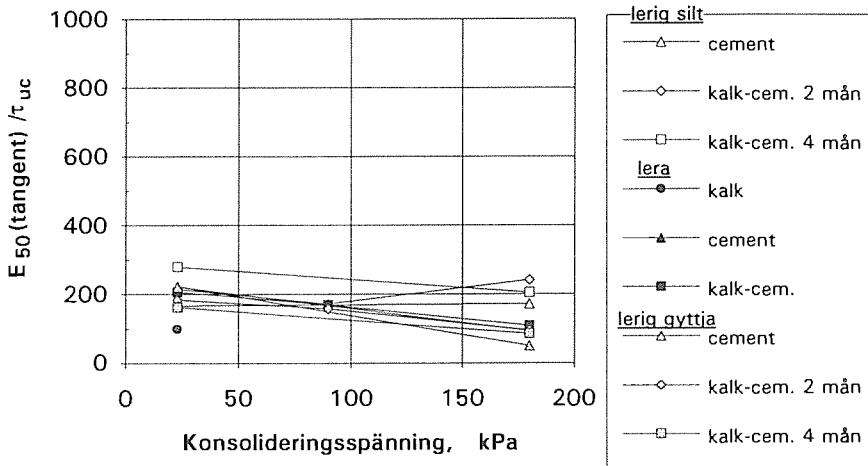
Figur 5.30. Förhållandet mellan utvärderad modul E_{50} enligt dränerade respektive odränerade triaxialförsök vid olika konsolideringsspänning.

Figure 5.30. Relation between evaluated modulus E_{50} according to drained and undrained triaxial compression tests with different consolidation stress.

Jämförelser kan också göras mellan utvärderade spännings-deformations samband vid triaxialförsöken och resultaten från ödometerförsöken, jämför avsnitt 5.3.5. Då inverkan av ojämnheter hos provet bedöms som relativt stor vid små deformationer och låga spänningar i ödometerfallet, antas utvärderat maximalt värde på den initiella kompressionsmodulen kunna vara representativt för spänning strax under gränsspänningen. Jämförbar modul i triaxialfallet bedöms vara tangentmodulen vid en spänningsökning motsvarande ca 50 % av den vid brott. Då ödometerförsöken och triaxialförsöken var utförda vid olika tidpunkter efter inblandning av stabiliseringsmedel har här valts att inte göra jämförelsen direkt mellan respektive värden för moduler utan istället mellan utvärderad kvot mellan modul och skjuvhållfasthet. I **Figur 5.31** har sammanställts tangentmodulerna E_{50} , utvärderade ur sambandet $E_{50(\text{tangent})} = E_0 / (1 + bE_0 \epsilon_{1(50)})^2$ enligt Duncan & Chang (1970), relaterade till odränerad skjuvhållfasthet hos materialen och konsolideringsspänningen.

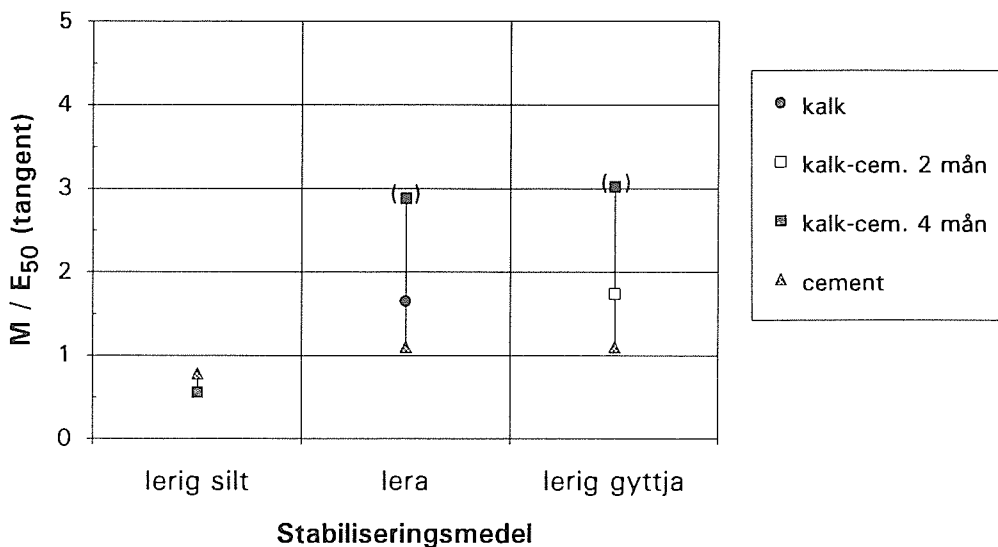
I **Figur 5.32** visas förhållandet mellan utvärderad kompressionsmodul och elasticitetsmodul för de olika stabiliserade jordarna. Utvärderingen visar på en högre modul i triaxialfallet än i ödometerfallet för stabiliserad lerig silt vilket är orealistiskt. Troligtvis påverkades resultaten för dessa mycket styva prover i alltför hög grad av anliggningsproblem i apparaturen. För övriga två stabiliserade jordar gäller att spridningen i resultat är relativt stor, huvudsakligen beroende på

att värdet för kvoten mellan kompressionsmodul och skjuvhållfasthet som uppmätts för kalk-cementstabiliserad lera och gyttjig lera efter längre tid, jämför **Figur 5.25**, kraftigt avviker från övriga värden. Resultaten i stort visar dock på en rimlig storleksordning hos kvoten mellan kompressionsmodulen och elasticitetsmodulen, ställt i relation till ett normalt antaget värde av ca 1,3 för ostabiliserade jord.



Figur 5.31. Förhållande mellan tangentmodulen E_{50} enligt dränerade triaxialförsök och uppmätt odränerad skjuvhållfasthet vid olika konsoliderings-spänning hos stabiliserad jord.

Figure 5.31. Relation between tangent modulus E_{50} according to drained triaxial compression tests and measured undrained shear strength with different consolidation stress of stabilised soil.



Figur 5.32. Förhållande mellan kompressionsmodul M enligt ödometerförsök och tangentmodulen E_{50} enligt dränerade triaxialförsök för olika typer av stabiliserad jord.

Figure 5.32. Relation between compression modulus M according to oedometer tests and tangent modulus E_{50} according to drained triaxial compression tests for different types of stabilised soil.

5.3.8 Elasticitetsmodul enligt enaxliga tryckförsök

Vid de enaxliga tryckförsöken, som utfördes under odränerade förhållanden, uppritades automatiskt sambandet mellan last och deformation (cylinderns hoptryckning). Från dessa diagram har E -modulen (sekantmodul) vid brott, q_c , och vid $0,33 q_c$ utvärderats för jordtyperna lerig silt, lera och lerig gyttja. Se **Figur 5.33 och 5.34**.

Vid utvärderingen har viss korrigering gjorts för ofullkomligheter i spänning-deformationskurvans startområde, som kan hänföras till provningstekniken. Hit hör den "svans" som stundom uppkommer på grund av dålig anläggning mot provets överyta, liksom fall med för kraftig stigning på grund av att viss provningslast förts på provet före start av mätning. Dessa ofullkomligheter bidrar till att de redovisade, grafiskt utvärderade, sekantmodulerna vid $0,33 q_c$ endast i mycket få fall skiljer sig från motsvarande tangentmodul vid samma last.

Observeras bör, att det är tryckhållfastheten som anges på horisontalaxeln. I figurerna har även lagts in resultaten från Etapp I (Holmqvist, m fl, 1991), vilka tidigare inte redovisats. Följande bindemedelskombinationer är alltså representerade i diagrammen:

A	100 % kalk	Etapp I och II
B	100 % Std-cement	Etapp I
C	100 % SH-cement	Etapp I och II
D	75 % Std, 25 % kalk	Etapp I
E	75 % SH, 25 % kalk	Etapp II
F	50 % Std, 50 % kalk	Etapp I

■ **Lerig silt** (Figur 5.33-5.34a)

Vid belastning till brott kan E-modulen (sekantmodul) i medeltal anges som

$$E_{q_c} = 90 \cdot q_c$$

Detta gäller för samtliga ovan redovisade bindemedelskombinationer när tryckhållfastheten var högre än ca 800 kPa. För lägre hållfastheter var faktorn inte större än ca 70 i medeltal. Spridningen är stor.

E-modulen vid 1/3 av brottlasten kan i medeltal anges som

$$E_{q_c/3} = 130 \cdot q_c$$

för hållfasthetsnivåer över 800 kPa. För lägre hållfastheter var faktorn ca 100.

■ **Lera** (Figur 5.33-5.34b)

Resultaten kan indelas i tre grupper, beroende på hållfasthetsnivå.

Då q_c var mindre än ca 120 kPa:

$$E_{q_c} = 30 \cdot q_c$$

$$E_{q_c/3} = 50 \cdot q_c$$

Då q_c var större än ca 120 kPa och mindre än 300 kPa:

$$E_{q_c} = 50 \cdot q_c$$

$$E_{q_c/3} = 90 \cdot q_c$$

Då q_c var större än 300 kPa:

$$E_{q_c} = 120 \cdot (q_c - 175)$$

$$E_{q_c/3} = 270 \cdot (q_c - 200)$$

Då q_c blev större ökade alltså E-modulen mer än proportionellt. Eventuellt kan ett krökt samband användas generellt. Vid riktigt höga hållfasthetsnivåer är det emellertid sannolikt att kurvan, liksom för betong, kröker nedåt igen, d v s att E-modulen ökar i mindre omfattning än tryckhållfastheten.

■ *Lerig gyttja* (Figur 5.33-5.34c)

De kalkstabiliserade proverna hade låg tryckhållfasthet, mindre än 70 kPa, och förhållandet mellan modul och tryckhållfasthet var relativt lågt.

$$E_{q_c} = 20 \cdot q_c$$

$$E_{q_c/3} = 50 \cdot q_c$$

Övriga bindemedelskombinationer, där q_c låg mellan 100 och 800 kPa, kan sammanfattas av medellinjen:

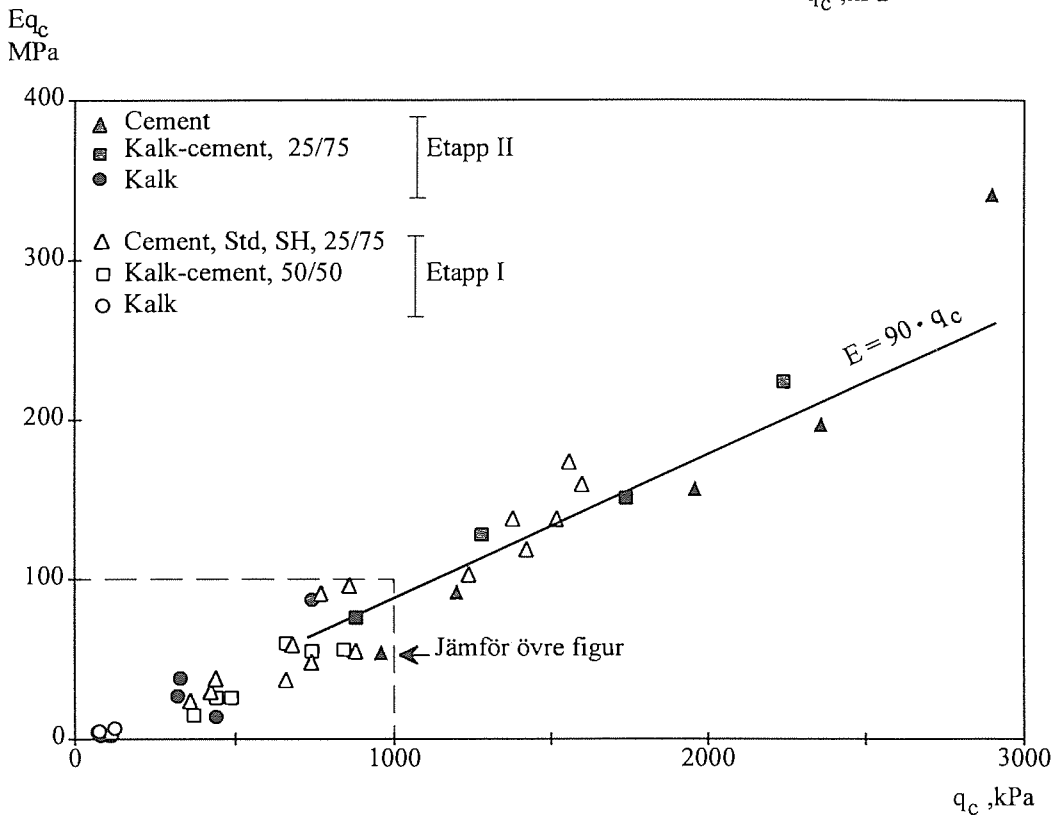
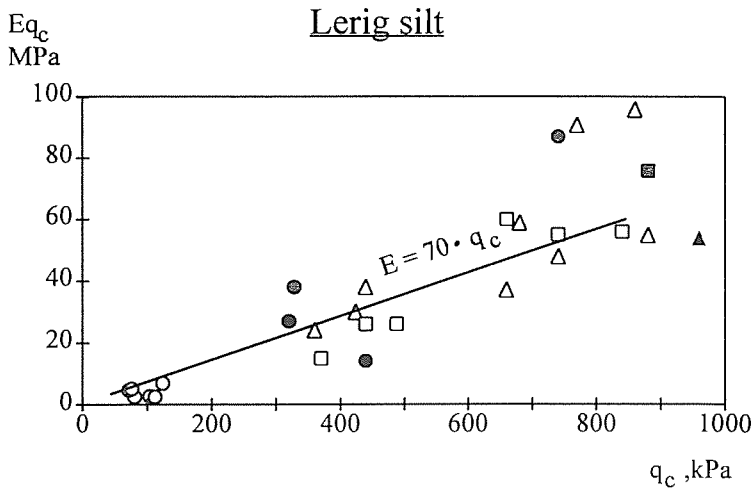
$$E_{q_c} = 70 \cdot q_c$$

$$E_{q_c/3} = 130 \cdot q_c$$

Spridningen är som synes av figurerna dock relativt stor.

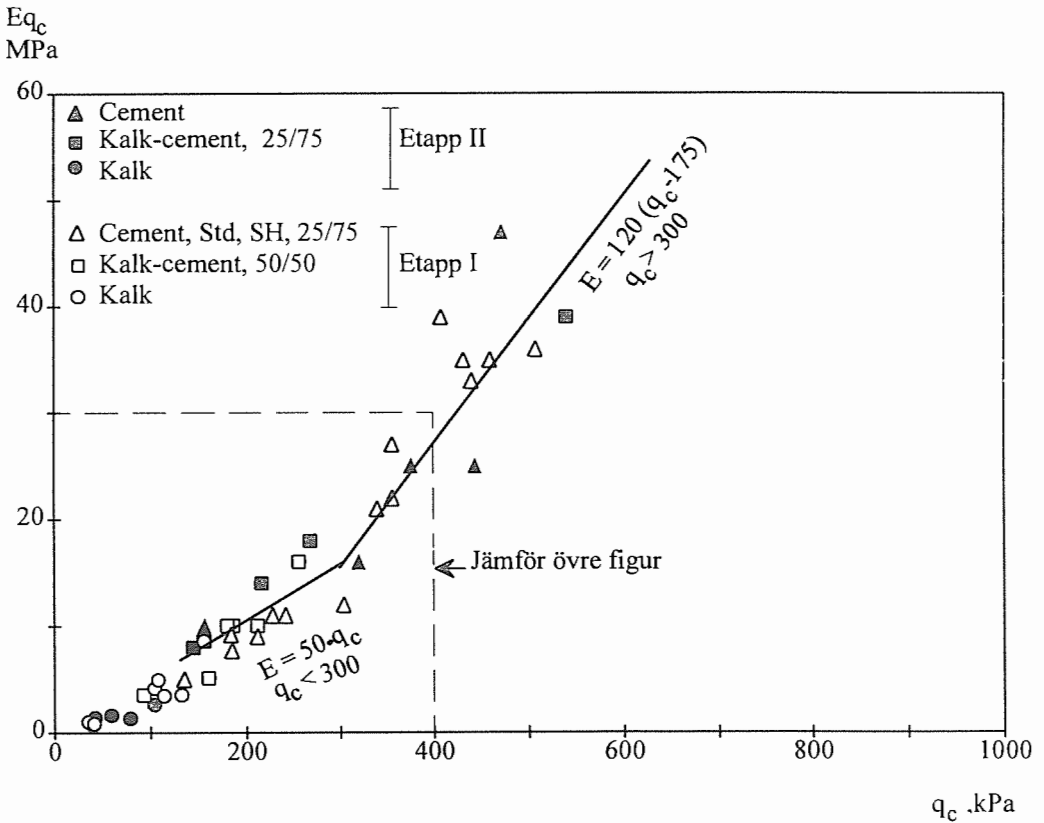
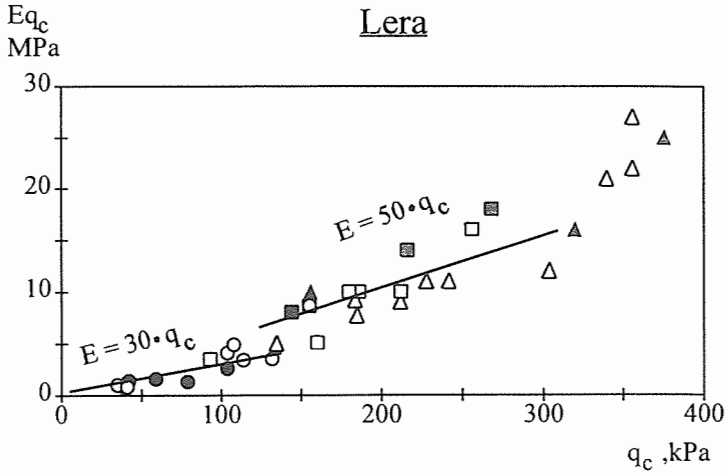
5.3.9 Deformationer vid långtidsförsök med konstant last

Ett mindre antal kompletterande dränerade triaxialförsök utfördes där stabiliserade prover belastades med konstant last under drygt tre månaders tid. För försöken användes den siltiga leran från projektet som stabiliserades med 10 % kalk-cement samt en utanför projektet hämtad lera ($w_L \approx 70$ %) som stabiliserades med 16 % kalk-cement. De stabiliserade jordarnas skjuvhållfasthet undersöktes efter 1 månad varefter prover konsoliderades ($\sigma'_{3c} = 20$ kPa) och belastades motsvarande ca 50 % och 75 % av brottlasten enligt dränerade triaxialförsök.



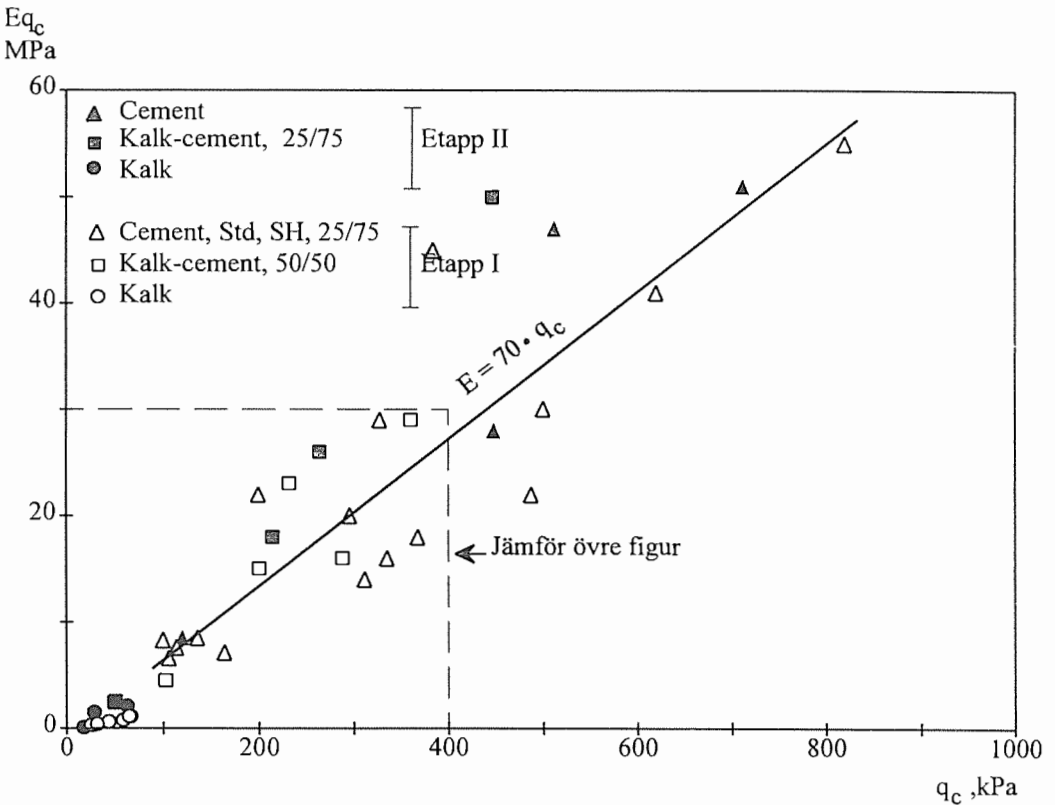
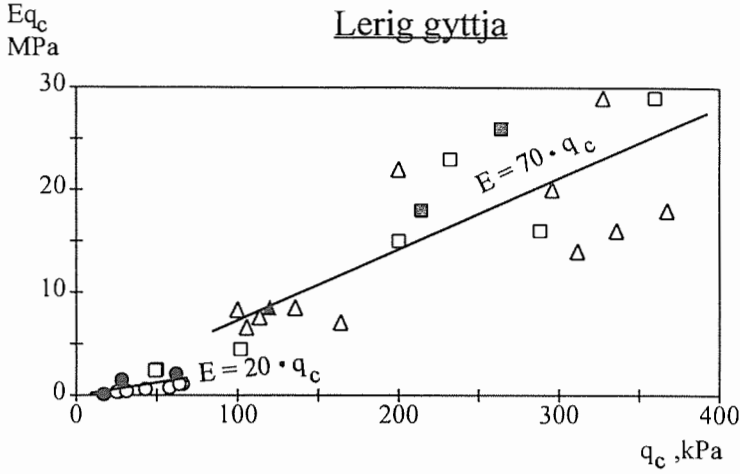
Figur 5.33a. E-modulen vid brott (E_{q_c}) som funktion av tryckhållfastheten (q_c) för lerig silt.

Figure 33a. E modulus at failure (E_{q_c}) as a function of compressive strength (q_c) for clayey silt.



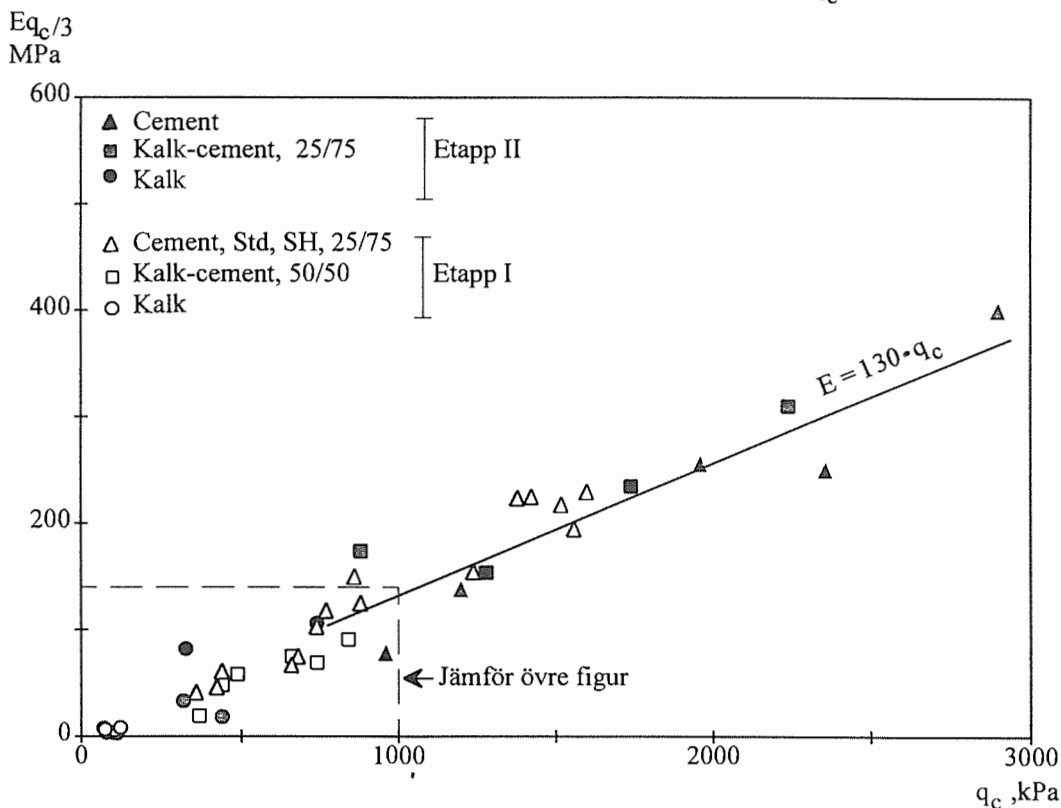
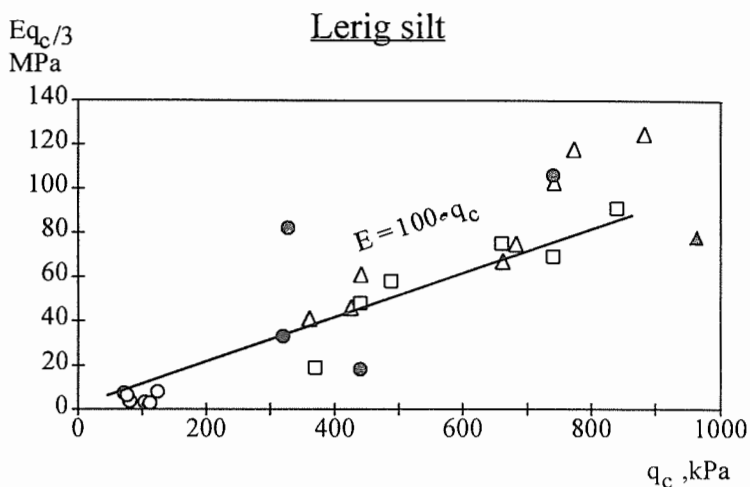
Figur 5.33 b. E-modulen vid brott (E_{q_c}) som funktion av tryckhållfastheten (q_c) för lera.

Figure 5.33b. E modulus at failure (E_{q_c}) as a function of compressive strength (q_c) for clay.



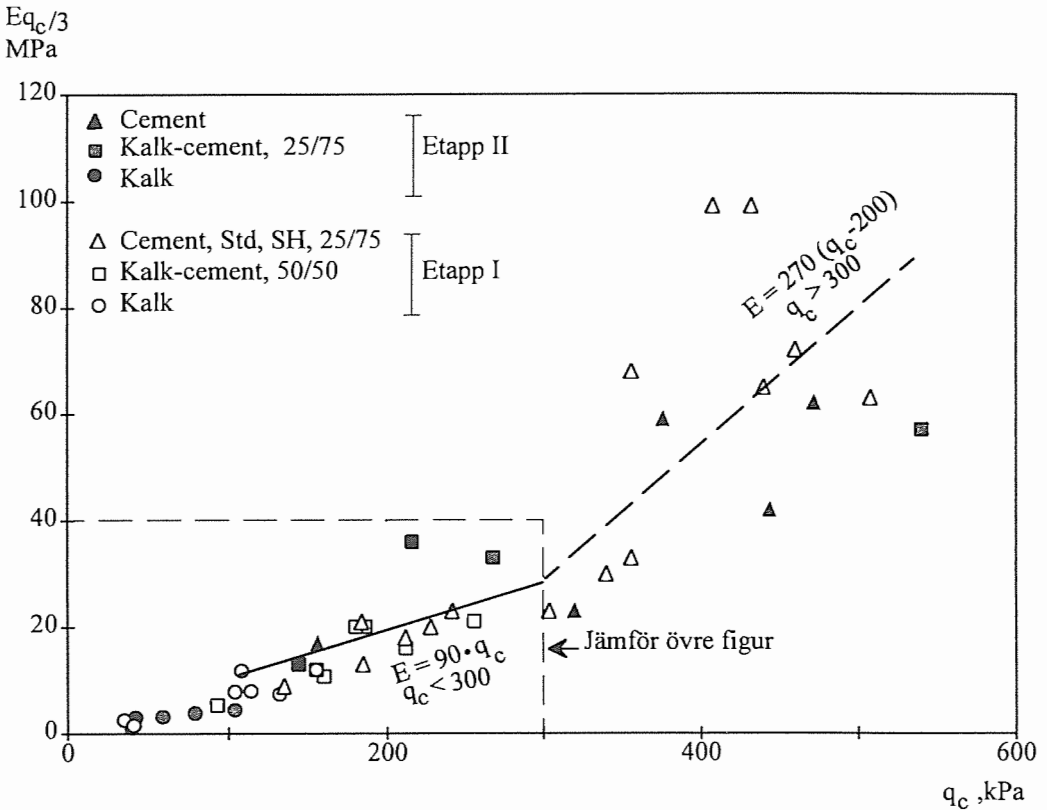
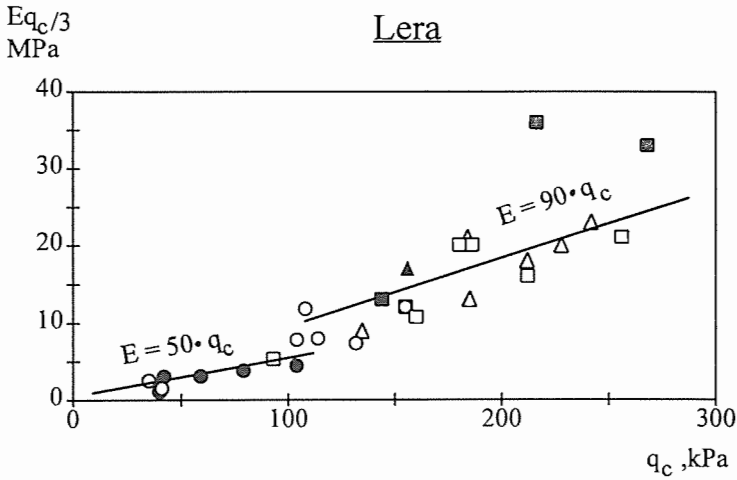
Figur 5.33 c. E-modulen vid brott (E_{q_c}) som funktion av tryckhållfastheten (q_c) för lerig gyttja.

Figure 12c. E modulus at failure (E_{q_c}) as a function of compressive strength (q_c) for clayey gyttja.



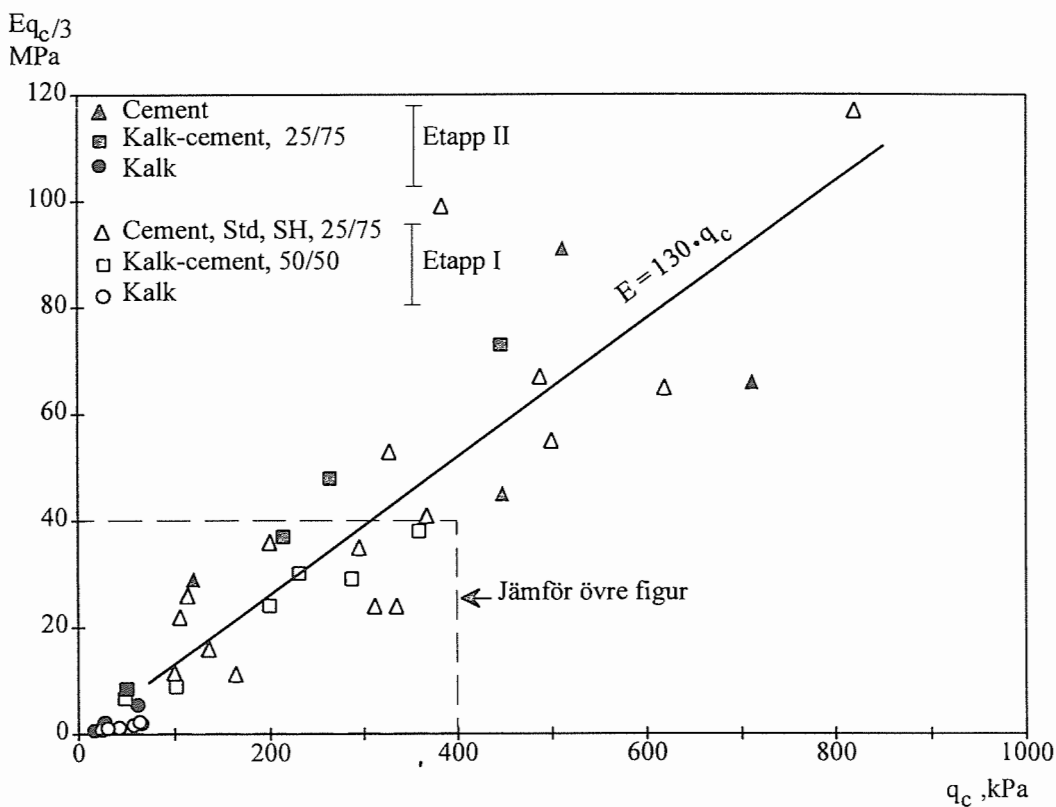
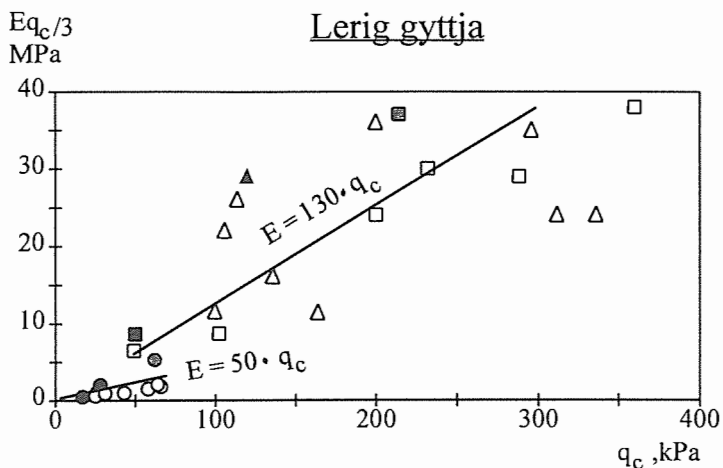
Figur 5.34 a. E-modulen vid 1/3 av brottlasten ($E_{q_c}/3$) som funktion av tryckhållfastheten (q_c) för lerig silt.

Figure 5.34a. E modulus at 1/3 of failure load ($E_{q_c}/3$) as a function of compressive strength (q_c) for clayey silt.



Figur 5.34 b. E-modulen vid $1/3$ av brottlasten ($E_{q_c/3}$) som funktion av tryckhållfastheten (q_c) för lera.

Figure 5.34b. E modulus at $1/3$ of failure load ($E_{q_c/3}$) as a function of compressive strength (q_c) for clay.



Figur 5.34 c. E-modulen vid 1/3 av brottlasten ($E_{q_c}/3$) som funktion av tryckhållfastheten (q_c) för lerig gyttja.

Figure 5.34c. E modulus at 1/3 of failure load ($E_{q_c}/3$) as a function of compressive strength (q_c) for clayey gytija.

I **Figur 5.35** visas resultaten av uppmätt vertikal kompression mot tiden i linjär- respektive log-skala. Då skjuvhållfasheten förändras med tiden såväl som med konsolideringsspänningen, innebär detta att förhållandet mellan påförd skjuvspänning och brottspänning förändrades under försökets gång. Pålagd last kunde uppskattas motsvara som mest 30 - 50 % av brottlasten under huvuddelen av försöket.

För tiden efter första dygnet visade mätningarna på en fortgående mindre deformation hos proverna. Uppmätt deformationshastighet motsvarade som högst ca 0,07 % / log t. Detta skulle i praktiken kunna motsvaras av att t ex 30 års (ca 10 000 dagar) belastning av en 10 m djup förstärkning skulle ge ett sättningstillskott pga krypeffekter av som mest 0,07 % · 4 · 10 m, dvs ca 3 cm.

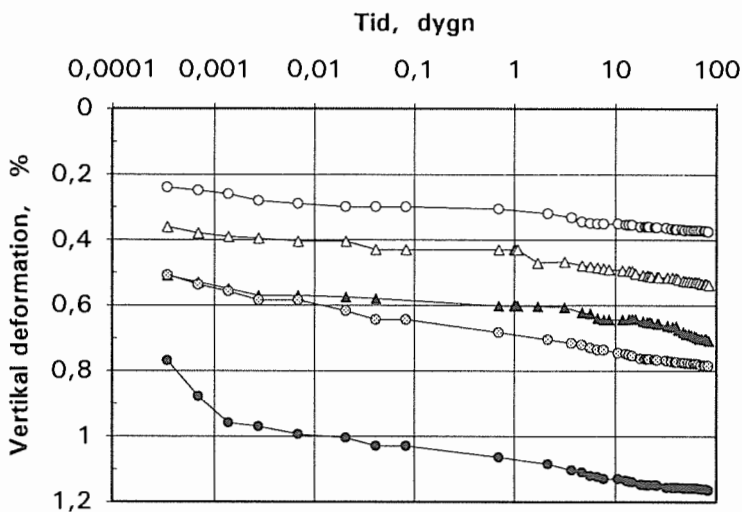
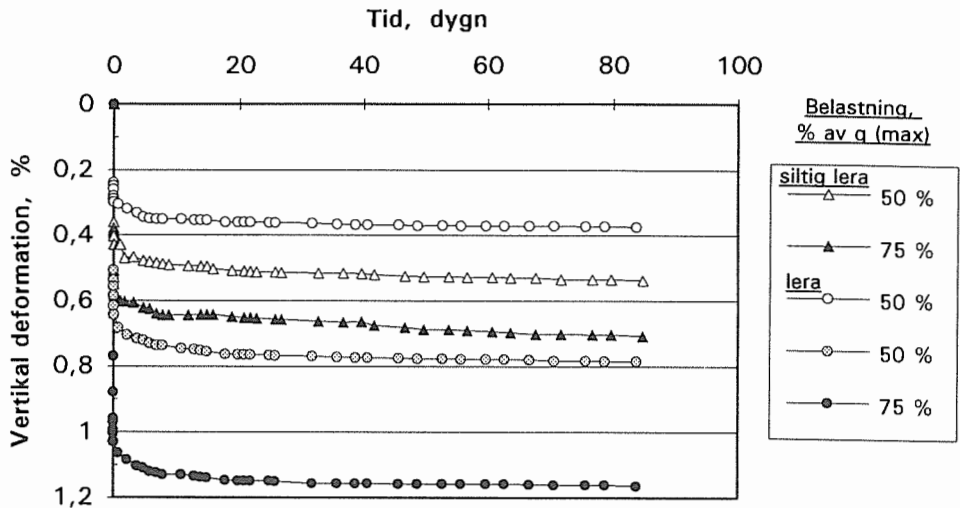
Den uppmätta initiella deformationen var emellertid också den relativt liten, vilket medförde att de aktuella försöken visade på en E-modul efter 100 dygn som motsvarade ca 80 - 90 % av E-modulen utvärderad efter 1 dygns belastning.

5.3.10 Permeabilitet

Permeabilitetsförsök utfördes på stabiliserad lerig silt, lera respektive lerig gyttja vid huvudsakligen två tillfällen, 14 och 91 dygn efter inblandning. Uppmätta skillnader i värden mellan de två provningstillfällena var i ett par fall uppenbart för stor, vilket föranledde att kompletterande försök utfördes vid ytterligare ett tillfälle på dessa material.

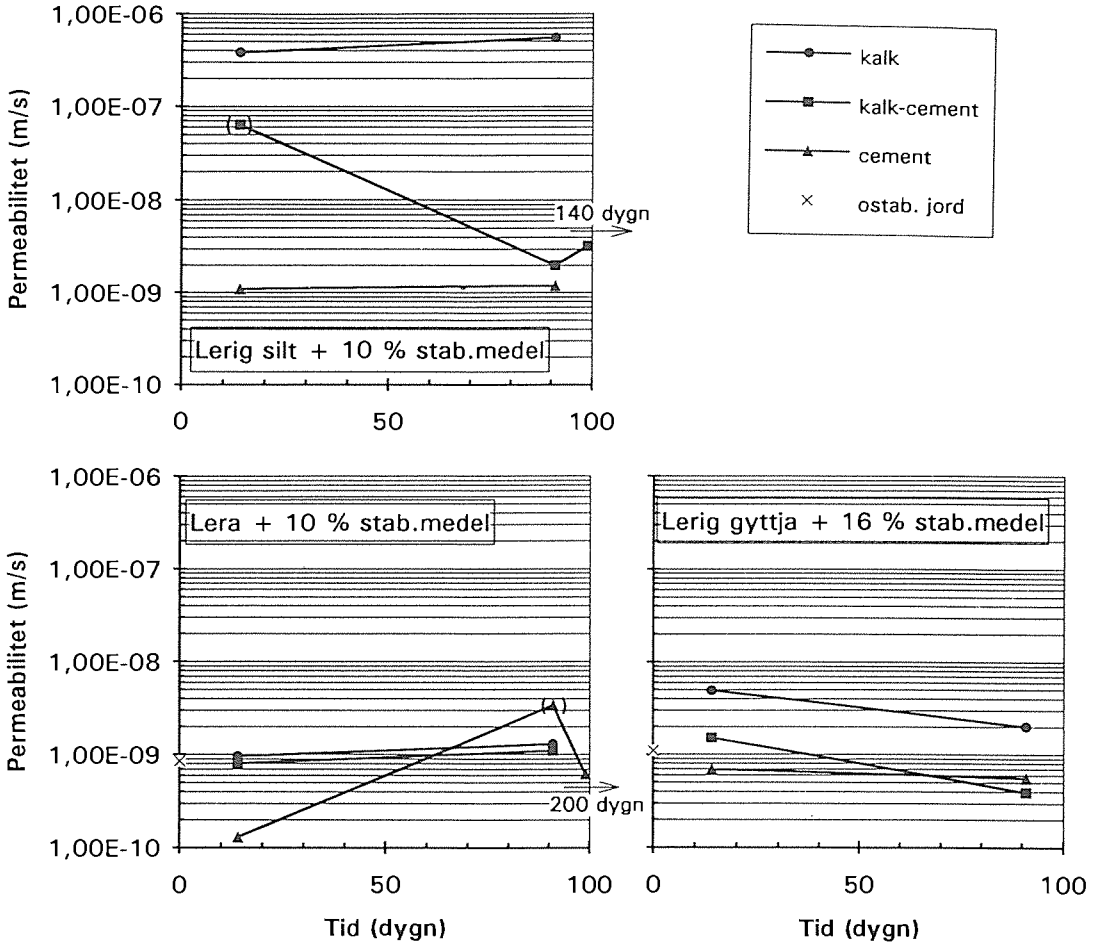
Resultaten av permeabilitetsbestämningarna har sammanställts i **Figur 5.36**. Av figuren framgår att skillnaderna i effekt mellan de olika stabiliseringsmedlen var störst hos den leriga silten, då inblandning av kalk i detta fall medförde avsevärt högre permeabilitet än de två övriga medlen. Cementstabiliserad jord hade genomgående de lägsta uppmätta värdena på permeabilitet, 10^{-10} - 10^{-9} m/s, och kalkstabiliserad jord de högsta, 10^{-9} - $5 \cdot 10^{-7}$ m/s, medan värdet för kalk-cementstabiliserad jord låg någonstans mellan de övriga.

Jämförelser med uppmätta värden för den ostabiliserad leran (Tremblay & Eriksson, 1987) och den ostabiliserade leriga gyttjan visade på att stabilisering med kalk gav något högre permeabilitet i dessa två jordar, medan kalk-cement gav ungefär samma och cement något lägre permeabilitet. Någon undersökning av permeabiliteten i den ostabiliserade leriga silten var inte gjord men denna kan uppskattas till 10^{-9} - 10^{-8} m/s. Stabiliseringen av den leriga silten gav ungefär motsvarande effekt som för de två andra jordarna men med skillnaden att permeabiliteten efter inblandning av kalk blev betydligt större.



Figur 5.35. Uppmätt vertikal deformation under långtidsbelastning vid initieell skjuvspänningsnivå motsvarande 50 % respektive 75 % av initieell brottspänning.

Figure 5.35. Measured vertical deformation during long-term loading at an initial shear stress level corresponding to 50 % and 75 % respectively of the initial failure load.



Figur 5.36. Resultat av permeabilitetsförsök i stabiliserad jord.

Figure 5.36. Result of permeability tests in stabilised soil.

Värden på permeabiliteten utvärderades också vid de *kompresionsförsök* (CRS) som utfördes på de olika materialen. Vid kompressionsförsöken hade proverna en lägre vattenmättnadsgrad jämfört med de vid de rena permeabilitetsförsöken där permeabilitetsvärdet utvärderades först efter en viss tids genomströmning av vatten. Detta medförde att resultaten från kompressionsförsöken på olika sätt skilde sig från permeabilitetsförsöken. *)

Cement gav genomgående lägsta värden på permeabiliteten men i övrigt var spridningen i resultat stor. Värdet hos kalkstabiliserad lerig silt var ett par 10-potenser lägre än de enligt permeabilitetsförsöken, men för övriga blandningar gällde att kompressionsförsöken visade på något högre värden för de inte helt mättade proverna. Skillnaden var i medeltal något större för de cementstabiliserade proverna än för de kalkstabiliserade proverna, 2,3 respektive 1,2 gånger värdet enligt permeabilitetsförsöken.

5.4 VIDARE ANALYS OCH DISKUSSION AV RESULTAT

5.4.1 Hållfasthetsegenskaper

Allmänt

Resultaten från de enaxliga tryckförsöken visar att uppnådd hållfasthet ökar med mängden bindemedel då cement eller blandningar av cement och kalk används. För ren kalk är oftast detta inte fallet. För de cementdominerade bindemedlen finns även ett klart samband mellan hållfastheten och kvoten mellan mängden vatten och mängden bindemedel, det så kallade vattenbindemedelstalet (vbt). Detta ger en förbättrad möjlighet att med kännedom om jordens vattenkvot relativt väl kunna uppskatta vilken hållfasthet som uppnås med viss mängd bindemedel.

Vid mycket höga hållfasthetsnivåer skiljer sig den stabiliserade jordens hållfasthets- och deformationsegenskaper så kraftigt från den ostabiliserade att en beräkning av jordens bärförmåga på traditionellt sätt med hjälp av ett vägt medelvärde på skjuvhållfastheten kan bli grovt felaktig. I sådant fall är det ofta rikti-

*) *Anm.* En lägre vattenmättnadsgrad ger normalt lägre permeabilitet. Högre uppmätt permeabilitet kan relateras till anliggningsproblem vid överstämpeln eftersom man då får extra deformationer som inte är relaterade till vattenutpressning ur provet.

gare att beräkna pelarna som distinkta lastupptagande element och jorden som obelastad. Genom val av tillräcklig säkerhetsfaktor på brotthållfastheten tillses att aktuell påkänning inte kommer i närheten av brotthållfastheten.

Det ligger utanför ramarna för denna rapport att ange eller föreskriva hur valet av säkerhetsfaktorer för hållfastheten skall ske. Några riktlinjer kan emellertid ges. En faktor att ta hänsyn till är konsekvensen av ett pelarbrott. Detta kan göras genom att tillämpningarna klassas i olika säkerhetsklasser, t ex enligt mönstret i Boverkets konstruktionsregler, BKR 94. Bortfall av en pelare under en vägbank t ex är normalt mindre allvarligt än bortfall av en pelare under en järnväg eller ett husfundament.

Dessutom bör hänsyn tas till den osäkerhet som spridningen i materialegenskaperna ger. Storleken på denna faktor bör kunna vara kopplad till en viss provningsfrekvens och metod så att en omfattande förprovning och fortlöpande provning i fält medger lägre faktor.

Om laboratorieblandningar med den i avsnitt 5.1 beskrivna metoden utförs ökar säkerheten i resultaten i hög grad om fler än en blandning görs. Skälet är att blandningsarbetet förefaller att starkt påverka resultatet, samtidigt som det är svårt att få det likvärdigt från gång till gång, jämför avsnitt 5.1.2. För några kombinationer av bindemedel och jordart finns resultat från mer än en blandning, eftersom de ingått i projektets båda etapper. I extremfall har variationskoefficienter (kvoten mellan standardavvikelse och medelvärde) på upp till 55 % erhållits. Detta innebär att risken är ungefär 5 % att ett enstaka laborativärde skall vara dubbelt så stort (eller hälften så litet) som det "sanna" värdet. Provkroppar ur samma blandning uppvisar däremot en relativt liten spridning, en variationskoefficient på 15 - 20 % kan noteras.

Såväl dimensionering via kännedom om jordart och vbt (diagram) som via laboratieförsök påverkas dessutom av osäkerhet i sambandet mellan laborativhållfasthet och fälthållfasthet. Här behövs mer data.

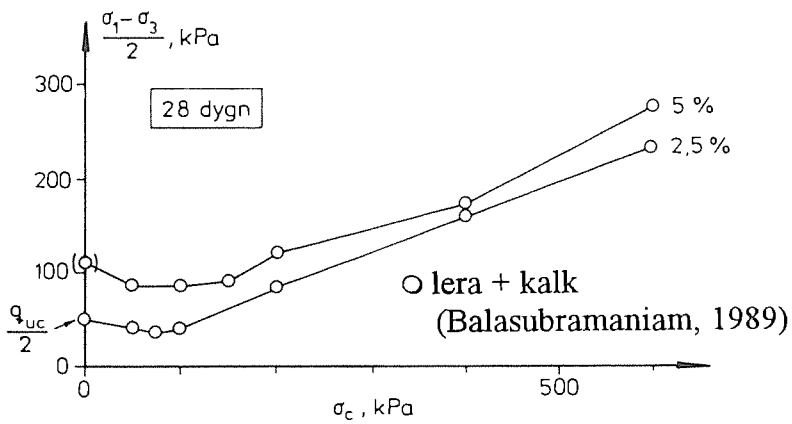
Spänningsberoende

Resultaten av de olika försök som utfördes för att studera skjuvhållfasthetens spänningsberoende gav bedömningen att direkta skjuvförsök enligt gängse provningsmetod för ostabiliserade leror inte är lämpliga att använda för provning av stabiliserade leror eller någon vidare analys av eventuella samband eller tendenser. Detta kan anses gälla generellt åtminstone i de fall stabilisering förväntas ge en väsentlig hållfasthetsförbättring hos jorden.

Triaxialförsöken blev utförda vid en relativt sen tidpunkt efter inblandning, vilket gäller både de som utfördes vid 4 månaders ålder och de försök som utfördes med kalk-cementstabiliserad lerig silt och lerig gyttja 2 månader efter inblandning. Några mer omfattande, generella slutsatser kan inte dras av resultaten då dessa endast utgör en begränsad undersökning av tillväxt med tiden och av den stabiliserade jordens beteende vid låga hållfasthetsnivåer.

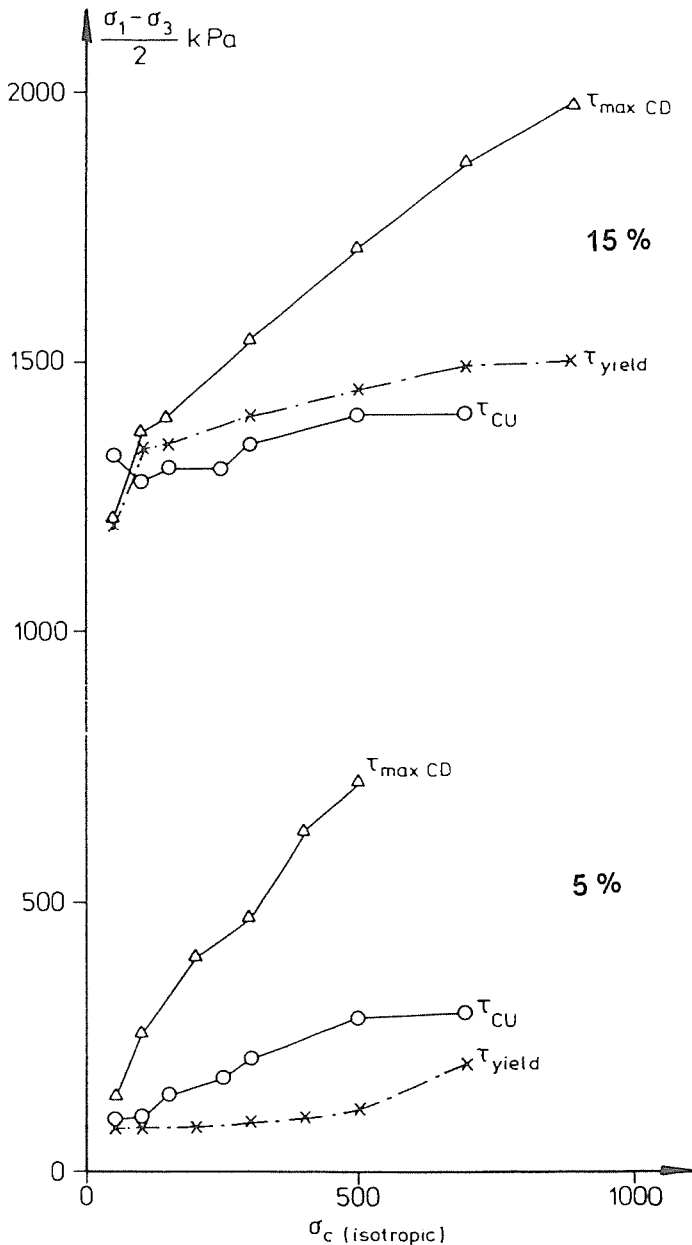
I **Figur 5.15** har uppskattad skjuvhållfasthet enligt de enaxliga tryckförsöken för en tidpunkt motsvarande den vid triaxialförsöken lagts in vid en konsoliderings-spänning lika med noll i diagrammen. Överensstämmelsen mellan de enaxliga tryckförsöken och triaxialförsöken vid låga konsoliderings-spänningar var till övervägande delen relativt god. En viss skillnad var väntad då proverna för de enaxliga tryckförsöken och de för triaxialförsöken hade blandats vid två olika tillfällen, vilket kan ge en viss skillnad i resultat men skiljaktigheter skapades också av att proverna för triaxialförsök hade vattenmättats i så stor utsträckning som möjligt medan proverna för tryckförsöken tillverkats på normalt sätt utan möjlighet att ta till sig vatten. Den klart största avvikelser i resultat uppmättes för den kalk-cementstabiliserade leriga silten där de enaxliga tryckförsöken visade på en nära på dubbelt så hög skjuvhållfasthet som triaxialförsöken.

För att få en mer allmän bild av hållfasthetens variation vid olika spänningsnivåer kan resultaten jämföras med vad som uppmättes vid tidigare redovisade undersökningar. Försök som till viss del åskådliggör odränerad och dränerad skjuvhållfasthets spänningsberoende vid dels lägre skjuvhållfasthetsnivå dels varierande mängd tillsatt stabiliseringsmedel, har tidigare redovisats av bl a Balasubramaniam (1989), Suzuki (1982) och Tatsuoka & Kobayashi (1983). Liksom resultaten från de direkta skjuvförsöken i viss mån antydde, visar dessa undersökningar att den odränerade skjuvhållfastheten är nära nog konstant oavsett konsoliderings-spänningen eller har betydligt flackare ökning upp till en viss spänningsnivå varöver hållfastheten ökar mer markant med ökande spänningsnivå. Efter kort tid eller vid små tillsatsmängder är spänningsintervallet med konstant skjuvhållfasthet litet. Med ökande tid och/eller tillsatsmängder och därmed ökande kohesion hos materialet ökar sedan detta intervall så att skjuvhållfastheten är ungefär konstant upp till relativt höga spänningsnivåer, jämför **Figur 5.37 - 5.39**. Av figurerna framgår också att den dränerade skjuvhållfasthetens spänningsberoende minskar något med ökande mängd stabiliseringsmedel, eller ökande hållfasthetsnivå. Detta är något som också jämförelser av resultaten från den kalk-cementstabiliserade leriga silten och leriga gyttjan efter 2 månader och 4 månader visar på. För de spänningsnivåer där den dränerade skjuvhållfastheten är lägre eller ungefär lika med den odränerade inträffar inte flytning vid någon



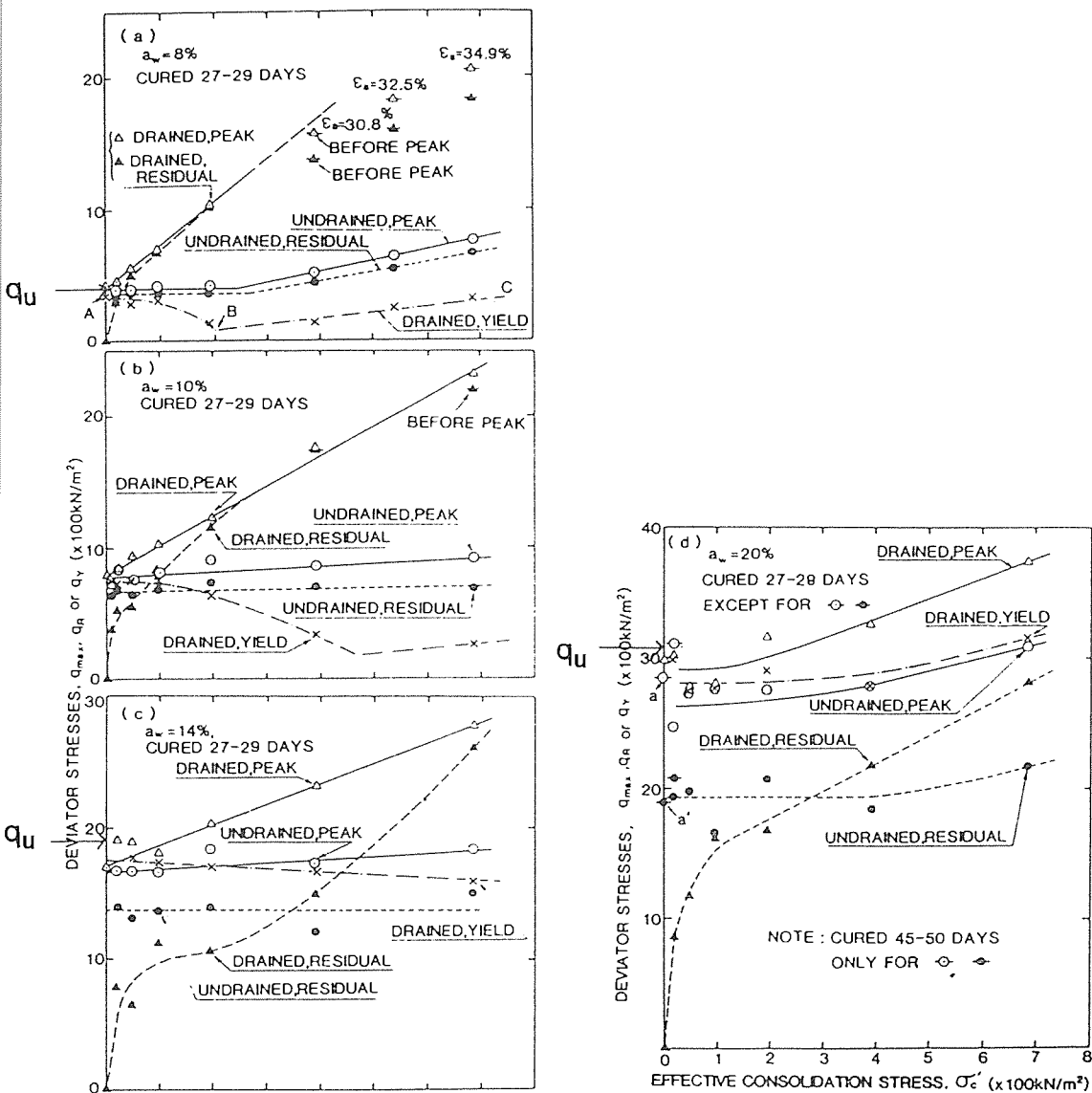
Figur 5.37. Lera stabiliserad med 2,5 % respektive 5 % kalk, 28 dygn efter inblandning. Odränerad skjuvhållfasthet enligt triaxialförsök.

Figure 5.37. Clay stabilised with 2.5 % and 5 % lime respectively, 28 days after mixing. Undrained shear strength according to triaxial compression tests.



Figur 5.38. Lera stabiliserad med 5 % respektive 15 % cement. Hållfasthetsvärdena utvärderade från triaxialförsök redovisade av Suzuki (1982).

Figure 5.38. Clay stabilised with 5% and 15% cement respectively. Strength values evaluated from triaxial compression tests reported by Suzuki (1982).



Figur 5.39. Odränerad och dränerad hållfasthet vid olika spänningsnivåer och vid olika tillsats av cement. Från Tatsuoka & Kobayashi (1983).

Figure 5.39. Undrained and drained strength at different stress levels and different proportions of cement. From Tatsuoka & Kobayashi (1983).

lägre spänningsnivå än brott vid det dränerade försöket. Där den dränerade skjuvhållfastheten däremot är betydligt högre än den odränerade inträffar flytning mer eller mindre markerat vid lägre skjuvspänningsnivåer än brott. Denna flytspänning förefaller ungefär motsvara den odränerade skjuvhållfastheten vid låga konsolideringsspänningar. I **Figur 5.39** antyds ett minvärde för flytspänningen vid en konsolideringsspänning som kan antas motsvara en form av förkonsolideringstryck hos materialet.

Generellt gäller att stabiliserade jordars beteende i hög grad liknar det hos en mer eller mindre överkonsoliderad jord. Precis som för ostabiliserade, överkonsoliderade jordar uppträder de stabiliserade materialen dilatant och uppträder också mindre dilatant vid höga spänningsnivåer än vid låga.

För material där flytning inträffar bör noteras att skjuvspänningen därefter visserligen ökar till en nivå ungefär lika med resthållfastheten hos övriga blandningar med motsvarande konsolideringsspänning men att brott då inträffar vid förhållandevis stora deformationer. Om dessa stora deformationer inte kan accepteras måste en lägre skjuvhållfasthet ansättas vid dimensionering.

Vid tillverkning av prover strävade man efter att göra dessa så likvärdiga som möjligt, men vid packning i provhylsor förekom att små luftfickor eller andra inhomogeniteter uppstod. Trots detta uppstod inte några större avvikelser i resultaten utan tvärt om ger gjorda sammanställningar en förhållandevis samstämmig bild av materialens beteende vid olika spänningar. Det kan emellertid också konstateras att t ex utvärderingar av effektivspänningsparametrarna ϕ' och c' ur enbart odränerade försök, som ibland förespråkas, hade inneburit en betydligt mer osäker utvärdering med större spridning i resultaten.

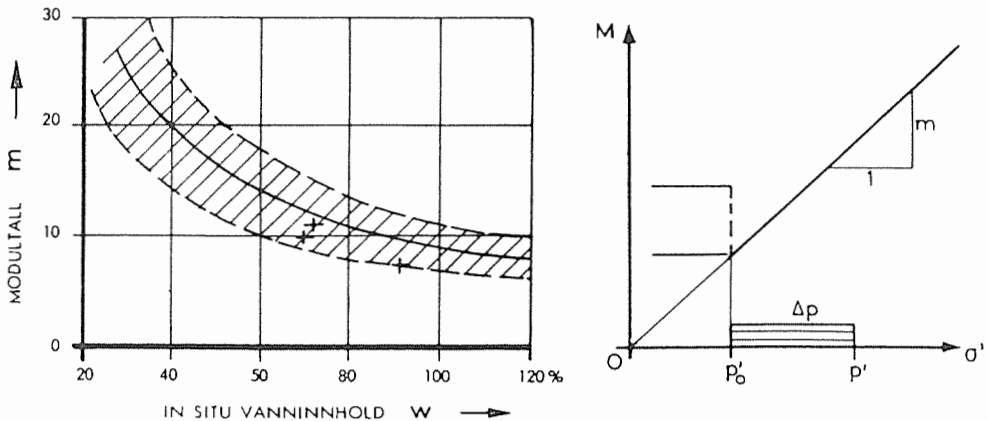
Värdet på c' ökade med ökande skjuvhållfasthet hos materialet och c' hos försöken motsvarade en faktor 0,25 - 0,5 gånger den utvärderade odränerade skjuvhållfastheten. Denna relation bedöms kunna användas för grov skattning av storlek av c' . För att mer säkert bestämma den dränerade skjuvhållfastheten krävs att dränerade försök utförs varvid storleken på c' också kan utvärderas ur dessa.

I de fall risk för dränerat brott föreligger, bör också effekten av ett eventuellt sprött beteende beaktas. I de undersökta materialen, som huvudsakligen uppvisade ett markant dilatant beteende vid låga spänningsnivåer uppstod brott vid små deformationer samtidigt som resthållfastheten vid stora deformationer var förhållandevis låg. Förhållandet med liten brottdeformation och låg residualhållfasthet accentuerades med ökande maximal hållfasthet och minskande spänningsnivå.

Resthållfastheterna vid de enaxliga tryckförsöken utvärderades inte enskilt för varje försök, men dessa var uppskattningsvis i samma storleksordning som dem som erhålls vid extrapolering av dränerad resthållfasthet till fallet för prover utan någon pålagd konsolideringsspänning. De enaxliga tryckförsöken kan i huvudsak betraktas som odränerade försök fram till dess brott inträffar, varefter försöket övergår till att i högre grad vara dränerat då sprickor öppnar sig vid ökande deformation och eventuella portryck i glidytan kan antas utjämnas.

5.4.2 Deformationsegenskaper

Undersökningarna av kompressionsmoduler med CRS-försök visade också på ett relativt sprött beteende hos de stabiliserade jordarna. Efter en viss deformation av proven uppträder materialen som om stabiliseringsmedlets cementerande effekt nästan helt brutits ned och vid högre spänningar erhålls ungefär samma modul-spänningskurva som för ostabiliserad jord, med linjärt ökande modul med ökande spänning. Minimumnivån hos kompressionsmodulen uppnås vid förhållandevis små deformationer, i de aktuella försöken runt 2 à 3 %. Jämförelse kan också göras med typiska moduler för de olika jordtyperna (Janbu, 1970), se **Figur 5.40**. Resultaten antyder att kompressionsmodulen hos stabiliserad jord med ökande spänningsnivå/deformationer minskar ned till en nivå i samma storleksordning som den hos en ostabiliserad jord av samma typ, vid motsvarande effektivspänning.



Figur 5.40. Vattenkvotens inflytande på m i lera. Från Janbu (1970).

Figure 5.40. Influence of water content on m in clay. From Janbu (1970).

En beskrivning av kompressionsegenskaperna med ett enda värde på kompressionsmodulen kan endast göras i de fall aktuell spänningsökning i jorden ligger inom spänningsområdet där modulen är ungefär konstant. I de fall belastningar av jorden förväntas öka spänningarna i pelarna till nivåer över den aktuella gränsspänningen bör kompressionsmodulens spänningsberoende tas i beaktande vid beräkning av deformationer.

Kompressionsförsöken utförs med förhindrad sidodeformation varför utvärderad modul normalt antas motsvara den vid belastning av en homogen jord från en utbredd last. Utvärderad E-modul ur de dränerade triaxialförsöken å andra sidan motsvarar en modul där materialet belastas vertikalt utan någon förändring av den effektiva horisontalspänningen i jorden. En installation av pelare med efterföljande belastning av ett pelarförstärkt område innebär att spänningar såväl som portryck förändras i jorden. Endast ett fåtal uppföljningar finns där portryck och horisontaltryck mätts i en pelarförstärkning varför antaganden om spänningsförhållanden i samband med belastning är relativt osäkra. För normalkonsoliderad kompressibel jord som det oftast är frågan om fordras dock relativt stora kompressioner för att några större effektiva horisontaltrycksökningar skall uppstå. Mätningar från förstärkningar med singulära, kvadratisk placerade pelare c/c 1,2 - 1,7 m, har också visat på endast små förändringar i effektiva horisontalspänningar närmast pelaren i samband med belastning även efter relativt lång tid (Bengtsson m fl, 1993). En bedömning av möjliga horisontalspänningar ger vid handen att kompressionsmodulen kan vara relevant i de fall marken belastas med utbredd last och pelarna är tätt placerade i skiv- eller gittermönster, medan någon form av elasticitetsmodul bör användas i de fall pelarna är glesare placerade i singulära mönster.

Vid utförande av ödometerförsök såväl som triaxialförsök krävs en noggrann preparering av prover för att åstadkomma släta och parallella ändytor. Ju högre hållfasthet materialet har desto svårare kan detta vara att åstadkomma. Nödvändigheten av en genomtänkt och väl fungerande teknik för trimning av prover ökar då betydligt med tanke på att inverkan av ojämnheter kan förväntas vara stor i dessa material. I de fall man ytterligare vill minimera effekten av ojämnheter bör triaxialförsök väljas som provningsmetod då provhöjden här är betydligt större än den vid ödometerförsöken, varför inverkan av dessa felkällor i hög grad minskar. Specialförsök med mätning av deformationer mellan punkter på själva provkroppen kan också utföras.

Krypeffekter vid långtidsbelastning

Endast ett fåtal försök utfördes med långtidsbelastning av prover för att studera belastningstidens inverkan på utvärderade moduler. Försöken utfördes vid låga skjuvspänningsnivåer i förhållandevis fasta material vilket också gav en mycket begränsad deformationsförändring med tiden. Krypeffekterna kan förväntas vara markant större än de här uppmätta i de fall skjuvspänningsnivåerna ligger närmare brottspänningen.

5.4.3 Permeabilitet

Resultaten av utförda permeabilitetsförsök i laboratoriet visade på permeabilitetsvärden hos de olika materialen som var i samma storleksordning som de hos ostabiliserad jord. Då makrostrukturen hos pelare i fält i olika grad skiljer sig från den hos dessa laboratorietillverkade prover, kan uppmätta värden inte direkt användas för att uppskatta permeabiliteten i fält. Uppmätta resultat bör snarare ses som mått på effekter som kan uppnås i förhållandevis homogena partier av pelarna.

Kapitel 6.

Kemisk laboratorieprovning av stabiliserad jord samt gränsszon

6.1 BAKGRUND

6.1.1 Allmänt

Vattenfasens sammansättning förändras genom att stabiliseringsmedlet reagerar med vattnet och löses upp samt att det sker ett jonbyte med absorberade joner i leran. Vid stabilisering med kalk tillförs nästan enbart kalciumjoner, medan stabilisering med cement även tillför Na^+ - och K^+ -joner. Kalk och cement ger båda OH^- -joner, men cement ger dessutom sulfatjoner (SO_4^{2-}). Dessa skillnader har betydelse för den stabiliserade lerans mekaniska egenskaper. Jonkoncentrationerna i vattenfasen bestämmer om den stabiliserade leran strax efter blandningen får en lös konsistens eller stabiliseras.

Den fasta fasen består av jordens fasta material, oreagerat stabiliseringsmedel och bildade reaktionsprodukter. Vissa av lermineralen reagerar med stabiliseringsmedlet genom puzzolanreaktioner och bildar bindande material, CASH. Stabiliseringsmedlet förbrukas genom upplösning i vattenfasen och reaktion med lermineralen. Om stabiliseringsmedlet innehåller cement bildas också bindande material från cementets reaktion med vattnet, CSH. Detta ger skillnader i det bindande materialets sammansättning och mängd.

Lerans kornstorlek ger ett mått på tillgänglig reaktiv yta. Det bildas mer bindande material om kornstorleken är mindre, men samtidigt är ytan som skall bindas samman större. Leror med mindre kornstorlek har också normalt högre vattenhalt, vilket innebär att en större volym måste fyllas ut med reaktionsprodukter för att man skall få en viss täthet.

Gyttjor och jordar med hög organisk halt ger ofta låga hållfastheter vid stabilisering. Retarderande ämnen i form av humussyror kan förekomma. De minskar reaktionshastigheten kraftigt, men på lång sikt börjar hållfastheten tillväxa om

mängden stabiliseringsmedel är hög nog för att neutralisera syran. I jordarter med organiskt material upptar detta en stor del av volymen. Kontakten mellan lerpartiklarna är begränsad och det bindande materialet förhindras att binda samman partiklarna. Vid stabilisering med cement uppnås bättre resultat än med kalk, genom att cementkornen själva också bildar bindande material, som stabiliserar. I torv har inblandning av sand eller flygaska tillsammans med stabiliseringsmedlet gett goda resultat. Detta beror sannolikt på att halten oorganiskt material därmed ökat så att puzzolanreaktionerna kan ske i större omfattning.

Svällning genom ettringitbildning orsakas av att ett överskott av sulfatjoner reagerar med lerans aluminatkomponenter. För att sulfater skall bildas i sulfidhaltiga jordar måste syre tillföras genom luft eller kemiska reaktioner så att sulfiden omvandlas till sulfat. Sulfater kan också tillföras med strömmande vatten. Jordar som innehåller sulfater kan ge svällning dels genom ettringitbildning men också genom gipsbildning med kalciumjonerna.

Sulfidhaltiga jordar ger ofta låg hållfasthet vid stabilisering. Detta beror på att sulfiden finns i organiskt material och att det är det organiska materialet som orsakar låg hållfasthet liksom i gyttjor etc. Det organiska materialet kan dessutom innehålla humussyror som ger retardation.

Beständigheten hos det bindande materialet bestäms av risken för urlakning. Sura vatten ($\text{pH} < 5$) angriper svårare än neutrala eller basiska. Vattenströmningen genom stabiliserad lera eller pelare är emellertid ytterst liten. Skillnaden i beständighet mellan bindande material, som bildats vid stabilisering med cement resp kalk är obetydlig. De hållfasthetsuppbyggande materialen är av samma typ som i betong eller antika cement.

6.1.2 Hypoteser

För att undersöka i vilken omfattning olika faktorer inverkar på stabiliseringen gjordes ett antal olika försök med kemiska analyser av stabiliserad såväl som ostabiliserad jord. Uppläggningsen av försöken baserades på ett antal hypoteser enligt följande:

- Skillnaden i vattenfasens sammansättning vid inblandning av cement respektive kalk kan förklara skillnader i mekaniska egenskaper kort tid efter inblandningen. Jonbytet blir mindre effektivt med cement.
- Kornstorleken har betydelse för hur fort puzzolanreaktionerna sker och för hur mycket bindande material som bildas. Detta provas genom undersökning-

ar med siltig lera, lera och gyttjig lera. Om reaktionerna kan kvantifieras genom mätning av stabiliseringsmedlets förbrukning eller reaktionerna för vissa lermineral så ger detta ett mått på hur stor del av hålrummen som kan fyllas med bindande material och därmed möjlig hållfasthet. Dessa försök skall utföras vid 40 °C för att reaktionerna skall ske snabbare.

- Temperaturen inverkan belyses i ett annat försök. Puzzolanreaktionen är mycket temperaturkänslig. Stabilisering med kalk ger hög temperatur i pelaren vilket ger förloppet en annan temperaturhistoria än för cement. Proverna lagras vid 8 respektive 40 °C.
- Gränssonen kring cementstabiliserade pelare blir lös och vattenfasens sammansättning har betydelse för detta. Analyser på olika avstånd från gränsen mellan stabiliserat och ostabiliserat material skall belysa detta för en lera med cement respektive kalk. Man kan också tänka sig att blandningar med cement krymper mer eftersom man får en s.k. kemisk krympning när cement reagerar. Detta skulle kunna vara en orsak till den spalt, som ibland har upptäckts mellan pelare och omgivande jord. Volymförändringarna för några blandningar med cement respektive kalk mäts också.
- Svällningen hos blandningar med sulfidhaltig lera bestäms i ett enkelt volymeterförsök.

Provningsprogrammet visas schematiskt i **Tabell 6.1**.

Tabell 6.1. Provningar för studier av kemiska reaktioner.

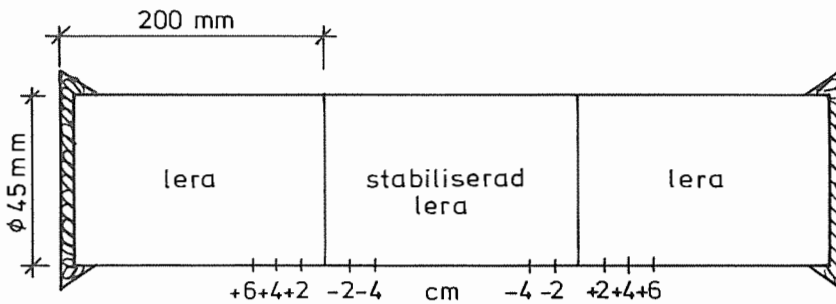
Provning	Stabmedel	Jordart					
		Lerig silt		Lera		Lerig gyttja	
Reaktivitet fast fas vattenfas	10 % kalk 10 % cement	40 °C 0, 7, 28, 91, 270 dygn 8 °C mer än 270 dygn					
Gränsszon	10 % cement			8 °C 7, 21, 40dygn			
Volymförändring	10 % kalk 10 % cement	20 °C	0-140d	20 °C	0-140d	20 °C	0-70d 0-140d
Sulfidsvällning	10 % kalk 10 % cement 10 % sulf.res.cem	20 °C sulfidlera					

6.2 PROVBEDNING

6.2.1 Tillverkning av prover

Jorden som provades var densamma som användes för hållfasthetsprovningarna. Stabiliseringsmedlet blandades in med höghastighetsblandare och proverna förvarades i plastpåsar fram till provningstillfället. Dessa prover användes för analys av vattenfasen, den fasta fasen och för bestämning av volymförändringen. För analys av den fasta fasen avbröts reaktionerna genom tvättning med aceton/etanol för att avlägsna vattnet.

För gränsonsökningsförsöken användes plastcylindrar med diametern 45 mm och längden 200 mm. Två cylindrar fylldes med ostabiliserad lera och en med stabiliserad lera. Cylindrarna pressades ihop med det stabiliserade materialet i mitten och förseglades, se **Figur 6.1**. Skivor med tjockleken 2 cm togs senare ut och analyserades med avseende på den fasta fasens och vattenfasens sammansättning.



Figur 6.1. Skiss över provkropp till gränsonsökningsförsök.

Figure 6.1. Specimen for boundary zone tests.

6.2.2 Lagringstemperatur

Proverna för kemisk analys förvarades förslutna i 40 °C utom ett i varje serie som förvarades i 8 °C.

Proverna för gränsonsökningsförsöken förvarades i 8 °C.

För volymbeständighetstesten var temperaturen 20 °C.

Lagringstemperaturerna finns också sammanställda i **Tabell 6.1**

6.3 PROVNINGSMETODER

- Röntgendiffraktometri: Med denna metod kan mineral identifieras. Provet bestrålas med röntgenstrålar, som böjs i olika vinklar beroende på mineralets kristallstruktur. Strålningens intensitet mäts och avsätts mot vinkeln i ett diffraktogram. Ur detta kan mineralen identifieras genom jämförelse med kända värden. Metoden är halvkvantitativ men noggrannheten kan ofta ökas med bättre provpreparering. Med denna metod kan förbrukningen av lermine-ral och bindemedel beskrivas liksom förekomsten av kalciumhydroxid och ettringit. För bestämning av kalciumhydroxid användes också en kalorime-trisk metod (Differential Scanning Calorimeter).
- Porvattenpressning och ICP: Provet pressas i ett specialverktyg under högt tryck och porvattnet samlas upp. Halten OH^- -joner analyseras genom titre-ring och övriga joner analyseras med en ICP (Inductive Coupled Plasma). Analysmetoden innebär att vätskan sugas in i en låga med hög temperatur varvid en plasma bildas. Ljuset från denna analyseras och mängden av olika ämnen kan beräknas.
- Volymändring: 100 cm^3 prov placeras i en plastpåse. Luften sugas ur påsen varpå den placeras i en flaska med olja. Flaskkorken är försedd med ett stig-rör och volymförändringen kan avläsas ur höjden på oljepelaren i röret.

6.4 RESULTAT

6.4.1 Vattenfasen

■ Allmänt

Jonkoncentrationerna i vattenfasen bestäms i huvudsak av löslighetsprodukterna för salterna NaOH , KOH , Ca(OH)_2 , CaSO_4 och CaCl_2 , samt laddningsbalansen mellan positiva och negativa joner. Löslighetsprodukten definieras för salter med envärda joner som $[\text{A}^+] \cdot [\text{B}^-] = K$, där $[\]$ är koncentrationerna i mol/l. För Ca(OH)_2 är löslighetsprodukten $[\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{OH}]^{-2}$.

Om vi begränsar oss till de joner som är aktuella i dessa system så är NaOH och KOH lättlösliga salter och ger höga jonhalter utan att falla ut i fast form. Ca(OH)_2 är svårlösligt, CaCl_2 är lättlösligt och CaSO_4 är mera lättlösligt än Ca(OH)_2 . Na^+ och K^+ kommer från leran genom jonbyte eller från cementet. Högre Na^+ - eller K^+ - halter ger högre OH^- -halt. Högt Cl^- -halt ger förutsättningar

för högre Ca^{2+} -koncentration men samtidigt lägre halt OH^- -joner på grund av laddningsbalansen.

Utvärderingen har gjorts med utgångspunkt från ovanstående samband och är endast en relativ jämförelse.

■ Jordarter

Vattenfasens sammansättning för de ursprungliga jordarna redovisas i **Tabell 6.2**.

Tabell 6.2. Kemisk sammansättning av vattenfasen för ursprungliga jordarter.

Jordart	koncentration mmol/l						pH
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	SO_4^{2-}	Cl^-	
Lerig silt	1,28	-	2,66	0,86	0,86	3,1	5,9
Lera	8,26	5,29	55,7	1,87	4,17	66	6,5
Lerig gyttja	16,5	18,5	9,32	1,75	38,6	5,36	5,5

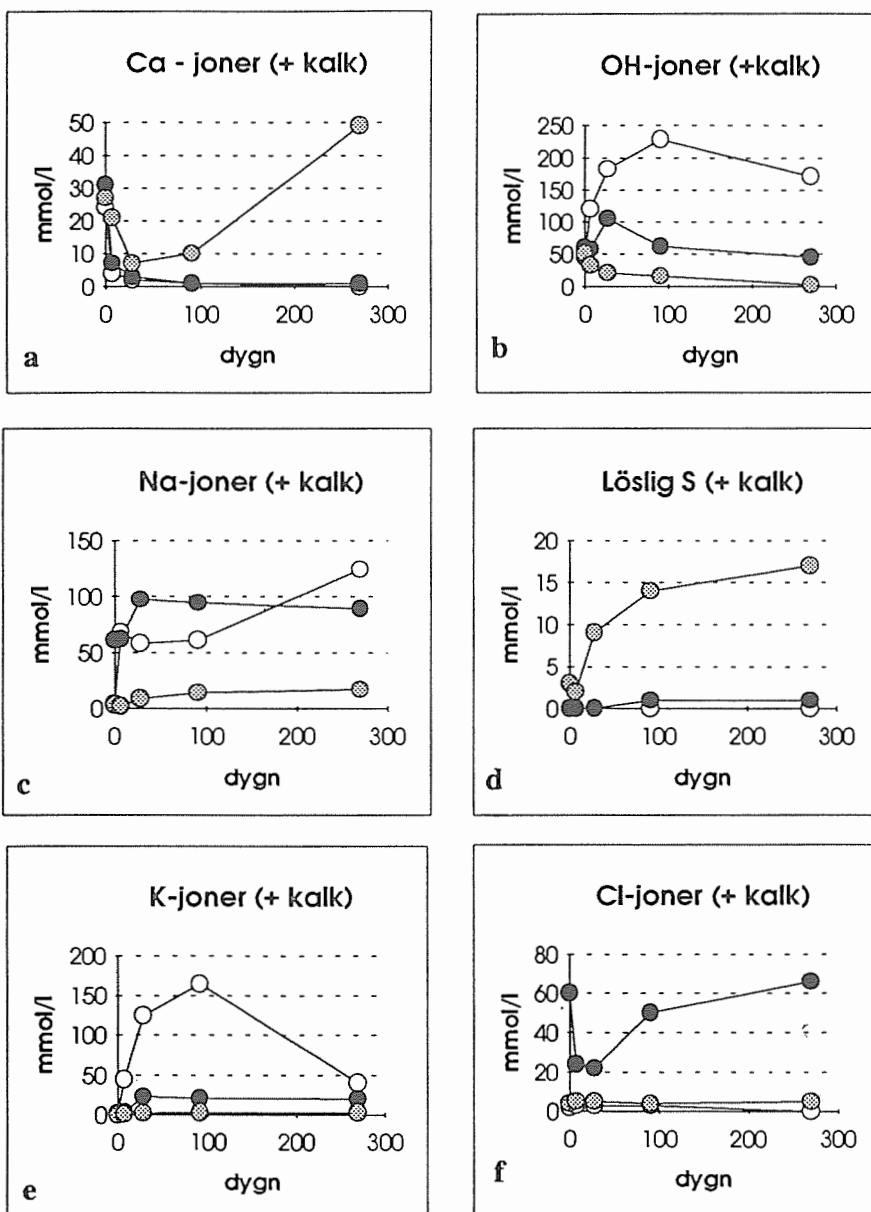
Koncentrationen av olika joner i vattenfasen vid olika tidpunkter framgår av **Figur 6.2 a-l**.

■ Jordart + kalk

Koncentrationen av kalciumjoner kort efter inblandningen är ungefär lika för alla jordarterna, **Figur 6.2 a**. Vattenfasen är mättad på kalciumhydroxid. Ca^{2+} -jonkoncentrationen i vattenfasen minskar genom adsorption på lermineralen vid jonbyte. Jonbytet som också kan ses av att K^+ - eller Na^+ -halterna ökar, är störst för siltig lera och lera. Den siltiga leran har både K^+ - och Na^+ -joner adsorberade medan leran i huvudsak har Na^+ -joner, **Figur 6.2 c och e**.

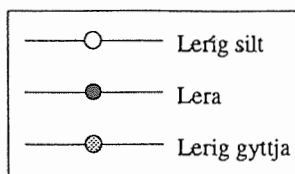
Ca^{2+} -jonerna förbrukas dessutom av puzzolanreaktionerna. Så länge det finns $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kvar i fast form, så kommer koncentrationen att ligga kring lösligheten för kalciumhydroxid, som är 0,5 mmol/l.

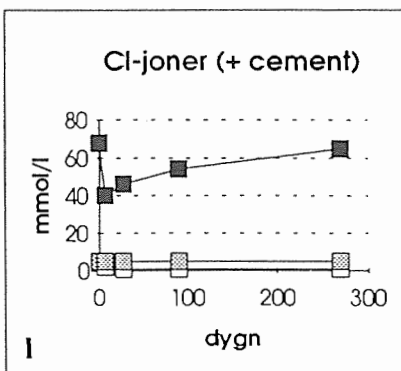
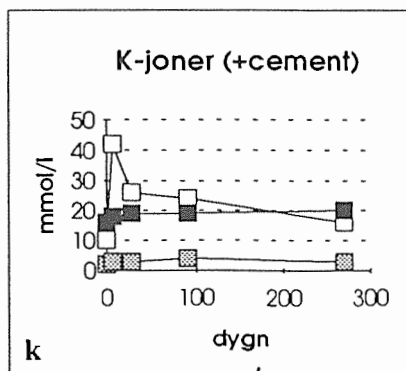
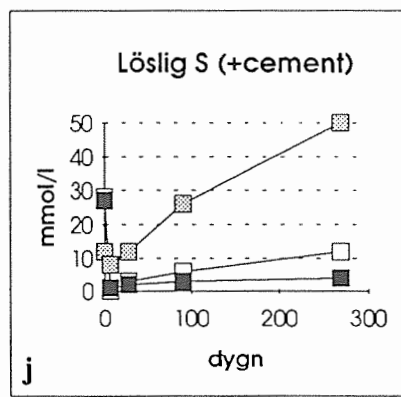
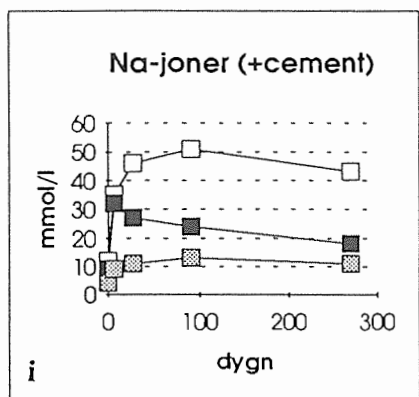
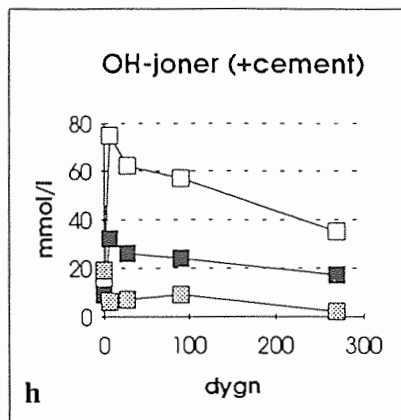
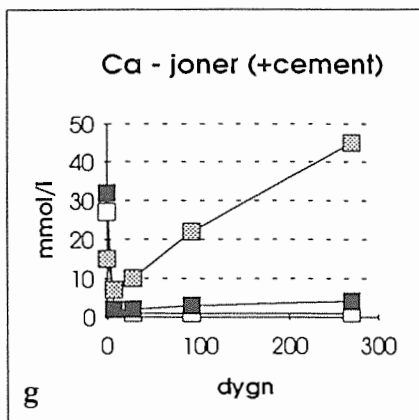
OH^- -halterna ökar när Ca^{2+} -halterna minskar, **Figur 6.2 b**. Detta beror på att lösligheten för KOH och NaOH är större än för $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Det innebär att ju mer K^+ - och Na^+ -joner som leran ger vid jonbytet desto högre koncentration av OH^- -joner i porvattnet. Lerans lägre OH^- -koncentration jämfört med den leriga siltens, trots hög Na^+ -halt, förklaras av närvaron av Cl^- -joner som också bidrar med negativa laddningar till jonbalansen, **Figur 6.2 f**.



Figur 6.2 a-f. Jonhalter i vattenfas. Jordarter + kalk.

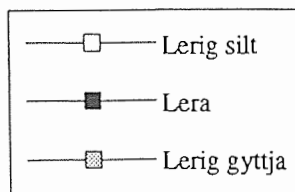
Figure 6.2 a-f. Ion contents in water phase, Soil types + lime.





Figur 6.2 g-l Jonhalter i vattenfas. Jordarter + cement.

Figure 6.2 g-l. Ion contents in water phase, Soil types + cement.



Vattenfasen för den leriga gyttjan skiljer sig genom högre halter av Ca^{2+} -joner och sulfat, **Figur 6.2 a och d**. Den ursprungliga jorden hade pH 5,5. Det finns alltså sura komponenter, som löser upp mer kalciumhydroxid.

■ *Jordart + Cement*

Kort efter inblandning av cement sjunker Ca^{2+} -halten samtidigt som Na^+ -halten stiger, **Figur 6.2 g och i**. För lerig silt så ökar även K^+ -halten vilket medför att OH^- -halten blir högre i denna blandning. Den leriga gyttjan har högre halter av Ca^{2+} och SO_4^{2-} . Det beror på lågt pH i den ursprungliga jorden vilket också ses av OH^- -halterna, **Figur 6.2 h**. På grund av högre Cl^- -halter så är OH^- -halterna lägre i leran jämfört med den leriga silten, **Figur 6.2 l**.

■ *Skillnader cement och kalk*

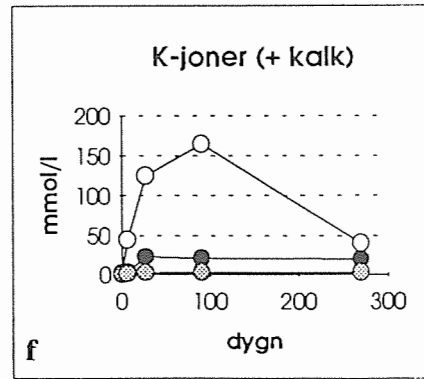
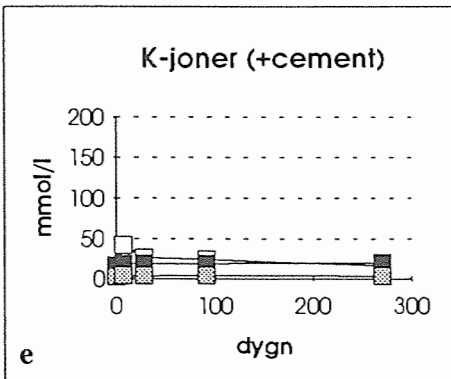
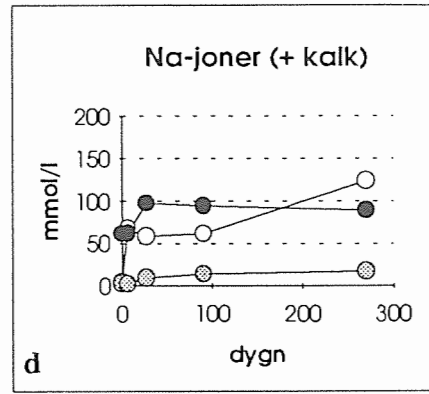
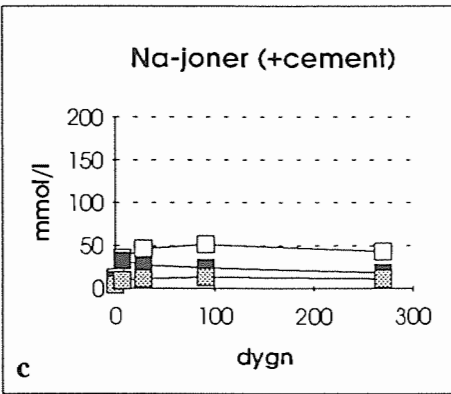
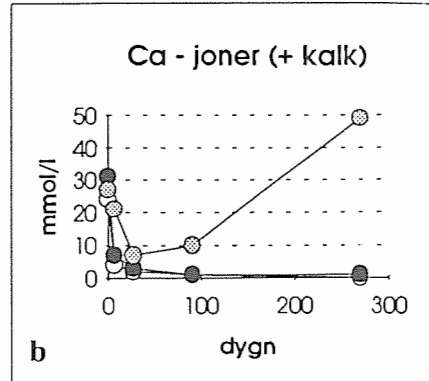
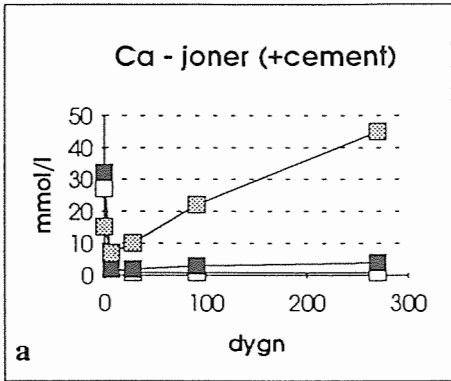
Skillnaderna i jonkoncentrationer i vattenfasen vid inblandning av kalk alternativt cement framgår av **Figur 6.3 a-l**.

Ca^{2+} -jonhalten är ungefär den samma. Kalken ger högre jonbyte vilket ses av Na^+ - och K^+ -halterna i **Figur 6.3 c-f**. För leran är Na^+ dominerande över K^+ eftersom det är en något salt lera. Jonbytet påverkar i sin tur OH^- -halterna enligt **Figur 6.3 g och h**. Leran har lägre OH^- -koncentration på grund av Cl^- -halten som ses i **Figur 6.3 k-l**. De högre OH^- -halterna för blandningarna med kalk ger också lägre sulfathalter i dessa.

6.4.2 Den fasta fasen

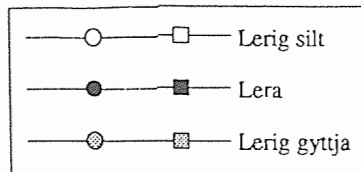
Den fasta fasen i stabiliserad lera består av lermineraler, stabiliseringsmedel, kalciumhydroxid och bildade reaktionsprodukter. Med röntgendiffraktometri kan kristallina faser studeras. Reaktionsprodukterna kan vara kristallina som strätlingit och ettringit men kan också vara amorfa i form av CSH-gel. Därför är det vanligast att man bestämmer hur mycket av lerans mineral, som reagerat för att få en uppfattning om reaktionshastigheten. Bindemedelsmängden är ofta för låg för att man skall kunna detektera kvarvarande mängd.

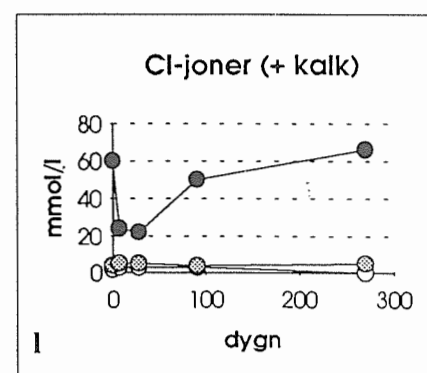
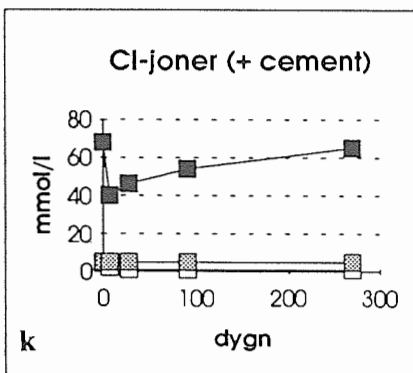
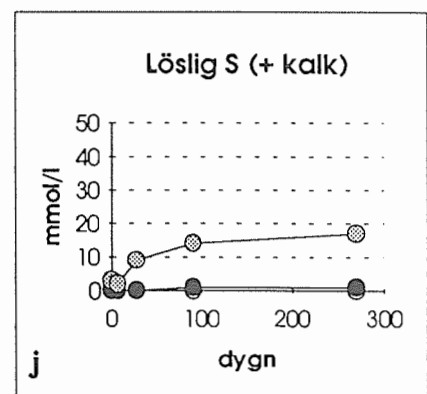
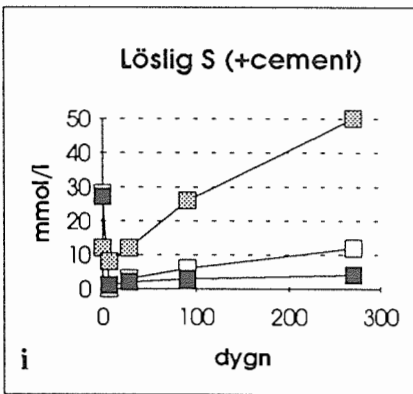
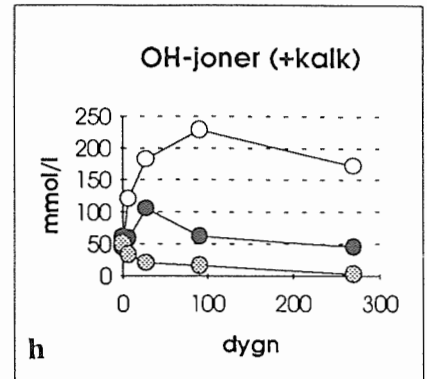
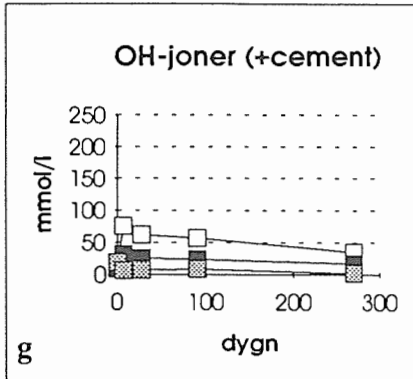
Figur 6.4 visar en del av ett röntgendiffraktogram för en lera, som reagerat med kalk respektive cement. Minskningen av topparna för lermineralen visar att dessa förbrukas i puzzolanreaktionen eller omvandlas på annat sätt. Vid inblandning av kalk kan kalciumhydroxiden detekteras och man ser hur den förbrukas med tiden. Med cement blir halten lägre och syns inte i diffraktogrammet.



Figur 6.3 a-f. Jonhalter i vattenfas. Jordarter + cement respektive kalk.

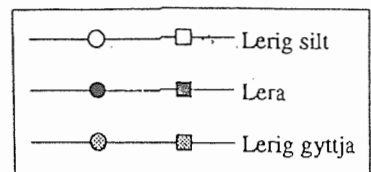
Figure 6.3 a-f. Ion contents in water phase, Soil types + cement and lime respectively.

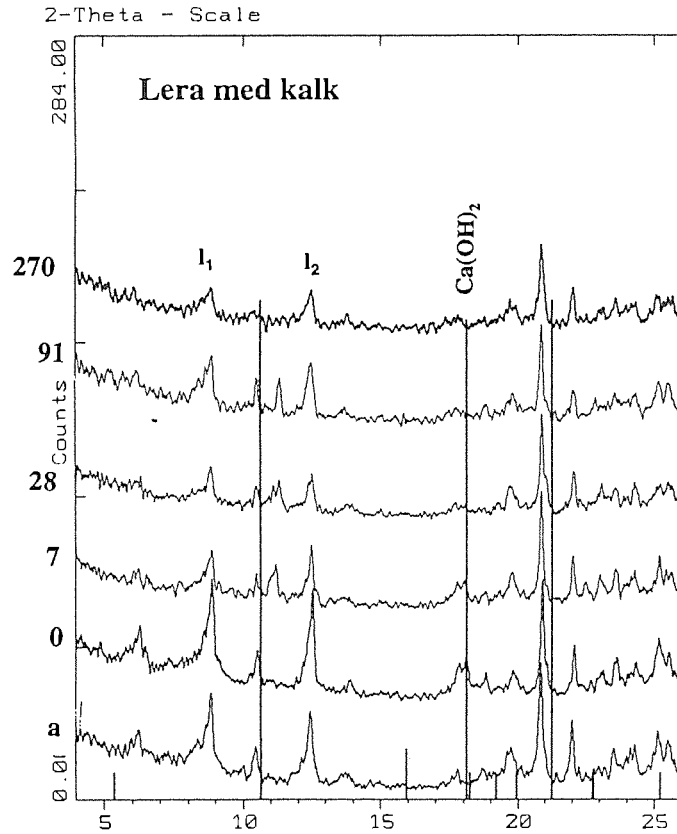




Figur 6.3 g-l. Jonhalter i vattenfas. Jordarter + cement respektive kalk.

Figure 6.3 g-l. Ion contents in water phase, Soil types + cement and lime respectively.





Figur 6.4. Röntgendiffraktogram av lera + kalk respektive cement. a = ursprunglig lera, 0 = direkt efter blandning. 7,28,91,270 = dygn efter blandning. I_1 = illit, I_2 = klorit.

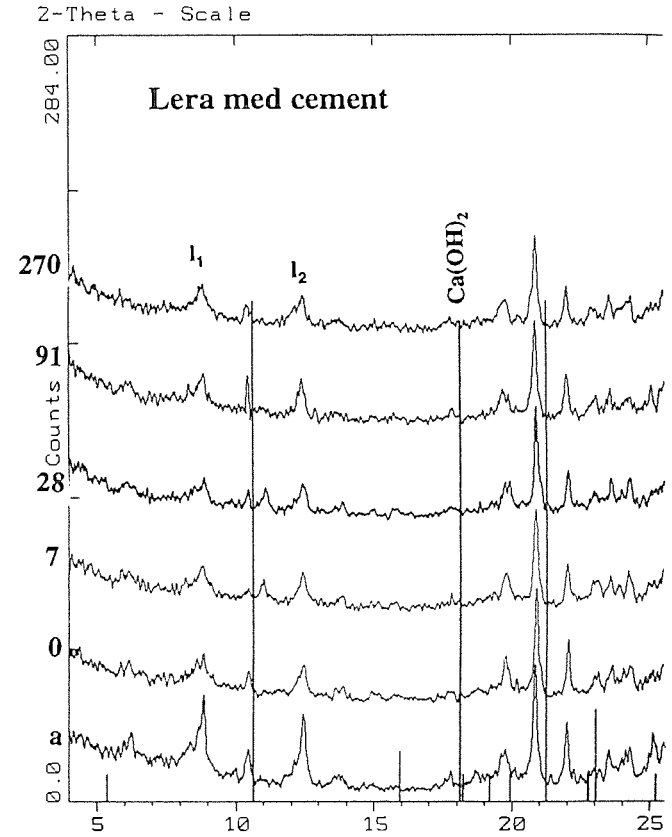


Figure 6.4. X-ray diffraction diagram of clay + lime and cement respectively. a = original clay, 0 = immediately after mixing. 7, 28, 91 and 270 days after mixing. I_1 = illite and I_2 = chlorite.

Genom kalibrering av metoden kan ämnena bestämmas kvantitativt. Skillnader i olika lerors reaktivitet skulle därmed kunna bestämmas. Detta har inte varit möjligt i denna undersökning. **Tabell 6.3** visar topphöjden för lermineral och Ca(OH)_2 för en lera med inblandning av 10 % kalk respektive cement.

Tabell 6.3. Relativa mängder av lermineral och Ca(OH)_2 i lera med 10 % kalk respektive cement. Värden i mm. (lermin 1 = illit, lermin 2 = klorit).

Prov/ålder	Lera + kalk			Lera + cement		
	lermin 1	lermin 2	Ca(OH)_2	lermin 1	lermin 2	Ca(OH)_2
0-prov	11	13	0	11	13	0
ca 5 min	13	15	3	5	5	0
7 dygn	6	9	3	4	5	0
28 dygn	4	4	1	3	5	0
91 dygn	6	8	1	4	6	0
270 dygn	3	5	0	4	5	0

■ Jordarter + kalk

Topparna för lermineralen har minskat betydligt några dagar efter blandningen. Troligen beror detta på att strukturen störs i samband med jonbytet. Mängden lermineral minskar sedan långsamt. Motsvarande mätningar för den leriga gyttjan visar att mängden lermineral minskar fortare än för leran. Värdena för lerig silt har stor spridning. Kalciumhydroxiden kan detekteras upp till ca 7 dygn i gyttjig lera och upp till 28 dygn i lera och siltig lera med större mängder i den senare.

■ Jordarter + cement

Inblandningen av cement medför en snabb minskning av topphöjden för lermineralen. Detta beror troligen inte på snabba reaktioner. Därefter är topparna relativt konstanta. Mängden lermineral tycks inte minska.

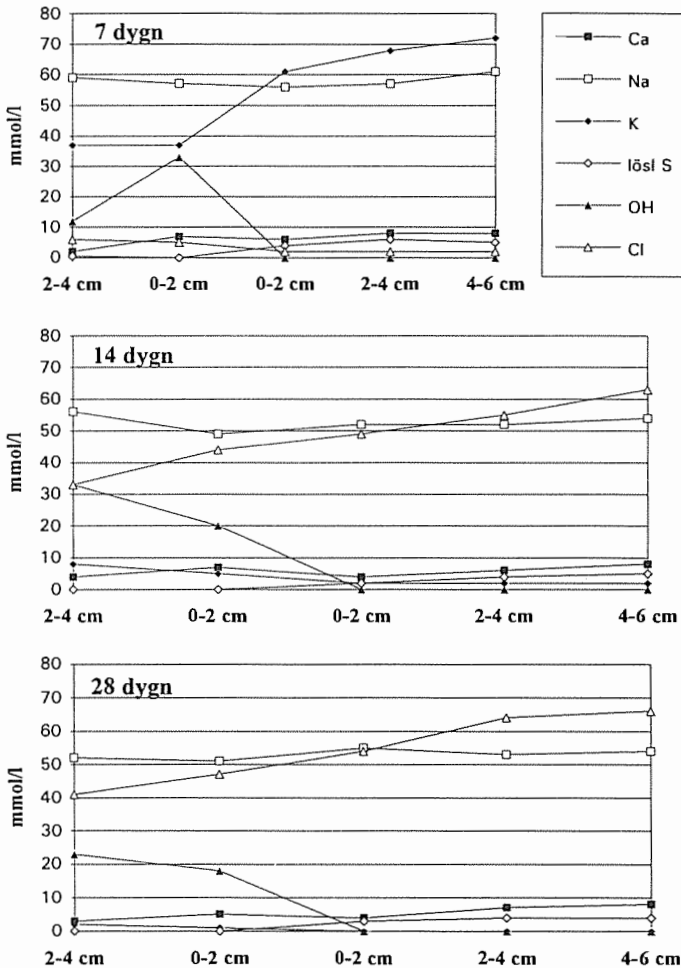
Kalciumhydroxiden kan endast detekteras i blandningen med lerig silt efter 7 dygn.

■ Skillnader kalk och cement

Lermineralen reagerar snabbare med kalk än med cement. Kalciumhydroxid fanns i överskott upp till 28 dygn i blandningar med kalk, medan blandningarna med cement endast hade detekterbara mängder för blandningen med lerig silt.

6.4.3 Gränsson

Vid öppning av provbehållarna syntes ett mycket tunnt och oregelbundet skikt av lösare lera mellan den stabiliserade och ostabiliserade leran. Eftersom materialmängden i den lösa zonen var otillräcklig för den planerade analysen togs ett antal 2 cm tjocka skivor för analys. Resultaten från analyserna av vattenfasen ses i **Figur 6.5**. Vid beräkning av laddningsbalansen mellan positiva och negativa joner finner man att OH-halten i skiktet 2-4 cm i det stabiliserade materialet efter 7 dygn är ca 20 enheter för låg. För övriga mätningar är avvikelserna mellan negativa och positiva joner mindre än 10 %.



Figur 6.5. Jonhalter i vattenfasen i gränsson. Lera + cement.

Figure 6.5. Ion content in water phase in boundary zone. Clay + cement.

Na⁺-halten ligger på samma nivå genom hela tvärsnittet. K⁺-halten är högre i det stabiliserade materialet på grund av cementet, men man kan inte se någon förhöjning av K⁺-halten i omgivande material med tiden.

Ca²⁺-halten i vattenfasen förändras endast obetydligt genom tvärsnittet. Den högre OH⁻-halten i det stabiliserade materialet minskar lösligheten för Ca²⁺. I omgivande materialet bibehålls ursprunglig nivå.

Sulfathalten i det stabiliserade materialet är lägre än i omgivande material eftersom OH⁻-halten är högre. Sulfathalterna i omgivande material tycks inte påverkas under denna korta provningstid.

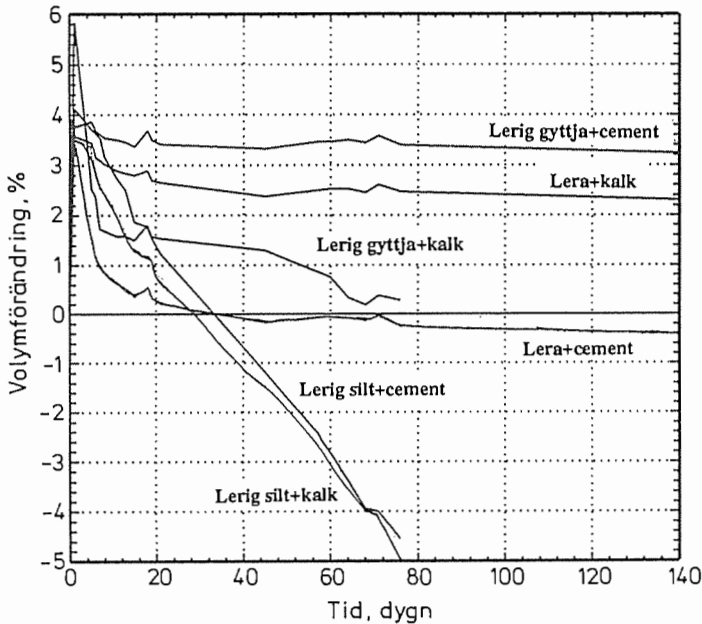
En viss osäkerhet i resultaten för OH⁻ gör det omöjligt att dra några slutsatser av förändringen med avstånd till gränsszon eller i tid. Cl⁻-halterna i omgivande material sjunker med minskande avstånd till gränsszonen i skikten närmast denna. Koncentrationen ökar med tiden i proverna som är uttagna 0-2 cm in i det stabiliserade materialet. Detta kan vara en effekt av att Ca(OH)₂ löses ut från det stabiliserade materialet på grund av stora koncentrationsskillnader till omgivande vattenfas.

Den använda metoden ger ingen möjlighet att noggrannare bestämma koncentrationsgradienter i närheten av kontaktytan.

För att se skillnaden mellan cement och kalk i kontaktytan kan man utgå ifrån jonhalterna i ostabiliserat material och ett stabiliserat material och anta att koncentrationerna förändrar sig linjärt med avståndet till gränsszonen. Halterna i gränsszonen blir då medelvärdet av halterna i stabiliserat och ostabiliserat material. Skillnaden mellan cement och kalk blir en högre koncentration av Na⁺ och OH⁻ i gränsszonen för kalkstabiliserat material. Halterna av övriga joner ligger på ungefär samma nivå.

Den fasta fasen har också undersökts, men eftersom proverna lagrades vid 8 °C så har ingen större förändring i sammansättning kunnat konstaterats.

Krympning hos det stabiliserade materialet kan orsaka en vattenspalt i gränsszonen om det omgivande materialet inte hinner flyta med. Volymförändringen hos de olika blandningarna har uppmätts och redovisas i **Figur 6.6**. Mätvärdena för perioden före 20 dygn påverkas av reaktionsvärme och volymsutvidgning vid kalkens släckning etc. Samtliga prover visar volymsminskning efter 20 dygn.



Figur 6.6. Volymförändring för olika jordarter.

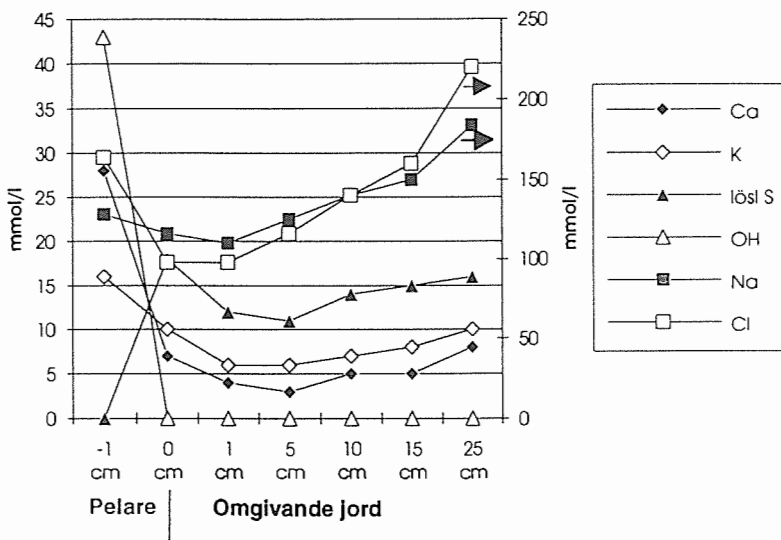
Figure 6.6. Volume change for different soil types.

Blandningarna med silt krymper betydligt mer än de övriga. Cement och kalk ger samma krympning.

■ Fältmätning

Kompletterande undersökningar av gränzonen mellan ostabiliserad och stabiliserad jord utfördes på material som togs ut från pelarstabiliserad mark i Ljungs-skile. Pelarnas ålder var mellan 3 och 6 månader. Proverna högs och grävdes ut på olika avstånd från en pelare. De förvarades därefter i täta plastpåsar fram till analystillfället. Bindemedelsblandningen var 50 % kalk och 50 % cement.

Vattenfasens sammansättning för den ursprungliga leran kan avläsas till höger i **Figur 6.7**. Leran har ca 3 gånger så hög salthalt i vattenfasen som den laboratorieprovade leran. Resultaten visar en minskning av salthalten i närheten av pelaren. Avsaltningen kan ge en lösare lera. Övriga jonhalter påverkas endast några centimeter från pelaren, speciellt Ca^{2+} , K^+ och SO_4^{2-} . Eftersom stabiliseringsmedlet är en blandning kan man inte dra några slutsatser om skillnader mellan kalk och cement.



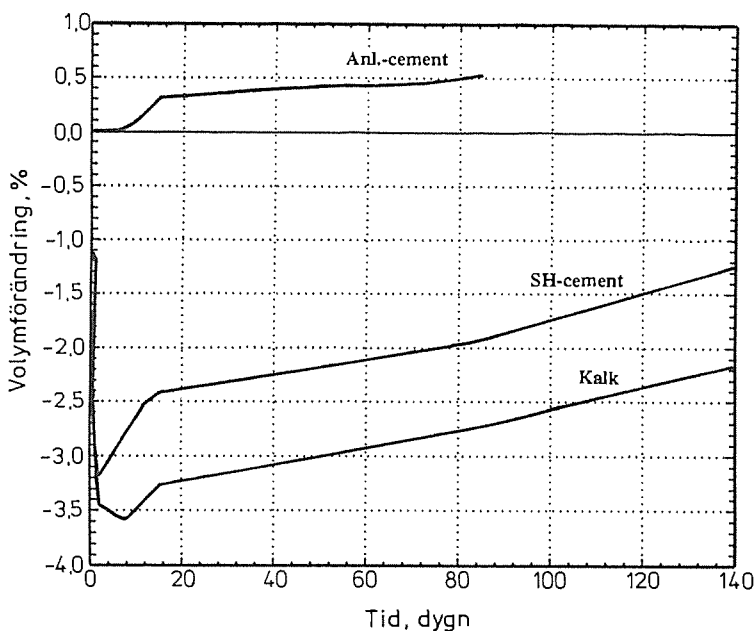
Figur 6.7. Vattenfasens sammansättning i gränzonen vid objekt i Ljungskile.

Figure 6.7. Composition of water phase in boundary zone for an object at Ljungskile.

6.4.4 Beständighet

Denna undersökning har inte varit specifikt inriktad på beständigheten av de bildade reaktionsprodukterna.

Volymförändringar för sulfidhaltig lera med olika bindemedel har emellertid undersökts. Resultaten redovisas i **Figur 6.8**. Förloppet före 20 dygn beror på inställning av temperaturjämvikt i proverna. Expansionstakten efter 20 dygn är lika för kalk och SH-cement medan sulfatresistent anläggningscement ger ungefär halva hastigheten. Tillgången på sulfater i denna provning bestäms av hur mycket sulfater som finns från början i leran och hur mycket sulfid som hinner oxideras under blandningen. Under praktiska förhållanden kan detta variera. Den uppmätta expansionens betydelse för materialets stabilitet eller hållfasthetsutveckling går inte att bedömma ur denna mätning men den visar att materialet expanderar även med sulfatresistent cement. För sulfater som tillförs utifrån har cementtypen ingen betydelse för att förbättra det stabiliserade materialets beständighet enligt Sherwood (1957).



Figur 6.8. Volymförändring. Sulfidlera med olika bindemedel.

Figure 6.8. Volume change. Sulphidic clay with different binders.

6.5 VIDARE ANALYS OCH DISKUSSION AV RESULTAT

Jonbyte, puzzolanreaktioner och cementets reaktion är de viktigaste kemiska faktorerna som påverkar jordens struktur. Kalken ger ett effektivare jonbyte än cement och förändringen i jordens struktur blir större. Jonbytet innebär att Na^+ - och K^+ -halterna ökar i vattenfasen och därmed även OH^- -halten (pH ökar). Ett högt pH gynnar puzzolanreaktionerna. För jordarter med liten jonbytesförmåga kan cement vara fördelaktigt eftersom hållfastheten inte enbart byggs upp av puzzolanreaktionerna. I denna undersökning visas att högre salthalt ger lägre OH^- -halt eftersom jonbalansen påverkas. Detta kan inverka på hållfasthetstillväxten.

Den leriga gytthan hade pH 5,5 och gav en låg OH^- -halt i vattenfasen. Den innehåller sura organiska komponenter, bl.a. humussyror, som även efter lång tid ger en lägre OH^- -halt i vattenfasen. Även om pH fortfarande är högt (>12) så innebär det att puzzolanreaktionerna sker långsammare än vid högre pH. Cementreaktionerna är inte lika känsliga i detta avseende. Undersökning av den fasta fa-

sen med röntgendiffraktometri visar att förändringen av lerans struktur är tydligare med kalk. Detta är mer en effekt av att jonbytet ändrar strukturen än att leran reagerat.

Om man för kalkstabiliserad lera beräknar ett medelvärde av jonhalterna i ostabiliserat material respektive pelare, får man ett ungefärligt värde för jonhalterna i gränsszonen. Det visar att halterna av Na^+ - och OH^- -joner är högre för material stabiliserat med kalk jämfört med cement. Detta kan tyda på att Ca^{2+} -joner transporterats ut i omgivande material och gett ett jonbyte som stabiliserat gränsszonen. En cementpelare innehåller mindre mängd $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vilket innebär lägre halt Ca^{2+} kring pelaren och därmed lägre jonbyte och lösare omgivande lera. Leror kan också bli lösare på grund av avsättning. Eftersom Cl^- -halten blir lägre närmare pelaren kan detta vara en orsak till den lösa zonen när salthaltiga leror stabiliseras. Det krävs dock ytterligare undersökningar av vattenfasen för olika jordarter för att man skall kunna dra några slutsatser om skillnaden i kemi i gränsszonen.

■ Hållfasthet

Hållfastheten påverkas av ett flertal kemiska och fysikaliska faktorer. Av de som finns i Tabell 3.1 skall några kommenteras. Hög vattenkvot medför att större hålrum skall fyllas ut av bindemedlet, samt att det bindande materialet får lägre densitet. Detta beskrivs i Kapitel 5. Organiskt innehåll har oftast en retarderande effekt samt hindrar bindemedlet från att komma i kontakt med lerpertiklarnas ytor. Hög lerhalt och hög BET-yta är mått på materialets finkornighet. Större kontaktyta kräver större mängd bindemedel. Høgt pH i blandningen är en viktig faktor för puzzolanreaktionen. Jonbyte, kloridhalt och organiska syror påverkar pH.

Figur 5.8 visar hållfastheten för de olika jordarterna. Den leriga silten har låg specifik yta vilket innebär att cementet behöver täcka förhållandevis liten yta för att binda samman partiklarna. Vattenbindemedelstalet blir dessutom lågt eftersom vattenkvoten är låg. Skillnaden mot stabilisering med kalk blir stor eftersom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reagerar snabbare med små partiklar.

Den siltiga leran har större andel finpartiklar vilket ger mindre mängd bindemedel på kontaktytorna jämfört med lerig silt. (BET värdet osäkert). Skillnaden blir lägre mellan kalk och cement eftersom puzzolanreaktionerna sker på finpartiklarna.

Leran har ytterligare högre yta vilket ger lägre hållfasthet.

Kvicklerans höga hållfasthetsvärde kan bero på den höga sensitiviteten, som medför att inblandningen av bindemedlet blir homogenare.

Den salta leran ger hållfasthet i samma nivå som leran trots mer finpartiklar. Kloridhalten medför högre löslighet för Ca^{2+} vilket medför att det finns mer Ca^{2+} -joner tillgängliga för puzzolanreaktioner. Kloridjoner accelererar också cementets reaktion. Den höga kloridjonhalten kan minska skillnaderna för Ca^{2+} och OH^- -halterna mellan kalk och cement.

Sulfidlerans låga hållfastheter beror delvis på organiskt innehåll vilket ger låga hållfastheter speciellt för kalkstabiliserat material.

Jordarter som innehåller gyttja ger låga hållfastheter på grund av organiskt innehåll, som förhindrar stabiliseringsmedlet att komma i kontakt med lerpartiklarna. Cement ger bättre effekt eftersom det bildar eget bindande material. Vissa material med lågt pH innehåller dessutom löst järn i vattenfasen. Om pH stiger faller järnhydroxid ut på lerpartiklarna och bindemedlet som ett tätt skikt och fördröjer reaktionerna.

Torv innehåller för lite lerpartiklar för att puzzolanreaktionerna skall ha någon effekt. Kalken löses upp medan cementet bildar fast material, som får en viss stabiliserande verkan.

Förutom vattenkvoten så har jordens kornstorlek och organiska innehåll störst effekt på hållfasthetsutvecklingen hos det stabiliserade materialet både vad det gäller nivån och skillnaden mellan cement och kalk. Jonbytet kan ha en avgörande inverkan på puzzolanreaktionerna genom att pH ökar.

Kapitel 7.

Fältförsök

7.1 ALLMÄNT

Projektet var huvudsakligen inriktat på undersökningar av stabiliserad jords beteende i laboratoriet, kompletterat med teoretiska studier avseende kemiska och termiska reaktioner under stabiliseringsprocessen. För att i viss mån belysa olika effekter av djupstabilisering i fält och kunna peka på kopplingar mellan undersökningsresultat i laboratoriet och uppmätta värden på pelares egenskaper i fält, utfördes också ett antal fältförsök i begränsad omfattning, vid två olika provplatser.

De mest omfattande undersökningarna i laboratoriet utfördes på de tre stabiliserade jordarna lerig silt, lera respektive lerig gyttja. Provtagningsplatserna för två av dessa jordar, lera och lerig gyttja, valdes som provplatser också för fältförsöken.

7.2 FÖRSÖKSPLATSER

Fältförsöken med djupstabilisering av *lera* utfördes vid SGI:s försöksfält i Lilla Mellösa nordost om Upplands Väsby. Området har varit SGI:s försöksfält sedan mitten av 40-talet då det upprättades i samband med undersökningar för lokalisering av ny storflygplats i Stockholm. Förhållandena på platsen finns beskrivna i en rad rapporter som behandlar olika typer av undersökningar, t ex (Chang, 1981), (Carlsten & Eskilsson, 1984) och (Larsson, 1986).

Försöksfältet ligger i ett platt landområde omgivet av jordbruksmark. De lösa jordlagren har en mäktighet av ca 14 meter. Överst finns ett relativt tunt lager med matjord och organiskt jord av torrskorpekaraktär. Under detta torrskorpelager finns ett mycket löst lager av gyttjig lera ned till ca 7 meters djup. Den organiska halten sjunker med djupet från ca 5 % alldeles under torrskorpan till ca 2 % i lagrets underkant. Den gyttjiga lera är mörkgrå till svart och har en sulfidhalt av ca 0,5 % av jordens torra vikt. Mellan 7,5 m och 10,5 m består

jorden av relativt homogen lös lera med låg organisk halt (1,5 %) och låg sulfidhalt (0,1 %). Det var till dessa djup som undersökningarna i fältförsöken koncentrerades, och från vilka också lerprover togs för laboratorieförsöken. Under det aktuella lagret övergår leran i en varvig lös glacial lera. Varvigheten ökar med djupet ned till fast botten på 14 meters djup, där ett tunt lager sand överlagrar berg.

Den andra försöksplatsen, där djupstabilisering utfördes av *lerig gyttja*, ligger strax väster om väg E4 vid Lövstad trafikplats några km söder om Norrköping. Försöksområdet ligger i ett plant område i en uppgrundad före detta vik till Lövstadsjön. Området är tidvis översvämmat av sjövattnet. Någon utpräglad torrskorpa har inte bildats utan jorden är mycket lös till lös ända från en halv meter under markytan ned till fast botten på ca 15 m djup. Överst finns ett ungefär halvmeter tjockt matjordlager över ett drygt lika tjockt lager av höghumifierad torv. Under dessa lager, på ca 1,25 - 2,25 meters djup, finns det lager av lerig gyttja till vilket fältmätningarna på platsen koncentrerades och varifrån prover till laboratorieförsöken hämtades. Mellan 2,25 meters djup och fast botten består jorden av mycket lös lera som på ca 5 meters djup övergår i varvig lera med siltskikt. I dess övre del, på 2,25 - 3,25 meters djup, är leran organisk och från detta djup togs material till laboratorieförsöken med gyttjig lera.

7.3 GEOTEKNISKA FÖRHÅLLANDEN

De geotekniska basegenskaperna hos leran respektive den leriga gyttjan finns närmare beskrivna i Tabell 3.1.

Vid försöksfältet i Lilla Mellösa är det rådande effektiva överlagringstrycket ca 40 - 60 kPa i det aktuella jordlagret på 7,5 - 10,5 meters djup. Portrycken i leran motsvarar en ungefär hydrostatisk tryckfördelning från en grundvattenyta ca 0,8 meter under markytan. På de aktuella djupen är portrycken ca 63 - 93 kPa. Permeabiliteten hos leran har uppmätts till ca $8 \cdot 10^{-10}$ m/s (Tremblay & Eriksson, 1988).

Vid provplatsen i Lövstad låg grundvattenytan strax under markytan då försöken utfördes. Den effektiva vertikalspänningen på 1,25 - 2,25 meters djup kunde uppskattas till 4 - 7 kPa och portrycket till 10 - 20 kPa.

7.4 UTFÖRDA FÖRSÖK

7.4.1 Försöksytor och instrumentering

Djupstabiliseringen utfördes gruppvis med kalk (osläckt), kalk-cement (25 % : 75 %) respektive cement vid båda försöksplatserna. I Lilla Mellösa installerades 13 pelare av varje typ, varav 12 pelare i grupp och en pelare som singelpelare, och i Lövstad installerades 10 pelare av varje typ. Pelarnas installerades med en diameter av 0,6 m och med ett centrumavstånd av 1,2 m. Grupperna installerades med ett inbördes avstånd motsvarande dubbla centrumavståndet. Plan över provområde och pelarplacering visas i Bilaga 7.1 - 7.2.

Stabilisering utfördes från en halvmeter under markytan ned till 12 - 14 meter under markytan vid provplatsen i Lilla Mellösa och ned till 5 meter under markytan i Lövstad. Använd mängd stabiliseringsmedel var 25 kg/m pelare (90 kg/m³) vilket motsvarade ca 10 % av jordens torra vikt i leran och 16 % i den leriga gyttjan.

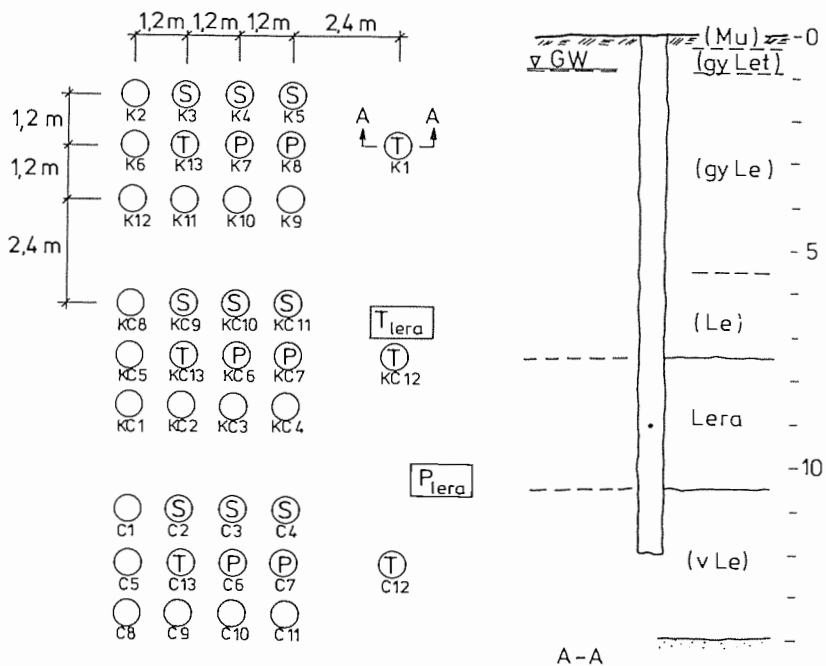
Pelarininstallationerna i Lövstad och Lilla Mellösa utfördes i juni respektive augusti 1992.

Instrumentering gjordes för mätning av permeabilitet i pelare och i jord vid båda försöksplatserna. I Lilla Mellösa installerades dessutom temperaturgivare för mätning av temperatur i pelare och i leran alldeles utanför pelare.

För mätning av permeabilitet installerades porttrycksspetsar i mitten av de aktuella jordlagren, dels centriskt i ett antal pelare dels vid en referenspunkt med ostabiliserad jord utanför pelarområdet. Två pelare av varje typ instrumenterades. För att öka influensområdet och få med inverkan av eventuella inhomogeniteter hos pelarna användes en relativt lång spets av typ Geotech 33 med en filterlängd av 0,4 m. Instrumenteringen utfördes 1 - 3 dygn efter installation av pelarna.

Termoelement av typ T användes för mätning av temperaturutveckling i pelare och jord efter installation av pelare. Termoelementen installerades mitt i de aktuella jordlagren, i en inre grupp pelare och i tillhörande singelpelare av varje typ. Dessutom installerades en givare ca 0,25 m utanför den kalk-cementpelare som utförts som singelpelare.

Plan över pelarområde med instrumentering visas i **Figur 7.1 och 7.2**.



Diameter : 0,6 m
Längd : (T) 14 m
 övriga 12 m
Mängd stab. medel : 25 kg/m

Stab. medel : K = kalk
 KC = kalk-cement (25 : 75)
 C = cement
Provning : T = temperatur
 P = permeabilitet
 S = sondering

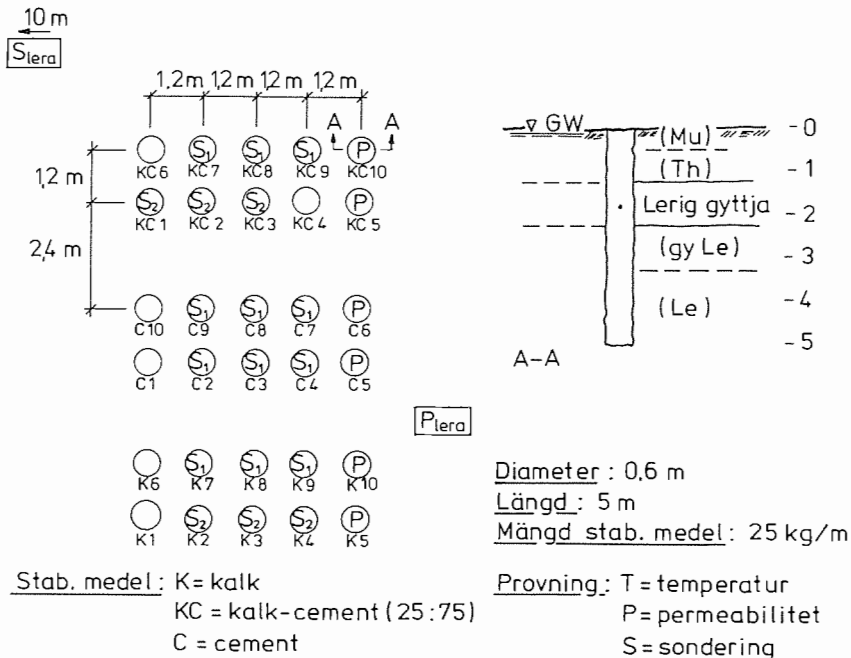
Figur 7.1. Provningar i Lilla Mellösa.

Figure 7.1. Tests at Lilla Mellösa.

7.4.2 Mätningar

Mätning av permeabilitet utfördes vid två tillfällen, ca 2 veckor och 3 månader efter installation av pelarna. Mätningarna utfördes huvudsakligen som "falling head" försök dvs en momentan ökning av trycknivån skapades i porttryckspetsen varefter avsjunkningen med tiden registrerades. Tryckförhöjningen åstadkoms genom att höja vattennivån i mätslangen ca 1 meter .

Registreringen av temperaturen i pelarna startades omedelbart efter det att termoelementen var färdiginstallerade i respektive pelare. Detta motsvarade en tidpunkt ca 15 - 30 minuter efter det att pelaren blivit installerad.



Figur 7.2. Provningar i Lövsstad.

Figure 7.2. Tests at Lövsstad.

7.4.3 Sondering

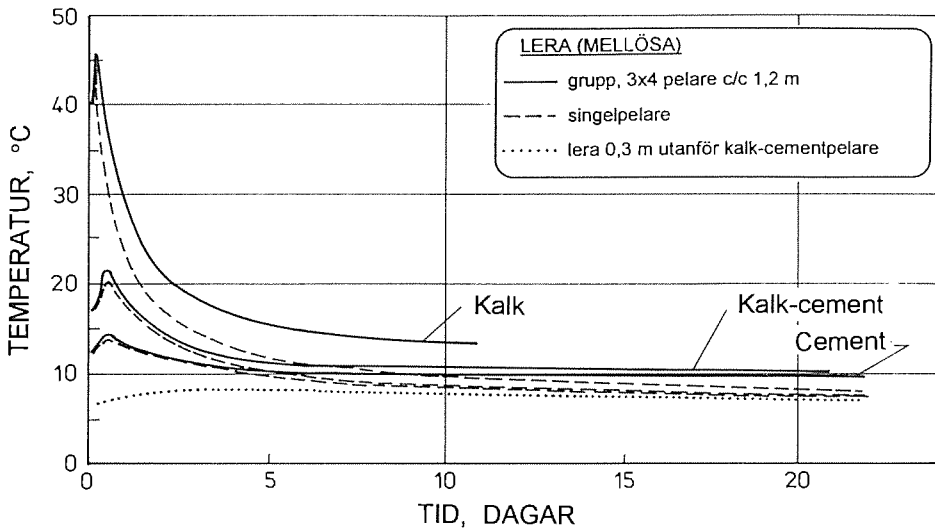
Sondering av pelare avsågs att utföras vid båda försöksplatserna. Sondering av pelarna i Lövsstad utfördes som planerat under sommaren efter installation. I Lilla Mellösa däremot hade pelarna en betydligt högre hållfasthet vilket i detta fall medförde att sonden styrde ur dessa på mindre djup än 7 meter, dvs ovanför det aktuella jordlagret. Någon alternativ teknik för provning av pelarna fanns inte vid tiden för fältförsöken. Den teknik som nu kan användas vid höga hållfastheter, nämligen kärnprovtagning i pelare, hade ännu inte färdigutvecklats, vilket innebar att kontrollen av pelarnas hållfasthet fick avbrytas.

Sondering av pelare i Lövsstad utfördes med en kalkpelarsond med spetstryckregistrering, vid två tidpunkter efter pelarinstallation. Pelarna var då 2 veckor respektive 3 månader gamla. Använd sondspets hade dimensionen 400 x 15 mm (7200 mm²).

7.5 RESULTAT

7.5.1 Temperatur

Resultaten av samtliga temperaturmätningar har sammanställts i **Figur 7.3**. Mätningarna visade att störst temperaturförhöjning erhöles i kalkpelare där släckning av kalken gav upphov till en uppmätt temperatur av drygt 45 °C några timmar efter pelarinstallation. Lägst temperaturförhöjning uppmättes i cementpelare där temperaturen som högst var 14 °C ett knappt dygn efter installation. Uppmätt temperatur i kalk-cementpelarna var som högst 21 °C.



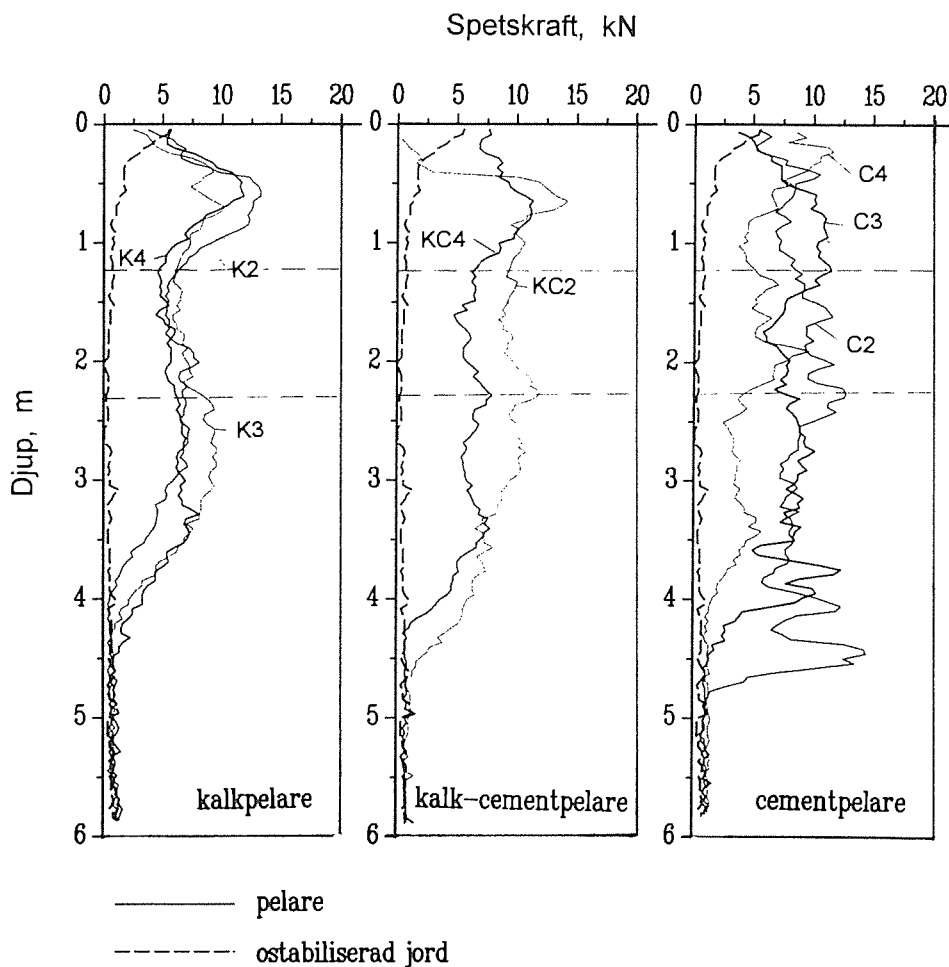
Figur 7.3. Uppmätt temperatur i pelare och i omgivande jord alldeles utanför kalk-cementpelare.

Figure 7.3. Measured temperature in columns and in surrounding soil immediately beside lime-cement columns.

Av figuren framgår att temperaturen i pelarna sjönk relativt snabbt efter att ett maximalt värde registrerats och att förloppet gick snabbare för singelpelare än för gruppelare. Ett relativt stabilt tillstånd uppnåddes i gruppelarna 5 till 10 dygn efter installation och temperaturen sjönk endast obetydligt under resten av mätperioden fram till drygt tre veckor efter start av mätningarna. Temperaturen i singelpelarna, som inte påverkades av värmespridning från någon omgivande pelare, sjönk märkbart, om än långsamt, också efter första veckan. Tre veckor efter installation var uppmätt temperatur 7 - 8 °C i dessa pelare, vilket är lika med temperaturen i opåverkad jord, jämfört med 10 - 13 °C i gruppelare.

7.5.2 Hållfasthet

Utförda sonderingar i pelarna i Lövstad visade en viss spridning i hållfasthet, framförallt för cement och kalk-cementpelarna. Jämförelser med pelarmaskinens utmatningsdiagram visade att detta troligtvis till stor del berodde på svårigheter vid installationen att uppnå jämn utmatning av rätt mängd stabiliseringsmedel då provpelarna var relativt få och av olika typ. Exempel på spridningsbilden visas i **Figur 7.4** där resultaten av sonderingarna vid andra provningstillfället, tre månader efter installation, sammanställts.

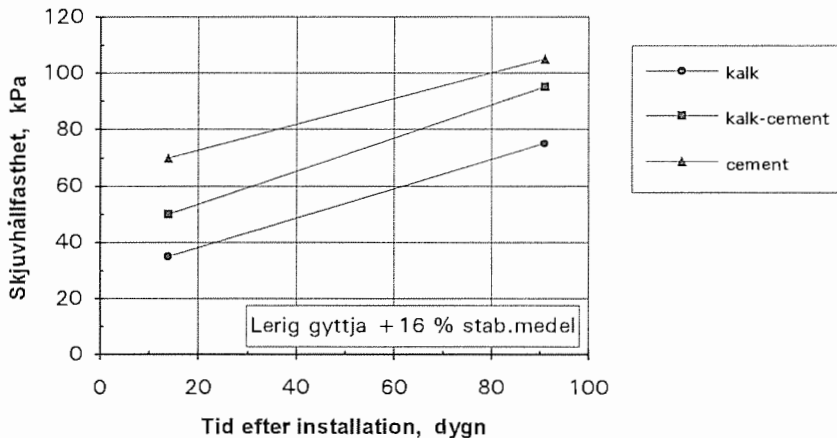


Figur 7.4. Uppmätt spetsmotstånd vid sondering 3 månader efter installation av pelare i Lövstad.

Figure 7.4. Measured point resistance in penetration tests three months after installation of columns at Lövstad.

Vid utvärdering av skjuvhållfasthet hos de olika typerna av pelare gjordes först en bedömning av troligt medelvärde hos spetsmotståndet med hänsyn till den något varierande mängden inblandat stabiliseringsmedel. För kalk-cementpelarna kunde konstateras att förhållandet kalk:cement avvek betydligt från det avsedda. Något försök att uppskatta medelmotstånd vid ett korrekt förhållande 25:75 gjordes inte. Dessa pelare fick istället betraktas som i det närmaste rena cementpelare, men med en något mindre utmatat mängd än övriga, rena cementpelare.

Den odränerade skjuvhållfastheten hos pelarna utvärderades enligt Holm m fl (1981) som 1/10 av spetsmotståndet. Resultaten visar på högst skjuvhållfasthet hos cementpelarna, något lägre hos kalk-cementpelarna och lägst hos kalkpelarna. Skjuvhållfastheten kan uppskattas till 35 - 70 kPa vid provningstillfället två veckor efter installation ökande till 75 - 105 kPa tre månader efter installation, se **Figur 7.5**.

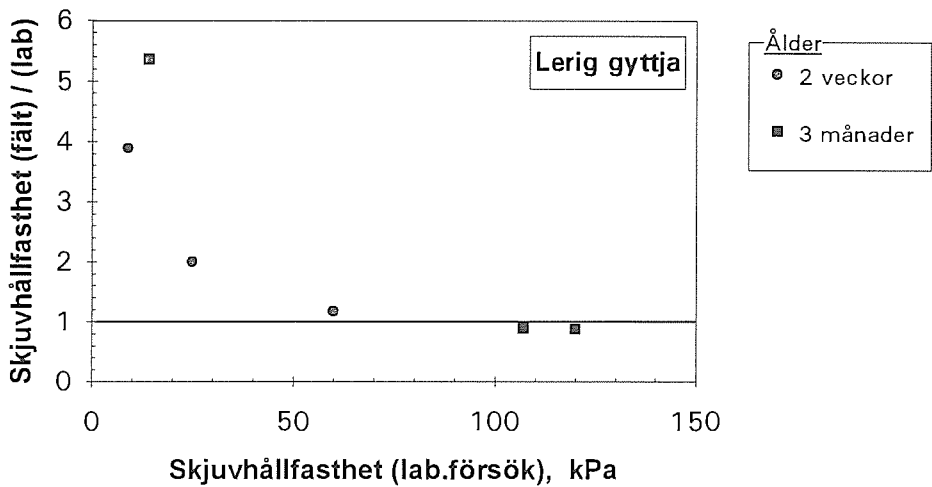


Figur 7.5. Uppskattad skjuvhållfasthet enligt kalkpelarsondering 14 dygn respektive 91 dygn efter installation i Lövstad.

Figure 7.5. Measured shear resistance according to lime column penetration tests 14 days and 91 days respectively after installation at Lövstad.

Resultaten av utförda undersökningar av skjuvhållfastheter i fält avviker till en del från dem som erhöles för motsvarande material vid provning i laboratoriet. Ett antal faktorer spelar härvid in såsom skillnader i blandningsarbete, homogenitet, mättnadsgrad, konsolideringsspänning och härdningstemperatur hos materialet vid fältförhållanden jämfört med i laboratoriet.

I Lövstad var spänningarna in situ låga på det relativt ringa djup som undersöktes. Inverkan av konsolideringsspänning och effektiva horisontalspänningar bedöms därför vara liten, trots att spänningsberoendet i princip kan förväntas vara betydande vid de relativt låga hållfasthetsnivåer som uppnåddes i pelarna. I **Figur 7.6** visas förhållandet mellan utvärderad skjuvhållfasthet i pelare och skjuvhållfasthet enligt enaxliga tryckförsök på laboratorietillverkade prover. Av figuren framgår att skillnaden är relativt liten då skjuvhållfastheten i såväl fält som laboratorium var större än 60 kPa. I de fall laboratorievärdena var lägre än 60 kPa uppmättes betydligt högre värden i fält.



Figur 7.6. Jämförelse mellan utvärderad skjuvhållfasthet enligt fältförsök och enligt laboratorieförsök.

Figure 7.6. Comparison between evaluated shear strength according to field tests and according to laboratory tests.

Skillnader i härdningstemperatur bedöms som i stort sett försumbar för den cementstabiliserade jorden medan undersökningarna av den kalk-cementstabiliserade jorden bedöms ge något låg hållfasthet i laboratoriet på grund av en lägre temperatur. Undersökningarna av kalkstabiliserad jord gjordes efter härdning vid 20 °C i laboratoriet, vilket innebär att skjuvhållfastheten i laboratoriet var högre än den som skulle ha erhållits vid temperaturnivåer motsvarande de i fält. Resultaten från båda provningstillfällena har lagts in i figuren men jämförelser av värden från det senare tillfället 3 månader efter inblandning bedöms som irrelevanta.

7.5.3 Permeabilitet

Vid utvärdering av permeabiliteten ur ”falling-head”-försöken ritades uppmätt värde på trycknivåförändringen relativt ursprunglig trycknivå upp mot tiden efter påfyllning av vatten. Nivåförändringen ritades i logaritmisk skala för att kunna studera rätlinjigheten hos sambandet mellan tid och trycknivå och kunna utvärdera permeabiliteten under så konstanta förhållanden som möjligt. De uppmätta sambanden finns sammanställda i Bilaga 7.3 - 7.4.

Permeabiliteten utvärderades enligt Hvorslev (1951) genom sambandet

$$k = \frac{A \cdot \ln(H_1 / H_2)}{F \cdot (t_2 - t_1)}$$

där A är stigrörets area, F är en formfaktor, vilken beräknades enligt Tavenas m fl (1986) till 0,36 för den aktuella spetsen, och H_n är tryckhöjden vid tidpunkten t_n efter pålagd tryckändring.

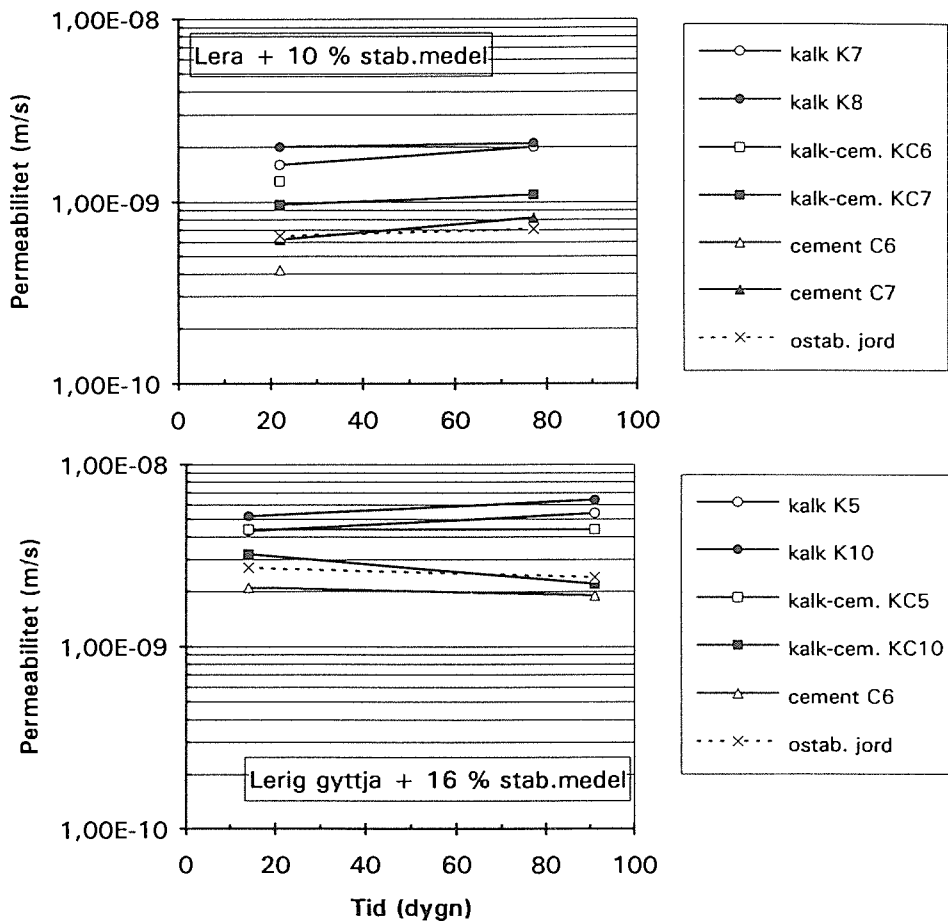
Resultaten av permeabilitetsmätningarna visar på högst permeabilitet hos kalkpelarna. Permeabiliteten var här två till tre gånger så hög som den hos ostabiliserad jord. Kalk-cementpelarna hade i medeltal något högre permeabilitet än ostabiliserad jord medan cementpelarna hade ungefär samma eller något lägre än denna. Utvärderad permeabilitet från de olika försöken visas i **Figur 7.7**. Någon korrektion med hänsyn till den något olika temperaturen i jorden och i pelarna har inte gjorts. Den något högre temperaturen i pelarna vid första mättillfället bedöms ha påverkat permeabiliteten som högst 10 - 20 % jämfört med motsvarande värde vid temperaturen ca 7 °C i den ostabiliserade jorden.

Resultaten av permeabilitetsmätningarna visar på en permeabilitet hos pelarna som var ca 1 - 4 gånger högre än den hos stabiliserade prover i laboratoriet. Förhållandet mellan uppmätt permeabilitet i fält och i laboratoriet visas i **Figur 7.8**.

7.6 ANALYS OCH DISKUSSION AV RESULTAT

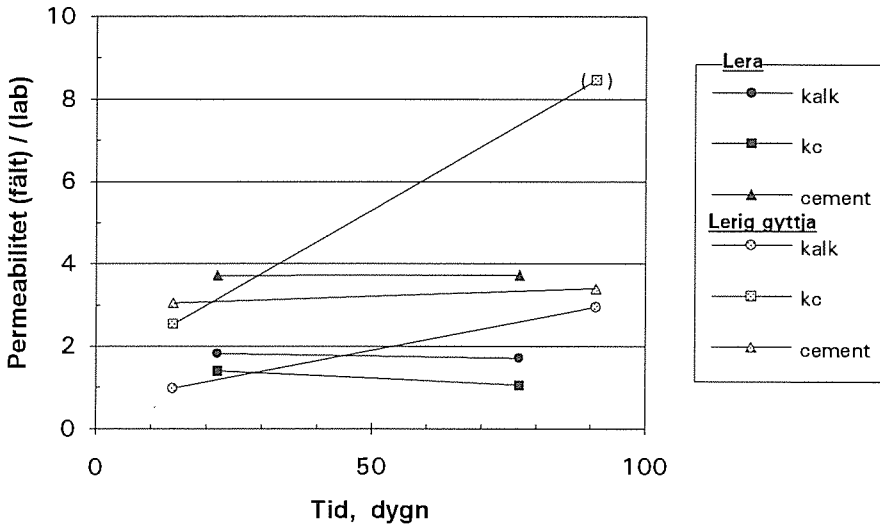
7.6.1 Temperatur

Reaktionsvärmets från kalkens och cementets reaktion med vattnet ger temperaturhöjningar som påverkar reaktionshastigheter och lösligheter. Kalkens snabba släckning ger omedelbart hög temperatur följt av ett avsvalningsförlopp utan ytterligare tillskott av värme. Cementet har sin maximala värmeavgivning efter



Figur 7.7. Uppmätt permeabilitet hos pelare på 8,8 - 9,2 m djup i Lilla Mellösa och på 1,6-2,0 m djup i Lövstad.

Figure 7.7. Measured permeability of columns at 8.8 - 9.2 m depth at Lilla Mellösa and at 1.6-2.0 m depth at Lövstad.



Figur 7.8. Jämförelse mellan uppmätt permeabilitet i pelare i fält och i stabiliserad jord på laboratorier.

Figure 7.8. Comparison between measured permeability of columns in the field and in stabilised soil in the laboratory.

ca 1 dygn och värmeavgivningskurvan planar ut efter några dygn. Pelarnas temperaturutveckling kan till stor del styras med blandningsförhållandet mellan cement och kalk. Avståndet mellan pelarna och pelarnas storlek har också betydelse för temperaturstegringen liksom jordartens vattenhalt. Värmeledningsförmågan förändras huvudsakligen med porositeten i materialet.

För att beräkna temperaturförloppet i pelare i olika jordarter och bindemedelsblandningar har ett datorprogram använts. Programmet bygger på en modell för dimensionering av jordvärmemagasin och har utvecklats vid LTH, Bilaga 7.5. Programmet förutsätter att inga retarderande ämnen förekommer och att stabiliseringsmedlet är homogent inblandat. Beräkningarna utförs i 2 dimensioner och gäller för nivåer under cirka 1 meter. För beräkningen krävs uppgifter om mängd och sammansättning av stabiliseringsmedlet, radien för pelarna och omgivande jordvolym samt jordens skrymdensitet och vattenkvot. Resultaten redovisas som kurvskaror för temperatur och radie vid olika tidpunkter, Bilaga 7.6.b.

Vid fältprovningarna i Lilla Mellösa mättes temperaturen i en fristående pelare och i en pelare omgiven av andra pelare, se **Figur 7.3**. Resultaten av beräkningarna visas för de olika stabiliseringsmedlen i **Figur 7.9 a-c**. Överensstämmelsen mellan uppmätta och beräknade värden är bra. Avvikelseerna kan bl.a. bero på placering av termoelement men någon närmare analys av avvikelseerna har inte gjorts.

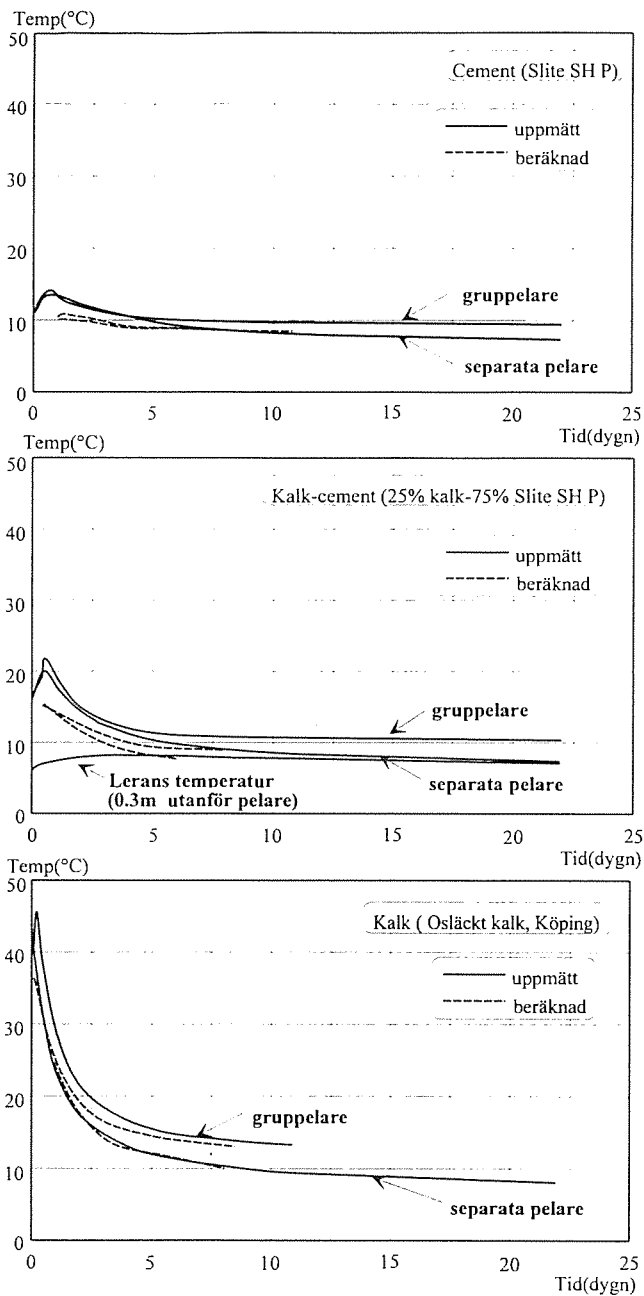
Med beräkningsprogram av denna typ kan inverkan av många parametrar lätt studeras. Jordartens skrymdensitet och vattenkvot påverkar kraftigt. Jordens utgångstemperatur bestämmer temperaturnivån, men den kan oftast betraktas som konstant. Pelarmönstret och avståndet inverkar också. Om exempelvis avståndet mellan pelarna i fältförsöket hade minskats från 1,2 till 0,8 m hade temperaturen stigit 6 °C för blandningarna ned kalk/cement.

Beräkningarna av temperaturförloppet vid inblandning av kalk och cement i lera visade således i denna begränsade undersökning god överensstämmelse med fältmätningar. Detta bör verifieras med flera jordarter, men öppnar bättre möjligheter att välja mängd och typ av stabiliseringsmedel med hänsyn till att högre temperatur accelererar de kemiska reaktionerna. Inverkan är olika för cementreaktionerna och puzzolanreaktionerna. Om temperaturförloppet kan beräknas, kan kanske en mer optimal blandning av stabiliseringsmedlet bestämmas. Man kan t.ex. beräkna mängden kalk för att en önskad temperatur skall uppnås i en jord med vissa egenskaper. Detta kan i sin tur styra cementets hållfasthetstillväxt. Närmare studier av dessa möjligheter har emellertid bedömts ligga utanför detta projekt.

7.6.2 Skjuvhållfasthet

Skillnader mellan skjuvhållfastheter uppmätta i fält och de som erhållits i laboratoriet har konstaterats vid ett antal olika undersökningar i samband med djupstabilisering av jord. I **Figur 7.10** visas en tidigare utförd jämförelse mellan utvärderad skjuvhållfasthet hos ett antal kalkpelare respektive cementpelare i fält och den som uppmätts i motsvarande stabiliserad jord i laboratoriet där proverna lagrats vid härdningstemperaturer lika med dem i pelarna (Åhnberg m fl, 1989). Som jämförelse har resultaten från försöken med cement-, kalk-cement- samt kalkstabiliserad (första provningstillfället) lerig gyttja i Lövstad lagts in i diagrammet.

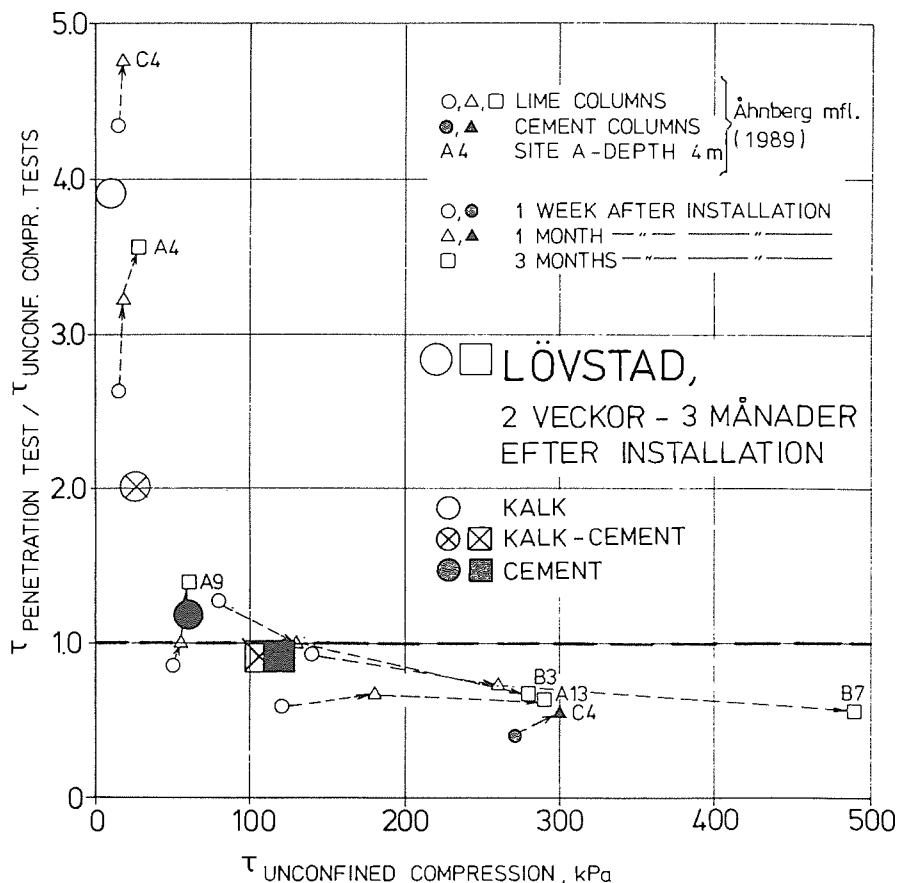
Förhållandevis stora skillnader råder således mellan utvärderad skjuvhållfasthet i fält och i laboratoriet, trots att härdningstemperaturen varit ungefär densamma i respektive material. En annan faktor som kan påverka förhållandet är den aktu-



Figur 7.9. Verklig och beräknad temperaturutveckling i pelare med SH-cement (överst), kalk/SH-cement (mitten) och med kalk (underst).

Figure 7.9. Measured and calculated temperature development in columns with SH-cement (top), lime/SH-cement (middle) and lime (bottom).

ella spänningsnivån i fält. Spänningsberoendet hos stabiliserad jord är som störst vid låg hållfasthet hos materialet vilket innebär att enaxliga tryckförsök i laboratoriet kan visa på hållfastheter som är betydligt lägre än vid spänningsförhållanden motsvarande dem i fält. Resultaten antyder att förhållandet ändras med tiden efter installation av pelare vilket kan vara en effekt av successiv portrycksutjämning och konsolidering.



Figur 7.10. Jämförelse med resultat från andra provplatser där förhållandet mellan skjuvhållfasthet enligt sondering och skjuvhållfasthet enligt enaxliga tryckförsök på laboratorieprover som lagrats vid en temperatur motsvarande den i fält redovisats (Åhnberg m fl, 1989).

Figure 7.10. Comparison with results from other test sites where the relation between shear strength according to penetration tests and shear strength according to unconfined compression tests on laboratory samples stored at a temperature corresponding to that in the field has been reported (Åhnberg et al. 1989).

Överensstämmelsen är relativt god vid skjuvhållfastheter runt 100 - 200 kPa. Detta representerar de skjuvhållfasthetsnivåer som var aktuella vid den utprovning och kalibrering av kalkpelarsonden som redovisats av Holm m fl (1981) och som ledde till nuvarande metod för utvärdering av skjuvhållfasthet. Vid högre hållfastheter visar laborieförsöken på högre skjuvhållfastheter än vad mätningar i pelare ger. Ett antal faktorer kan här inverka på resultaten, såsom skillnader i homogenitet och i vattenmättnadsgrad i kombination med ett troligtvis alltmer uttalat dilatant beteende hos materialet i laborieförsöken.

Resultaten talar för att fortsatta jämförelser mellan resultat av fält- och laborieförsök samt ytterligare kalibrering av sonderingsmetoden bör utföras för ett större hållfasthetsregister än vad som tidigare gjorts. Skillnader mellan fält- och laborieförvärden måste beaktas och försiktigt valda värden bör användas i de fall dimensionering görs enbart på basis av laborieförsök.

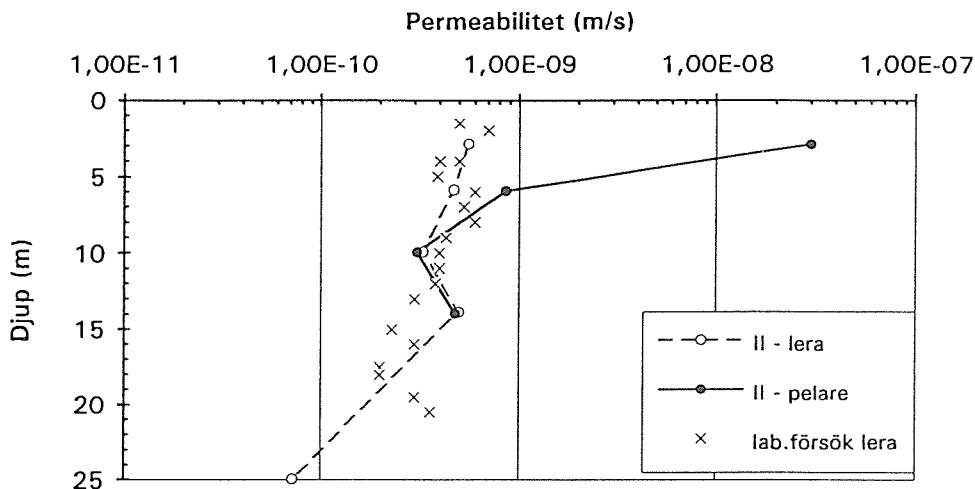
7.6.3 Permeabilitet

Kalkpelare har normalt betraktats som dränerande i förhållande till omgivande ostabiliserad jord. Detta har kunnat påvisas i ett antal fall, bl a i Tuve 1978 då kalkpelare hjälpte till att sänka de mycket höga portrycken i skredade massor (Hansbo & Torstensson, 1978).

I dagens vanligen använda beräkningsmodell för uppskattning av sättningars tidsutveckling antas permeabiliteten hos kalkpelare vara 1000 gånger så hög som omgivande lera. Värdet på permeabiliteten, och i viss mån också beräkningsmodellen i övrigt, är empiriskt framtagen och baseras på ett antal jämförelser mellan beräknat och uppmätt sättningsförlopp hos kalkpelarförstärkta vägbankar. Denna storleksordning på permeabiliteten i pelarna eller något lägre, 100 till 500 gånger värdet hos ostabiliserad jord, har utvärderats också vid en jämförelse mellan uppmätt tidsförlopp och tidsförlopp beräknade med en finit element metod (Bengtsson & Holm, 1984). Det bör dock beaktas att detta är ett indirekt mått på permeabiliteten som inrymmer osäkerheter i beräkningsmodellen.

Uppföljningar av cementpelarförstärkningar och kalk-cementpelarförstärkningar har hittills utförts i begränsad omfattning. Då cement kan antagas ge en lägre permeabilitet än kalk vid stabilisering av jord finns det idag behov av att ytterligare utreda den eventuella dränerande effekten hos denna typ av pelare. En utveckling på maskinsidan med successiv förbättring av inblandningsteknik kommer dessutom troligtvis att innebära en ökande homogenitet hos pelare.

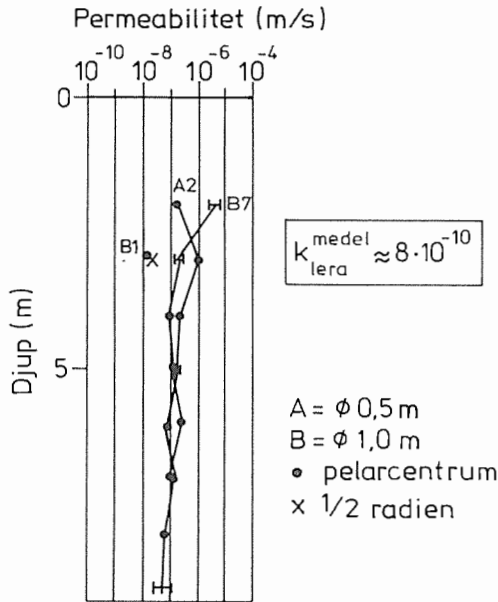
Tidigare mätningar i pelare har visat på varierande storlek hos förändringen i permeabilitet efter stabilisering av jord. Permeabilitetsmätningar i portrycksspetsar redovisade av Bengtsson m fl (1993) har visat på permeabiliteter av storleksordningen 1 - 100 gånger den hos ostabiliserad jord. Andra undersökningar där mätningar utförts med pressopermeameter har givit betydligt högre värden på permeabiliteten i pelare (Nygren & Welander, 1991), se **Figur 7.11 och 7.12**.



Figur 7.11. Permeabilitet hos kalkpelare och jord enligt permeabilitetsförsök i portrycksspetsar (BAT) samt laborieförsök på ostabiliserad lera. Från Bengtsson m fl (1993).

Figure 7.11. Permeability of lime columns and soil according to permeability tests in piezometers (BAT) and laboratory tests on unstabilised clay. From Bengtsson et al. (1993).

Resultaten av fältmätningarna visade på låga permeabiliteter hos pelarna, betydligt lägre än dem som antas vid beräkningar av sättningsförlopp. Detta gäller samtliga pelartyper, också de som utförts med kalk som stabiliseringsmedel. Resultaten kan tolkas som att detta berodde på hög homogenitet hos pelarmaterialet i samtliga fall utan förekomst av dräneringsskikt eller sprickor, alternativt att inverkan av en eventuell mer permeabel makrostruktur inte går att detektera vid denna typ av försök. Neddrivningen av portrycksspetsen kan ha skapat en omörd, mer homogen zon närmast filtret som påverkar strömningsförhållandena. Vid denna typ av försök finns dessutom alltid en risk för viss igensättning av filtren under neddrivning, men den relativt begränsade spridningen i resultat mellan olika pelare tyder inte på att så var fallet.



Figur 7.12. Permeabilitet hos kalk-cementpelare enligt pressopermeameterförsök. Efter Nygren & Welander (1991).

Figure 7.12. Permeability of lime-cement columns according to presso-permeameter tests. After Nygren & Welander (1991).

Detta innebär att några större skillnader i dräneringseffekt mellan olika typer av pelare inte kan fastställas. Utifrån resultaten av tidigare utförda mätningar med pressopermeameter (Nygren & Welander, 1991) i pelare av endast en typ, går inte heller att dra någon slutsats om några större skillnader i dräneringseffekt och påverkan på sättningsförlopp vid belastning. En viss osäkerhet finns dessutom också vid utvärdering av permeabiliteter ur pressopermeameterförsök då eventuella läckage under mätningarna kan påverka resultaten.

Vid jämförelser mellan resultat av uppföljningar av sättningsförlopp och resultat av beräknat förlopp för utvärdering av permeabilitet hos pelare, bör man beakta att beräkningsmodeller normalt innefattar ett antal förenklingar av beteendet hos en belastad jordvolym. En faktor som också påverkar sättningsförloppet, och som normalt inte tas hänsyn till vid beräkning enligt nuvarande vanligen använda modell, är förändringen av kompressionsmodul med ökande härdningstid/liggstid och med ökande konsolidering hos stabiliserad jord. Beräkningsmodellen har trots detta för praktiskt bruk visat sig ge till övervägande del god överens-

stämme mellan beräknat och uppmätt sättningsförlopp, framförallt vad gäller pelare stabiliserade med kalk vid tidpunkten för 80 - 90 % konsolidering (Holm & Åhnberg, 1984). Relativt stora avvikelser har emellertid också förekommit, framförallt under senare år, till en del troligtvis beroende på osäkerheter vid val av beräkningsmoduler hos pelare med allt högre hållfastheter och annat stabiliseringsmedel än ren kalk.

Ytterligare undersökningar bör utföras för att utröna hur och i vilken omfattning permeabiliteten hos jorden förändras vid djupstabilisering.

Kapitel 8.

Slutsatser

I projektet har flera olika aspekter av att använda cement och kalk-cement (25 % kalk / 75 % cement) för djupstabilisering av jord studerats. Tidigare allmän uppfattning om egenskaper hos stabiliserad jord har till vissa delar kunnat styrkas men också nya kunskaper har kommit fram under projektets gång som är av betydelse för bedömning av funktionen hos pelarförstärkningar. Det omfattande undersökningsprogrammet har gjort det möjligt att, förutom att belysa stabiliseringsproblematiken ur ett flertal synvinklar, också dra ett antal slutsatser av mer eller mindre generell karaktär. Undersökningarna har i huvudsak omfattat försök på laboratorietillverkade prover, varför givna samband, där inte annat klart anges, i första hand gäller för laboratorieförhållanden.

- I projektet utfördes stabilisering av ett brett spektrum av jordar, från siltiga jordar och leror av olika typ till rena organiska jordar som gyttja och torv. Alla dessa typer av jordar är möjliga att stabilisera med cement eller blandningar av kalk-cement och flertalet av dessa kan också stabiliseras med kalk. Vilken hållfasthet som uppnås beror på en rad olika faktorer, som typ av jord, typ och mängd stabiliseringsmedel, blandningsarbete, härdningstid, härdningstemperatur och spänningsnivå.
- Cement eller kalk-cement gav generellt högre hållfasthet än kalk. Hög hållfasthet kan åstadkommas med cement eller blandningar av kalk och cement i samtliga provade typer av jordar. Effekten av enbart kalk är god i framförallt kvicklera och i marin lera med hög salthalt, men däremot begränsad i organiska jordar och sulfidhaltiga jordar. I **Tabell 8.1** har en grov klassning gjorts av den grad av hållfasthetshöjande effekt som de olika stabiliseringsmedlen gav i de provade jordarna. Vid val av stabiliseringsmedel måste vidare hänsyn tas till bl a faktorer som önskad korttids- eller långtidshållfasthet samt samverkan mellan pelare och jord i olika tillämpningar.

Tabell 8.1. Bedömd hållfasthetshöjande effekt av olika stabiliseringsmedel i de provade jordarna.

Stabiliseringsmedel	Jordar									
	lerig silt	siltig lera	lera	lera (kvisk)	lera (salt-haltig)	lera (sulfid-haltig)	gyttjig lera	lerig gyttja	gyttja	torv
kalk	•	+	•	+	+	-	•	•	-	-
kalk-cement	+	+	+	+	+	+	+	•	•	•
cement	++	++	+	++	+	+	+	+	+	+

-	<i>ingen eller dålig effekt</i>
•	<i>relativt god effekt</i>
+	<i>god effekt</i>
++	<i>mycket god effekt</i>

- Hållfastheten hos stabiliserad jord byggs upp olika beroende på om kalk eller cement används. Vid inblandning av kalk minskar vattenkvoten, en flockulering sker och en grövre struktur byggs upp hos jorden. En reaktion sker med mineraler i jorden som har puzzolana egenskaper vilket ger en med tiden ökande hållfasthet. Cement har förmågan att vid reaktion med vattnet i jorden generera hållfasthetshöjande produkter som kan fylla ut hålrummen mellan partiklarna i jorden. Cement ger också upphov till puzzolanreaktioner med jorden men i mindre omfattning än kalk. Om fullständiga puzzolanreaktioner sker kan kalk på lång sikt ge större mängd hållfasthetsuppbyggande ämnen än cement vid samma mängd tillsatt medel. I jordar där kalk ger försumbar effekt kan en tillfredsställande hållfasthet byggas upp med cement där större delen av hållfastheten åstadkoms av cementets egenreaktioner med vattnet i jorden.
- Vid inblandning bör hög homogenitet eftersträvas hos materialet. Med cement byggs den hållfasta strukturen huvudsakligen upp kring cementkornen, varför dessa bör vara jämnt fördelade för att utnyttjas fullt ut. För att uppnå effektiv hållfasthetstillväxt genom puzzolanreaktioner bör också kalk som tillsatsmedel fördelas jämnt vid inblandning.
- Tillväxttakten är beroende av vid vilken temperatur härdning sker. En ökad härdningstemperatur ger en snabbare tillväxt i hållfasthet. En viss andel kalk är därför ofta positivt att använda i stabiliseringsmedlet för att snabba på hållfasthetstillväxten. Temperaturen blir högre ju högre andel kalk som används. Vilken temperatur som kommer att uppnås i fält kan relativt väl beräknas på grundval av typ och mängd av stabiliseringsmedel, pelarmönster

och vattenkvoten hos jorden. Mer svårbedömda, eventuellt retarderande ämnen i jorden kan dock ge en fördröjning av denna värmeutveckling.

- Tillväxttakten blir olika beroende på vilket stabiliseringsmedel som används. Vid laboratorieförsök med lagringstemperaturer motsvarande dem som användes i detta projekt, dvs 8 °C för cement och kalk-cement och 20 °C för kalk, ger cement hög hållfasthetstillväxt tiden närmast efter inblandning. Efter ca 1 månad minskar normalt tillväxttakten betydligt. Kalk ger en viss hållfasthetstillväxt det första dygnet efter inblandning. Hållfasthetstillväxten kan därefter i många fall vara relativt begränsad under någon vecka efter inblandning varefter tillväxttakten ökar. Efter lång tid kan hållfastheten i vissa fall komma upp till samma nivå eller högre än den som uppnås med motsvarande mängd cement.
- Stabilisering med cement eller en blandning av cement och kalk ger ökande hållfasthet med ökande mängd tillsatsmedel. Ren kalk kan ge liknande effekt för den första eller de första veckorna efter inblandning, men på längre sikt försvinner denna effekt eller blir mindre uttalad.
- En uppskattning av vilken hållfasthetsnivå som kan uppnås vid inblandning av olika mängd stabiliseringsmedel i olika typer av jordar vid laboratorieprovning kan fås genom att studera resultaten för jordar av samma typ i denna rapport. I de fall stabiliseringsmedlet helt eller delvis utgörs av cement kan samband mellan hållfasthet och vattencementtal (vct) användas för en bättre bedömning av trolig hållfasthet baserat på inverkan av vattenkvoten i jorden.
- Hållfastheten hos stabiliserad jord är beroende av spänningssituationen före belastning. Detta gäller under både dränerade och odränerade förhållanden. Spänningsberoendet minskar med ökande hållfasthet.
- Styvheten hos stabiliserad jord ökar ungefär proportionellt med ökande hållfasthet. Vilket förhållande mellan deformationsmoduler och skjuvhållfasthet som erhålls beror huvudsakligen på uppnådd skjuvhållfasthet och använd konsolideringsspanning. Använd typ av stabiliseringsmedel har däremot mindre inverkan på förhållandet.
- Den stabiliserade jordens beteende vid belastning liknar i stor utsträckning det hos en cementerad och överkonsoliderad ostabiliserad jord. Detta gäller vid skjuvning såväl som vid konsolidering. Det är ingen väsentlig skillnad mellan de olika typerna av stabiliseringsmedel i detta avseende. Den stora

skillnaden är vilken grad av cementering som kan uppnås med en viss mängd bindemedel.

- Vid mycket höga spänningsnivåer och stora deformationer bryts cementeringen ned och materialet får en dränerad skjuvhållfasthet och kompressibilitet som är av samma storleksordning som den hos ostabiliserad jord som konsoliderats för samma höga spänningsnivå.

Vid dimensionering av förstärkning genom djupstabilisering måste skillnader mellan laboratorieförsök och verkliga förhållanden i fält beaktas. En annan homogenitet, en inverkan på jorden i gränzonen utanför pelaren, en förhöjd men avklingande härdningstemperatur i fält och en med djupet ökande spänningsnivå är faktorer som påverkar skjuvhållfasthet och deformationsegenskaper. Beroende på avsedd funktion hos förstärkningen kan dimensioneringen utföras med försiktigt valda parametrar baserade på enbart laboratorieförsök, som stöd kombinerat med resultat från denna rapport samt tidigare erfarenhet, men normalt bör laboratorieförsök kompletteras med fältförsök på provpelare och/eller kontroll av produktionspelare.

De mycket höga hållfastheter som kan uppnås, framförallt med cement eller kalk/cement i förhållandet 25/75, innebär att användningen inom nyare applikationsområden, t ex grundläggning av hus och mindre broar, kan komma att öka. I sådana fall bör dimensionering ske med betraktande av pelarna som mer distinkt lastbärande element. Vid ett mer traditionellt utnyttjande av tekniken för djupstabilisering, där lägre hållfastheter fordras, kan mindre mängd bindemedel användas och därmed besparingar göras.

Referenser

- Assarsson, K G (1977).** Stabilisering och jordmaterialförbättring med kalk. Kurs i jordstabilisering med cement och kalk. Cementa, Nov 1977.
- Balasubramaniam, AS, Bergado, DT, Buensuco Jr, BR & Yang, WC (1989).** Strength and deformation characteristics of lime-treated soft clays. Geotechnical Engineering, no 1 1989.
- Barnes, P (1983).** Structure and performance of cements. Applied Science Publishers Ltd, 1983.
- Bengtsson, P-E & Holm, G (1984).** Kalkpelare som drän. IX Nordiskt geoteknikermöte, Linköping 1984.
- Bengtsson, P-E, m fl (1993).** Statens geotekniska institut, Rapport. BFR-projnr 860455-1, Koncept 1993-12-30.
- Boynton, R S (1980).** Chemistry and Technology of Lime and Limestone. John Wiley & Sons, Inc. 1980.
- Broms, B & Boman, P (1975).** Kalkstabiliserade pelare - ny grundförstärkningsmetod vid vägbyggande. Väg- och vattenbyggaren nr 5 1975.
- Caprez, M (1983).** Stabilisieren mit Zement oder Kalk. Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik. Studientag, 4. Nov 1983, Fribourg.
- Carlsten, P & Eskilsson, S (1984).** In situ-bestämning av lerors permeabilitet. IX Nordiskt geoteknikermöte, Linköping 1984.
- Chang, YCE (1981).** Long-term consolidation beneath the test fills at Väsby, Sweden. SGI Rapport No 13.
- Diamond, S, White, JL & Dolch, WL (1963).** Transformation of clay minerals by calcium hydroxide attack. 12th National conference on clay and clay minerals. Atlanta 1963.
- Duncan, JM & Chang, C-Y (1970).** Nonlinear analysis of stress and strain in soils. ASCE, SM 5, 1970.
- Eades, JL & Grim, RE (1960).** Reaction of Hydrated Lime with Pure Clay Minerals in Soil Stabilization. Highway Research Board, Bulletin 262.

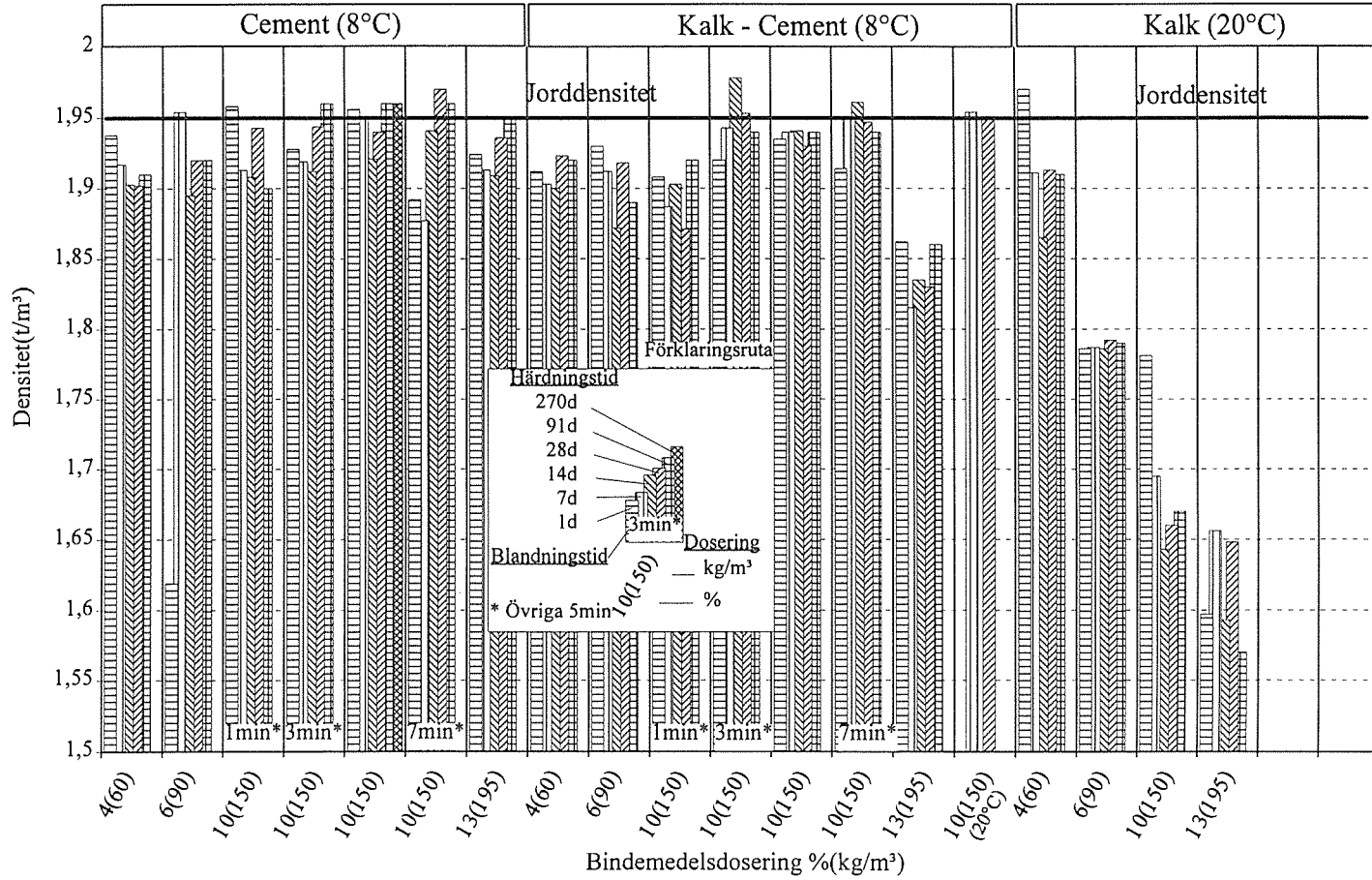
- Hansbo,S & Torstensson,B-A (1978).** Tuveskredet. Analys och sammanställning av geotekniska undersökningar i skredområdet. AB Jacobson & Widmark 1978.
- Herzog,A & Mitchell,JK (1963).** Reactions Accompanying Stabilization of Clay with Cement. Highway Research Record No.36r.
- Holm,G & Åhnberg,H (1984).** Kalkpelarförstärkning för vägbankar. Arbetsrapport SGI projekt 1-348/83.
- Holm,G, Åhnberg,H & Holmqvist,L (1984).** Kalkpelarmetoden - försök med större pelardiameter. Väg- och vattenbyggaren nr 7/8 1984.
- Holm,G, Bredenberg,H & Broms,B (1981).** Lime columns as foundation for light structures. X Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm 1981.
- Holmqvist,L, Johansson,S-E & Retelius,A (1991).** Djupstabilisering med cementpelarmetod, Etapp 1. BPA/Cementa FoU rapport 91021, BFR-projektnummer 890637-1.
- Hvorslev,MJ (1951).** Time lag and soil permeability in ground water observations. U.S. Army Waterways Experiment station, Vicksburg, Mississippi, Bulletin No 36.
- Imse, von, W (1972).** Messung der Fliessfähigkeit von Zement. Zement - Kalk - Gips, nr 3.
- Janbu,N (1970).** Grunnlag i geoteknikk. Tapir förlag, 1970.
- Kondner,RL (1963).** Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils. ASCE, SM1 1963.
- Kujala,K, (1984).** Faktorer som inverkar på djupstabiliserade jordars mekaniska egenskaper. IX Nordiskt geoteknikermöte, Vol 2, Linköping, 1984.
- Lahtinen,P (1993).** Personlig kommunikation.
- Larsson,R (1986).** Consolidation of soft soils. Statens geotekniska institut, Rapport No 29.
- Locat,J, Berube,MA & Choquette,M (1990).** Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. Canadian Geotechnical Journal nr 3, Vol.27, 1990.
- Moh,ZC (1965).** Reactions of soil minerals with cement and chemicals. Massachusetts Institute of Technology. Highway Research Record No 86, 1965.
- Mulabdi'c,M (1993).** Area correction in triaxial testing. Statens geotekniska institut, Varia nr 408.
- Müller-Vonmoos,M (1983).** Die Bedeutung der Tonminerale für das bodenmechanische Verhalten. Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik. Studenttag,4.Nov 1983, Fribourg.

- Nygren,M & Welander,A-S (1991).** Bedömning av egenskaper hos kalk/cementpelare. KTH Examensarbete 91/5 JoB.
- Olsson,S (1991).** Geochemistry, mineralogy and pore water composition in uplifted, Late Weichselian-Early Holocene clays from southern Sweden. Lundqua thesis 28, Lunds University, Department of Quaternary Geology 1991.
- Paus,K (1979).** Lerans hållfasthet ökar med kalkpelare som armering. Byggmästaren nr 4, 1979.
- Sherwood,P T (1962).** The effect of soil organic matter on the setting of soil-cement mixtures. Road Research Technical paper No 61, 1962.
- Soroka,I (1970).** Portland Cement Paste & Concrete. The Macmillan press Ltd, 1970.
- Suzuki,Y (1982).** Deep chemical mixing using cement as hardening agent. Symp on Soil & Rock Improvement, Bangkok 1982.
- Tatsuoka,F & Kobayashi,A (1983).** Triaxial strength characteristics of cement-treated soft clay. Proc of 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsingfors, Vol 1.
- Tavenas,F, Tremblay,M, Larouche,G & Leroueil,S (1986).** In situ measurement of permeability in soft clays. Proc. In situ 86, Blackburg.
- Taylor,H F W (1990).** Cement Chemistry, Academic Press Ltd 1990.
- Tremblay,M & Eriksson,L (1987).** Mätning av permeabilitet i fält - enkla och fungerande metoder. X Nordiska geoteknikermötet, Oslo 1988.
- Wild,S, Arabi,M & Leng Ward, G (1989).** Fabric development in lime treated clay soils. Ground Engineering, april, 1989.
- Åhnberg,H, Bengtsson,P-E & Holm,G (1989).** Prediction of strength of lime columns. XII Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro 1989.
- Åhnberg,H & Holm,G (1984).** Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk- och cementstabiliserad jord. Statens geotekniska institut, Rapport No 30.
- Åhnberg,H & Holm,G (1986).** Kalkpelarmetoden - Resultat av 10 års forskning och praktisk användning samt framtida utveckling. Statens geotekniska institut, Rapport No 31.

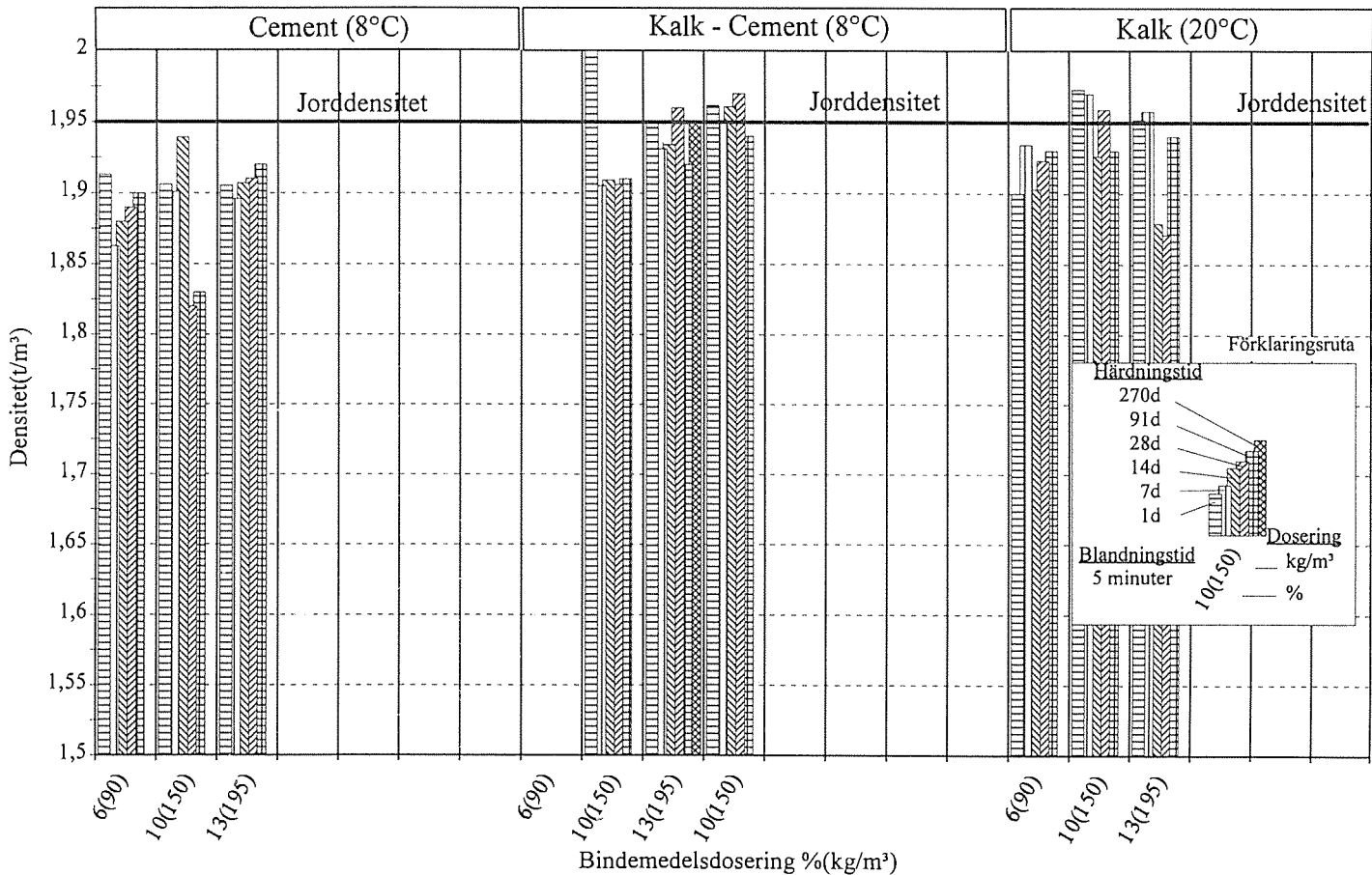
Bilagor

Kapitel 5

Lerig silt Densitet efter inblandning av bindemedel

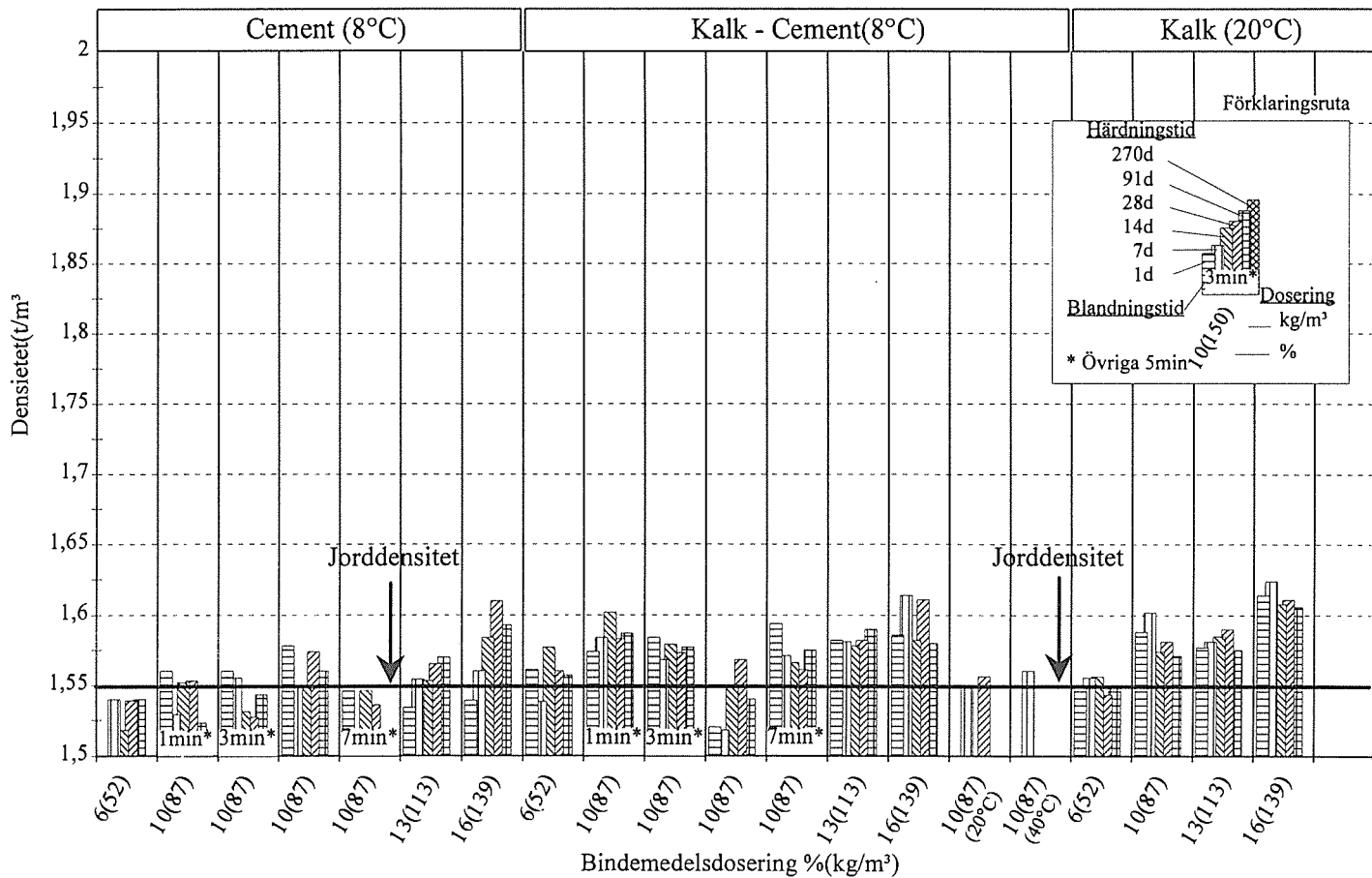


Siltig Lera Densitet efter inblandning av bindemedel



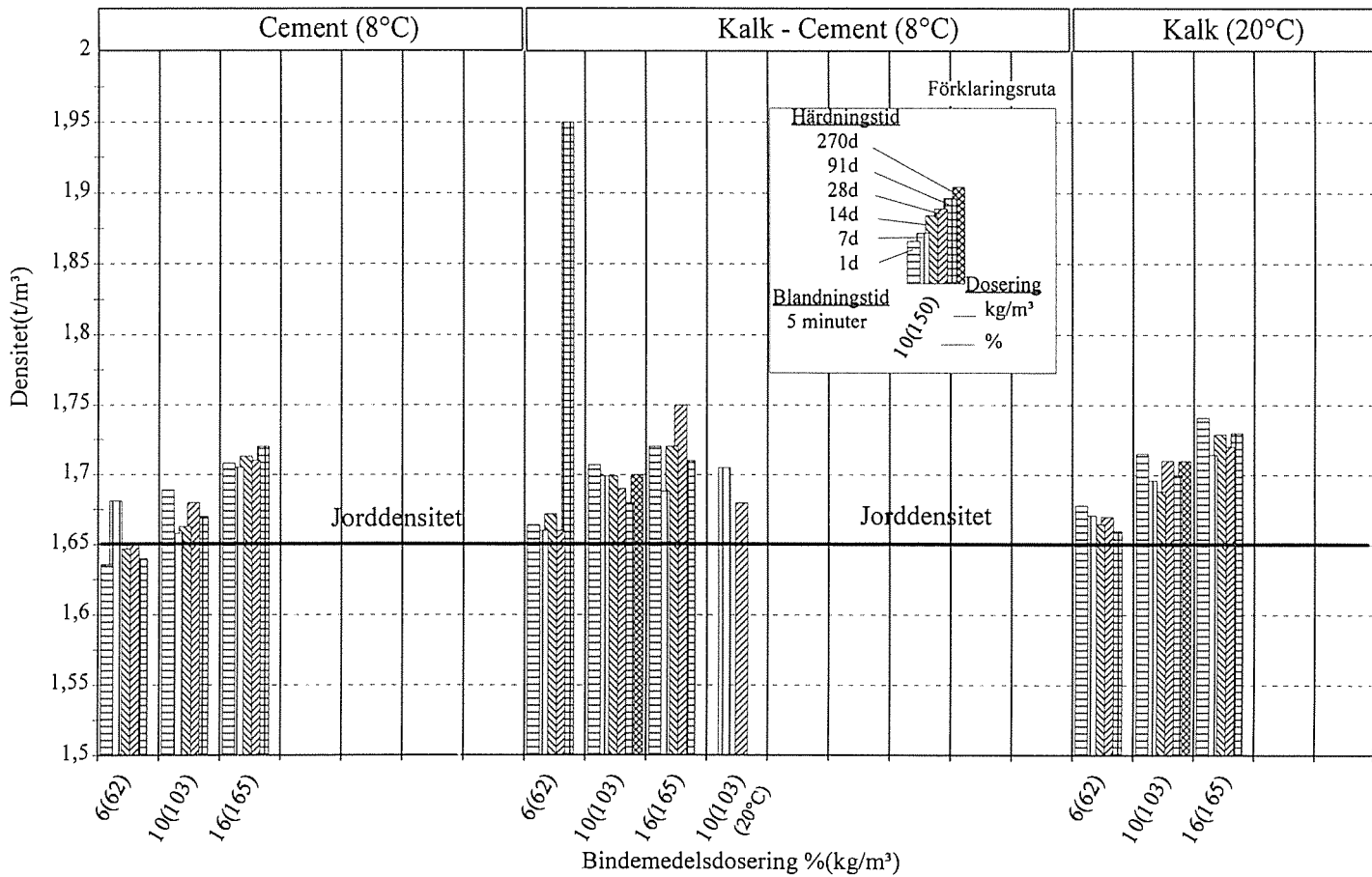
Lera

Densitet efter inblandning av bindemedel

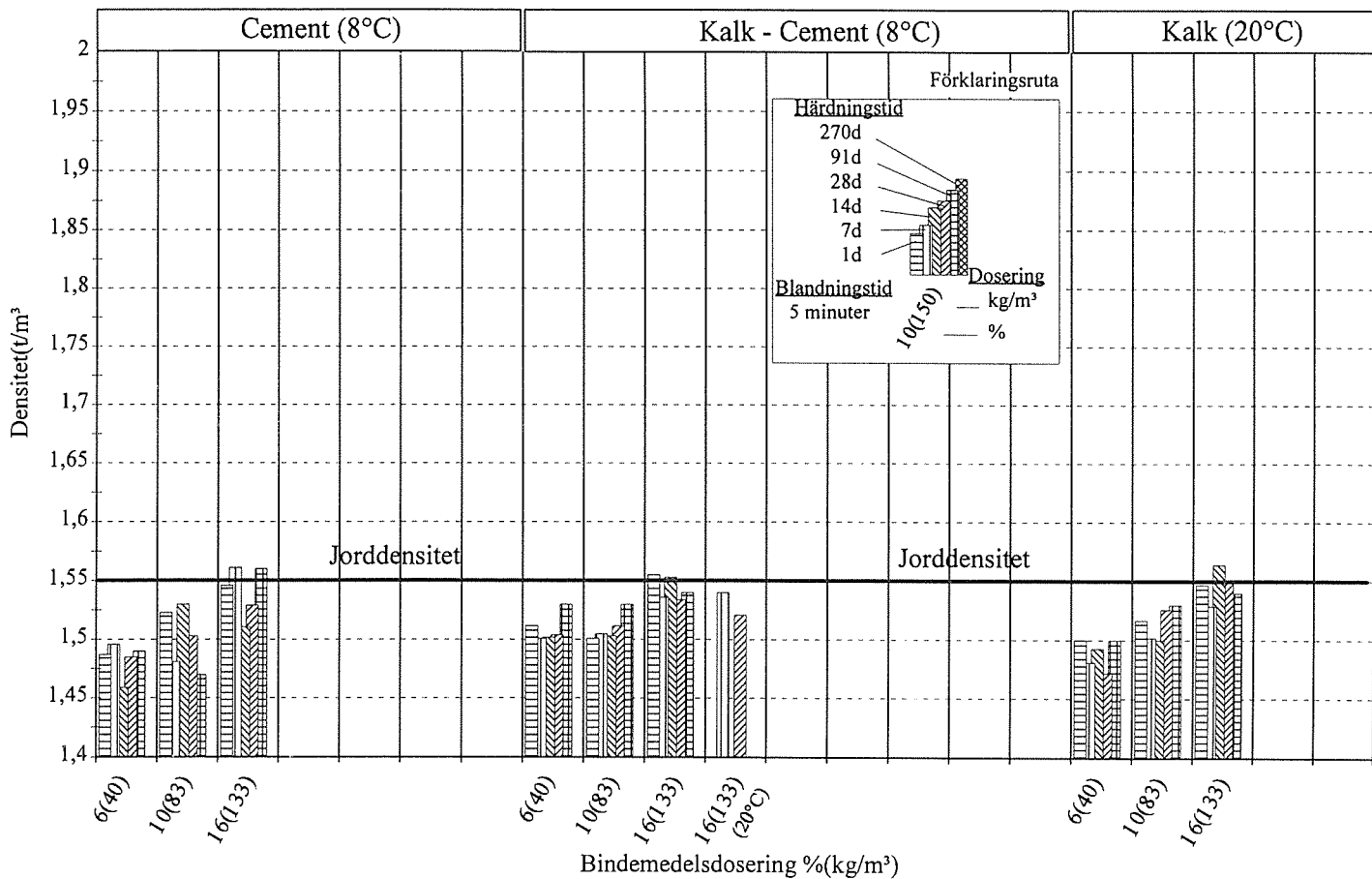


Kvicklera

Densitet efter inblandning av bindemedel

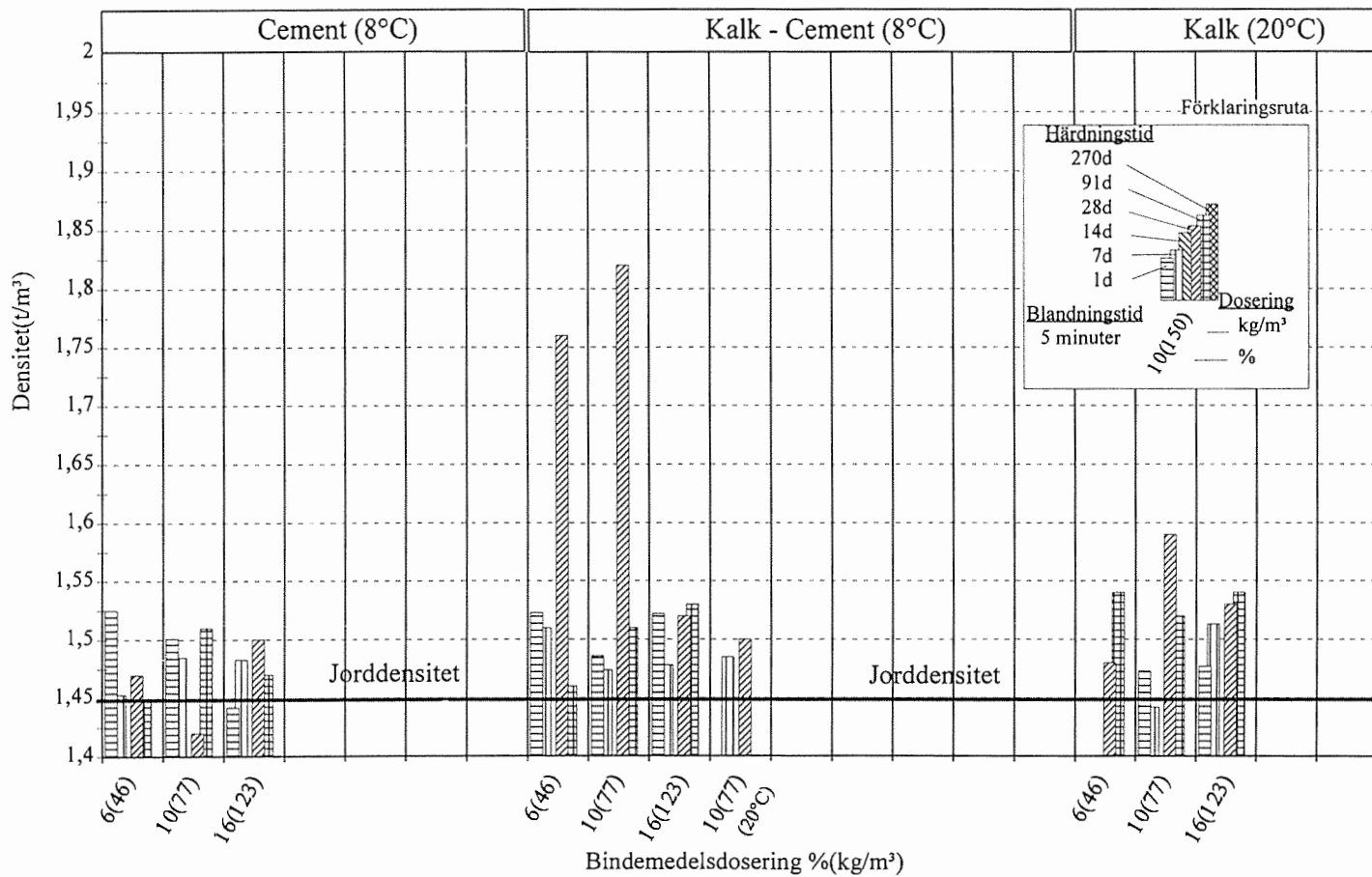


Lera med hög salthalt
Densitet efter inblandning av bindemedel

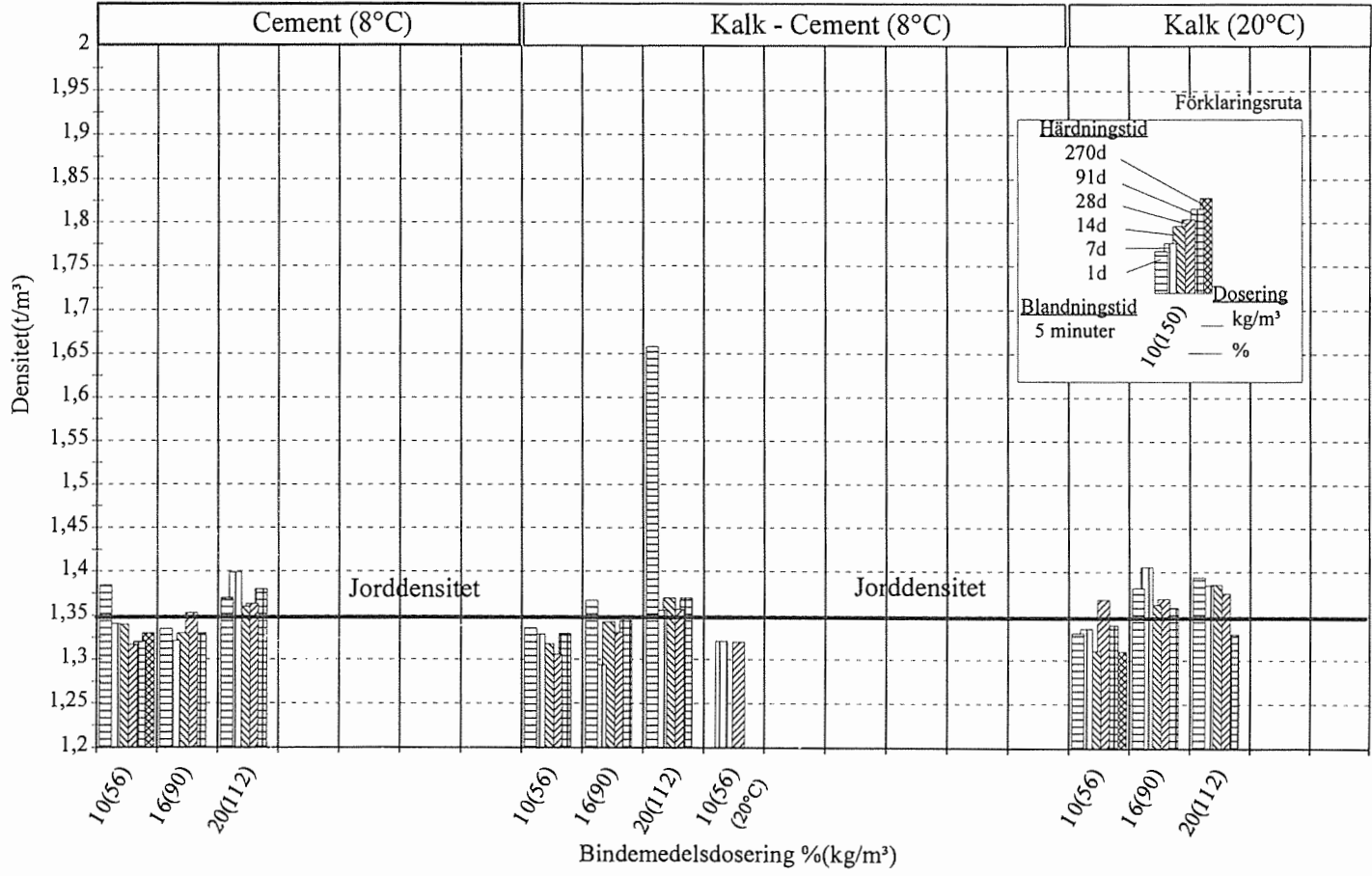


Lera med hög sulfidhalt
Densitet efter inblandning av bindemedel

Cement och kalk för djupstabilisering av jord

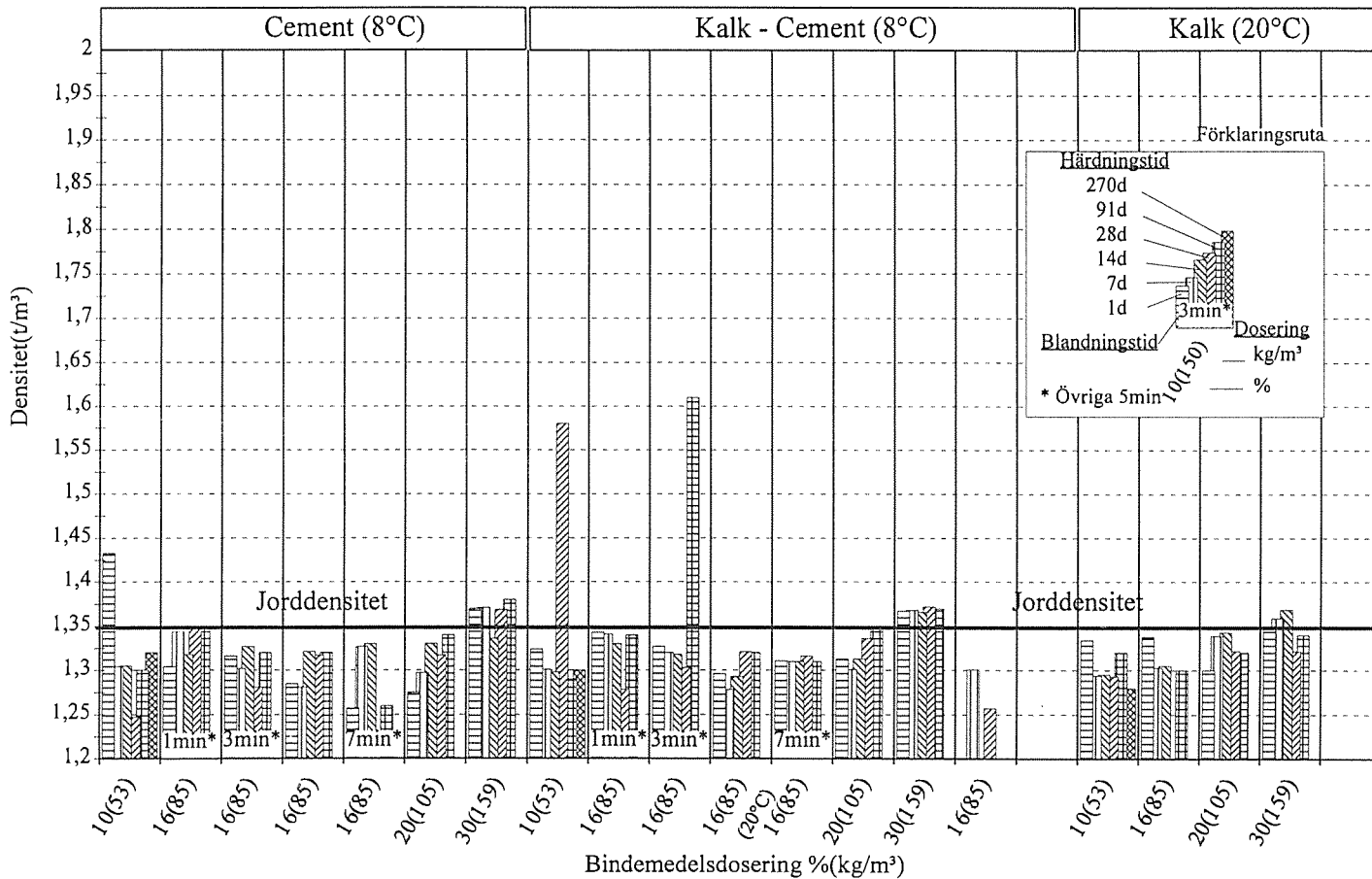


Gyttig lera
Densitet efter inblandning av bindemedel

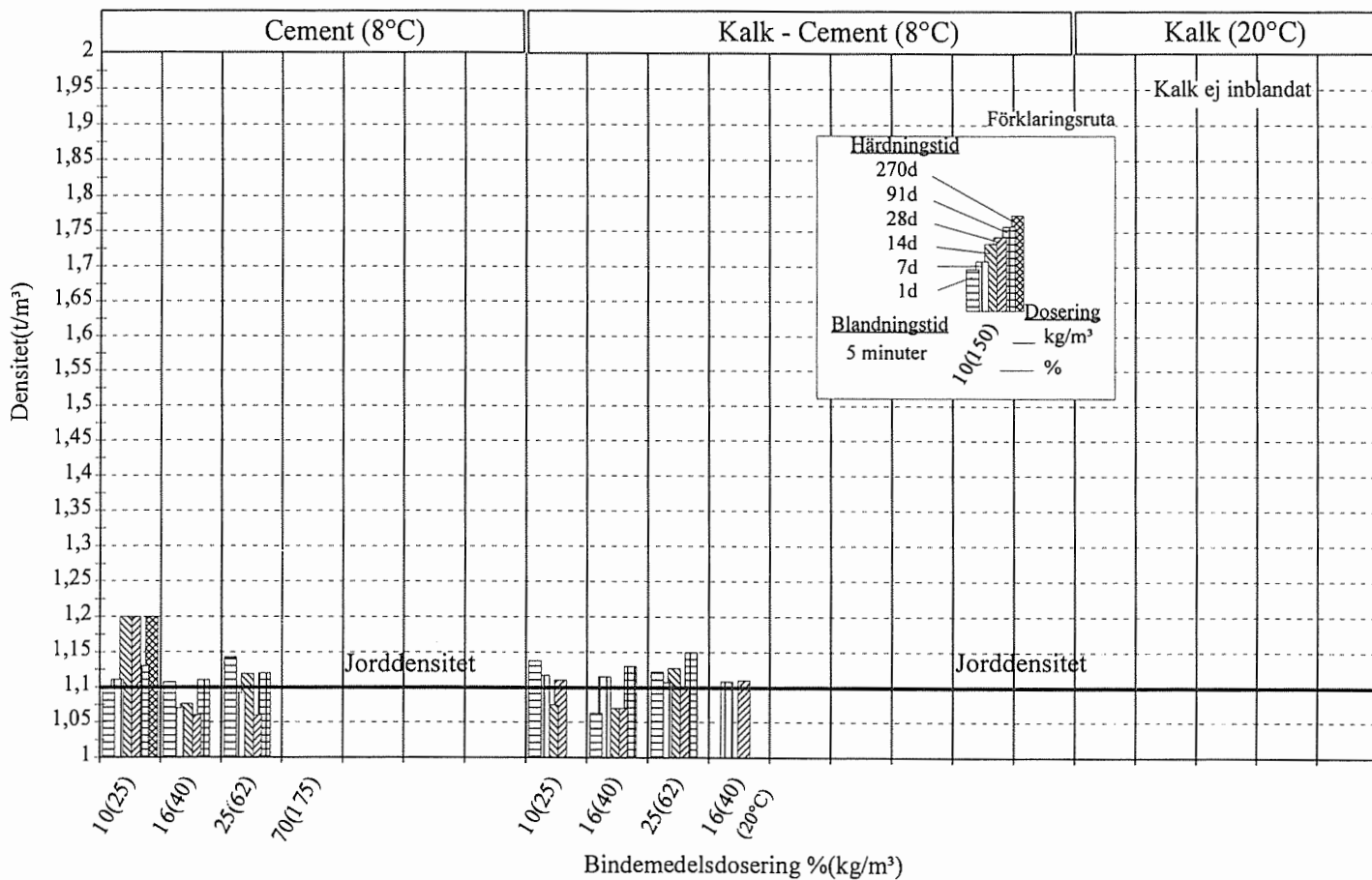


Lerig gyttja

Densitet efter inblandning av bindemedel

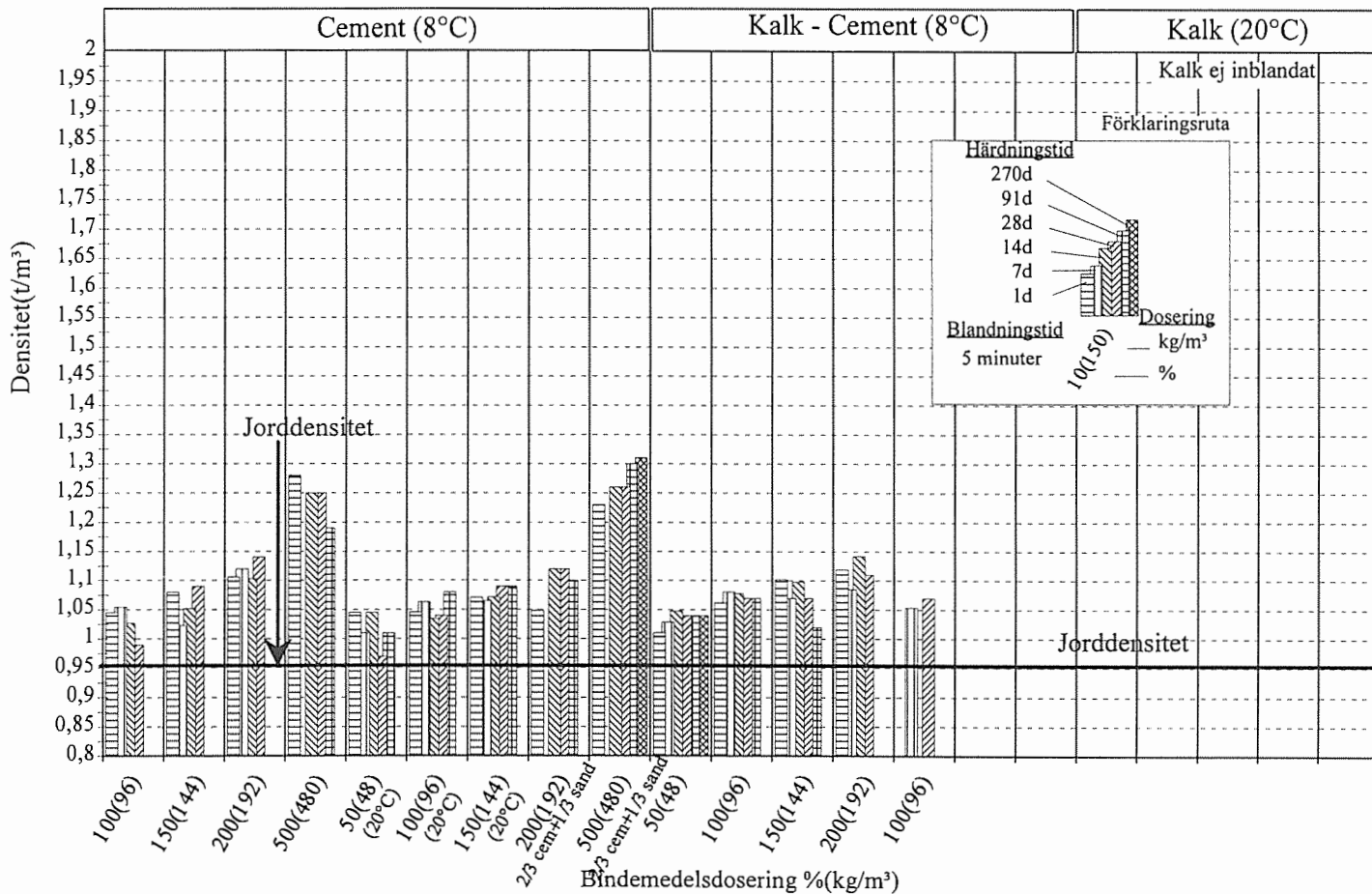


Gyttja Densitet efter inblandning av bindemedel

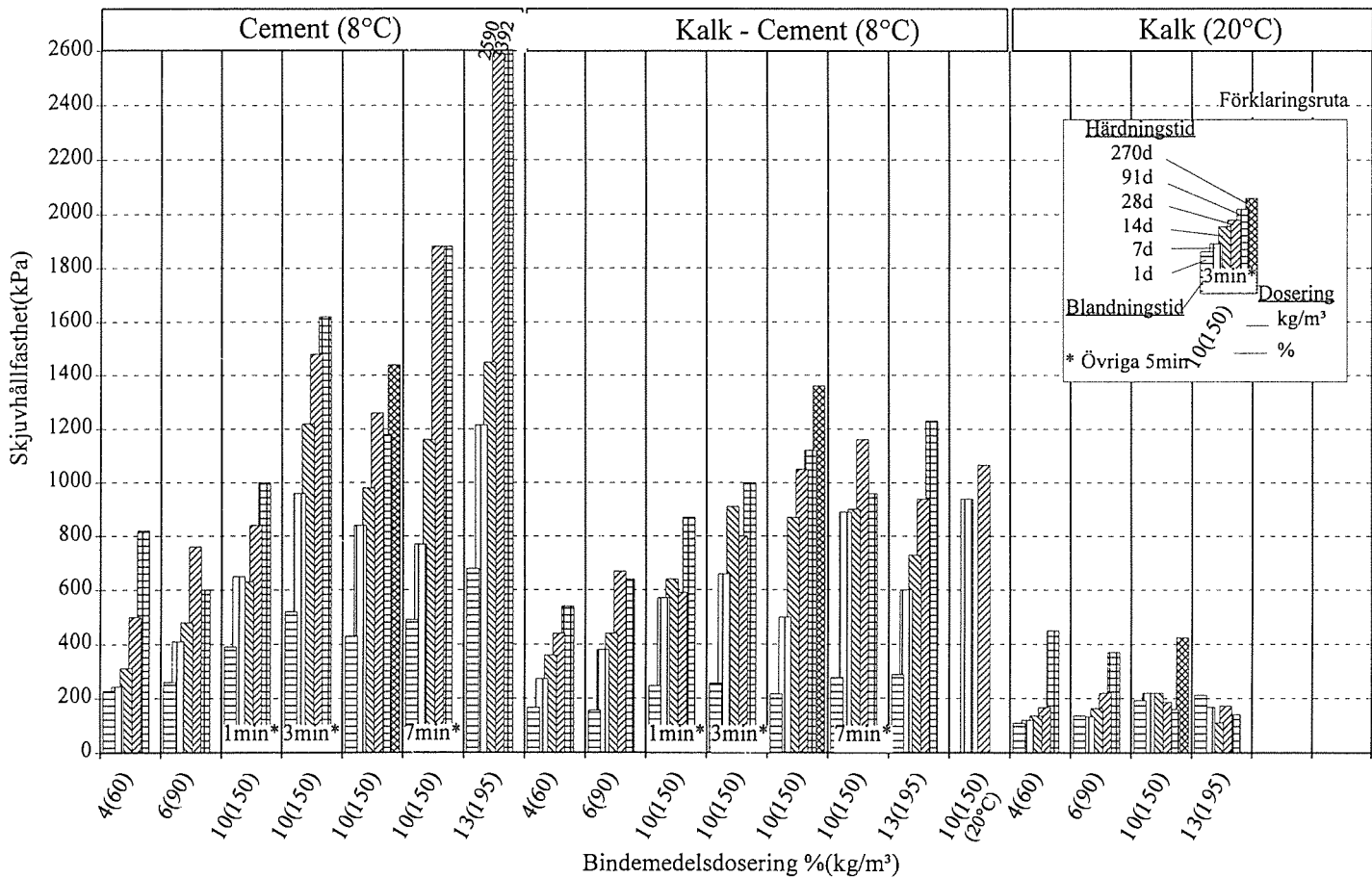


Torv

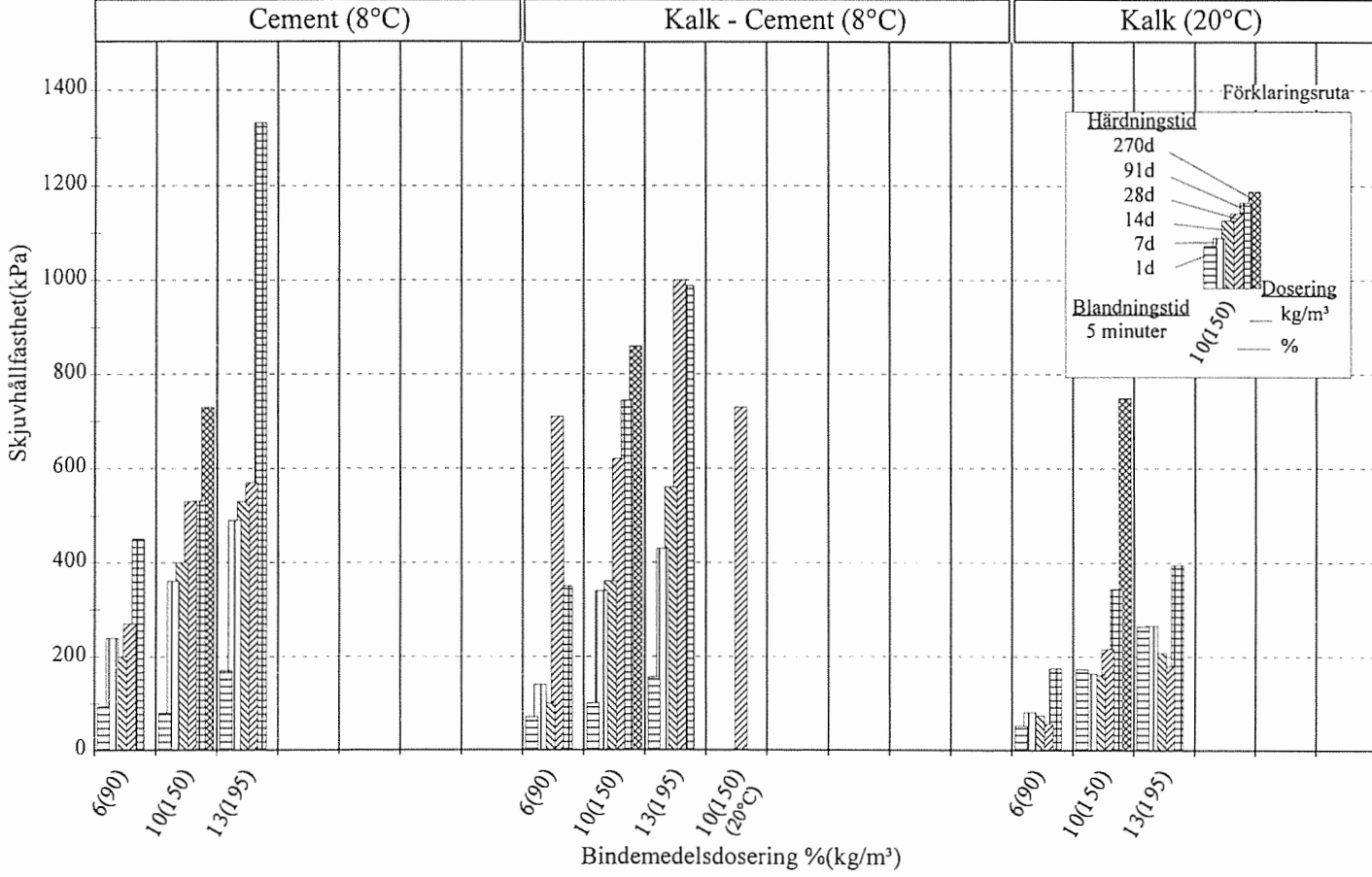
Densitet efter inblandning av bindemedel



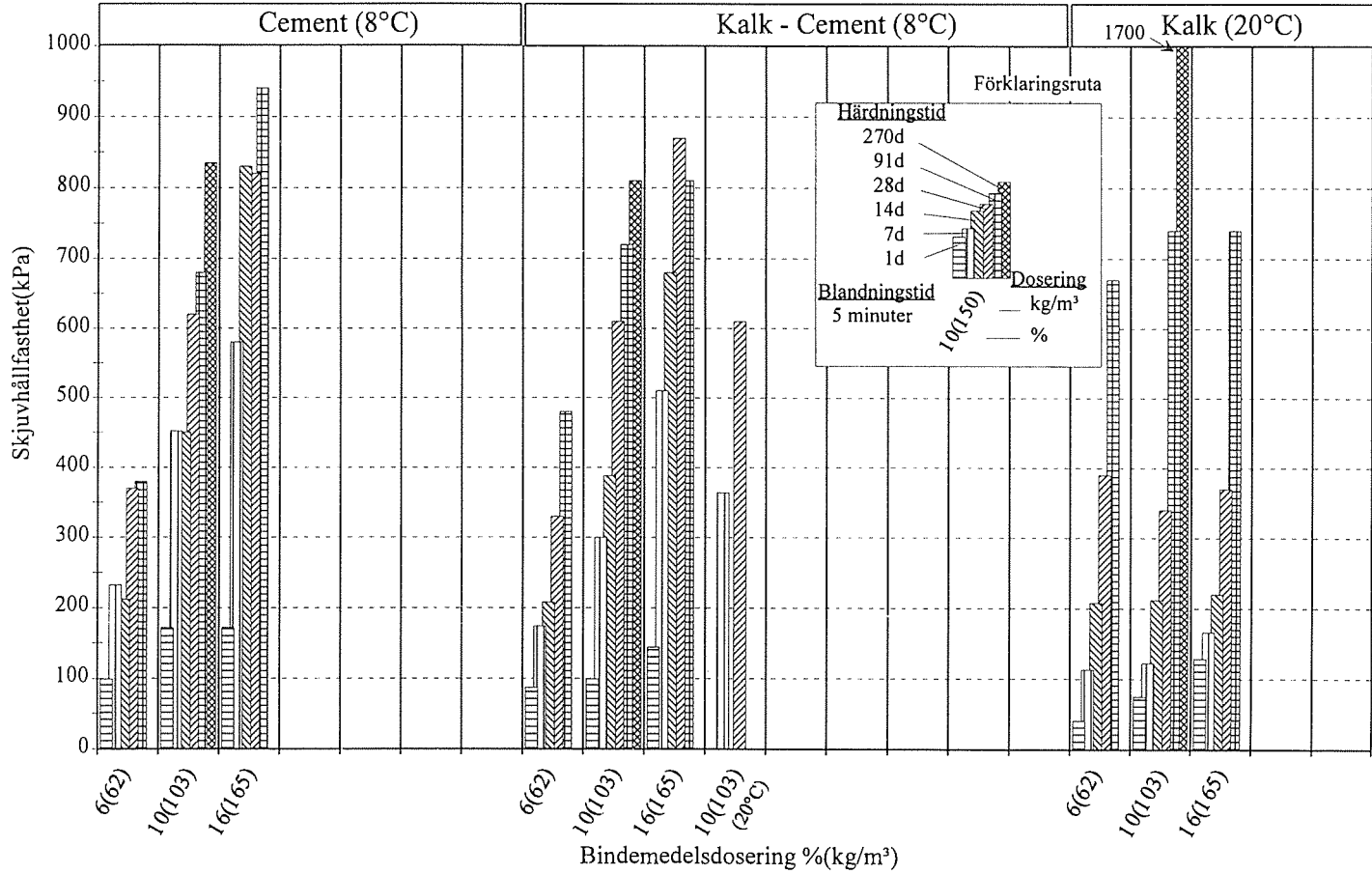
Lerig silt



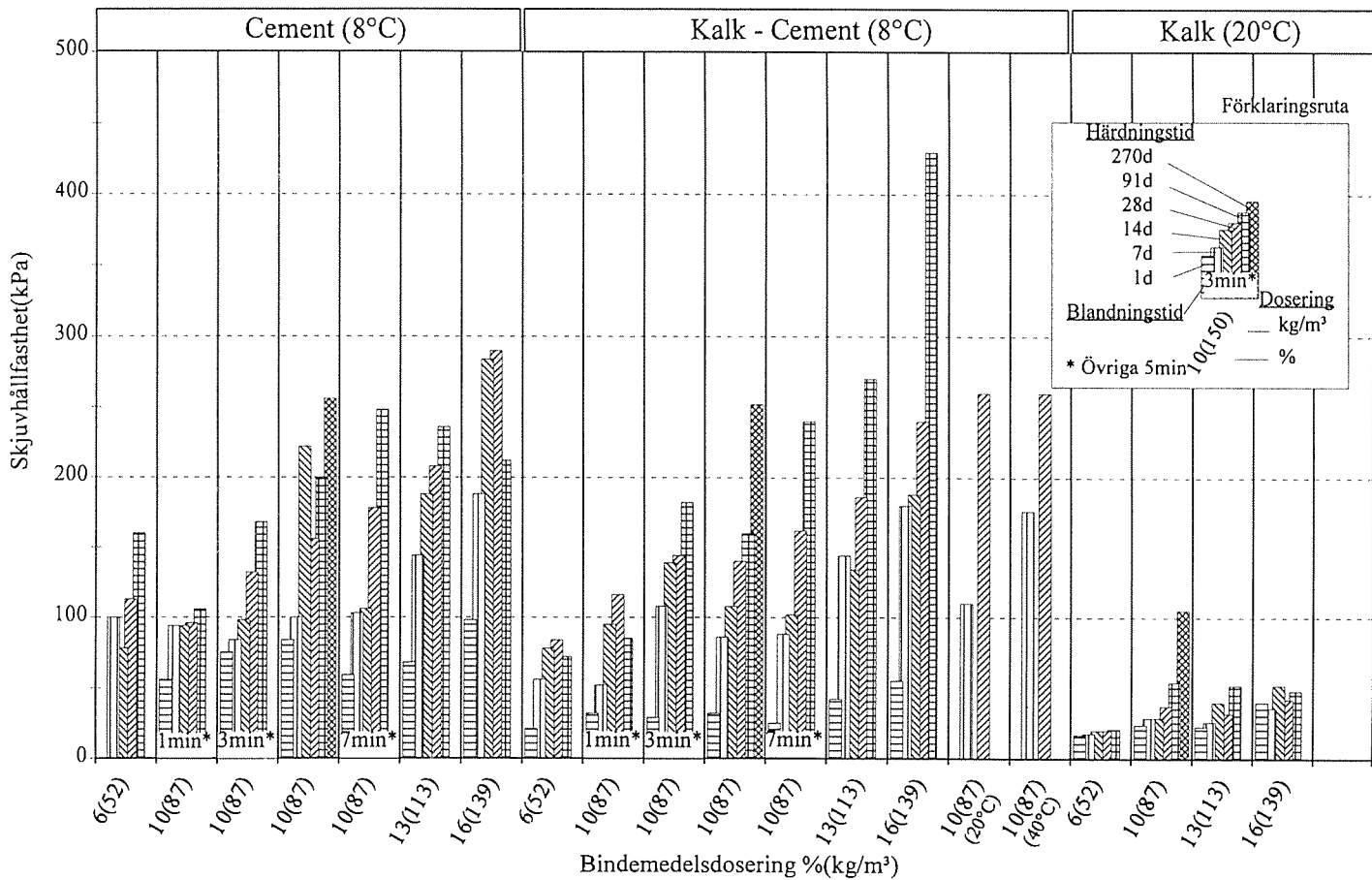
Siltig Lera



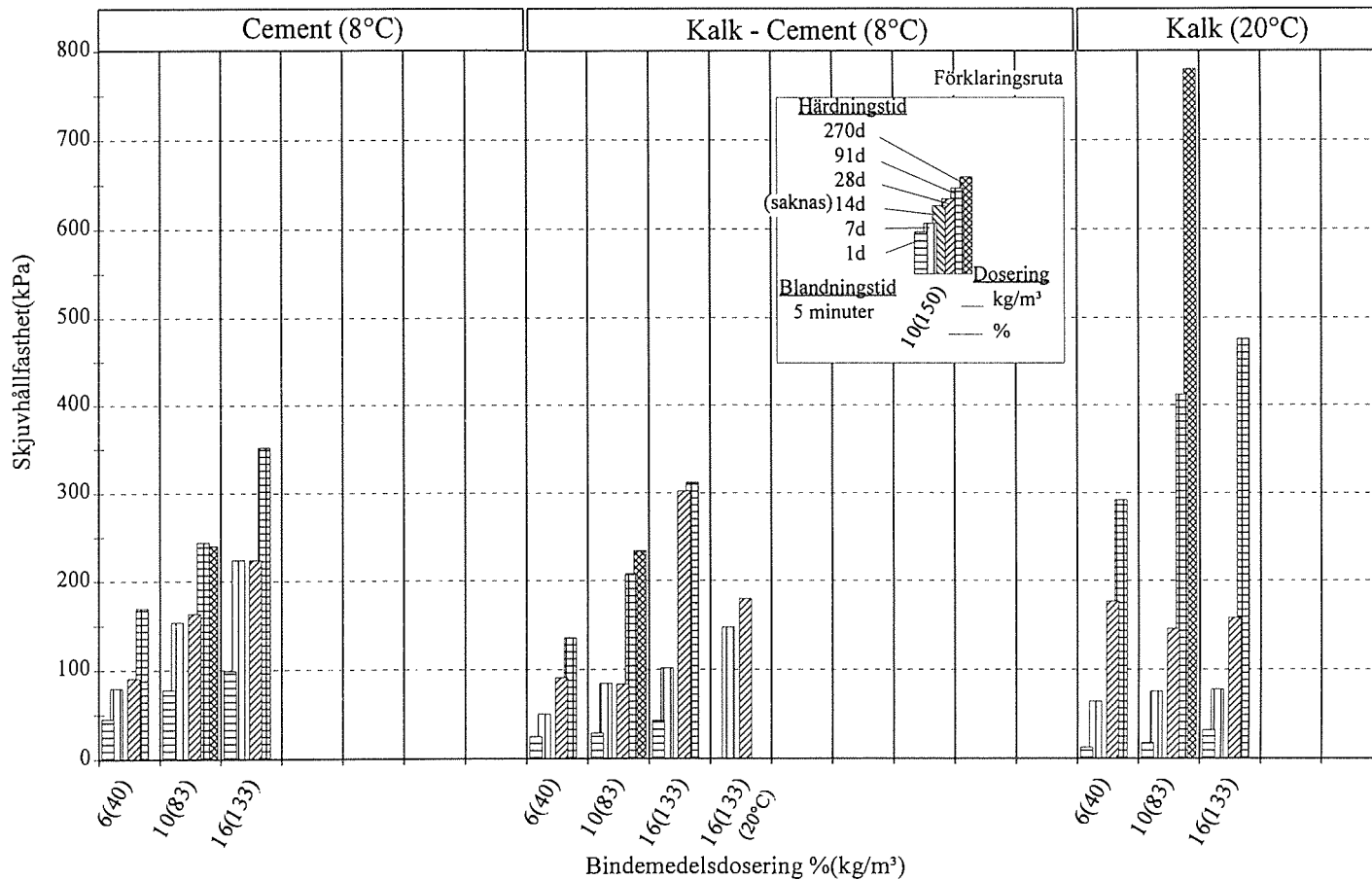
Kvicklera



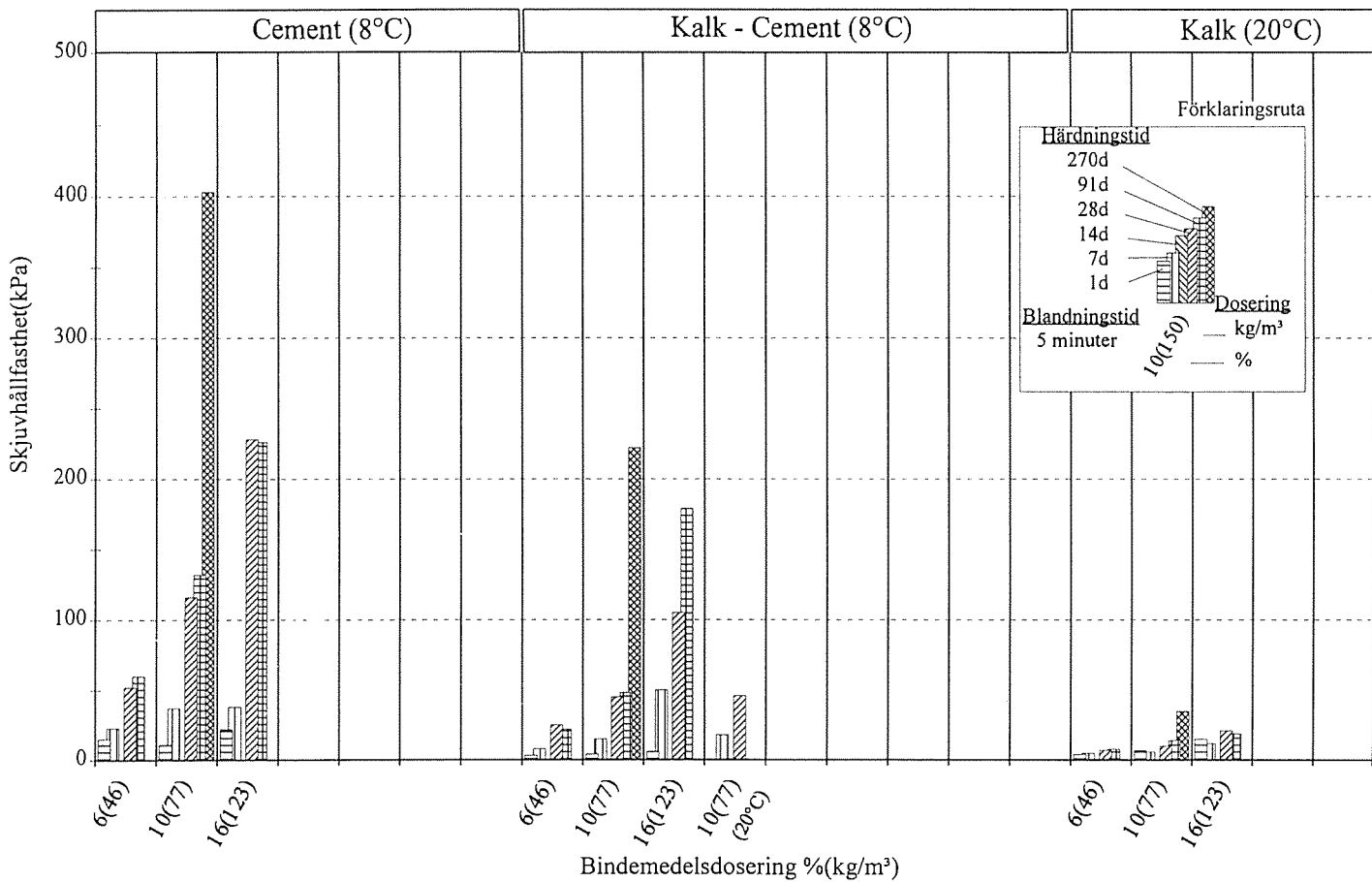
Lera



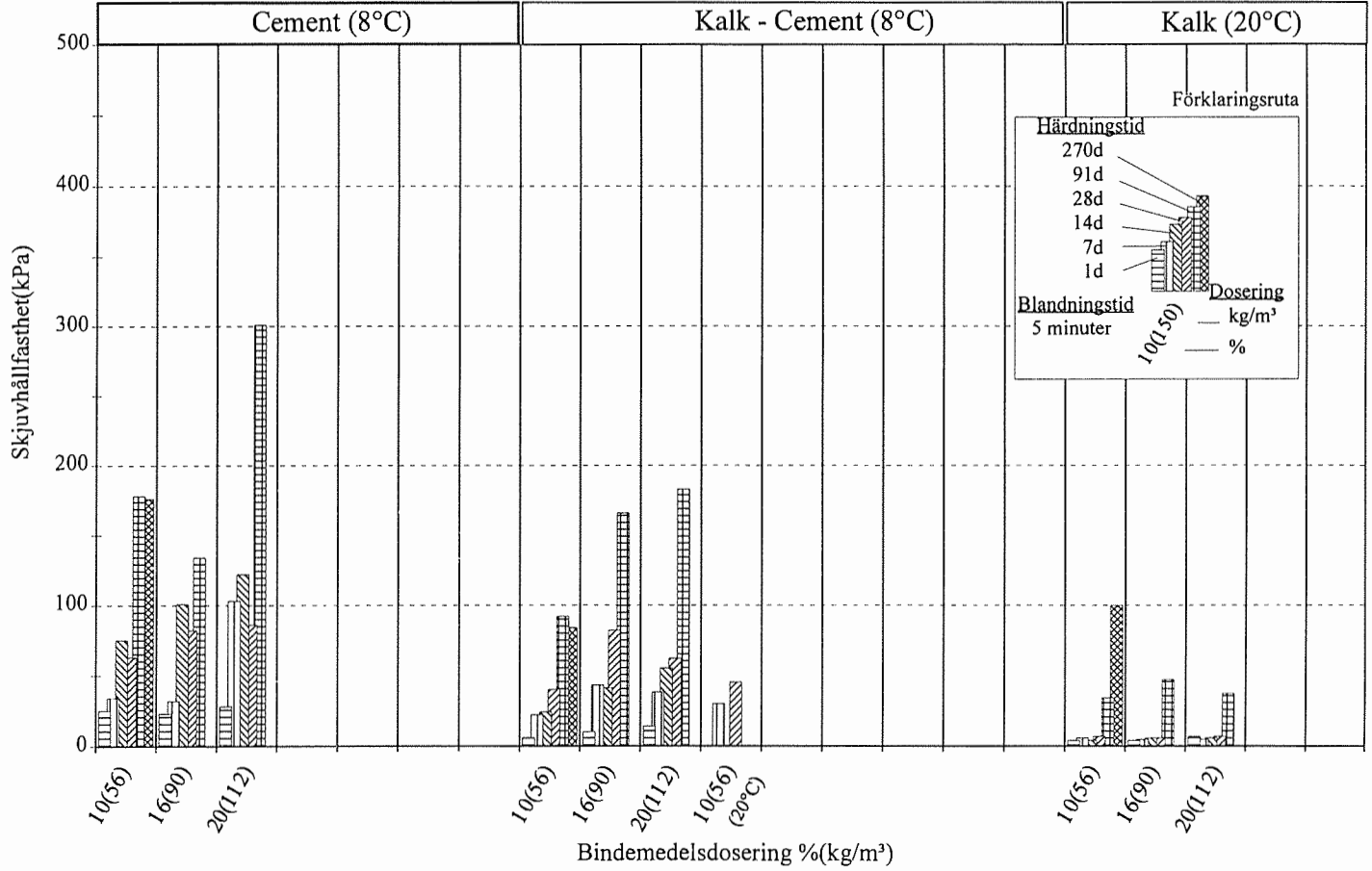
Lera med hög salthalt



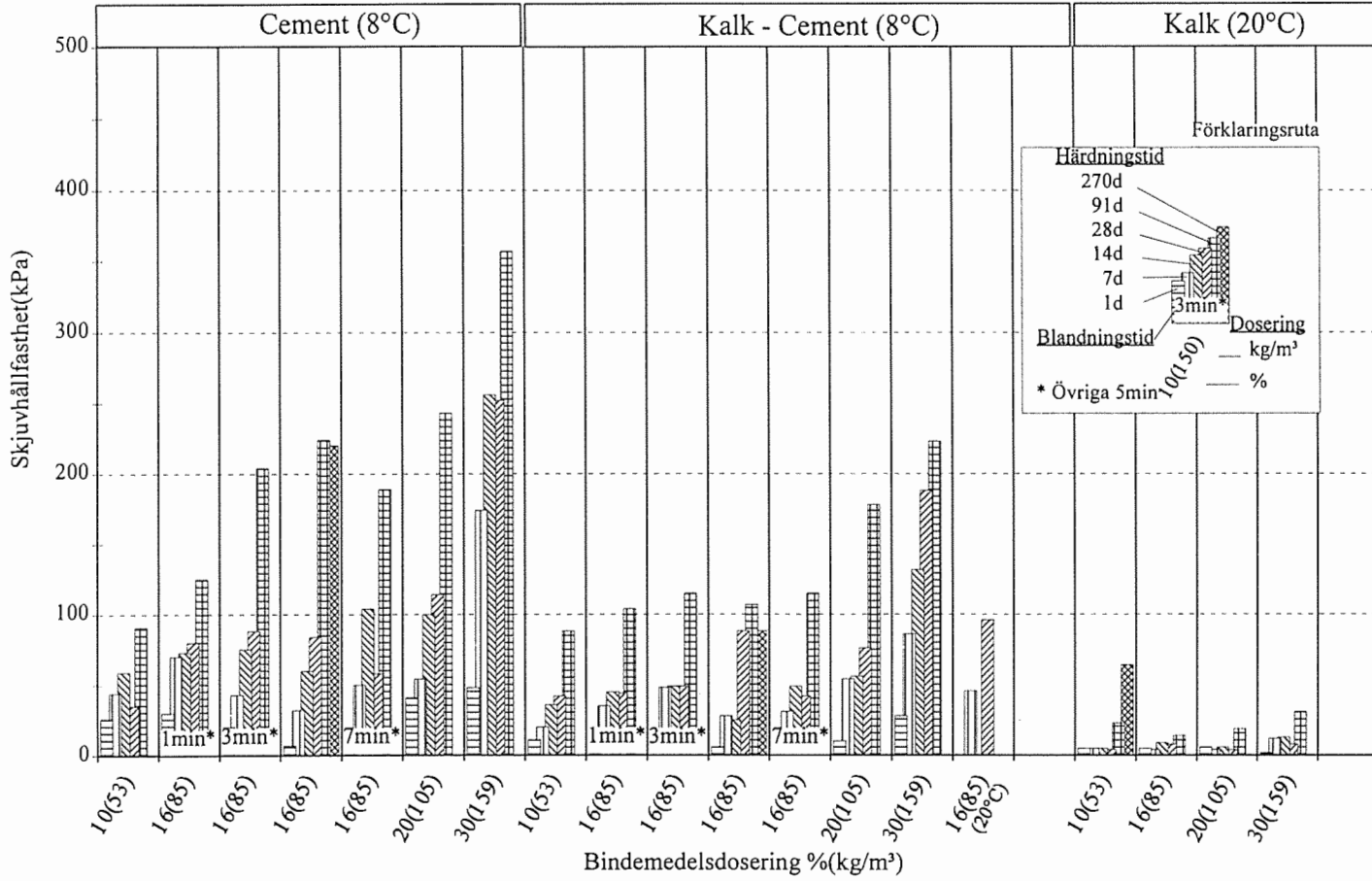
Lera med hög sulfidhalt



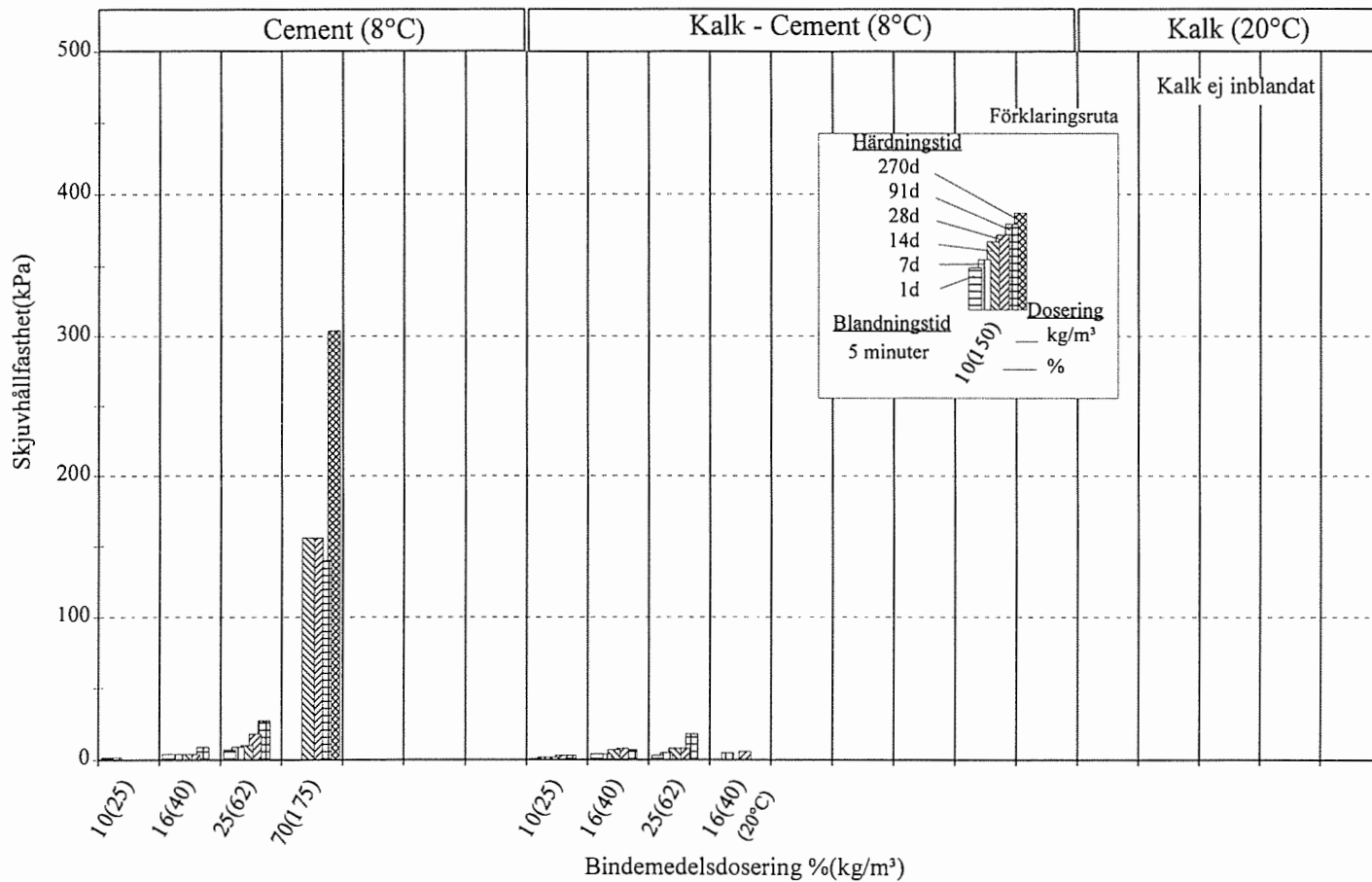
Gyttjig lera



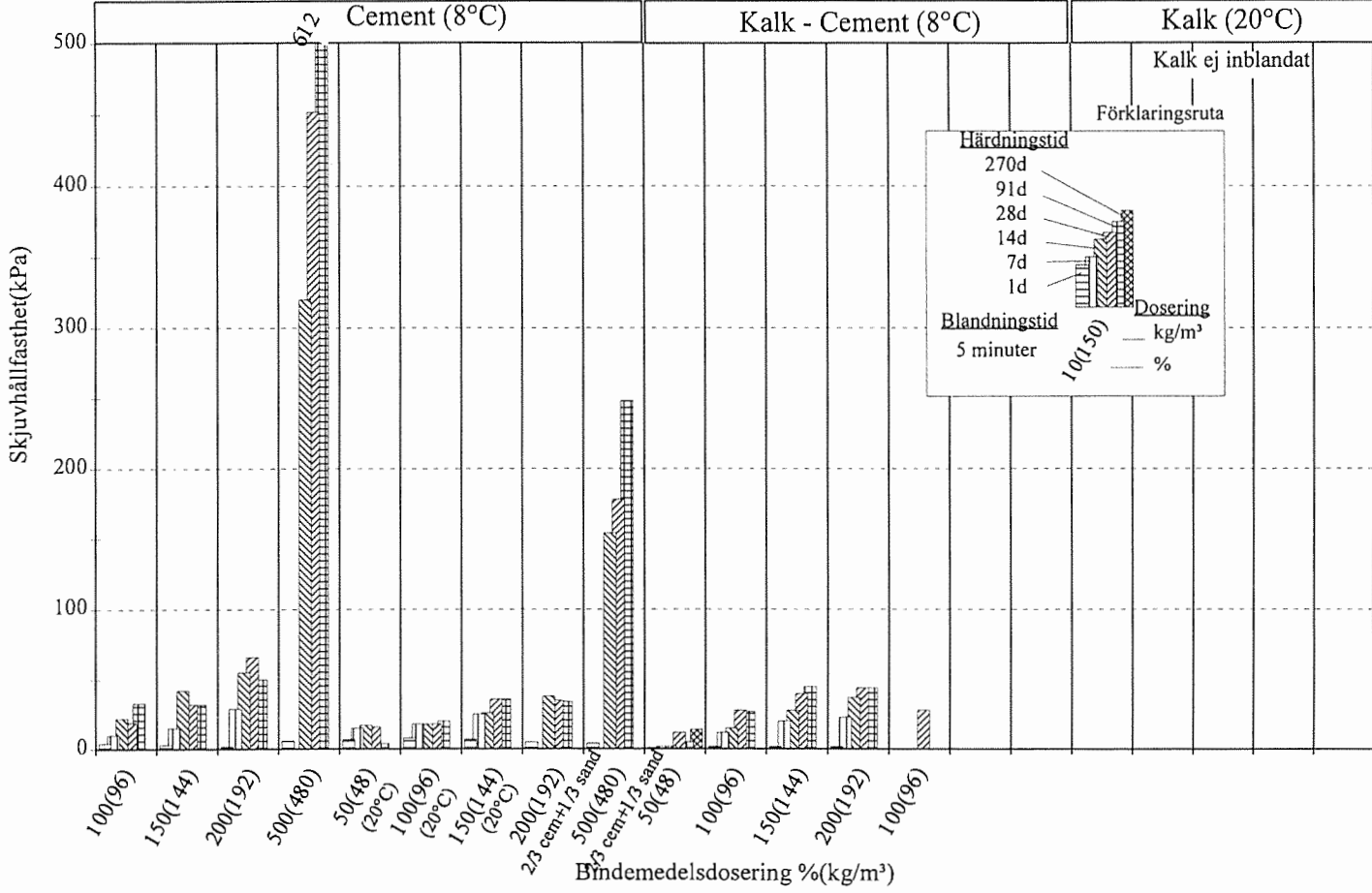
Lerig gytta

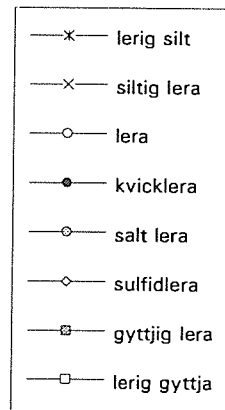
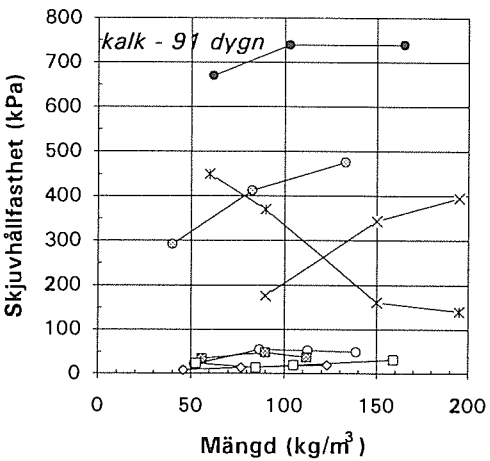
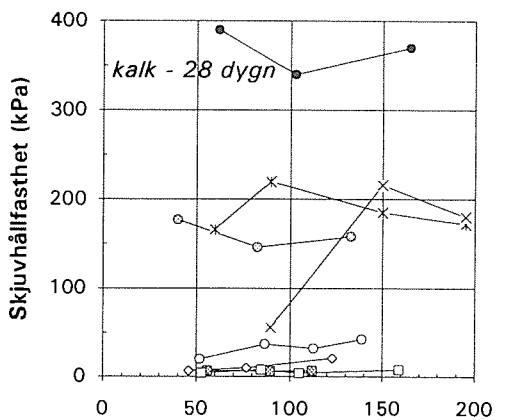
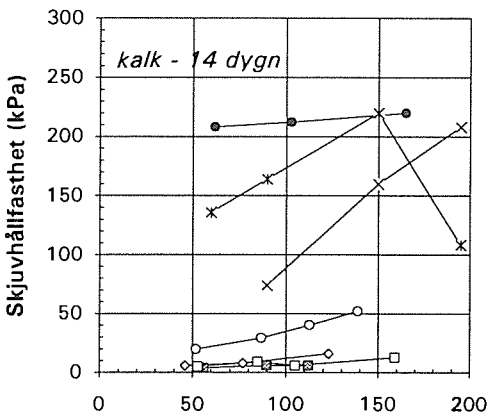
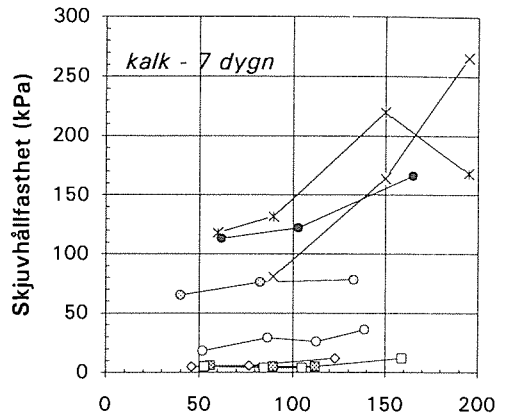
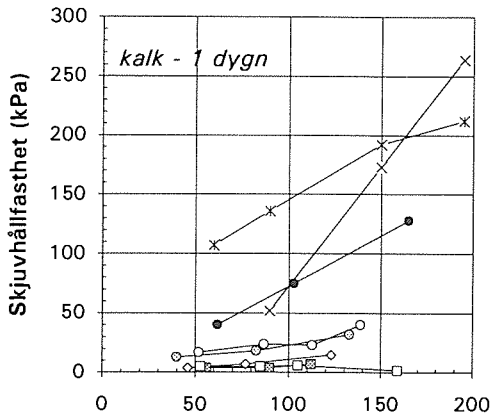


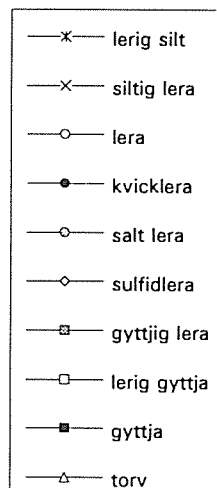
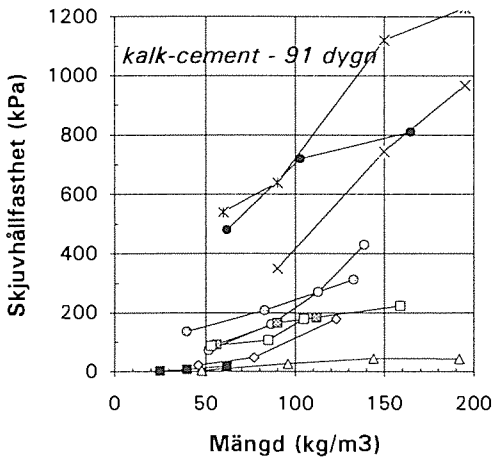
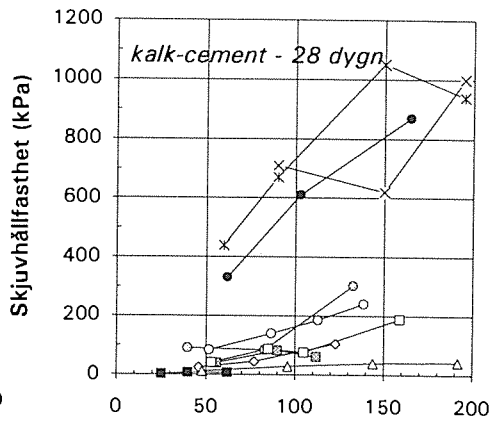
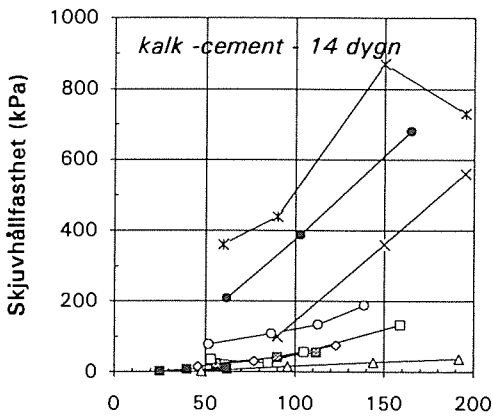
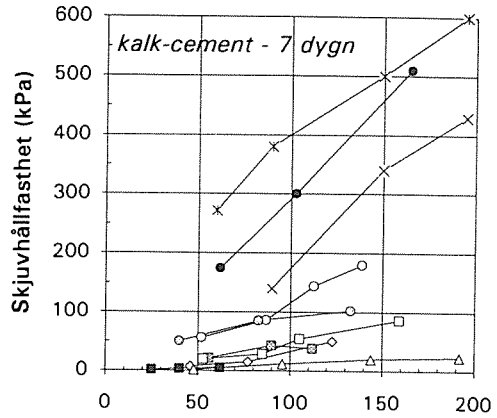
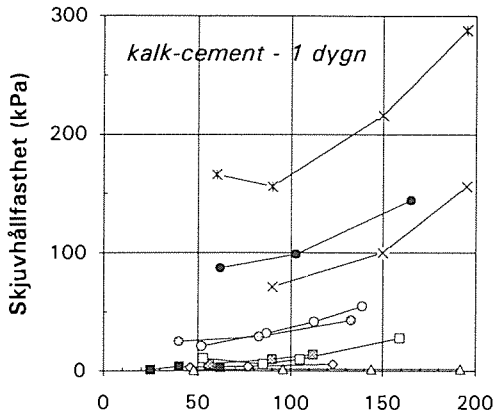
Gyttja

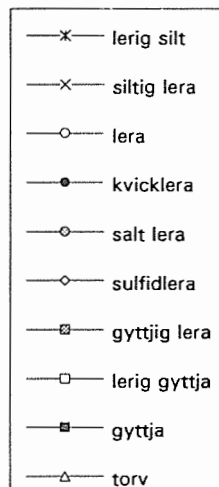
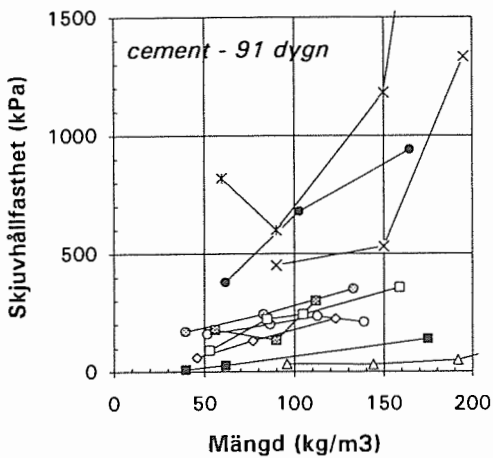
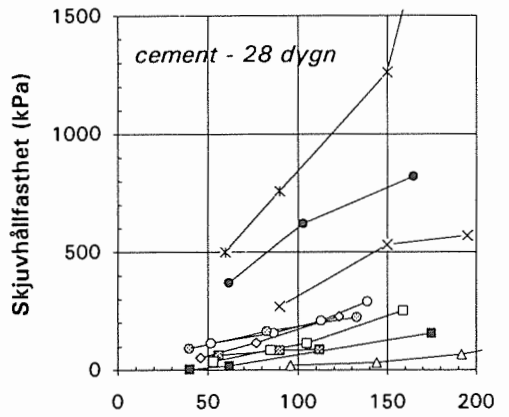
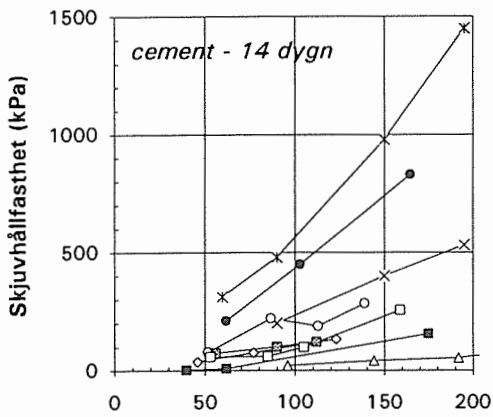
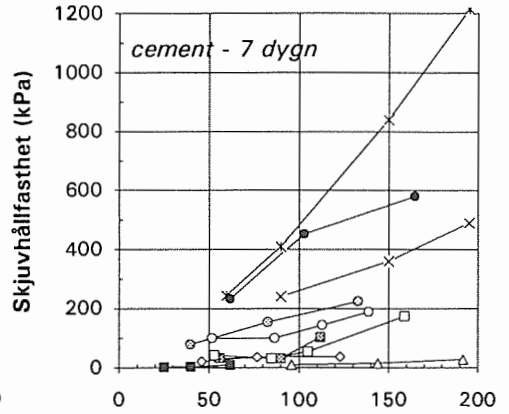
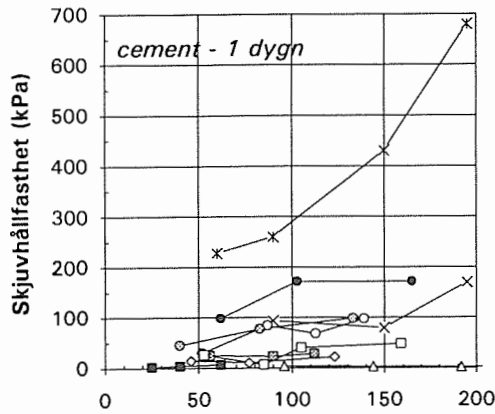


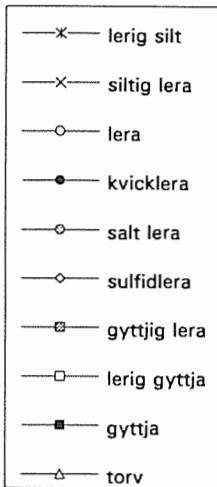
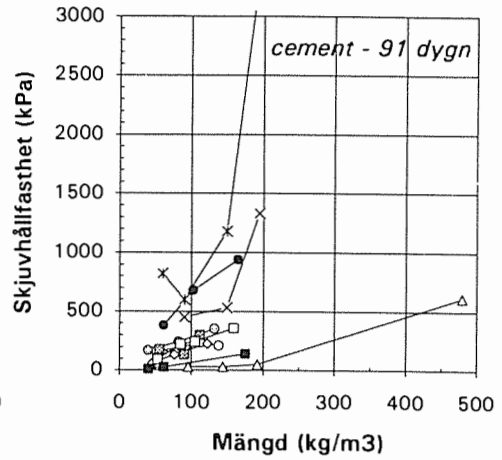
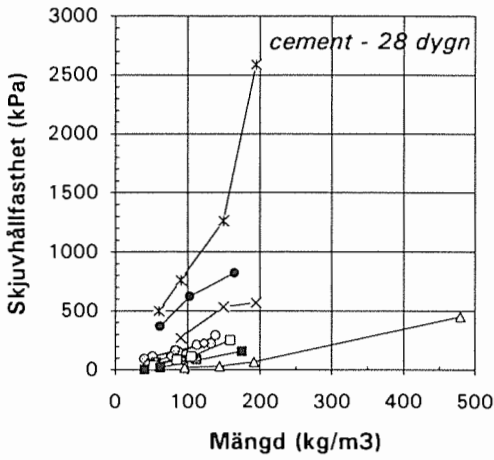
Torv



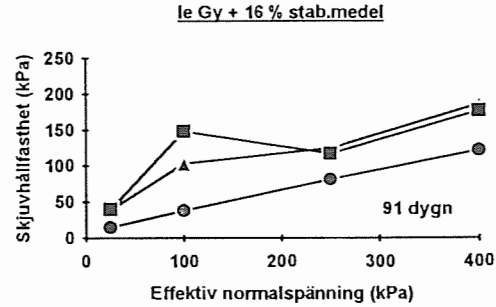
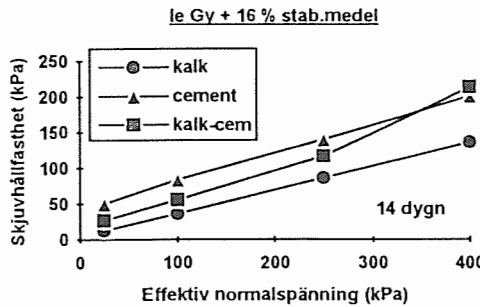
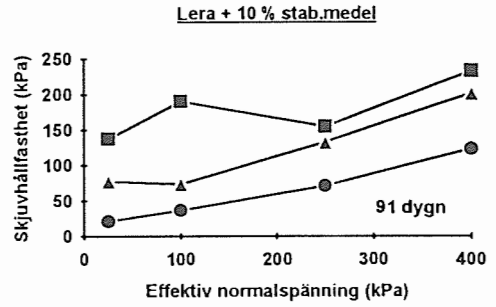
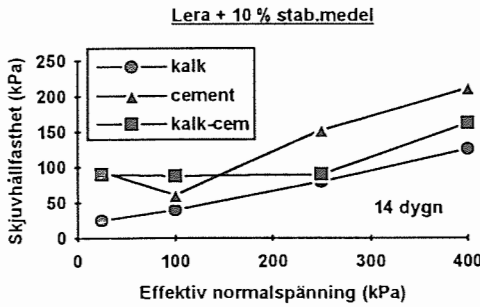
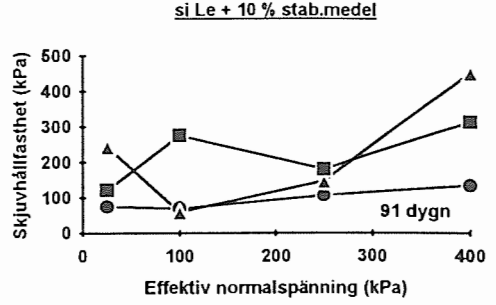
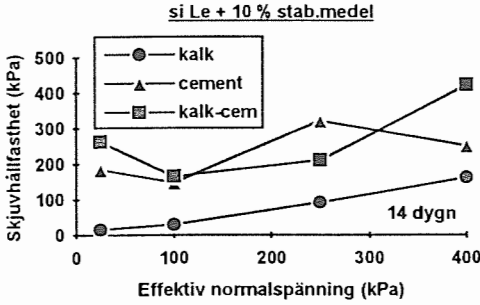




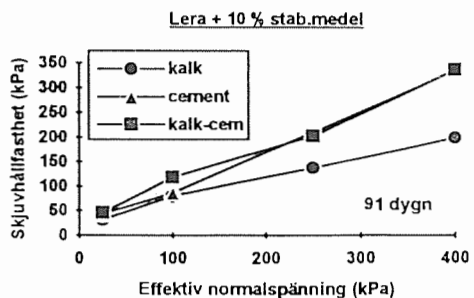
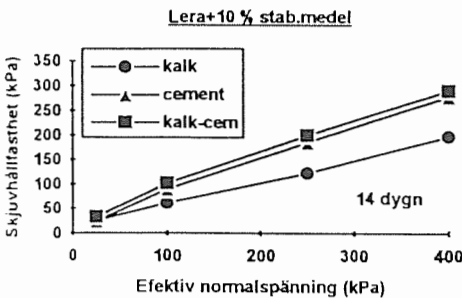
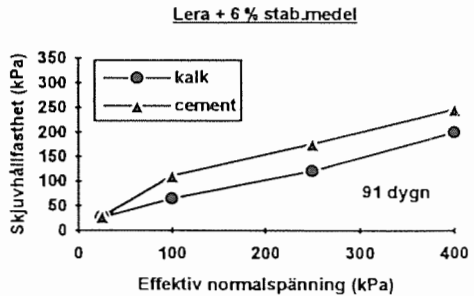
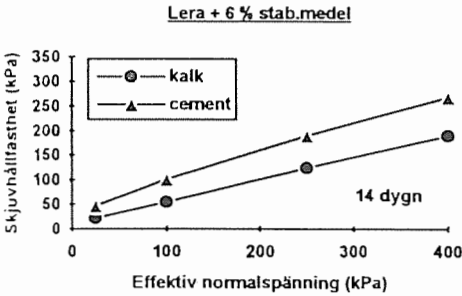
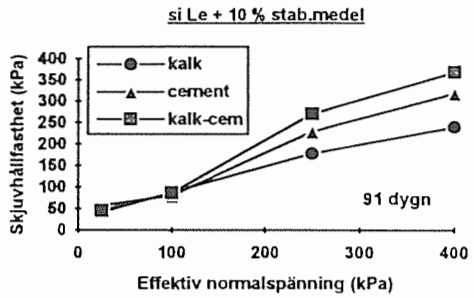
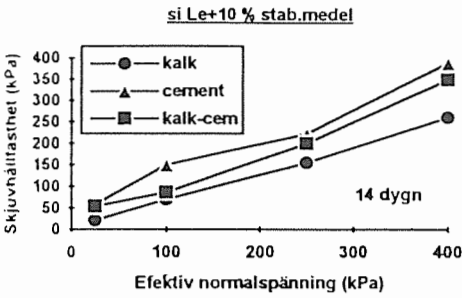
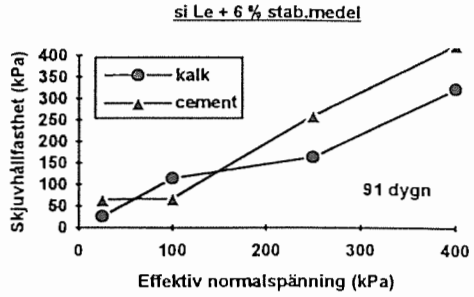
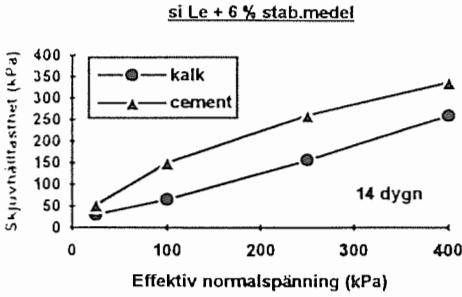




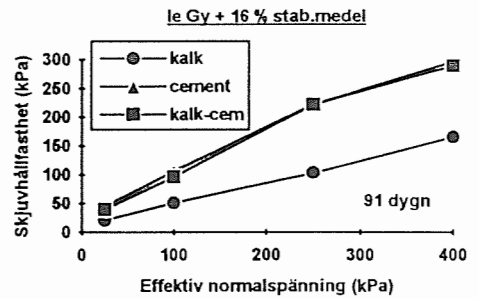
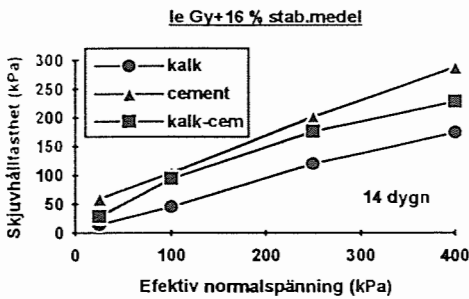
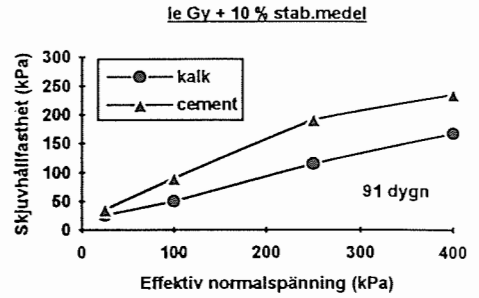
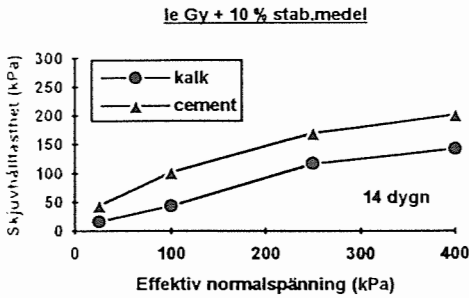
Odränerade direkta skjuvförsök



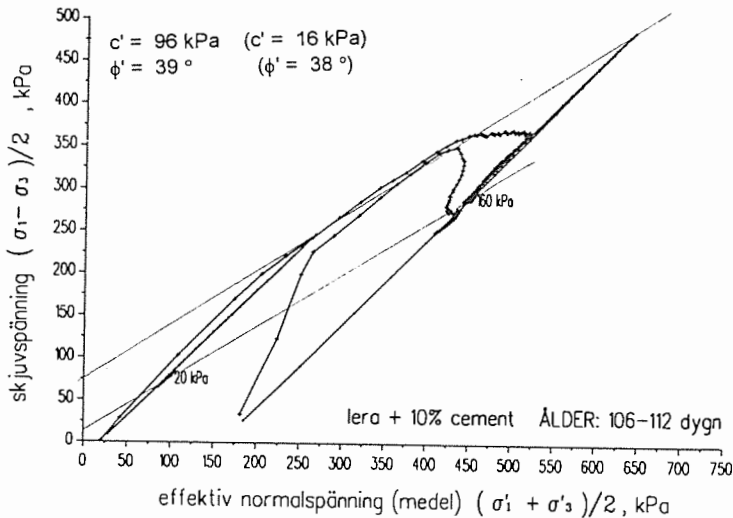
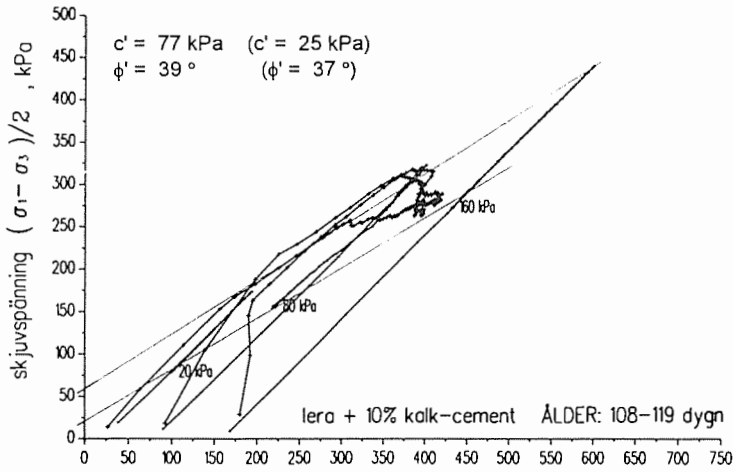
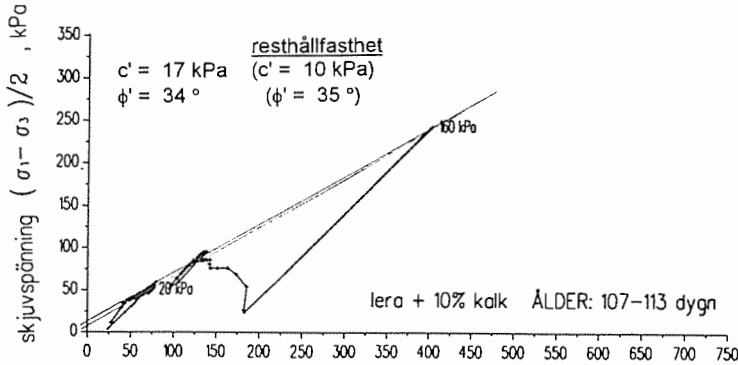
Dränerade direkta skjuvförsök



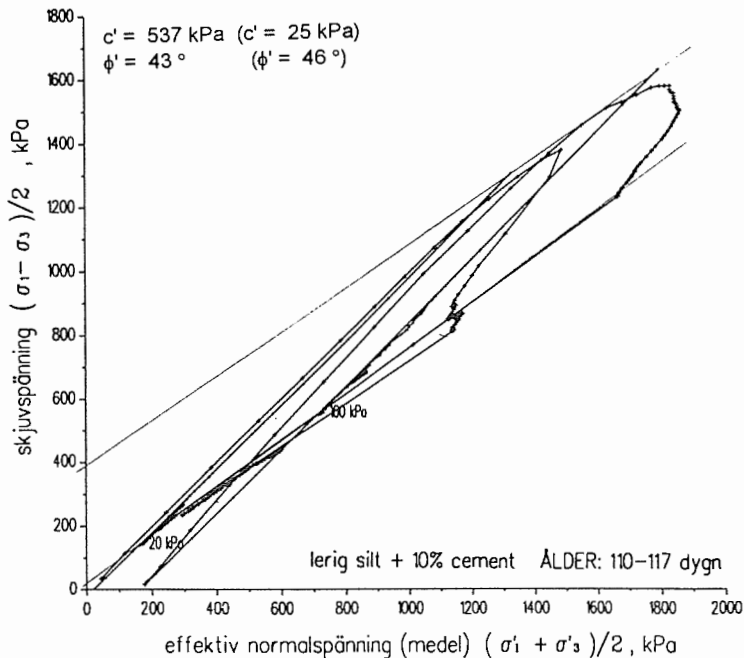
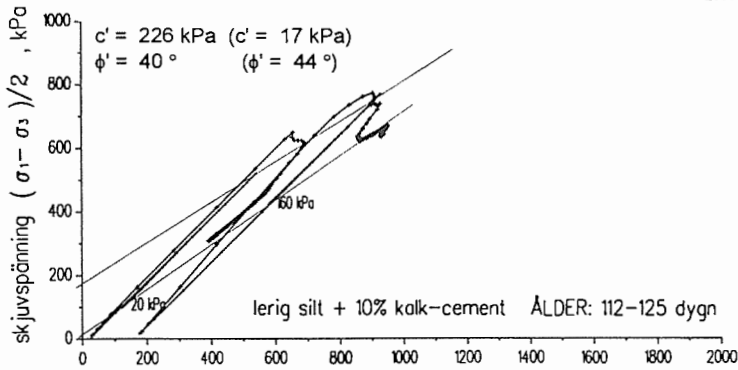
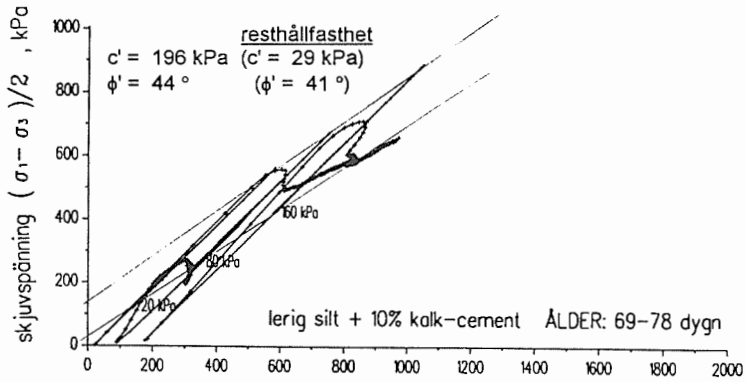
Dränerade direkta skjuvförsök



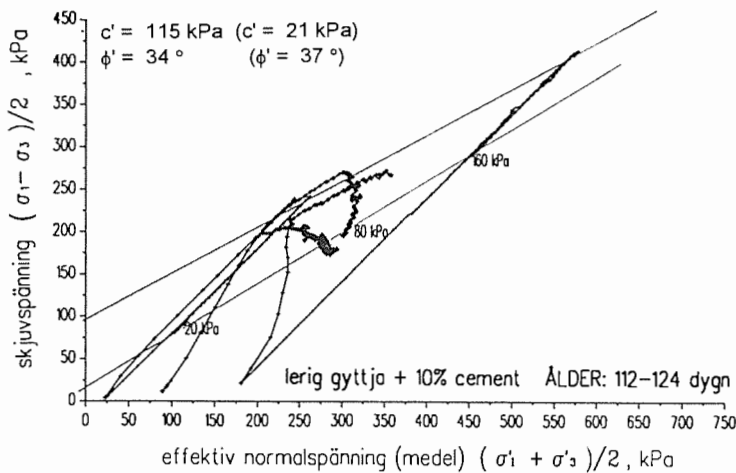
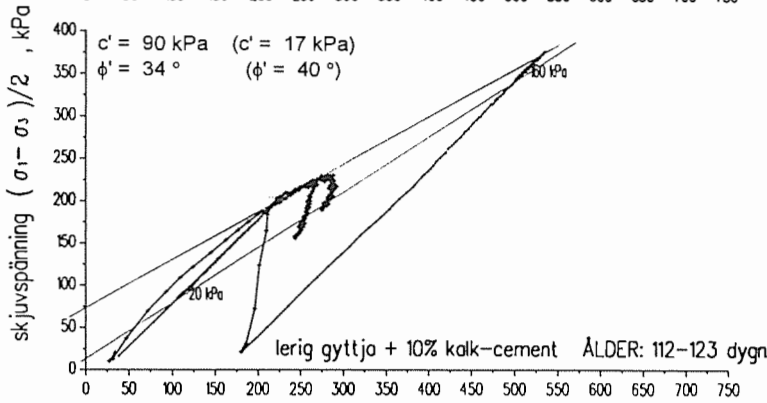
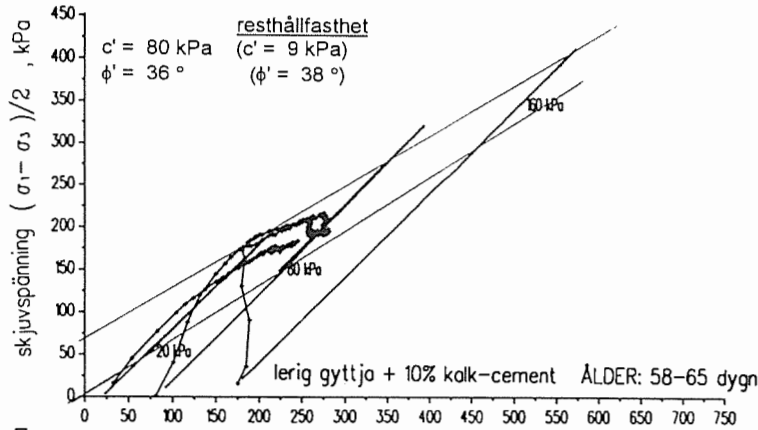
Spänningsvägar vid dränerade och odränerade triaxialförsök



Spänningsvägar vid dränerade och odränerade triaxialförsök



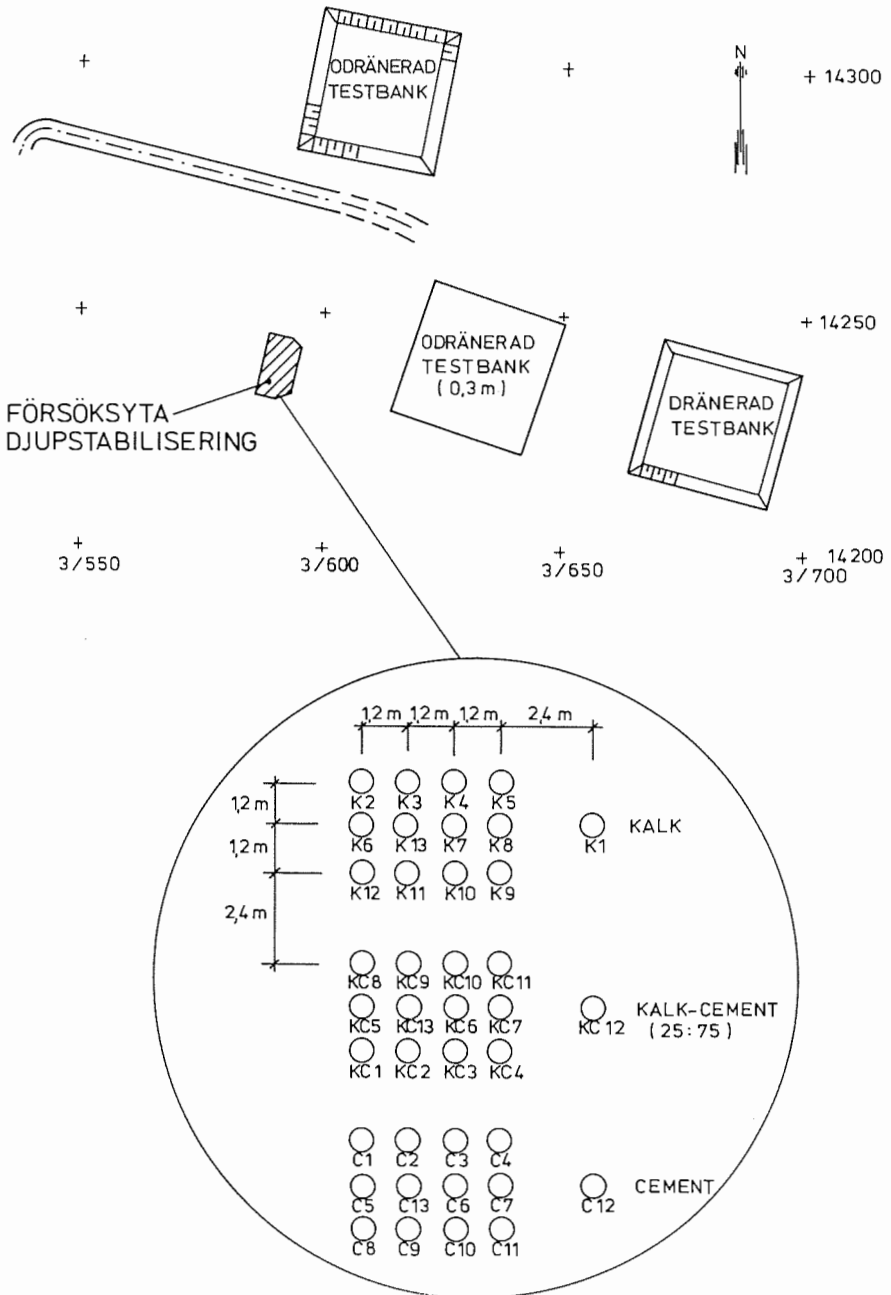
Spänningsvägar vid dränerade och odränerade triaxialförsök



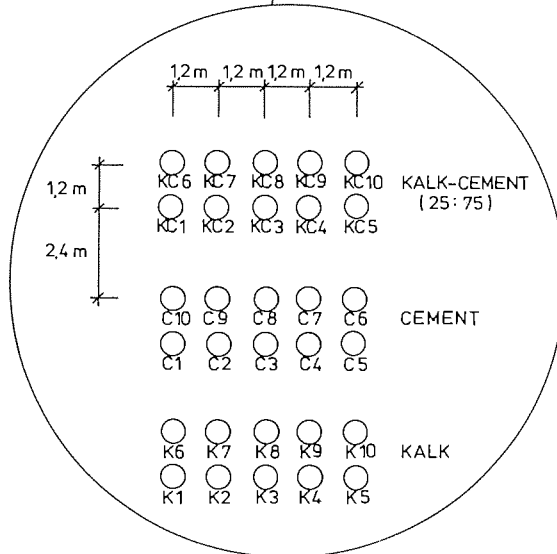
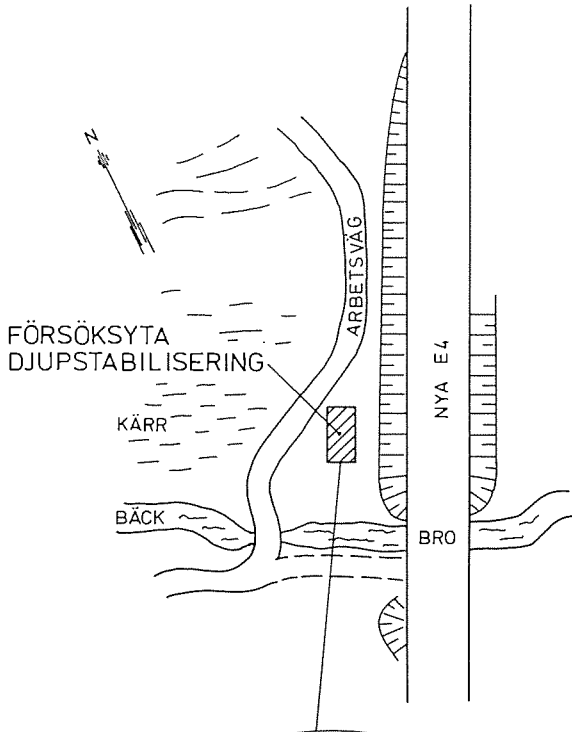
Bilagor

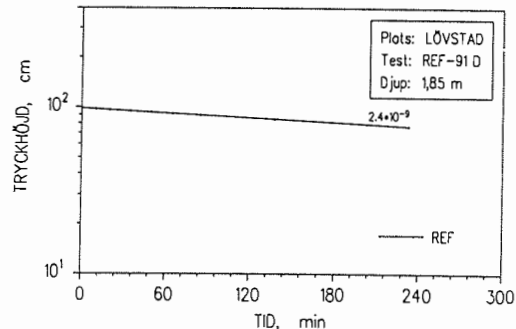
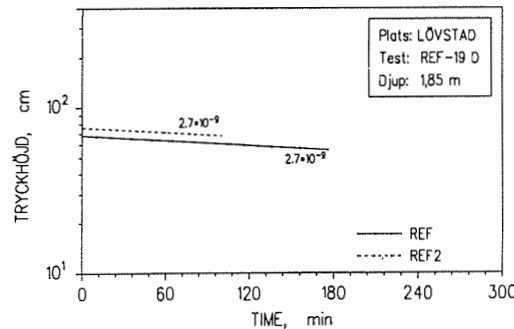
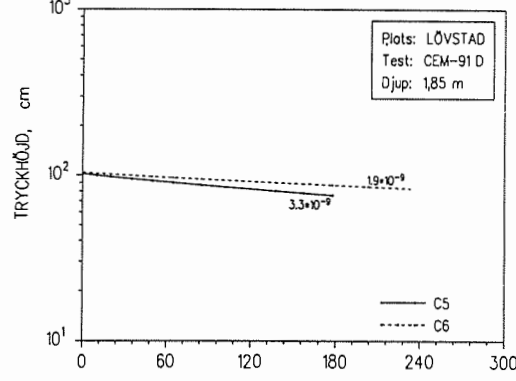
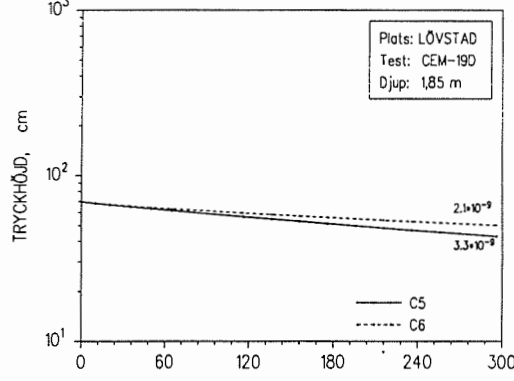
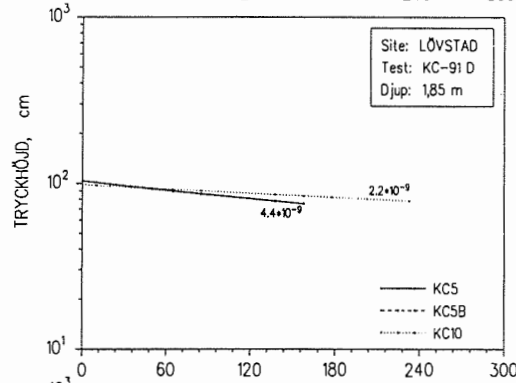
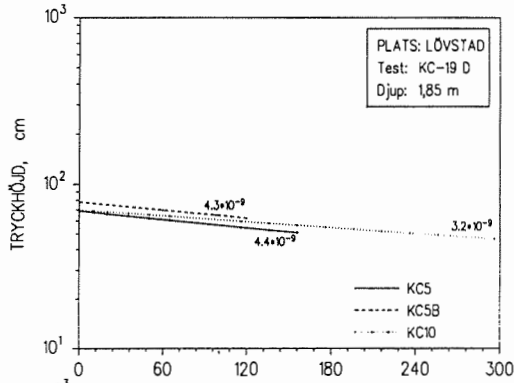
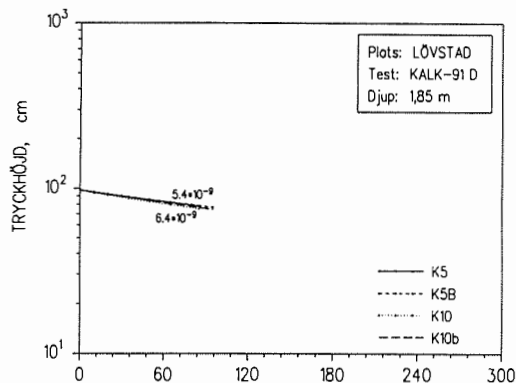
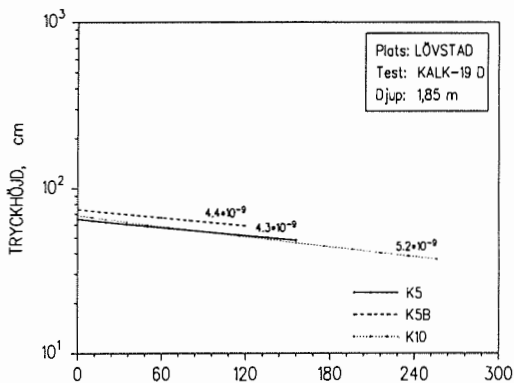
Kapitel 7

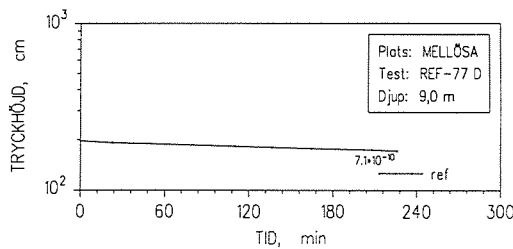
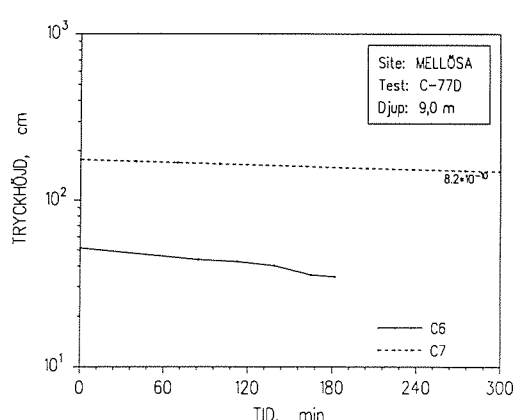
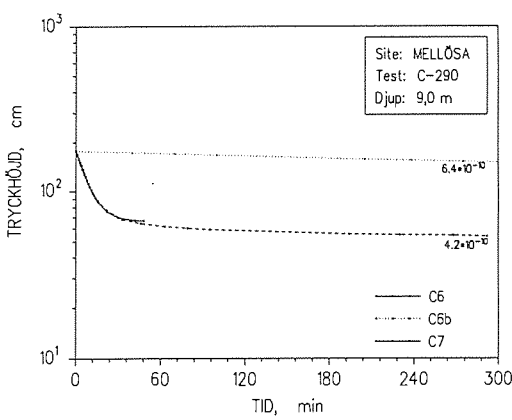
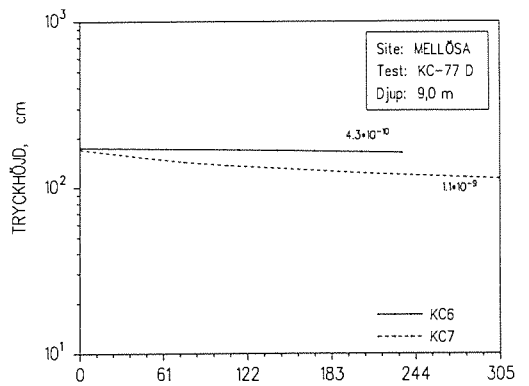
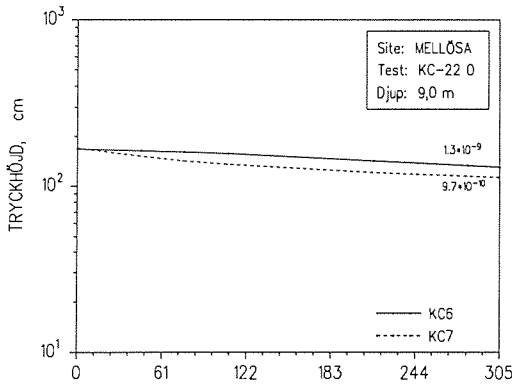
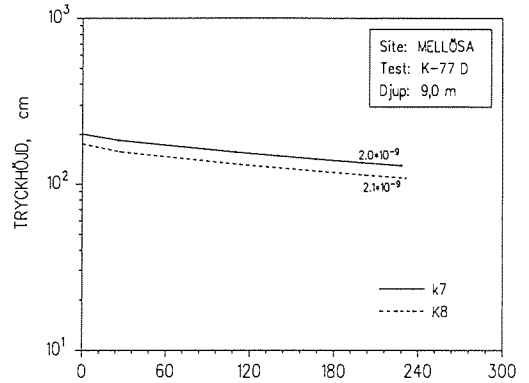
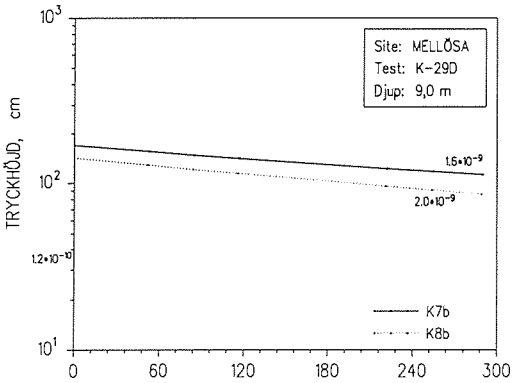
PROVPLATS LILLA MELLÖSA



PROVPLATS LÖVSTAD







TEMPERATURFÖRLOPP VID MARKSTABILISERING MED CEMENT- OCH KALKINBLANDNING

Göran Hellström

Juni 1992

1 INTRODUKTION

2 VÄRMEUTVECKLING

2.1 Cement

Jan-Erik Jonasson, LuTH. Ordinary Portland Cement K25, Standard cement SH.

Vid tiden t har värmemängden W avgivits från cementblandningen. Effektutvecklingen beror av halt och temperatur enligt:

$$W = \alpha \cdot C \cdot W_c \quad (1)$$

$$\alpha = \exp\{-\lambda_1[\ln(1 + t_e/t_1)]^{-\kappa_1}\} \quad (2)$$

$$t_e = \int_0^t \beta_T \, dt \quad (3)$$

$$\beta_T = \exp\left[\theta\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T + 273}\right)\right] \quad (4)$$

$$\theta = \theta_{ref} \left(\frac{30}{T + 10}\right)^{\kappa_3} \quad (5)$$

$$Q = \frac{dW}{dt} = W_c \cdot c \cdot \frac{d\alpha}{dt} \quad (6)$$

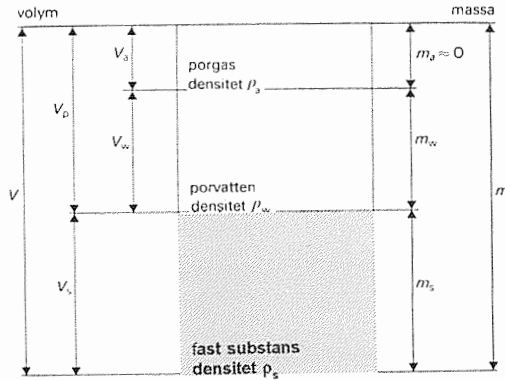
Ref: Betonghandboken - Material, under bearbetning.

	SH	K25
W_c	380 kJ/kg	325 kJ/kg
λ_1	0.61	0.5
t_1	9.80 h	14.6 h
κ_1	1.28	1.22
κ_3	0.54	0.48
θ_{ref}	4790 K	5660 K

3 TERMISKA EGENSKAPER

Jan Sundberg, Terratema AB.

3.1 Nomenklatur



	Volym (m ³)	Massa (kg)	Densitet (kg/m ³)
Mark	V	m	ρ
• därav fast material	V_s	m_s	ρ_s
• därav porer	V_p	m_p	ρ_p
- därav porvatten	V_w	m_w	ρ_w
- därav porgas	V_a	m_a	ρ_a

$$V = V_s + V_p \quad (7)$$

$$V_p = V_w + V_a \quad (8)$$

$$m = m_s + m_p \quad (9)$$

$$m_p = m_w + m_a \approx m_w \quad (10)$$

Kompaktdensitet	$\rho_s = m_s/V_s$	(kg/m ³)
Skrymdensitet	$\rho = m/V = \rho_d(1 + w)$	(kg/m ³)
Torrdensitet	$\rho_d = m_s/V = \rho/(1 + w)$	(kg/m ³)
Vattenkvot	$w = m_w/m_s = w_h/(1 - w_h)$	(-)
Vattenhalt	$w_h = m_w/m$	(-)
Porositet	$n = V_p/V = 1 - \rho_d/\rho_s$	(-)

	Kompaktdensitet ρ_s (J/m ³ K)	Spec. värmekapacitet (c) (kJ/kgK)
Lera	2700	0.72
Vatten	1000	4.18
Cement	2400	0.90
Kalk	2600	0.84

Index: lera (l), vatten (w), cement (k), kalk (k),

3.2 Ostörd lera

Leran antas vara vattenmättad $V_p = V_w$.

Indata skrymdensitet ρ^l och vattenkvot w .

Torrtdensitet för lera:

$$\rho_d^l = \rho^l / (1 + w) \quad (11)$$

Porositet för ostörd lera:

$$n = 1 - \rho_d^l / \rho_s^l \quad (12)$$

Volymsandel vatten $x_w = n$. Volymsandel fast material $x_l = 1 - n$.

$$x_l + x_w = 1 \quad (13)$$

3.3 Lera blandad med cement och kalk

Blandning av lera med cement och kalk antas vara vattenmättad $V_p = V_w$. Porositeten hos tillsatt cement och kalk antas vara försumbart, så att massandelen vatten förhåller sig till massandelen lera på samma sätt som i ostörd lera:

$$w = \frac{m_w}{m_l} \quad (14)$$

Blandningen specificeras av kg cement per kg torr lera i_c , och kg kalk per kg torr lera i_k :

$$i_c = \frac{m_c}{m_l} \quad i_k = \frac{m_k}{m_l} \quad (15)$$

För kompakt fast material gäller då:

$$m_s = m^l + m^c + m^k \quad (16)$$

För vattenmättad blandning gäller:

$$m = m^l + m^w + m^c + m^k \quad (17)$$

Total volym blir då:

$$V = V^l + V^w + V^c + V^k = \frac{m^l}{\rho_s^l} + \frac{m^w}{\rho_s^w} + \frac{m^c}{\rho_s^c} + \frac{m^k}{\rho_s^k} \quad (18)$$

För volymerna av cement, kalk och vatten

$$V^c = \frac{i_c m^l}{\rho_s^c} \quad V^k = \frac{i_k m^l}{\rho_s^k} \quad V^w = \frac{w m^l}{\rho_s^w} \quad (19)$$

vilket medför:

$$V = \frac{m^l}{\rho_s^l} + \frac{w m^l}{\rho_s^w} + \frac{i_c m^l}{\rho_s^c} + \frac{i_k m^l}{\rho_s^k} \quad (20)$$

Volymsandelarna för lera med kalk och cement blir då

$$x_l^* = V^l / V = \frac{1 / \rho_s^l}{1 / \rho_s^l + w / \rho_s^w + i_c / \rho_s^c + i_k / \rho_s^k} \quad (21)$$

$$x_w^* = V^w / V = \frac{w / \rho_s^w}{1 / \rho_s^l + w / \rho_s^w + i_c / \rho_s^c + i_k / \rho_s^k} \quad (22)$$

$$x_c^* = V^c / V = \frac{i_c / \rho_s^c}{1 / \rho_s^l + w / \rho_s^w + i_c / \rho_s^c + i_k / \rho_s^k} \quad (23)$$

$$x_k^* = V^k / V = \frac{i_k / \rho_s^k}{1 / \rho_s^l + w / \rho_s^w + i_c / \rho_s^c + i_k / \rho_s^k} \quad (24)$$

$$x_l^* + x_w^* + x_c^* + x_k^* = 1 \quad (25)$$

3.4 Värmeledningsförmåga

Ändringen i värmeledningsförmåga består huvudsakligen på ändring i porositet.

För ostörd lera sätts porositeten till

$$n = x_w \quad (26)$$

För lera blandat med cement och kalk antar vi i stället:

$$n = x_w^* \quad (27)$$

Värmeledningsförmågan ges av:

$$\lambda = \lambda_w^n \cdot \lambda_s^{(1-n)} \quad (28)$$

där

Värmeledningsförmåga i vatten λ_w	0.6 W/mK
Värmeledningsförmåga i fast material λ_s	3.08 W/mK

3.5 Värmekapacitivet

För ostörd lera:

$$(\rho c)_m = x_l \rho_s^l c_l + x_w \rho_s^w c_w \quad (29)$$

För lera blandat med cement och kalk:

$$(\rho c)_m = x_l^* \rho_s^l c_l + x_w^* \rho_s^w c_w + x_c^* \rho_s^c c_c + x_k^* \rho_s^k c_k \quad (30)$$

4 INDATA

4.1 Via skärmbild

1. kg cement per kg torr substans lera, kg kalk per kg torr substans lera
2. Radie för zon med inblandning, radie för omgivande lervolym
3. Ostörd leras skrymdensitet
4. Ostörd leras vattenkvot
5. Simuleringstid (dygn)
6. Utskriftsintervall (dygn)
7. Antal kurvor i diagram
 - (a) Utskriftstid för kurva (dygn) (upprepas för varje kurva)
 - (b) Text för kurva (upprepas för varje kurva)
8. Överskrift på diagram
9. Text på x-axeln
10. Text på y-axeln
11. Fil med cement data

12. Fil med övriga data

13. Typ av utdata fil:

(a) Graph-in-the-Box Analytic

(b) ASCII fil med i rader med parvis radie och temp värde (r_i , temp(r_i, t_1), r_i , temp(r_i, t_2), ...).

(c) ASCII fil med i rader med radie och temp värde (r_i , temp(r_i, t_1), temp(r_i, t_2), ...).

4.2 Via fil med materialegenskaper

Programmet startas med default värden på material data:

1. Kompaktdensitet (kg/m^3): cement, kalk, vatten, lera
2. Specifik värmekapacitivet (J/kgK): cement, kalk, vatten, lera
3. Värmeledningsförmåga (W/mK): vatten, lera (kompakt)
4. Total värmeutveckling för kalk (J/kg)

Referensfilen c1.dat har följande utseende:

```
2400.0 2600.0 1000.0 2700.0
900.0 840.0 4180.0 720.0
0.6 3.08
1180.0E3
```

4.3 Via fil med egenskaper hos cement

Innehåller värden på parametrarna W_c , λ_1 , t_1 , κ_1 , κ_3 och θ_{ref} .

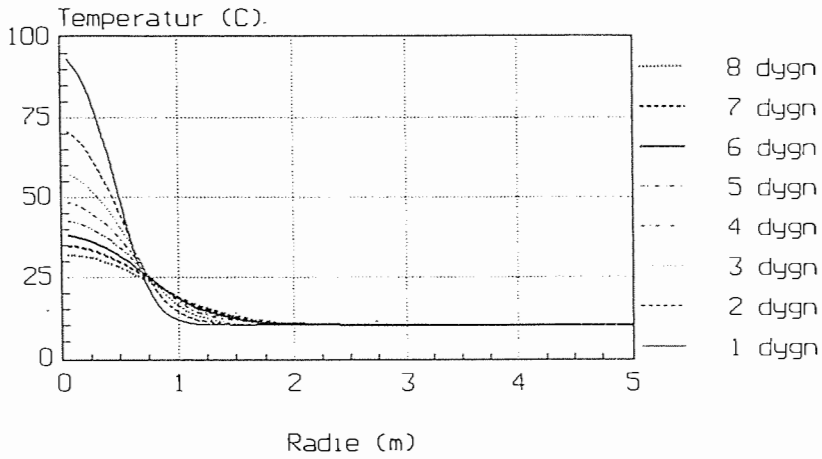
Standardcement finns på filen sh.cem:

```
380000.0 9.8 0.61 1.28 0.54 4790.0
```

K25 cement finns på filen k25.cem:

```
325000.0 14.6 0.5 1.22 0.48 5660.0
```

MARKSTABILISERING
 Andel: Kalk=0.100 Cement=0.100
 Radie: Drill=0.500 Lera= 5.000



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Serien "Rapport" ersätter våra tidigare serier: "Proceedings" (27 nr), "Särtryck och Preliminära rapporter" (60 nr) samt "Meddelanden" (10 nr).

The series "Report" supersedes the previous series: "Proceedings" (27 Nos), "Reprints and Preliminary Reports" (60 Nos) and "Meddelanden" (10 Nos).

RAPPORT/REPORT

No		År/Year
1.	Grundvattensänkning till följd av tunnelsprängning P. Ahlberg & T. Lundgren	1977
2.	Påhängskrafter på långa betongpålar L. Bjerin	1977
3.	Methods for reducing undrained shear strength of soft clay K.V. Helenelund	1977
4.	Basic behaviour of Scandinavian soft clays R. Larsson	1977
5.	Snabba ödometerförsök R. Karlsson & L. Viberg	1978
6.	Skredriskbedömningar med hjälp av elektromagnetisk fältstyrkemätning - provning av ny metod. J. Inganäs	1978
7.	Förebyggande av sättningar i ledningsgravar -en förstudie U. Bergdahl, R. Fogelström, K.-G. Larsson & P. Liljekvist	1979
8.	Grundläggingskostnadernas fördelning B. Carlsson	1979
9.	Horisontalarmerade fyllningar på lös jord J. Belfrage	1981

RAPPORT/REPORT

No

År/Year

10.	Tuveskredet 1977-11-30. Inlägg om skredets orsaker	1981
11a.	Tuveskredet - geoteknik	1984
11b.	Tuveskredet - geologi	1981
11c.	Tuveskredet - hydrogeologi	1981
12.	Drained behaviour of Swedish clays R. Larsson	1981
13.	Long term consolidation beneath the test fillsat Väsby, Sweden Y.C.E Chang	1981
14.	Bentonittätning mot lakvatten T. Lundgren, L. Karlqvist & U. Qvarfort	1982
15.	Kartering och klassificering av lerområdets stabilitetsförutsättningar L. Viberg	1982
16.	Geotekniska fältundersökningar Metoder - Erfarenheter - FoU-behov. E. Ottosson (red.)	1982
17.	Symposium on Slopes on Soft Clays	1983
18.	The Landslide at Tuve November 30 1977 R. Larsson & M. Jansson	1982
19.	Släntstabilitetsberäkningar i lera Skall man använda totalspänningsanalys, effektivspänningsanalys eller kombinerad analys? R. Larsson	1983

RAPPORT/REPORT

No

År/Year

-
- | | | |
|------|--|------|
| 20. | Portrycksvariationer i leror i Göteborgsregionen
J. Berntson | 1983 |
| 21. | Tekniska egenskaper hos restprodukter från kolförbränning - en laboratoriestudie
B. Möller, G. Nilson | 1983 |
| 22. | Bestämning av jordegenskaper med sondering - en litteraturstudie
U. Bergdahl & U. Eriksson | 1983 |
| 23. | Geobildtolkning av grova moräner
L. Viberg | 1984 |
| 24. | Radon i jord
- Exhalation - vattenkvot
- Årstidsvariationer
- Permeabilitet
A. Lindmark & B. Rosén | 1984 |
| 25. | Geoteknisk terrängklassificering för fysisk planering
L. Viberg | 1984 |
| 26. | Large diameter bored piles in non-cohesive soils
Determination of the bearing capacity and settlement from results of static penetration tests (CPT) and standard penetration test (SPT).
K. Gwizdala | 1984 |
| 27. | Bestämning av organisk halt, karbonathalt och sulfidhalt i jord
R. Larsson, G. Nilson & J. Rogbeck | 1985 |
| 27E. | Determination of organic content, carbonate content and sulphur content in soil
R. Larsson, G. Nilson & J. Rogbeck | 1987 |

RAPPORT/REPORT

No

År/Year

-
-
- | | | |
|------|---|------|
| 28. | Deponering av avfall från kol- och torveldning | 1986 |
| | T. Lundgren & P. Elander | |
| 28E. | Environmental control in disposal and utilization of combustion residues | 1987 |
| | T. Lundgren & P. Elander | |
| 29. | Consolidation of soft soils | 1986 |
| | R. Larsson | |
| 30. | Kalkpelare med gips som tillsatsmedel | 1987 |
| | G. Holm, R. Tränk & A. Ekström | |
| | Användning av kalk-flygaska vid djupstabilisering av jord | |
| | G. Holm & H. Åhnberg | |
| | Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk- och cementstabiliserad jord | |
| | H. Åhnberg & G. Holm | |
| 31. | Kalkpelarmetoden | 1986 |
| | Resultat av 10 års forskning och praktisk användning samt framtida utveckling. | |
| | H. Åhnberg & G. Holm | |
| 32. | Two Stage-Constructed Embankments on Organic Soils | 1988 |
| | <input type="checkbox"/> Field and laboratory investigations | |
| | <input type="checkbox"/> Instrumentation | |
| | <input type="checkbox"/> Prediction and observation of behaviour | |
| | W. Wolski, R. Larsson et al. | |
| 33. | Dynamic and Static Behaviour of Driven Piles | 1987 |
| | (Doctoral thesis) | |
| | Nguyen Truong Tien | |
| 34. | Kalksten som fyllningsmaterial | 1988 |
| | J. Hartlén & B. Åkesson | |

RAPPORT/REPORT

No		År/Year
35.	Thermal Properties of Soils and Rocks (Doctoral thesis) J. Sundberg	1988
36.	Full-Scale Failure Test on a Stage-Constructed Test Fill on Organic Soil W. Wolski, R. Larsson et al.	1989
37.	Pore Pressure Measurement - Reliability of Different Systems M. Tremblay	1989
38.	Behaviour of Organic Clay and Gyttja R. Larsson	1990
39.	Gruvavfall i Dalälvens avrinningsområde - Metallutsläpp och åtgärdsalternativ RAPPORT TILL DALÄLVSDELEGATIONEN T. Lundgren & J. Hartlén	1990
40.	Shear Moduli in Scandinavian Clays - Measurement of initial shear modulus with seismic cones - Empirical correlations for the initial shear modulus in clay R. Larsson & M. Mulabdic'	1991
41.	Övervakningssystem - Släntbeteende - Skredinitiering Resultat från ett fullskaleförsök i Norrköping B. Möller & H. Åhnberg	1992
42.	Piezococone Tests in Clay R. Larsson & M. Mulabdic'	1991
43.	Footings with Settlement-Reducing Piles in Non-Cohesive Soil Phung Duc Long	1993

RAPPORT/REPORT

No

År/Year

44.	Agnesbergsskredet R. Larsson, E. Ottosson & G. Sällfors	1994
45.	Agnesbergsskredet - Skredförebyggande åtgärder H. Sandebring & E. Ottosson	1994
46.	In progress	1995
47.	In progress	1995

The Swedish Geotechnical Institute is a government agency dealing with geotechnical research, information and consultancy.

The purpose of the Institute is to achieve better techniques, safety and economy by the correct application of geotechnical knowledge in the building process.

Research

Development of techniques for soil improvement and foundation engineering. Environmental and energy geotechnics. Design and development of field and laboratory equipment.

Information

Research reports, brochures, courses. Running the Swedish central geotechnical library with more than 85.000 documents. Computerized retrieval system.

Consultancy

Design, advice and recommendations, including site investigations, field and laboratory measurements. Technical expert in the event of disputes.

Statens geotekniska institut Swedish Geotechnical Institute

S-581 93 Linköping, Sweden

Tel 013-20 18 00, Int + 46 13 201800

Fax 013-20 19 14, Int + 46 13 201914