



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

RAPPORT
REPORT

No 30

Kalkpelare med gips som tillsatsmedel

GÖRAN HOLM, ROLAND TRÄNK, ALLAN EKSTRÖM

**Användning av kalk-flygaska vid
djupstabilisering av jord**

GÖRAN HOLM, HELEN ÅHNBERG

**Om inverkan av härdningstemperaturen
på skjuvhållfastheten hos kalk- och
cementstabiliserad jord**

HELEN ÅHNBERG, GÖRAN HOLM

LINKÖPING 1987



STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

RAPPORT
REPORT **No 30**

Kalkpelare med gips som tillsatsmedel

GÖRAN HOLM, ROLAND TRÄNK, ALLAN EKSTRÖM

**Användning av kalk-flygaska vid
djupstabilisering av jord**

GÖRAN HOLM, HELEN ÅHNBERG

**Om inverkan av härdningstemperaturen
på skjuvhållfastheten hos kalk- och
cementstabiliserad jord**

HELEN ÅHNBERG, GÖRAN HOLM

LINKÖPING 1987

I N N E H Ä L L

	Sid
KALKPELARE MED GIPS SOM TILLSATSMEDEL GÖRAN HOLM, ROLAND TRÄNK, ALLAN EKSTRÖM	5
ANVÄNDNING AV KALK-FLYGASKA VID DJUPSTABILISERING AV JORD GÖRAN HOLM, HELEN ÅHNBERG	59
OM INVERKAN AV HÄRDNINGSTEMPERATUREN PÅ SKJUVHÅLLFASTHETEN HOS KALK- OCH CEMENTSTABILISERAD JORD HELEN ÅHNBERG, GÖRAN HOLM	93

ISSN 0348-0755

FÖRORD

Djupstabilisering av lös lera enligt kalkpelarmetoden har använts sedan mitten av 1970-talet i många jordförstärkningsarbeten, exempelvis för vägbankar och ledningsschakter.

Alltsedan den första tillämpningen 1975 har vid Statens geotekniska institut bedrivits forsknings- och utvecklingsverksamhet parallellt med praktiska tillämpningar av kalkpelarmetoden. Forsknings- och utvecklingsverksamheten har omfattat många delområden, såsom effekten av olika stabiliseringsmedel i olika jordarter, funktionsstudier-beräkningsmetoder för kalkpelarförstärkningar samt kontroll- och uppföljningsmetoder.

I föreliggande rapport redovisas tre projekt. Två av dessa har gällt möjligheten att genom tillsatsmedel till kalken dels förbättra stabiliseringseffekten i lös lera, dels stabilisera jordar som ej går att stabilisera med enbart kalk. De två använda tillsatsmedlen är gips respektive flygaska. I det tredje projektet har härdningstemperaturens inverkan på stabiliseringseffekten studerats.

Projektet "Kalkpelare med gips som tillsatsmedel" har huvudsakligen finansierats genom anslag (801067-3) från Statens råd för byggnadsforskning. Bidrag har även erhållits av BPA Byggproduktion AB, Vägverket, Täby kommun och Statens geotekniska institut.

Projektet "Användning av kalk-flygaska vid djupstabilisering av jord" har finansierats av Vattenfalls Kol-Hälsa-Miljö-projekt, Vägverket, Statens geotekniska institut, Alimak Svenska Försäljnings AB och AB Cementa.

Projektet "Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk- och cementstabiliserad jord" har finansierats av Statens geotekniska institut.

Ett stort antal personer och företag har med engagemang medverkat i projekten. Till alla medverkande framför författarna sitt varma tack. Ett särskilt tack riktas till laboratorieassistent Lena Fredén som genomfört huvuddelen av de omfattande laboratorieundersökningarna.

Linköping i januari 1987

Göran Holm

Helen Åhnberg

Roland Tränk

Allan Ekström

Kalkpelare med gips som tillsatsmedel

GÖRAN HOLM, ROLAND TRÄNK, ALLAN EKSTRÖM

FÖRORD

I föreliggande rapport redovisas ett forskningsprojekt där effekten av gips, dvs kalciumsulfat, som tillsatsmedel till den osläckta kalken har studerats såväl i laboratorium som i fält. Projektet har finansierats huvudsakligen genom anslag från Statens råd för byggnadsforskning. Bidrag har även erhållits från BPA Byggproduktion AB, Vägverket, Täby kommun och Statens geotekniska institut.

Linköping mars 1985

Göran Holm

Roland Tränk

Allan Ekström

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid
SAMMANFATTNING	11
SUMMARY	14
1. BAKGRUND	17
2. PROJEKTETS SYFTE OCH GENOMFÖRANDE	19
3. UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR OCH RESULTAT	24
3.1 Allmänt	24
3.2 Laboratorieundersökningar	25
3.2.1 Ursprunglig jord	25
3.2.2 Stabiliserad jord - Vagnhärad	27
3.2.3 Stabiliserad jord - Stäket och Täby	31
3.2.4 Stabiliseringsmedel - blandningsförhållande kalk/gips	32
3.3 Fältundersökningar	34
3.3.1 Vagnhärad	34
3.3.2 Stäket och Täby	38
4. JÄMFÖRELSE AV LABORATORIE- OCH MÄTRESULTAT	38
5. ERFARENHETER FRÅN TVÅ ANDRA PROJEKT	42
5.1 Huddinge Centrum och Fittja	42
5.1.1 Ursprunglig jord	42
5.1.2 Stabiliserad jord - laboratorieförsök och fältförsök	42
6. SLUTSATSER, KOMMENTARER OCH REKOMMENDATIONER	46
REFERENSER	48
BILAGOR	49
Sammanställning av laboratorieundersökningar	
Rutinanalys av naturlig jord	Tabell 1- 4
"Rutinanalys" av stabiliserad jord	" 5-10

SAMMANFATTNING

I början av 1970-talet utvecklades den s k kalkpelarmetoden för djupstabilisering av lös lera. Under senare år har påbörjats studier av möjligheterna att genom tillsatsmedel till den osläckta kalken förbättra egenskaperna hos kalkpelare och utvidga användningsområdet för kalkpelarmetoden genom att möjliggöra stabilisering av organiska leror och organiska jordar.

I föreliggande utredning har effekten av gips som tillsatsmedel till kalken studerats vid stabilisering av mellansvensk lös lera. Studien har genomförts för att klarlägga om bättre stabiliseringseffekt och kortare härdningstider erhålls genom gipstillsets. Möjligheten att använda dagens kalkpelarmaskiner har också undersökts. Undersökningarna har omfattat såväl laboratorieförsök som fältförsök under en treårsperiod. På försöksplats Vagnhärad har utförts stabilisering med olika blandningsförhållanden kalk/gips, nämligen 75/25, 67/33 och 50/50 i laboratoriet samt 75/25 och 50/50 i fält. Dessutom har parallellförsök utförts med enbart kalk. För de två andra försöksplatserna, Stäket och Täby, har endast kalkgipsinblandning med blandningsförhållandet 50/50 utförts. Jorden på de tre försöksplatserna utgörs huvusakligen av lös varvig lera med siltskikt och med en naturlig vattenkvot på ca 85, 55 och 60% vid Vagnhärad, Stäket respektive Täby. Dessutom har resultaten från provningar med kalkgipsinblandning i samband med kalkpelarförsök i Huddinge Centrum och Fittja studerats.

Laboratorieförsöken visar att gips som tillsatsmedel till kalk påskyndar de kemiska reaktionerna och att en snabbare hållfasthetstillväxt sker under ungefär de tre första månaderna efter inblandning jämfört med ren kalkinblandning. Ju större gipsandelen, dock max 50%, är av stabiliseringsmedlet desto snabbare hållfasthetstillväxt erhålls under denna period. Därefter går hållfasthetsökningen långsammare ju större gipsandelen är. Laboratorieförsöken visar också att kalk-gipsstabiliserad lera är ett sprödare material än kalkstabiliserad lera.

Fältförsöken visar emellertid ungefär samma skjuvhållfasthet i kalkpelare som i kalk-gipspelare de första månaderna efter inblandning. Skjuvhållfastheten uppgår i samtliga provade pelare till minst 125 kPa (olika blandningsförhållande kalk/gips och enbart kalk) redan tre veckor efter inblandning och till 150-300 kPa efter tre månader. Dessa höga och ungefär samma skjuvhållfastheter som erhållits i kalkpelare och kalk-gipspelare bedöms bero på att den totala effekten av temperatur i pelare, stabiliseringsmedel och spänningsförhållanden blivit ungefär densamma i kalkpelare och kalk-gipspelare. De i kalkpelare och kalk-gipspelare uppmätta skjuvhållfastheterna är högre än i motsvarande laboratorieblandade prover fram till ca 1 år efter inblandningen. Skillnaden är störst i början och avtar med tiden. Denna skillnad mellan fält- och laboratorieförsök bedöms bero på faktorerna temperatur, blandningsteknik och spänningsförhållanden.

De höga skjuvhållfastheterna i kalk-gipsstabiliserad lera beror på att mineralet ettringit bildas. Detta kräver ett högt pH-värde för att vara beständig. En hög kalkandel är därför lämplig för permanenta förstärkningar. En låg gipsandel är lämplig också för att minska risken för sulfatangrepp på eventuellt närliggande betongkonstruktioner.

Utredningen visar att användningsområdet för kalkpelarmetoden kan utvidgas genom att gips som tillsatsmedel till kalk medför att god stabiliseringseffekt erhålls i organisk lera med en vattenkvot av 100-140% till skillnad från stabilisering med enbart kalk.

Utredningen visar att tänkbara användningsområden för gips som tillsatsmedel är

- temporära förstärkningar i organisk lera med en naturlig vattenkvot på 100-140%.
- temporära förstärkningar där snabb hållfasthetstillväxt önskas och risken för sulfatangrepp (från gipsen) på närliggande betongkonstruktionen kan accepteras eller elimineras/motverkas.

Utredningen visar att för att kalk-gipspelare skall bli praktiskt användbara behövs en vidareutveckling av den fältmässiga blandningstekniken för kalk-gips och av kalkpelarmaskinens blandningsverktyg. Utredningen visar också att fortsatt forskning behövs rörande kalk-gipspelares beständighet.

SUMMARY

At the beginning of 1970 the lime column method for deep stabilization of soft clay was developed. During recent years studies have been started on the possibilities to improve the qualities of lime columns and make stabilization of organic clays and soils possible through additives to the quick lime.

The effect of gypsum as an additive to the lime for stabilizing of soft clay from the middle part of Sweden has been studied in this investigation. The study has been carried out to clarify if better stabilizing effects and shorter time of curing are obtained. The possibility of using the present lime column machines has also been investigated. The investigations have included laboratory tests as well as field tests during three years. At the test site Vagnhärads, stabilizing with different mixing proportions have been carried out, i.e. 75/25, 67/33 and 50/50 in the laboratory tests and 75/25 and 50/50 in the field tests. Furthermore, parallel tests with lime solely have been carried out. At the two other test sites, Stäket and Täby, only mixing with limegypsum with the mixing proportions 50/50 was carried out. The soil at the three test sites consists mainly of soft varved clay with silt layers and a neutral water content of approx. 85, 55 and 60% at Vagnhärads, Stäket and Täby respectively. The results from tests with mixing of lime-gypsum for stabilizing of lime columns in Huddinge and Fittja have also been studied.

The laboratory tests show that gypsum as additive to the quick lime speeds up the chemical reactions and that a faster strength increase occurs during the first three months after mixing compared to pure lime mixture. The greater the share of gypsum of the stabilizing agent, however, max. 50%, the faster the strength increase received during this period. The strength increase is slower when the share of gypsum increases. The laboratory tests also show that lime-gypsum stabilized clay is a more brittle material than clay stabilized with only lime.

The field tests show, however, about the same shear strength in lime columns as in lime-gypsum columns the first months after mixing. The shear strength in all the test columns is at least 125 kPa three

weeks after mixing and 150-300 kPa after three months. The explanation of these high strengths and that about the same shear strengths have been received in lime columns and in lime-gypsum columns is that the total effect of the temperature in the columns, the stabilizing agent and the stress conditions are almost the same in lime columns and in lime-gypsum columns. About one year after mixing the measured shear strengths in lime columns and lime-gypsum columns are higher than in samples mixed in the laboratory up to one year after mixing. The difference is greatest at the beginning and decreases with time. This difference between field and laboratory tests depends on the factors temperature, mixing technique and stress conditions.

The high shear strengths in lime-gypsum stabilized clay is depending on that the mineral ettringite is formed. This mineral demands a high pH-value to be permanent. A high share of lime is therefore suitable for permanent stabilization. A low share of gypsum is also suitable to decrease the risk for the affect of sulphate on concrete structures in the neighbourhood.

The investigation shows that gypsum as an additive to the quick lime results in a good stabilizing effect in organic clay with a water content of 100-140% unlike stabilizing with lime solely. This means that the field of application for the lime column method can be expanded.

The investigation shows that possible fields of application for gypsum as an additive are:

- temporary stabilizations in organic clay with a natural water content of 100-140%
- temporary stabilizations where a fast shear strength is required and the risk for affection of sulphate (from the gypsum) on concrete structures in the neighbourhood can be accepted or eliminated/neutralized.

The investigation also shows that to get practical use of the lime-gypsum columns a further development of the mixing technique in the

field for lime-gypsum and of the mixing tool on the lime column machine is needed. The investigation also shows that a continued research on the constancy of the lime-gypsum column is needed.

1. BAKGRUND

I början av 1970-talet utvecklades i Sverige en metod för djupstabilisering av lös lera med kalk, den så kallade kalkpelarmetoden. Denna innebär att kalkpelare tillverkas in situ genom mekanisk inblandning av osläckt kalk (CaO) i jorden. Vid inblandning av kalk i lera förbättras dess geotekniska egenskaper beroende på kemisk-fysikaliska processer. Reaktionen mellan leran och kalken kan indelas i följande faser (Högberg, 1979)

1. Den osläckta kalken reagerar med vattnet i leran och släcks varvid lerans vattenkvot reduceras. Reaktionen sker under värmeutveckling som också kan bidra till en minskad vattenkvot hos leran. Släckningsförloppet är avslutat under den första timmen efter kalkinblandning.
2. Lerans alkalijoner byts mot kalciumjoner från kalken varvid leran omstruktureras med koagulering av lerpartiklarna till större korn. Koaguleringsprocessen sker huvudsakligen under det första dygnet efter kalkinblandningen men för ett fullständigt jonutbyte kan det behövas flera månader.
3. Puzzolanreaktioner som börjar samtidigt med jonutbytet och pågår under flera år. Dessa kemiska reaktioner mellan kalken och lerans silikater och aluminater ger en cementeringseffekt som binder ihop kornen.

Dessa processer medför en väsentlig förbättring av främst lerans skjuvhållfasthet och kompressionsegenskaper.

Kalkpelare utförs normalt med diametern 0,5 m och längden maximalt 15 m. Försök med 0,6 m diameter har dock utförts under 1984 med bra resultat (Holm, Åhnberg, Holmkvist, 1984)

Erfarenheterna från ett stort antal praktiska tillämpningar av kalkpelarmetoden visar att den ofta är både tekniskt och ekonomiskt fördelaktig relativt andra förstärkningsmetoder då jorden utgörs av lös lera med vattenkvot varierande mellan 40 och 100%. Kalkens stabiliserings-effekt avtar med ökande vattenkvot (Holm, Åhnberg, 1984) och med ökande organisk halt i leran.

Vidareutvecklingen av kalkpelarmetoden har pågått både inom och utom Sverige bl a med tillsatsmedel till kalken för att erhålla bättre stabiliseringsmedel än ren osläckt kalk. Försök i Finland (Nieminen, 1979) med inblandning av kalk och gips i lös lera visade att hög skjuvhållfasthet erhöles om siltig lera stabiliserades med en blandning av kalk och gips. Anledningen härtill är att gips (kalciumsulfat) tillsammans med kalk bildar ett mineral, ettringit (kalciumsulfoaluminat $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$), vid inblandning i lera. Ettringit utgörs av nålformade kristaller vilka binder ihop de fastare aggregaten och en hög hållfasthet erhålls hos den stabiliserade leran. I figur 1 visas dessa nålformade kristaller i kalkgipsstabiliserad lera.



FIGUR 1. Ettringit i siltig lera stabiliserad med kalk-gips. 3000 ggr förstoring (Nieminen, 1979).

I många tillämpningar av kalkpelarmetoden t ex kalkpelare i stället för spont för stabilisering av schaktväggar vid rörgravsarbeten är en snabb hållfasthetstillväxt av stor betydelse ur praktisk och ekonomisk synpunkt.

En bra stabiliseringseffekt i organisk lera och eventuellt även i organisk jord skulle utvidga användningsområdet för kalkpelarmetoden och billigare grundläggningar skulle erhållas.

2. PROJEKTETS SYFTE OCH GENOMFÖRANDE

Projektet har syftat till att klarlägga effekten av gips som tillsatsmedel till osläckt kalk vid djupstabilisering av lös lera enligt kalkpelarmetoden med inriktning mot

- kan bättre stabiliseringseffekt erhållas i lös lera
- kan härdningstiderna kortas
- kan en blandning kalk-gips användas i dagens kalkpelarmaskin
- rekommendationer för användning

Under projektets gång har en utvidgning av projektet skett genom att i anslutning till anläggningsprojekt studera om organisk lera/organisk jord kan stabiliseras.

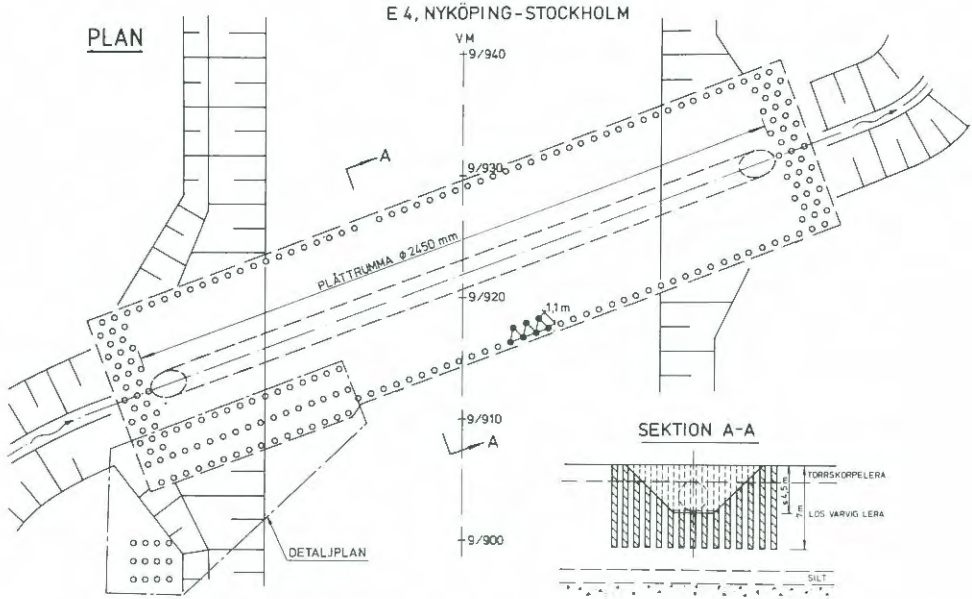
Projektet har genomförts i samband med praktiska tillämpningar av kalkpelarmetoden vid tre anläggningsarbeten vid Vagnhärad, Stäket och Täby. Förstärkningsåtgärder enligt kalkpelarmetoden vid de tre arbetsplatserna har utförts enligt följande.

Vagnhärad. För utbyggnad av E4, delen Sille-Pilkrog i Södermanlands län, projekterades kalkpelarförstärkningar (projektör SGI) för sex delobjekt med sammanlagt ca 70.000 lm kalkpelare. Ett av dessa projekt var ett trumläge, där kalkpelare installerades i stället för stålspons som förstärkning för schaktningsarbetet. I figur 2 visas en översikt av utförd kalkpelarförstärkning. För jämförelse av kalkpelare och kalk-gipspelare installerades 34 st kalk-gipspelare. Olika blandningsförhållanden mellan kalk och gips användes för att studera inverkan av blandningsförhållandet på stabiliseringseffekten.

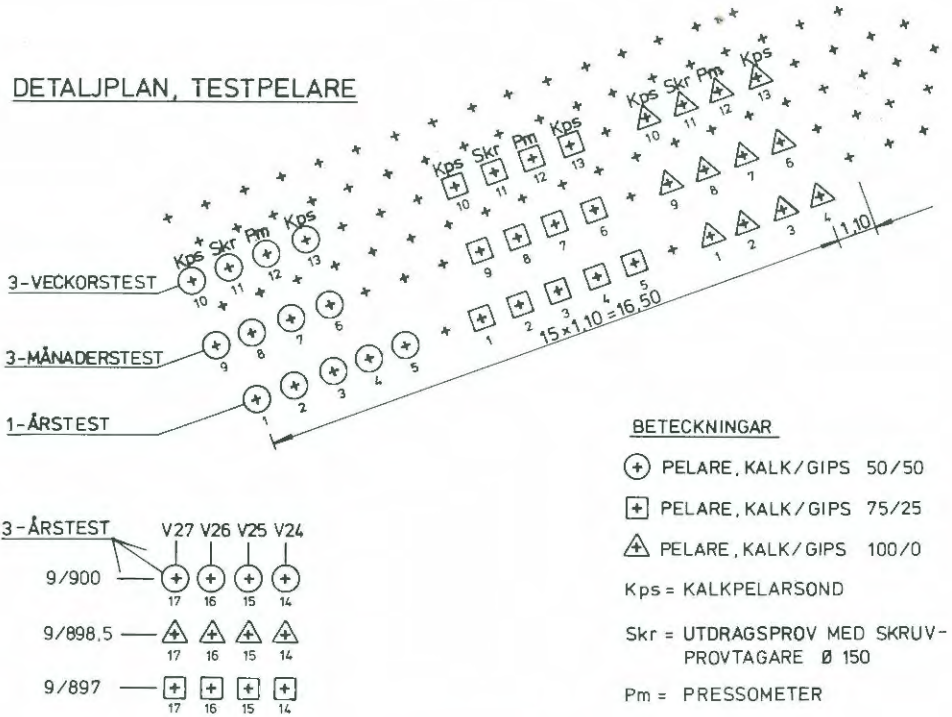
Stäket. För en huvudvattenledning, Stäket-Rotebro, installerades ca 8800 lm kalk-gipspelare (projektör VIAK AB) för att förbättra släntstabiliteten vid schaktningen, se figur 3.

Täby. Vid utbyggnad av Löttingelundsvägen och Furuvägen, se figur 4, installerades ca 6700 lm kalk-gipspelare (projektör K-Konsult) för reducering av sättningar och för att förbättra stabiliteten för vägen.

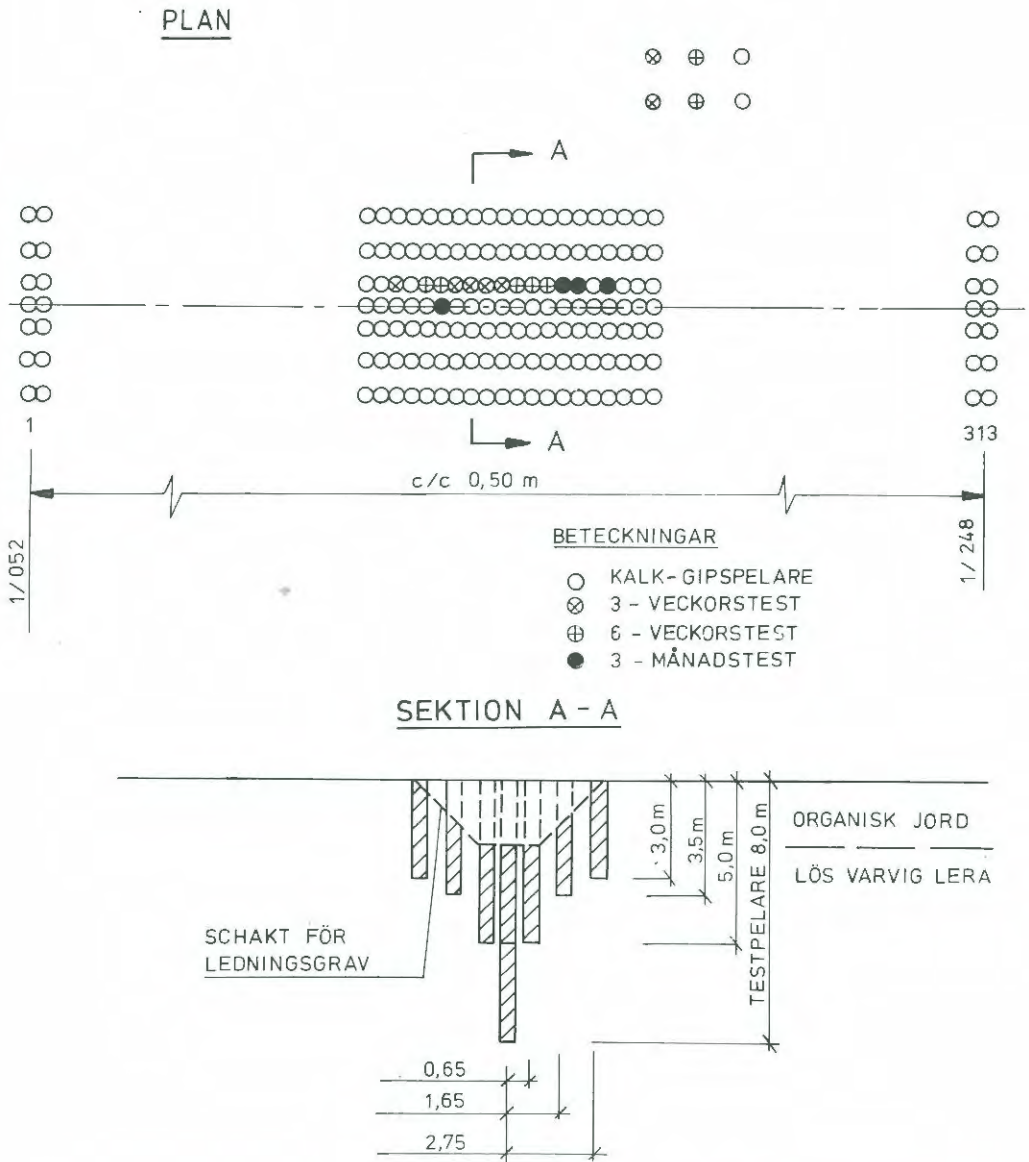
Projektet har genomförts genom provningar i fält av pelare, och laboratorieundersökningar. Provningarna i fält har omfattat främst kalkpelarsonderingar vid olika tidpunkter inom en 3-årsperiod efter pelarinstallationen. Laboratorieundersökningarna har omfattat inblandningar av kalk-gips på upptagna jordprover samt bestämningar av skjuvhållfasthet och kompressionsegenskaper vid olika tidpunkter likaledes inom en 3-årsperiod efter inblandningen.



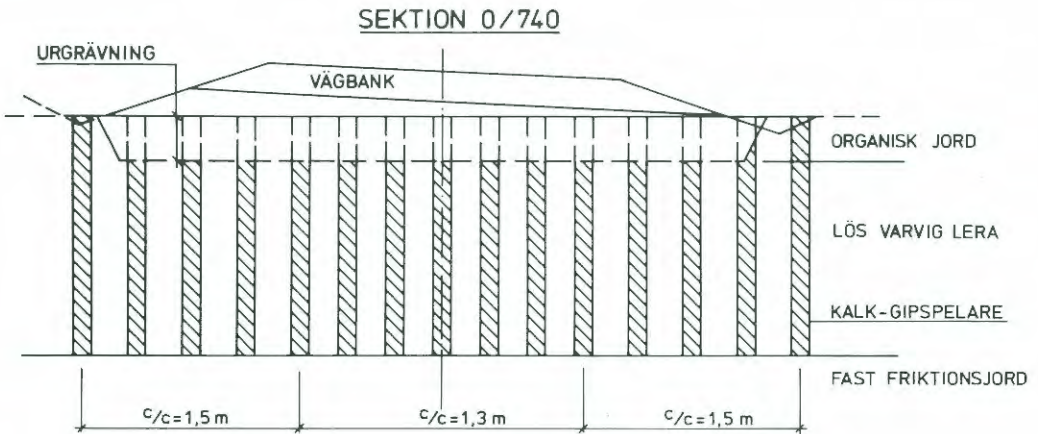
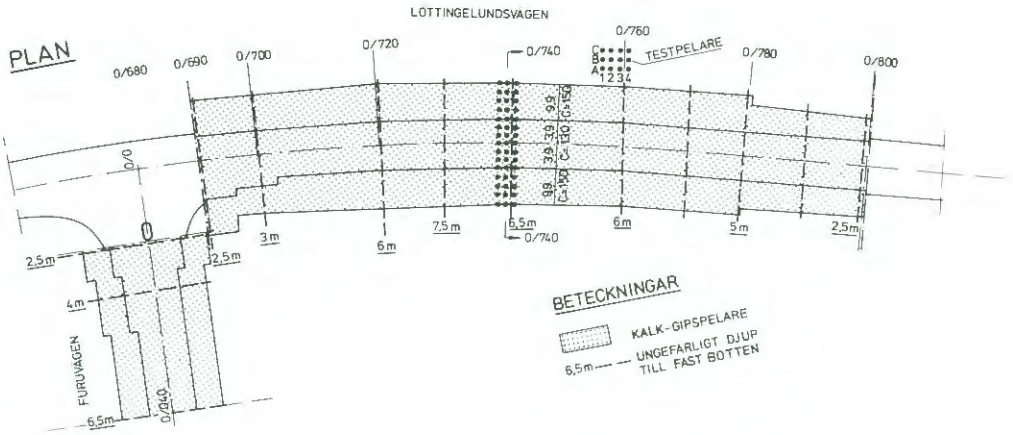
DETALJPLAN, TESTPELARE



FIGUR 2. Kalkpelarförstärkning samt testpelare vid Vagnhärad.



FIGUR 3. Kalk-gipsplatarförstärkning samt testplatar vid Stäket.



FIGUR 4. Kalk-gipselarförstärkning samt testpelare vid Täby.

3. UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR OCH RESULTAT

3.1 Allmänt

För projektet vid Vagnhärad har laboratorie- och fältförsök utförts under en period av tre år medan testperioden för de båda övriga projekten uppgår till ca ett år.

På laboratorieblandade prover, inpackade i kolvborrhylsor och lagrade i fuktrum vid +8°C, har skjuvhållfastheten bestämts genom konförsök och enaxliga tryckförsök. Konförsök ger normalt 2-4 ggr högre skjuvhållfasthetsvärden än tryckförsök åtminstone under första året efter inblandningen. Denna skillnad beror på den inhomogena strukturen hos den stabiliserade jorden. Konförsöken återspeglar inte skjuvhållfastheten hos den stabiliserade jorden utan huvudsakligen skjuvhållfastheten hos de relativt sett fastare aggregaten i den stabiliserade jorden. Tryckförsöken, där ett större jordprov testas, bestäms dock skjuvhållfastheten hos de relativt sett svagare zonerna mellan de fastare aggregaten och ett mer representativt värde på skjuvhållfastheten hos den stabiliserade jorden erhålls därvid. På sikt bidrar dock cementeringseffekten till att den stabiliserade jorden får en jämnare struktur och skillnaden i skjuvhållfasthet mellan konförsök och tryckförsök blir härigenom mindre med tiden.

I fält har pelarna provats genom kalkpelarsondering och pressometerförsök. Pelarnas skjuvhållfasthet har utvärderats som 0,10 ggr det specifika sonderingsmotståndet mot kalkpelarsondens vinge (Holm, G, Bredenberg, H, Broms, B 1981) och som 0,18 ggr nettogränstrycket vid pressometerförsök. Båda metoderna uppvisar en relativt stor spridning på skjuvhållfasthetsvärdena. Detta beror på pelarnas inhomogenitet och att kalkpelarsondens vinge ej alltid går helt i pelaren respektive att pressometerförsöken utförts i pelarcentrum där pelaren är mest inhomogen. Dessutom är pressometerens diameter något för liten jämfört med

den efter Kellystången på kalkpelarmaskinen försvagade mittzonen i pelaren med ca 0,10 m diameter. En fördel med kalkpelarsondering är att hela pelarens längd provas. Pelarnas egenskaper i fält har främst utvärderats från kalkpelarsonderingarna.

3.2 Laboratorieundersökningar

3.2.1 Ursprunglig jord

Inom respektive testområde - Vagnhärad, Stäket och Täby har jordprover tagits upp med kolvprovtagare. Rutinanalys och enaxliga tryckförsök har utförts på jordprover från samtliga testområden. Dessutom har kompressionsförsök (typ CRS) utförts på sex jordprover från Vagnhärad.

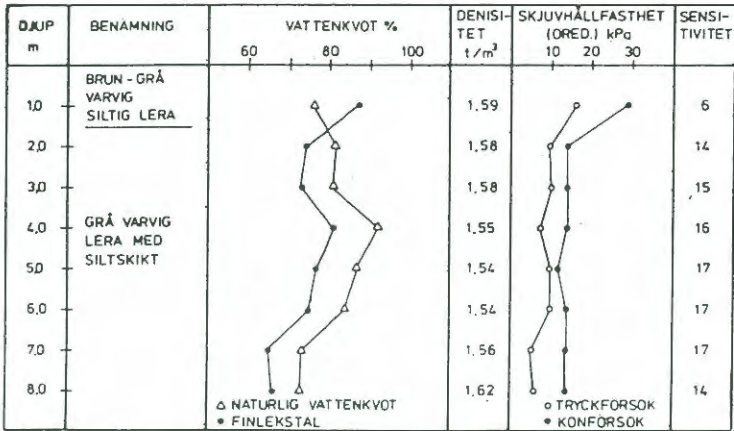
Jordprofilerna kan allmänt beskrivas enligt följande:

Vagnhärad. Under 1-1,5 m tjock torrskorpelera utgörs jorden i huvudsak av lös varvig lera med siltskikt till ca 9 m djup. Den naturliga vattenkvoten varierar mestadels mellan 70 och 95%. Skjuvhållfastheten uppgår till ca 10 och 14 kPa enligt tryck- respektive konförsök. Enligt CRS-försök är leran överkonsoliderad för ca 15 (10-25) kPa och kompressionsmodulen (M_L) uppgår i genomsnitt till ca 170 (60-290) kPa.

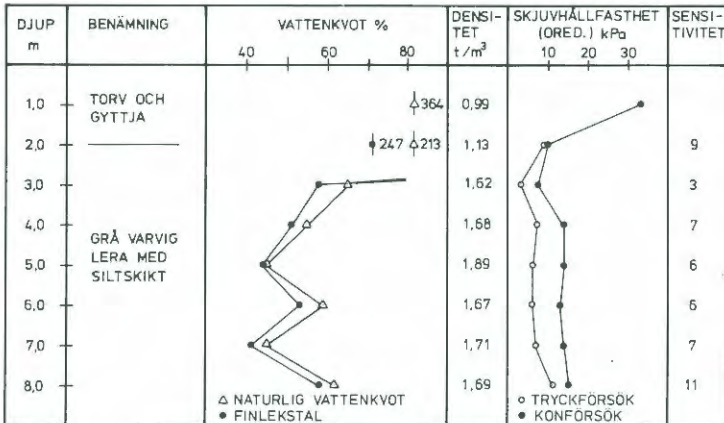
Stäket. Överst, till ca 2 m djup, består jorden av torv och gyttja och därunder i huvudsak av lös varvig lera med siltskikt. Den naturliga vattenkvoten i leran varierar mestadels mellan 45 och 65%. Skjuvhållfastheten uppgår till 6-10 och ca 14 kPa enligt tryck- respektive konförsök.

Täby. Överst, till ca 1 m djup, består jorden av dyrtorv och lerig gyttja och därunder i huvudsak av mycket lös varvig lera med siltskikt. Den naturliga vattenkvoten i leran varierar mellan 43 och 88%. Skjuvhållfastheten varierar mellan 4 och 9 kPa.

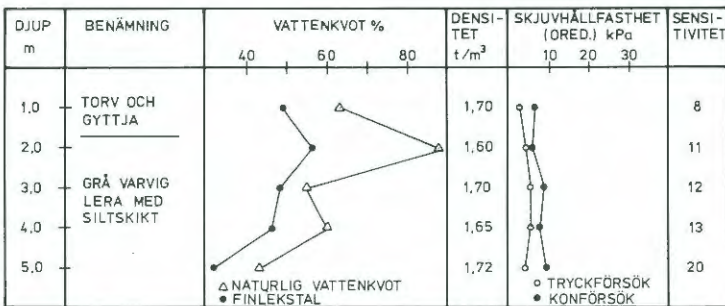
På figur 5a-5c visas en representativ jordprofil från varje testområde.



FIGUR 5a. Jordprofil, Vagnhärad.



FIGUR 5b. Jordprofil, Stäket.



FIGUR 5c. Jordprofil, Täby.

3.2.2 Stabiliserad jord - Vagnhärad

Jord från två djupintervall, 1,5-4,5 respektive 4,5-7,5 m, blandades med kalk och gips med varierande proportioner, se tabell 1.

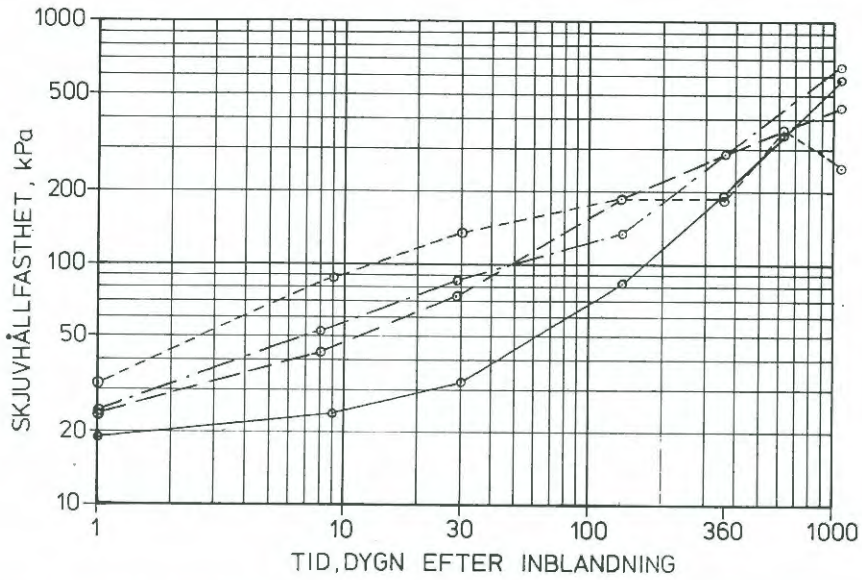
TABELL 1. Sammanställning av inblandningar av laboratorieundersökningar, Vagnhärad.

Blandning	Djupintervall, m	w _n %	Vikts-% stabiliseringsmedel	Blandningsförhållande kalk/gips
A	1,5-4,1	76	9,7	50/50
B	4,5-7,1	83	10,3	50/50
C	1,5-4,1	79	10,0	67/33
D	4,5-7,1	84	10,4	67/33
E	2,0-4,5	81	10,2	75/25
F	5,0-7,6	86	10,6	75/25
G	2,0-4,6	80	10,1	100/0
H	5,0-7,6	85	10,5	100/0

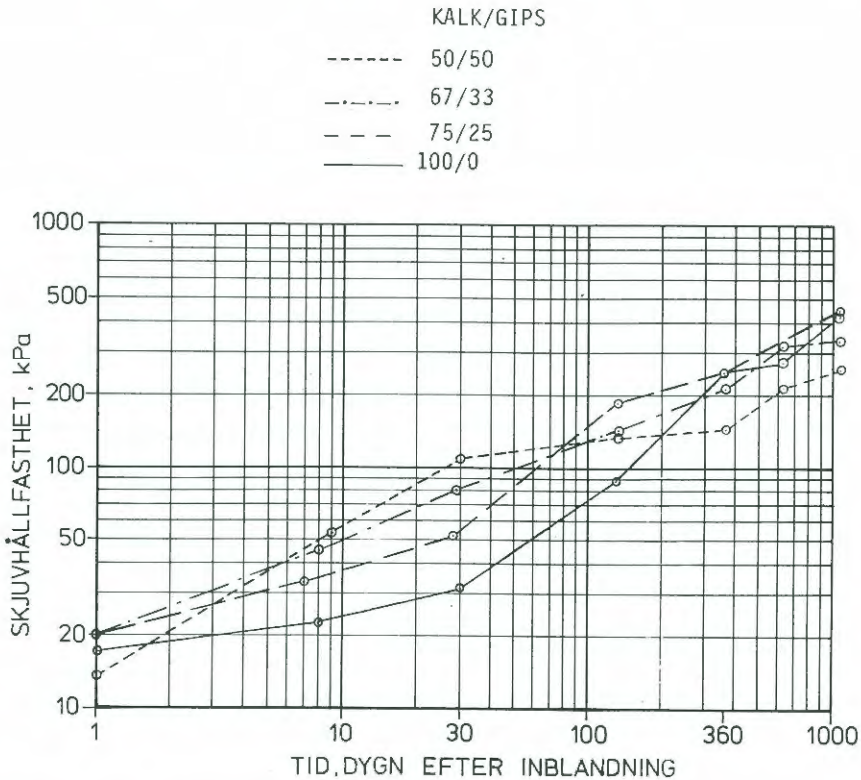
Inblandad mängd stabiliseringsmedel, kalk respektive kalk + gips, motsvarar 17 kg/m pelare i samtliga blandningar.

Samtliga blandningar har, under en period av 3 år, provats vid minst sex tidpunkter med avseende på densitet, vattenkvot, flytgräns, plasticitetsgräns samt skjuvhållfasthet enligt kon- och tryckförsök. Vid två tidpunkter har även kompressionsförsök typ CRS utförts på respektive blandning.

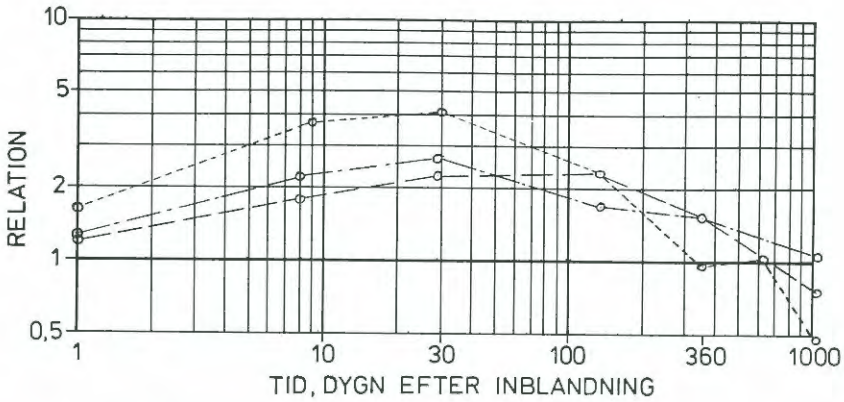
I figur 6a och 6b visas skjuvhållfastheten enligt enaxliga tryckförsök som funktion av tiden. Använda blandningsförhållanden kalk/gips anges i figuren. I figur 7a och 7b visas förhållandet mellan skjuvhållfastheten hos kalk-gipsstabiliserad och kalkstabiliserad lera som funktion av tiden efter inblandning.



FIGUR 6a. Skjuvhållfastheten bestämd med enaxliga tryckförsök, som funktion av tiden, djupintervall 1,5-4,5 m.



FIGUR 6b. Skjuvhållfastheten, bestämd med enaxliga tryckförsök, som funktion av tiden, djupintervall 4,5-7,5 m.



FIGUR 7a. Förhållandet mellan skjuvhållfastheten hos kalk-gipsstabiliserad och kalkstabiliserad lera som funktion av tiden efter inblandning. Djupintervall 1,5-4,5 m.

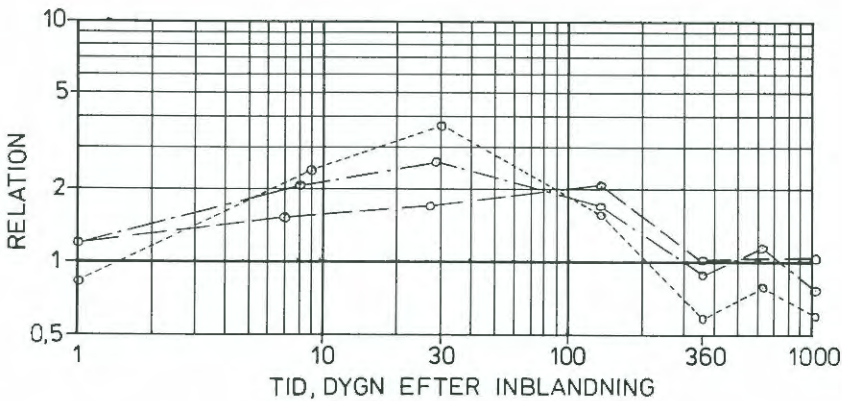
KALK/GIPS

----- 50/50

- · - · - 67/33

- - - 75/25

———— 100/0



FIGUR 7b. Förhållandet mellan skjuvhållfastheten hos kalk-gipsstabiliserad och kalkstabiliserad lera som funktion av tiden efter inblandning. Djupintervall 4,5 - 7,5 m.

Kompressionsmodulen har utvärderats ur CRS-försöken och kvoten mellan kompressionsmodulen och skjuvhållfastheten för stabiliserad lera har beräknats. I tabell 2 redovisas en sammanställning.

TABELL 2. Sammanställning av kompressionsmoduler (M) och skjuvhållfastheter (τ) hos stabiliserad lera.

Blandning	Blandningsförhållande kalk/gips	M/τ	M/τ
		90-112 dygn efter inbl.	ca 1 år efter inbl.
A	50/50	25250/188 = 134	31500/186 = 169
B	50/50	16250/136 = 119	22500/144 = 156
C	67/33	18330/136 = 135	30250/292 = 103
D	67/33	19500/149 = 131	30500/216 = 141
E	75/25	14875/185 = 80	22000/296 = 74
F	75/25	17700/184 = 96	22000/248 = 89
G	100/0	7300/82 = 89	16125/196 = 82
H	100/0	8600/88 = 98	32500/244 = 133

Av figurerna 6 och 7 samt tabell 2 framgår att

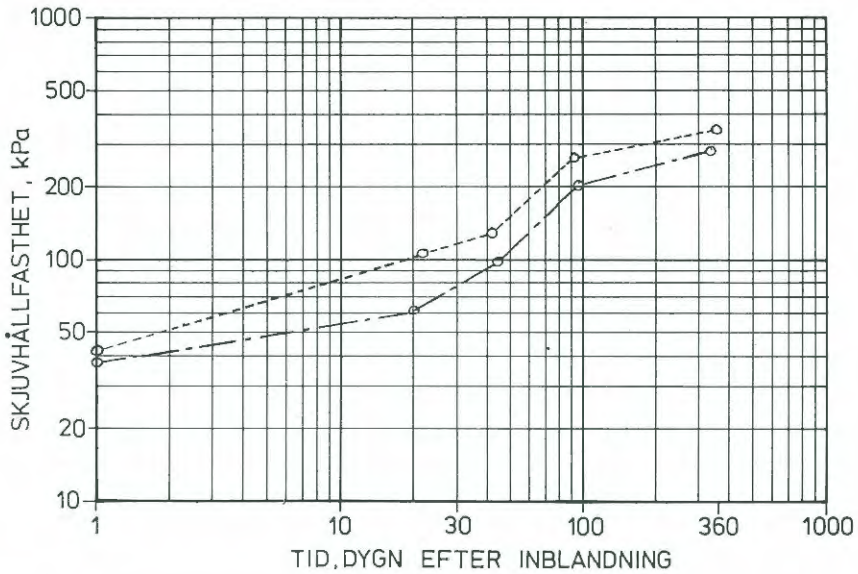
- under perioden 1-30 dagar ökar skjuvhållfastheten snabbare då gips ingår som tillsatsmedel och skjuvhållfasthetstillväxten ökar med ökad gipsandel.
- under perioden 10-100 dagar är skjuvhållfastheten 1,54 ggr högre då gips ingår som tillsatsmedel.
- efter 0,5-2 år går skjuvhållfastheten mot ungefär samma värde för kalk- och kalk-gipsblandade prover.
- efter mer än 2 år är skjuvhållfastheten lika eller högre i kalkblandade prover än i kalk-gipsblandade prover.
- skjuvhållfastheten hos kalk-gipsblandade prover har ökat 36, 4-9, 9-13 och 10-20 gånger på 10, 30, 120 respektive 360 dagar efter inblandningen utgående från den ostabiliserade lerans skjuvhållfasthet. Motsvarande ökning på kalkblandade prover uppgår till ca 2, 2, 6 och 15 gånger.

- skjuvhållfastheten **efter 2 veckor** hos kalk-gipsblandade prover är ca 100 respektive ca 65 kPa i de två jordlagren. Skjuvhållfastheten efter **1 månad** har ökat till ca 140 respektive ca 105 kPa. Detta gäller för det blandningsförhållande, 50/50, som ger snabbast hållfasthetsökning.
- kompressionsmodulen ökar med tiden och är större i kalk-gipsstabiliserad jord än i motsvarande kalkstabiliserad jord, ungefär 23,5 ggr högre efter 3-4 månader.
- kvoten mellan kompressionsmodulen och skjuvhållfastheten varierar mellan 74 och 169 i den kalk-gipsstabiliserade jorden samt mellan 82 och 133 i den kalkstabiliserade jorden.
- kompressionsmodulen hos kalk-gipsstabiliserad jord är 15.000 - 25.000 kPa 3-4 månader efter inblandning och 22.000-31.000 kPa 1 år efter inblandning.

3.2.3 Stabiliserad jord - Stäket och Täby

Varvig lera med siltskikt från djupintervallen 3,0-8,0 m från Stäket och 3,0-4,0 m från Täby blandades separat varefter kalk och gips blandades in i jordarna. Jordarnas naturliga vattenkvot uppgick till ca 55 (Stäket) respektive 60% (Täby). För kalkstabiliseringsprojekten i Stäket och Täby hade föreskrivits 13 respektive 20 kg stabiliseringsmedel per meter pelare, motsvarande ca 6,2 och 9,8 viktsprocent. Härav skulle kalk utgöra 67 och gips 33% för båda projekten. Det verkliga blandningsförhållandet för kalk/gips blev dock ca 50/50 i Stäket, se punkt 3.2.4 nedan. För inblandningsförsöken på laboratoriet togs stabiliseringsmedel som blandats i fält i Stäket. Någon jämförelse med jord från Stäket och Täby med enbart kalkinblandning har ej gjorts.

De stabiliserade jordproverna har under en period av ca ett år testats vid fem tidpunkter med avseende på densitet, vattenkvot, finlekstal, plasticitetsgräns samt skjuvhållfasthet enligt konförsök och tryckförsök. I figur 8 visas skjuvhållfastheten enligt tryckförsök som funktion av tiden efter inblandning.



FIGUR 8. Skjuvhållfastheten bestämd med enaxliga tryckförsök som funktion av tiden, Stäket och Täby.

Av figur 8 framgår att skjuvhållfastheten enligt tryckförsök, medelvärde för Stäket och Täby, uppgår till ca 90, 200 och 300 kPa efter ca 30, 90 respektive 360 dagar. Proverna från Stäket har givit något högre värden än proverna från Täby. Skjuvhållfastheten har således ökat ca 6, 14 och 18 gånger jämfört med den ostabiliserade lerans skjuvhållfasthet (fig 5b och 5c). De erhållna skjuvhållfasthetsökningarna är större än vad som skulle erhållits med kalk vid laboratorieförsök enligt erfarenheter från kalkstabilisering av liknande lera.

3.2.4 Stabiliseringsmedel - blandningsförhållande kalk/gips.

För kalk-gipspelarna - endast provpelare - i Vagnhärad användes fabriksblandat stabiliseringsmedel varför någon undersökning av stabiliseringsmedlet ej bedömdes vara erforderlig.

Vid Stäket och Täby var förstärkningsarbetena i sin helhet projekterade med kalk-gipspelare med blandningsförhållande 67/33 och kalken respektive gipsen levererades var för sig. Kalken och gipsen blandades där-

efter på arbetsplatsen i en fältblandningsstation. För kontroll av blandningsförhållandet togs stabiliseringsmedel i tre säckar (I, II och III) på vardera ca 10 kg. Proverna togs dels ur kalkpelarmaskinens behållare och dels direkt från blandarutrustningens utmatningsrör. En del av stabiliseringsmedlet användes för laboratorieinblandning enligt punkt 3.2.3 ovan. Resterande stabiliseringsmedel skickades till K-Konsult för analys av sammansättningen.

På laboratoriet togs slumpvis ur varje säck ett antal prover om 50 gram. Ur varje prov togs därefter ett delprov om ca 0,5 gram utan föregående homogenisering och ett delprov om ca 20 gram efter omsorgsfull homogenisering. Delproverna analyserades med avseende på sulfat och kalcium varefter förhållandet kalk/gips bestämdes. I tabell 3 redovisas medelvärden och standardavvikelser.

TABELL 3. Resultat av analys av kalk-gipsblandning.

Delprov		Medelvärde			Standardavvikelse		
		Säck nr			Säck nr		
		I	II	III	I	II	III
20 g prov	kalk	49%	45%	56%	8,1	1,5	1,9
	gips	54%	59%	46%	9,8	1,9	1,6
	summa	103%	104%	102%			
0,5 g prov	kalk	51%	43%	54%	6,5	1,1	0,47
	gips	48%	56%	43%	7,9	1,5	1,2
	summa	99%	99%	98%			

Av tabell 3 framgår att blandningsförhållandet kalk/gips varierar mellan 43/56 och 56/46 dvs blandningsförhållandet är ca 50/50. Standardavvikelsen är 0,47-8,1. En markant avvikelse från föreskrivna 67/33 förelåg således. Effekten av en dylik avvikelse på skjuvhållfasthetsutvecklingen är stor. Jfr Figur 5 och 6.

3.3 Fältundersökningar

3.3.1 Vagnhärad

Fältförsöken omfattade tre testserier av kalk och kalk-gips med blandningsförhållandena 100/0, 75/25 och 50/50 (kalk/gips). Pelarna avsågs att provas vid fyra tidpunkter under en period av tre år efter inblandning enligt följande:

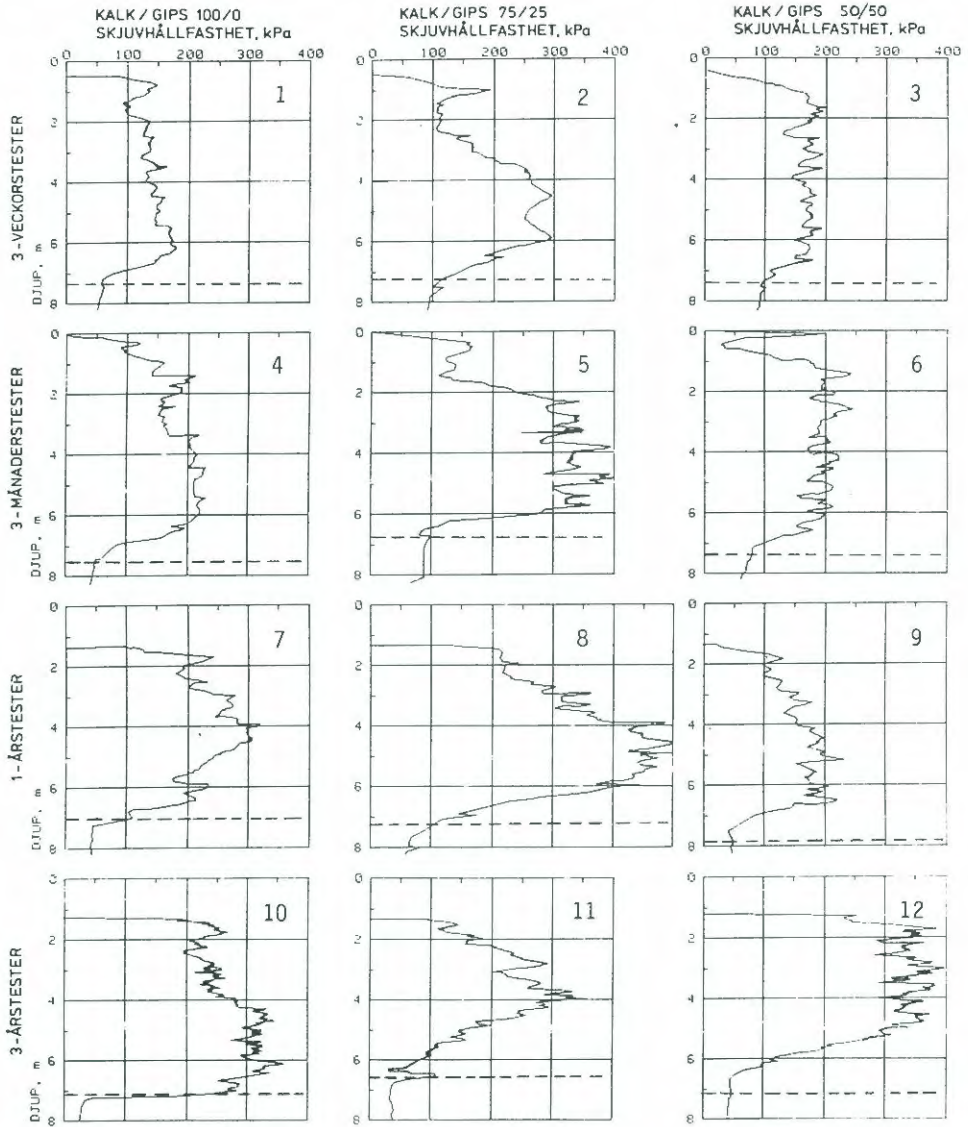
- Provning skulle utföras ca 21, 90 och 270-360 dagar samt 3 år efter inblandning
- Vid varje provningstidpunkt skulle totalt tolv pelare, fyra av varje blandningsförhållande, provas. Provningen skulle utföras genom kalkpelarsondering (Kps) i två pelare, genom pressometerförsök (Pm) i en pelare och genom utdragsförsök med skruvborr $\varnothing 150$ mm i en pelare per blandningsförhållande.

Vid genomgång av resultaten från första provningsomgången bedömdes att utdragsproven ej gav representativa resultat på grund av söndermalning av pelarna vid nedskruvningen. Denna provningsmetod utbyttes därför fortsättningsvis mot kalkpelarsondering.

Vid andra provningstidpunkten kunde inte alla 50/50-pelarna provas på grund av pågående schaktningsarbeten. I övrigt utfördes samtliga försök enligt programmet.

I figur 9 visas exempel på resultat av kalkpelarsonderingar. Resultaten visas som utvärderad skjuvhållfasthet. Av figuren framgår även pelarnas verkliga utförda längd (med markering ---) enligt kalkutmatningsdiagrammen. Provningarna vid 1 och 3 år utfördes från en lägre nivå på grund av att en 1,2 m avschaktning utförts.

Sonderingarna i **kalkpelarna** visar att pelarna är homogena samt att en ökning av skjuvhållfastheten skett med tiden. Skjuvhållfastheten har



FIGUR 9. Exempel på resultat av kalkpelarsonderingar i kalk-och kalk/gipspelare vid Vagnhärad.

ökat från ca 130 respektive 150 kPa vid 20 dygn, till ca 160 respektive 210 kPa vid 90 dygn, till ca 220 respektive 250 kPa vid 1 år och till 220 respektive 300 kPa vid 3 år i de två studerade jordlagren (1,5-4,5 m respektive 4,5-7,5 m). Skjuvhållfastheten har sålunda ökat under hela 3-årsperioden. Vid 1-årsprovningen har sonden troligen gått något snett och sondens vinge har härigenom successivt gått ur den pelare som redovisas i diagram 7, varför en för låg och för pelaren ej representativ skjuvhållfasthet redovisas på större djup än ca 4,5 m.

Sonderingarna i **kalk-gipspelare** visar att skjuvhållfastheten i pelarnas längsled är mer oregelbunden än i kalkpelarna. Genomsnittligt är dock skjuvhållfasthetsvärdena något högre än i kalkpelarna. Svårigheter föreligger att utvärdera skjuvhållfastheten i kalk-gipspelare vid såväl 1-års-som 3-årsprovningen på grund av att sonden gått snett och vingen successivt gått ur pelarna i diagram 8, 9, 11 och 12. De i diagrammen redovisade skjuvhållfastheterna på större djup än 4 à 6 m är sålunda för låga och ej representativa för kalk-gipspelare. Utvärderingen av skjuvhållfasthetstillväxten under senare delen av den studerade tidsperioden blir härigenom osäker.

Skjuvhållfastheten i kalk-gipspelare med blandningsförhållandet 75/25 har ökat på 2-4 m djup från ca 150 kPa vid 20 dygn till ca 280 kPa vid 90 dygn samt till ca 300 kPa vid 1 år och på 4-6 m djup från ca 250 kPa vid 20 dygn till ca 300 kPa vid 90 dygn samt till ca 400 kPa vid 1 år.

Skjuvhållfastheten i kalk-gipspelare med blandningsförhållandet 50/50 har ökat på 2-4 m djup från ca 160 kPa vid 20 dygn till ca 180 kPa vid 90 dygn samt till 300 kPa vid 3 år och på 4-6 m djup från ca 150 kPa vid 20 dygn till ca 170 kPa vid 90 dygn samt till ca 300 kPa vid 3 år.

Kalkpelarsonderingarna i kalkpelare och kalk-gipspelare i Vagnhärad visar att

- kalkpelarna är mer homogena med avseende på skjuvhållfasthet än kalk-gipspelarna.
- kalk-gipspelarna med blandningsförhållandet 75/25 har högre skjuvhållfasthet än kalkpelarna fram till ca 1 år efter inblandningen. Därefter bedöms skjuvhållfastheten vara densamma.
- kalk-gipspelarna med blandningsförhållande 50/50 har högre skjuvhållfasthet än kalkpelarna på 2-4 m djup fram till ca 3 mån efter inblandning medan kalkpelare och dessa kalk-gipspelare har ungefär samma skjuvhållfasthet på 4-6 m djup.
- skjuvhållfastheten i kalkpelarna och kalk-gipspelarna är 130-150 kPa respektive 150-250 kPa ca 20 dagar efter inblandning.
- skjuvhållfastheten i kalkpelarna och kalk-gipspelarna är ca 300 kPa 3 år efter inblandning.

I samband med schaktningsarbetena togs sex stora prover av kalkpelare och kalk-gipspelare. Provernans diameter var 0,50 m, dvs pelarnas diameter, och längden var 0,30 m. Provtagningen skedde med avsågade oljefat som trycktes ned runt pelarna och togs upp med grävmaskin. Prover togs i de tre pelarsorterna på två djup, nämligen 1,5 och 2,5 m under markytan. Ur de upptagna proverna stansades delprover in i kolvborrhylsor (diameter 50 mm) med skytprovtagare. Delproverna undersöktes ca 8 månader efter inblandningen. Resultaten tyder på att den använda provningstekniken medfört stor störning av proverna. Vid undersökningen har erhållits låga skjuvhållfastheter och stor spridning i skjuvhållfasthet i samtliga prover från kalkpelare och framförallt från kalk-gipspelare. Resultaten tyder på att inhomogen inblandning erhållits i flera fall, vilket också konstaterades vid okulär besiktning av proverna. Det använda provtagningsförfarandet har medfört störning av proverna. Störningen har haft större inverkan på skjuvhållfastheten i kalkgipspelarna eftersom kalk-gipsstabiliserad lera är ett sprödare material än kalkstabiliserad lera.

3.3.2 Stäket och Täby

Fältprogrammet planerades att omfatta sondering med kalkpelarsond i 12 st kalk-gipspelare vid Stäket och 12 st kalk-gipspelare vid Täby, fördelat på fyra provningsomgångar. Dessa skulle utföras vid ca 20, 40, 90 respektive 360 dagar efter pelarinstallationen.

De tre första provningsomgångarna utfördes planenligt medan endast två pelare vid Täby kunde testas i den sista omgången, som också fick senareläggas ca 2,5 månader.

Sonderingarna visar att skjuvhållfastheten i kalk-gipspelarna (med blandningsförhållandet ungefär 50/50) ökade enligt följande: I Stäket från ca 100 kPa vid 20 dygn till ca 150 kPa vid 40 dygn och till ca 190 kPa vid 90 dygn. I Täby från ca 120 kPa vid 20 dygn, ca 160 kPa vid 40 dygn, ca 160 kPa vid 90 dygn och ca 130 kPa vid 14,5 mån. Detta gäller för pelarna under den ytliga organiska jorden, dvs på 2-8 m djup i Stäket och 2-5 m djup i Täby. Den ursprungliga lerans skjuvhållfasthet var ca 10 kPa i Stäket och 8 kPa i Täby. Skjuvhållfastheten har sålunda ökat 10-15 gånger under de första 20 dygnen och ca 20 ggr efter 3 månader.

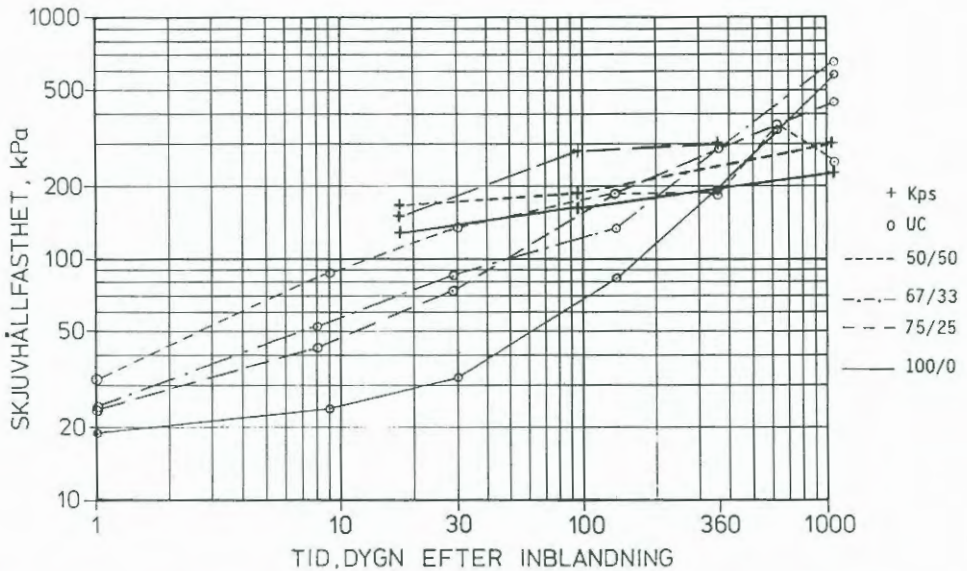
4. JÄMFÖRELSE AV LABORATORIE- OCH FÄLTRESULTAT

Inblandning av kalk respektive kalk-gips med olika blandningsförhållanden och efterföljande provning har utförts både i laboratorium och i fält. I tabell 4 redovisas resultaten av skjuvhållfasthetsbestämningarna i laboratorium genom tryckförsök (UC) och i fält genom kalkpelarsondering (Kps).

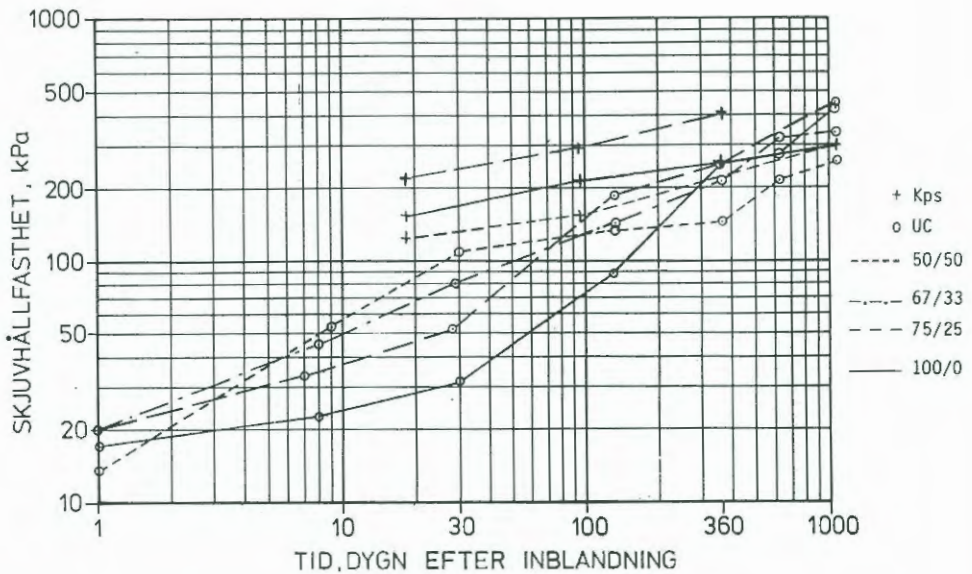
TABELL 4. Skjuvhållfasthet enligt tryckförsök på laboratorieblandade prover (UC) respektive kalkpelarsondering i fält (Kps).

Plats Provnings- metod	Djup- inter- vall m	Stabiliserings- medel Blandningsför- hållande	Skjuvhållfasthet, kPa Tid efter inblandning (ca-tider)			
			20 dygn	90 dygn	1 år	3 år
Vagnhärad						
UC	2-4	kalk/gips 50/50	120	160	190	250
		67/33	75	120	290	670
		75/25	60	140	290	450
Kps	2-4	Kalk/gips 50/50	160	180	-	300
		75/25	150	280	300	-
UC	2-4	Kalk	30	70	200	580
Kps	2-4	Kalk	130	160	200	220
UC	4-6	Kalk/gips 50/50	85	135	145	260
		67/33	70	135	220	330
		75/25	45	140	250	460
Kps	4-6	Kalk/gips 50/50	150	170	-	300
		75/25	250	300	400	-
UC	4-6	Kalk	30	65	250	450
Kps	4-6	Kalk	150	210	250	300
Stäket						
UC		Kalk/gips/	100	270	340	-
Kps		Kalk/gips/	100	190	-	-
Täby						
UC		Kalk/gips	60	180	270	-
Kps		Kalk/gips	120	160	130	-

I figur 10a och 10b redovisas i diagramform skjuvhållfastheter bestämda i laboratorium respektive i fält.



FIGUR 10a. Skjuvhållfastheten som funktion av tiden, djupintervall 1,5-4,5 m (UC=tryckförsök på laboratorieblandade prover, Kps=kalkpelarsondering i fält).



FIGUR 10b. Skjuvhållfastheten som funktion av tiden, djupintervall 4,5-7,5 m (UC=tryckförsök på laboratorieblandade prover, Kps=kalkpelarsondering i fält).

Av tabell 4 och figur 10 framgår att

- skjuvhållfastheten är högre i kalkpelarna än i de laboratorieblandade proverna fram till ca 1 år efter inblandning. Skillnaden är störst i början och avtar med tiden.
- skjuvhållfastheten är högre i kalk-gipspelarna än i de laboratorieblandade proverna fram till ca 1 år efter inblandning. I Stäket och Täby dock endast fram till ca 1 månad. Skillnaden är störst i början och avtar med tiden.
- skjuvhållfastheten efter 3 år är högre i de laboratorieblandade proverna än i pelarna.
- För samtliga provade kalkpelare och kalk-gipspelare gäller att skjuvhållfastheten är minst 125 kPa 1 månad efter inblandning.

Den snabbare hållfasthetsökning som givit högre skjuvhållfastheter i fält, i kalkpelare, än i laboratorium beror till stor del på att en högre temperatur, alstrad av kalkens släckning, råder under längre tid i pelarna i fält än i laboratorieblandade prover vilka lagrats vid 8°C (hittills rutin vid lab.und.) (Åhnberg, H, Holm, G, 1984). Förutom temperatur är inblandningsteknik och under härdningstiden rådande spänningsförhållanden faktorer som påverkar skillnaden mellan fält-och laboratorieresultat. Sannolikt beror den högre hållfastheten efter 3 år i laboratorieinblandade prover på att en mer homogen stabiliserad jord erhållits vid laboratorieinblandningen.

5. ERFARENHETER FRÅN TVÅ ANDRA PROJEKT

5.1 Huddinge centrum och Fittja

5.1.1 Ursprunglig jord

I samband med kalkpelarförstärkningar för Forelltorget i Huddinge centrum och väg 588 vid Fittja undersöktes jordarna gyttjig lera (gyLe), lera (Le) och varvig lera (vLe) från Huddinge samt varvig lera (vLe), varvig lera med siltskikt (vLesi) och varvig siltig lera (vsile) från Fittja. Jordarnas geotekniska egenskaper framgår av tabell 5.

TABELL 5. Ursprunglig jords egenskaper.

PLATS	HUDDINGE			FITTJA		
	Jordart	gyLe	Le	vLe	vLe	vLesi
djup, m	1,2-2,7	2,7-4,5	6-10	2-5	6-8	8-10
densitet, t/m ³	1,2	1,45	1,6	1,6	1,7	1,8
w _n , %	130	100	70	70	55	45
w _L , %	150	80	55	60	50	40
S _t	5	20	25	20	22	20
kon, kPa	13	9	12	12	17	14
tryck, kPa	14	12	14	10	19	18
M _L , kPa	-	-	-	200	400	700

5.1.2 Stabiliserad jord - laboratorieförsök och fältförsök

Inblandning utfördes med blandningsförhållandet kalk/gips 50/50 och 100/0 på varje jordart enligt tabell 5 ovan. Mängden stabiliseringsmedel uppgick till 17 och 16 kg per meter pelare i jordarna från Huddinge respektive Fittja.

I Huddinge installerades både kalkpelare och kalk-gipspelare medan endast kalkpelare installerades i Fittja.

TABELL 6. Resultat av laboratorie- och fältförsök på stabiliserad jord.
Huddinge Centrum och Fittja.

Plats resp testmetod	Djup- intervall (Jordart)	Stabili- serings- medel	Skjuvhållfasthet, kPa Tid efter inblandning			
			20 dygn	90 dygn	360 dygn	3 år
HUDDINGE						
UC	1,1-2,7 (gyLe)	kalk-gips	50	100	200	-
Kps	1,1-2,7 (gyLe)	kalk-gips	100	100 ¹	-	-
UC	1,1-2,7 (gyLe)	kalk	20	20	40	60
Kps	1,1-2,7 (gyLe)	kalk	-	-	100-200 ²	-
UC	2,7-4,5 (Le)	kalk-gips	90	120	100	135
Kps	2,7-4,5 (Le)	kalk-gips	80	100 ¹		
UC	2,7-4,5 (Le)	kalk	11	11	12	-
Kps	2,7-4,5 (Le)	kalk	-	-	200 ²	
UC	6-10 (vLe)	kalk-gips	200	250	160	250
Kps	6-10 (vLe)	kalk-gips	200	200 ¹		
UC	6-10 (vLe)	kalk	35	45	75	200
Kps	6-10 (vLe)	kalk	-	-	250-350 ²	
FITTJA						
UC	2-5 (vLe)	kalk-gips	140	145	180	-
UC	2-5 (vLe)	kalk	45	75	270	-
Kps	2-5 (vLe)	kalk	80-200	100-200 ³	200-300 ⁴	
UC	6-8 (v <u>Lesi</u>)	kalk-gips	190	260	400	-
UC	6-8 (v <u>Lesi</u>)	kalk	85	130	400	-
Kps	6-8 (v <u>Lesi</u>)	kalk	120-250	200-300 ³	>300 ⁴	-
UC	8-10 (v <u>si</u> Le)	kalk-gips	170	580	-	-
UC	8-10 (v <u>si</u> Le)	kalk	100	150	-	-
Kps	8-10 (v <u>si</u> Le)	kalk	150-250	250-400 ³	>400 ⁴	-

¹ca 160 dygn efter pelarinstallation

²ca 450 " " "

³ca 50 " " "

⁴150-240 dygn efter pelarinstallation

Fält- och laborieförsök utfördes under en period av ca 15 månader respektive 3 år i Fittja respektive Huddinge. Skjuvhållfasthet enligt tryckförsök på laborieblandade prover (UC) och enligt kalkpelarsonderingar (Kps) redovisas i tabell 6. I tabell 7 redovisas kvoten mellan kompressionsmodul enligt CRS-försök och skjuvhållfasthet enligt tryckförsök.

TABELL 7. Kompressionsmodul (M) och skjuvhållfasthet (τ) och kvoten M/τ hos stabiliserad lera från Fittja.

Jordart	Blandnings- förhållande kalk/gips	M/τ ca 20 dygn efter inbl.	M/τ ca 210 dygn efter inbl.
v L	50/50	8600/152 = 57	17500/178 = 98
v L <u>si</u>	50/50	11000/182 = 60	24250/328 = 74
v si L	50/50	11500/168 = 68	-
v L	100/0	4883/43 = 114	15375/142 = 108
v L <u>si</u>	100/0	7625/78 = 98	20800/244 = 85
v si L	100/0	8250/102 = 81	-

Av tabell 6 och 7 framgår att

- skjuvhållfastheten hos de laborieblandade proverna är högre i kalk-gipsstabiliserad lera än i kalkstabiliserad lera fram till åtminstone 90 dygn, Fittja, respektive ca 1 år, Huddinge, efter inblandning.
- skjuvhållfastheten i kalkpelarna är fram till ca 1 år efter inblandning väsentligt högre än i motsvarande laborieblandade prover.
- skjuvhållfastheten i kalkpelarna i Fittja är 80-250 kPa 20 dygn efter inblandning och 200-400 kPa efter 1 år.

- skjuvhållfastheten i kalk-gipspelarna är ungefär densamma som hos laboratorieblandade prover inom den undersökta perioden fram till 3 månader efter inblandning.
- skjuvhållfastheten i kalk-gipspelarna i Huddinge centrum är 80-200 kPa under tidsperioden 20-90 dagar efter inblandning.
- hos laboratorieblandade prover ökar kompressionsmodulen med tiden och är större i kalk-gipsstabiliserad jord (Fittja) än i motsvarande kalkstabiliserad jord. Kompressionsmodulen är 17000-24000 kPa i kalk-gipsstabiliserade prover och 15000-20000 kPa i kalkstabiliserade prover ca 7 månader efter inblandning.
- kvoten mellan kompressionsmodulen och skjuvhållfastheten (Fittja) varierar mellan 57 och 98 i den kalk-gipsstabiliserade jorden samt mellan 81 och 114 i den kalkstabiliserade jorden.

6. SLUTSATSER, KOMMENTARER OCH REKOMMENDATIONER

De utförda laboratorie- och fältundersökningarna med kalk respektive kalk-gips som stabiliseringsmedel vid djupstabilisering enligt kalkpelarmetoden har visat följande:

- Den kemiska inverkan av gips som tillsatsmedel till kalk har studerats genom laboratieförsök. Dessa försök visar att gips som tillsatsmedel till kalken påskyndar de kemiska reaktionerna och en mycket snabbare hållfasthetstillväxt sker under ungefär de tre första månaderna efter inblandning jämfört med endast kalk som stabiliseringsmedel. Hållfasthetstillväxten under dessa månader sker snabbare ju större andel gips som ingår i stabiliseringsmedlet, dock max 50%. Från ca tre månader och framöver gäller det omvända förhållandet, dvs tillväxten går snabbast vid ren kalkinblandning och långsammast med kalk-gipsinblandning med 50% gips. Laboratieförsöken visar också att kalk-gipsstabiliserad lera är ett sprödare material än kalkstabiliserad lera.
- Utförda fältförsök visar att uppmätta skjuvhållfastheter i kalkpelare och kalk-gipspelare i lera med vattenkvot mindre än ca 100% är ungefär desamma (något högre för kalk-gipspelare) vid provningar kort tid efter inblandning. Skjuvhållfastheten uppgår till minst 125 kPa för samtliga inblandningar redan tre veckor efter inblandning och till 150-300 kPa efter 3 månader. Kalk-gipspelarna uppvisar större variationer i skjuvhållfasthet än kalkpelarna.
- De uppmätta högre skjuvhållfastheterna i kalkpelare jämfört med (skjuvhållfastheten enligt laborieblandningar) beror på att högre temperaturer råder under längre tid i kalkpelare i fält än normal marktempertur, vilket normalt är lagringstemperaturen för laborieprover. De kemiska reaktionerna som ger hållfasthetstillväxt går snabbare ju högre temperaturen är. Den höga hållfastheten i kalk-gipsstabiliserad lera beror på att ettringit ($3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ CaSO}_4 \cdot 32 \text{ H}_2\text{O}$) bildas. Den ungefär samma skjuvhållfasthet som konstaterats i kalkpelarna och kalk-gipspelarna bedöms bero på att den totala effekten av temperaturen i pelarna, stabiliseringsmedlet, blandningstekniken och spänningsförhållandena under härdningstiden har blivit ungefär densamma i kalkpelarna och kalk-gipspelarna fast de olika faktorernas inverkan är olika i kalkpelarna respektive kalk-gipspelarna.

- Gips som tillsatsmedel till kalk medför att god stabiliseringseffekt erhålls i organisk lera med en naturlig vattenkvot av 100-140%, till skillnad från stabilisering med enbart kalk. Användningsområdet för kalkpelarmetoden kan sålunda utvidgas.
- Den i kalk-gipsstabiliserad lera bildade ettringiten är stabil endast vid höga pH-värden hos den stabiliserade jorden. Befintliga gränsvärden härför är osäkra. För att säkerställa ett högt pH-värde skall kalkhalten vara hög i kalk-gipsblandningen. Ett blandningsförhållande kalk/gips på 75/25 är därför lämpligast när långtidseffekt eftersträvas. Kalk-gipspelare för permanenta förstärkningar bör dock användas med försiktighet innan ytterligare kunskaper om beständigheten hos ettringiten erhållits. För att inte överskott av sulfatjoner, vilket kan ha skadlig inverkan på betongkonstruktioner, skall uppkomma bör mängden gips minimeras om risk finns för transport av joner genom vattenströmning i jorden. Blandningsförhållandet 75/25 är lämpligast även ur denna synpunkt. För temporära förstärkningar, då snabbast möjliga hållfasthetstillväxt önskas och risken för sulfatangrepp på betong ej finns alternativt beaktas, är blandningsförhållandet 50/50 lämpligast.
- Vid utförandet av kalk-gipspelarna har konstaterats praktiska svårigheter att erhålla önskat blandningsförhållande kalk/gips. En vidareutveckling behövs av utrustning för blandning av kalk och gips på arbetsplatser. Dessutom behövs en viss förbättring av utmatnings- och blandningsmekanismen hos kalkpelarmaskinen för att erhålla mer homogena kalk-gipspelare.

REFERENSER

HoIm, G., Åhnberg, H., 1984. Kalkpelarförstärkning för vägbankar. SGI projekt 1-348/83 till Vägverket 1984.

HoIm, G., Åhnberg, H., Holmkvist, L., 1984. Kalkpelarmetoden - försök med större pelardiameter. Väg- och Vattenbyggaren nr 7-8 1984.

Åhnberg, H., HoIm, G., 1984. Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk- och cementstabiliserad jord. SGI rapport nr 30, 1984.

HoIm, G., Bredenberg, H., Broms, B., 1981. Lime column stabilization for light structures. Proc. 10th ICSMFE sid 687-694, Stockholm 1981.

Nieminen, P., 1979. Use of industrial By-products as Binders in Soil Stabilization. Proc. Nordiska geoteknikermötet Esbo 1979, sid 303-309.

Högberg, E., 1979. Kalkens betydelse i processförloppet. Kalkpelarseminarium KTH Stockholm 1979-11-27.

Sektion/borrhål Djup/nivå	Benämning enligt 1953 års system	Densitet ρ Um³	Vatten- kvot w %	Finleks- tal w _F %	Sensiti- viteten enl. konprov S _t	Skjuvhållfasthet (oreducerad) T _f kPa *)		Rek. korr. fakt. SGI	Jord- arts- för- kortn.	Övriga under- sök- ningar**)	Anm.
						Tryckprov	Konprov				
9/902 V21											
1,5-2,1 m	Brun, varvig lera, rostfläckig	1,60	77	90	7,9	16	30	0,9	v L		torrskorpetyyp
2,5-3,1	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,57	88	79	16	11	16		v L mj		störda varv o skikt
3,5-4,1	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,62	82	74	16	11	15		v L mj		sneda varv o skikt
4,5-5,1	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,62	78	69	17	11	14		v L mj		överburk:störda varv o skikt
5,5-6,1	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,57	93	84	15	~7	15	0,9	v L mj		
6,5-7,1	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,53	92	84	15	9,4	15	0,9	v L mj		störda varv o skikt
7,5-8,1	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,54	83	76	(15)	(13)	(15) ¹		v L mj		¹ Stor spridning
8,5-9,1	Grå, varvig, mjällig lera med mjälaskikt	1,82	44	36	(18)		(8,8) ¹		v mj L mj		T _{fu} =10-21 kPa ¹ Stor spridning T _{fu} =6,3-14 kPa
9/903 V18											
1,2-1,8	Gråbrun, varvig, mjällig lera med växtdelar	1,59	74	85	5,3	13	23	0,9	v mj L vx		torrskorpetyyp
1,5-2,1	Gråbrun, varvig, mjällig lera med tunna mjälaskikt	1,57	84	85	11	10	21	0,9	v mj L (mj)		
2,5-3,1	Grå, varvig lera med enst mjälaskikt	1,57	77	68	17	10	14		v L mj		
3,5-4,1	Grå, varvig lera med enst mjälaskikt	1,62	63	57	17	8,6	15		v L mj		delvis störda varv
4,5-5,1	Grå, varvig lera med enst mjälaskikt	1,54	83	74	17	10	14		v L mj		
5,5-6,1	Grå, varvig lera med enst mjälaskikt	1,57	80	72	16	11	14		v L mj		störda varv
6,5-7,1	Grå, varvig lera med tunna och enst tjocka mjälaskikt	1,54	94	83	15	8,4	14	0,9	v L mj		
7,5-8,1	Grå, varvig lera med tunna och enst tjocka mjälaskikt	1,57	95	87	16	(6,8)	17	0,9	v L mj		ev stort prov
8,5-9,1	Grå, varvig lera med tjocka mo- och mjälaskikt ~30-40 mm	1,92	47	42	(14)	(6,8)	(11) ¹		v L mj		fritt vatten ¹ Stor spridning T _{fu} =6,5-17 kPa

*) Understräckning av värden anger att skjuvhållfastheten bör reduceras. Rekommenderade korrektionsfaktorer anges i ledig kolumn eller i bilaga

1 kPa = 1 kN/m² ≈ 0,1 Mp/m²

Lediga kolumner är avsedda för resultat av specialundersökningar, t. ex. Atterbergs gränser, glödningningsförlust, kapillaritet, tjälfarlighet, permeabilitet.

**) Övriga undersökningar (se bilagor)
skj = direkta skjuvförsök
komp = kompressionsförsök
korn = kornfördelning

pac = packningsförsök

Kalkpelare med gipstillsets -
parallellförsök, E4 Silje - Pålkrög

PROVTAGNING VFB LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

datum 80-11

datum 80-11

GODKÄND den 80-12-02

Dnr 1-267/80

Kv

laboratorieförest.

RL/JR

Litena upprätnings c. llin.

Tabellnr. plansch. e. llin.

1

Sektion/borrhål Djup/nivå	Benämning enligt 1953 års system	Densitet ρ Vm ³	Vatten- kvot w %	Finleks- tal w _F %	Sensiti- viteten enl. konprov S _t	Skjuvhållfasthet (reducerad) τ_f kPa *		Rek. Jord- (CRS) korr. arts- M _L fakt. för- SGI kortn. kPa	Anm.
						Tryckprov	Konprov		
9/904 V15									
1,0-1,6 m	Gråbrun, varvig, mjällig lera, växt- delar	1,59	76	87	(5,6)	16	(29) ¹	0,9 v mj L vx	torrskorpetyp ¹ Stor spridning $\tau_{fu}=26-34$ kPa
2,0-2,6	Grå, varvig lera med tunna mjäla- skikt, växtdelar	1,58	81	74	14	9,5	14	v L 150 mj vx	störda varv och skikt
3,0-3,6	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,58	81	73	15	10	14	v L 200	
4,0-4,6	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,55	92	81	16	7,3	14	0,9 v L 170 mj	störda varv o skikt
5,0-5,6	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,54	87	77	17	9,7	12	v L 290 mj	
6,0-6,6	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,54	84	75	17	10	14	v L 160 mj	
7,0-7,6	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,56	73	65	17	5,2	14	v L 60 mj	
8,0-8,6	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,62	73	66	14	6,2	14	v L mj	
9/906 V10									
1,0-1,6	Gråbrun, varvig lera med växtdelar	1,59	72	79	9,3	13	24	v L vx	torrskorpetyp
2,0-2,6	Grå, varvig lera med mjälaskikt och växtdelar	1,55	83	75	14	10	13	v L mj vx	
3,0-3,6	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,55	75	66	20	10	14	v L mj	
4,0-4,6	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,56	70	61	20	11	12	v L mj	
5,0-5,6	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,56	78	70	16	7,6	13	v L mj	sneda skikt o varv
6,0-6,6	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,56	79	71	15	12	13	v L mj	
7,0-7,6	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,56	79	72	21	6,8	20	v L mj	
8,0-8,6	Grå, varvig lera med mjälaskikt	1,69	61	55	(19)	(4)	(14) ¹	v L mj	¹ Stor spridning $\tau_{fu}=5,5-16$ kPa

* Understreckning av värden anger att skjuvhållfastheten bör reduceras. Rekommenderade korrektionsfaktorer anges i lodrig kolumn eller i bitaga

Lediga kolumner är avsedda för resultat av specialundersökningar t. ex. Altobergs gränser, glödningstförlust, kapillaritet, tjälfärdighet, permeabilitet.

** Övriga undersökningar (se bilagor)

skj = direkta skjuvförsök
komp = kompressionsförsök

pac = packningsförsök

PROVTAGNING
datum 80-11
PROVTAGNINGSPREDSKAP
KV

VFB
LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
datum 80-11
GÖDKÄND DEN 80-12-02
RL/JR

laboratorieföretag
Littera, upprätnings e. lkn
Dnr 1-287/80

Tabellnr, planschnr e. lkn.

Kalkpelare med gipstillsets -
parallellförsök, F4 Sille - Palkrog

Sektion/borrhål Djup/nivå	Benämning enligt 1953 års system	Densitet Q t/m ³	Vatten- kvot w %	Finlekt- tal w _F %	Sensiti- viteten enl. konprov S _t	Skjuvhållfasthet (oreducerad) τ _f kPa *)		Jord- arts- för- kortn.	Övriga under- sök- ningar**)	Anm.
						Tryckprov	Konprov			
Bh 1										
1,0 m	Brun torv	0,99	364				33	T		
2,0	Grågrön gyttja	1,13	213	247	3,5	9,4	10	G		φ fyller dåligt
3,0	Grå, varvig lera med tunna mjälaskikt	1,62	65	58	(10)	3,2	(7,9)*	v L(mj)		*Stor spridning τ _{fu} =6,6-9,6 kPa
4,0	Grå, varvig lera med tunna mjälaskikt, sulfidfläckig	1,68	55	51	14	7,0	14	v L(mj)		
5,0	Kontakt: Grå, varvig lera med tunna mjälaskikt/Grå, moig lera	1,89						v L(mj)/m L		
			45	44	16		14	v L(mj)		
			24				8,8	m L		
6,0	Grå, varvig lera med tunna mjälaskikt och enstaka grusinslag	1,67	59	53	17	6,2	13	v L(mj)		Sneda varv och skikt
7,0	Grå, varvig lera med tunna mo- och mjälaskikt	1,71	45	41	16	7,2	14	v L(m) (mj)		Störda varv och skikt
8,0	Grå, varvig lera	1,69	62	58	14	11	15	v L		
Bh 2										
1,5 m	Brun, något dyig torv	0,98	596		4,0		19	(dy)T		
2,5	Grå, varvig lera med enstaka tunna mjälaskikt	1,55	74	54	16	4,4	7,0	v L		Störda varv och skikt
3,5	Grå, varvig lera med tunna mjälaskikt, sulfidfläckig	1,64	63	56	(12)	4,4	(8,0)*	v L(mj)		*Stor spridning τ _{fu} =7,9-10 kPa
4,5	Grå, varvig lera med tunna mjälaskikt, sulfidfläckig	1,68	61	55	16	8,4	14	v L(mj)		Störda varv och skikt
5,5	Grå, moig lera	2,13	19	18	(12)	10	(12)*	m L		Sneda varv och skikt
6,5	Grå, varvig lera med tunna mjälaskikt, sulfidfläckig	1,68	53	48	17	10	14	v L(mj)		1 st flinta 16 *Stor spridning τ _{fu} =10-14 kPa
7,5	Grå, varvig lera med tunna mo- och mjälaskikt	1,70	65	60	15	10	14	v L(m) (mj)		Störda varv och skikt
8,5	Grå, varvig lera med moinslag	1,69	57	52	16	11	15	v L		Störda varv

*) Understreckning av värden anger att skjuvhållfastheten bör reduceras. Rekommenderade korrektionsfaktorer anges i ledig kolumn eller i bilaga

1 kPa = 1 kN/m² ≈ 0,1 Mp/m²

Lediga kolumner är avsedda för resultat av specialundersökningar, t. ex. Atterbergs gränser, glödgningsförlust, kapillaritet, tjälfarlighet, permabilitet.

**) Övriga undersökningar (se bilagor)

skj = direkta skjuvförsök
komp = kompressionsförsök
korn = kornfördelning

pac = packningsförsök

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT

51

SAMMANSTÄLLNING AV
LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

BILAGA

PROVTAJNING
datum 82-10-07
PROVTAJNINGSSERIESKAP
Kyv

LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
datum 82-11
GÖDKÄND den 82-11-02
Laboratorieförest.
LFN

Literna, upprädnings- e. likn.
Dnr 1-287/80
Tabeller, planscher e. likn.

3

Projekt
Kalkpelare med gipstillsets-
parallellförsök, Ståket

Sektion/borrhål Djup/nivå	Benämning enligt 1953 års system	Densitet ρ Vm ³	Vatten- kvot w %	Finleks- tal w _F %	Sensiti- viteten enl. konprov S _t	Skjuvhållfasthet (oreducerad) τ_f kPa *)		Jord- arts- för- kortn.	Övriga under- sök- ningar**)	Anm.
						Tryckprov	Konprov			
Bh 2										
1,0 m öb	Kontakt: Brun dytorv med växtdelar/ Gröngrå, lerig gyttja med växtdelar/ Grå sand med träbitar		172							
mb	Kontakt: Grå sand med träbitar/ Grå lera med moinslag	(1,70)	63	49	8,7	(2,8)	6,2	S/L		ø fyller dåligt
2,0 mb	Grå, varvig lera med sand- och grus- inslag, sulfidfläckig	1,60	88	56	(11)	4,0	(5,8)*	v L		Störda varv *Stor spridning $\tau_{fu}=5,0-6,9$ kPa
öb	Grå, varvig lera med enstaka sand- skikt, ~30 mm							v L(s)		
3,0	Grå, varvig lera med tunna mjälä- skikt, moinslag	1,70	55	48	12	5,2	8,8	v L(mj)		Störda varv och skikt
4,0	Brungrå, varvig lera med mjälaskikt, sulfidfläckig	1,65	60	46	13	5,2	7,9	v L mj		Störda varv och skikt
5,0	Brungrå, varvig lera med mjälaskikt, sulfidrandig	1,72	43	32	20	4,0	9,2	v L mj		Störda varv och skikt

*) Underströkning av värden anger att skjuvhållfastheten bör reduceras. Rekommenderade korrektionsfaktorer anges i ledig kolumn eller i bilaga

Lediga kolumner är avsedda för resultat av specialundersökningar, t. ex. Atterbergs gränser, glödningsförlust, kapillaritet, tjälfarlighet, permabilitet.

**) Övriga undersökningar (se bilagor)

skj = direkta skjuvförsök
komp = kompressionsförsök

pac = packningsförsök

4

Kalkpelare med gipstillsats -
parallellförsök, Täby

PROVTAJNING

datum 82-11-23

PROVTAJNINGSPROJEKT

LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

datum 82-12

GODKÄND DEN 82-12-09

laboratorieförest.

L.F.N.

Littera, uppdragsnr e. likn.

Dnr 1-287/80

Tabellnr, plansch nr e. likn.

Sektion/borrhål Djup/nivå	Benämning	Densitet Q t/m ³	Vatten- kvot w %	Finleks- tal WF %	Skjuvhållfasthet (oreducerad) τ _f kPa *)		w _p %	(CRS) M _L kPa	Övriga under- sök- ningar**)	Anm.
					OM- rört	Tryckprov Konprov				
Blandning	<u>före kalk/gipsinblandning</u>									
A.	9/902 V21 1,5-2,1, 2,5-3,1, 3,5-4,1		76	70	1,07		26			¹ Stor spridning
	<u>efter inblandning 17 kg/m, 50% kalk/50% gips</u>									
	1 dygn	1,56	68	128		31 67	68			
	9 dygn	1,57	66	127		88 250	69			
	30 dygn	1,57	67	118		132 510	74			
	~135 dygn	1,55	66	116		188 640 ¹	73	25250*		*90 dygn ¹ τ _{fu} =510-1000 kPa
	~360 dygn	1,56	67	117		186 756 ¹	73	31500		¹ τ _{fu} =346-1108 kPa ¹ τ _{fu} =694-907 kPa
	624 dygn	1,55	66	115		360 826 ¹				¹ τ _{fu} =510-826 kPa
	1082 dygn	1,56	67	110		255 591 ¹	75			
	<u>före kalk/gipsinblandning</u>									
B.	9/902 V21 4,5-5,1, 5,5-6,1, 6,5-7,1		83	73	0,700		27			
	<u>efter inblandning 17 kg/m 50% kalk/50% gips</u>									
	1 dygn	1,53	74	123		14 34	66			
	9 dygn	1,52	73	127		52 123	66			
	30 dygn	1,53	73	129		110 444	76			
	~135 dygn	1,52	74	117		136 640 ¹	76	16250*		*90 dygn ¹ τ _{fu} =475-1000 kPa
	~360 dygn	1,51	73	121		144 756 ¹	77	22500		¹ τ _{fu} =591-907 kPa ¹ τ _{fu} =640-1000 kPa
	624 dygn	1,52	72	122		216 756 ¹				¹ τ _{fu} =510-591 kPa
	1082 dygn	1,52	72	120		260 548 ¹	81			

*) Underströkning av värden anger att skjuvhållfastheten bör reduceras. Rekommenderade korrektionsfaktorer anges i lediga rutor eller i bilaga 1
1 kPa = 1 kN/m² ≈ 0,1 Mp/m²

Lediga kolumner är avsedda för resultat av specialundersökningar, t. ex. Alterbergs gränser, glödgningsförlust, kapillaritet, tjälfarlighet, permeabilitet.

**) Övriga undersökningar (se bilaga)
skj = direkta skjuvförsök
komp = kompressionsförsök
korn = kornfördelning
pac = packningsförsök

5

Sektion/borrhål Djup/nivå	Benämning	Densitet ρ U/m ³	Vatten- kvot w %	Finleks- tal w _F %	Skjuvhållfasthet (oreducerad)		w _D %	(CRS) M _L kPa	Övriga under- sök- ningar**)	Anm.	PROVTAGNING datum PROVTAGNINGSSKEDSKAP	LABORATORIEUNDERSKÖKNINGAR datum GODKÄND den	Laboratoriereferens: LFN/JR	Littera. uppräkningsnr e. likn.	Dnr 1-287/80	SAMMANSTÄLLNING AV LABORATORIEUNDERSKÖKNINGAR	Projekt Kalkpelare med gipstillrats - parallellförsök, E4 Sille - Pilkrög
					Skjuvhållfasthet (oreducerad)												
					Om- rört	Tryckprov Konprov											
Blandning <u>C.</u>	före kalk/gipsinblandning																
	9/903 1,5-2,1, 2,5-3,1, 3,5-4,1		79	69	0,700				27								
	efter inblandning 17 kg/m, 67% kalk/33% gips																
	1 dygn	1,56	69	120		24	49	58									
	8 dygn	1,56	68	113		52	160	66									
	29 dygn	1,55	69	119		84	416	72									
	~135 dygn	1,53	69	117		136	826 ¹	74	18330*								
~360 dygn	1,55	69	113		292	907 ¹	75	30250									
1082 dygn	1,55	66	109		645	826 ¹	78										
<u>D.</u>	före kalk/gipsinblandning																
	9/903 V18 4,5-5,1, 5,5-6,1, 6,5-7,1		84	73	0,715				28								
	efter inblandning 17 kg/m, 67% kalk/33% gips																
	1 dygn	1,52	73	124		20	36	59									
	8 dygn	1,54	71	121		45	142	66									
	29 dygn	1,53	72	114		80	510	75									
	~135 dygn	1,53	72	107		149	694 ¹	80	19500*								
~360 dygn	1,52	71	112		216	826 ¹	80	30500									
623 dygn	1,53	70	117		316	826 ¹											
1082 dygn	1,52	70	114		335	907 ¹	82										

*; Underströkning av värden anger att skjuvhållfastheten bör reduceras. Rekommenderade korrektionsfaktorer anges i ledig kolumn eller i bilaga

Lediga kolumner är avsedda för resultat av specialundersökningar, t. ex. Atterbergs gränser, glödningsförlust, kapillaritet, tjälfarlighet, permeabilitet.

** Övriga undersökningar (se bilagor)
skj = direkta skjuvförsök
komp = kompressionsförsök

pac = packningsförsök

Sektion/borrhål Djup/nivå	Benämning	Densitet ρ t/m ³	Vatten- kvot w %	Finleks- tal w _F %	Skjuvhållfasthet (reducerad τ_f kPa *)		w _p %	(CRS) M _L kPa	Övriga under- sök- ningar**)	Anm.
					om- rört	Tryckprov				
Blandning E.	före kalk/gipsinblandning									
	9/904 V15 2,0-2,6, 3,0-3,6, 4,0-4,6		81	71	0,700					¹ Stor spridning
	efter inblandning 17 kg/m, 75% kalk/25% gips									¹ τ_{fu} =40-50 kPa
	1 dygn	1,56	70	124		23	45 ¹	68		
	8 dygn	1,55	69	124		42	142	67		
	29 dygn	1,56	69	113		72	308	70		
~135 dygn	1,54	68	111		185	591 ¹	76	14875*	* 88 dygn ¹ τ_{fu} =444-1000 kPa	
~360 dygn	1,54	68	119		296	640 ¹	76	22000	¹ τ_{fu} =367-694 kPa	
1082 dygn	1,55	67	110		422	756 ¹	77		¹ τ_{fu} =640-1000 kPa	
F.	före kalk/gipsinblandning									
	9/904 V15 5,0-5,6, 6,0-6,6, 7,0-7,6		86	75	0,700					
	efter inblandning 17 kg/m, 75% kalk/25% gips									
	1 dygn	1,52	74	130		20	42	60		
	7 dygn	1,53	73	128		33	118	70		
	28 dygn	1,53	73	122		52	292	76		
~135 dygn	1,51	73	115		184	694 ¹	81	17700*	* 112 dygn ¹ τ_{fu} =475-1000 kPa	
~360 dygn	1,51	74	125		248	756 ¹	81	22000	¹ τ_{fu} =640-1108 kPa	
1082 dygn	1,52	72	127		467	826 ¹	81		¹ τ_{fu} =548-1562 kPa	

* Underströkning av värden anger att skjuvhållfastheten bör reduceras. Rekommenderade korrektionsfaktorer anges i ledig kolumn eller i bilaga

1 kPa = 1 kN/m² ≈ 0,1 Mp/m²

Lediga kolumner är avsedda för resultat av specialundersökningar, t. ex. Alterbergs gränser, gödningsförlust, kapillaritet, tjälfarlighet, permeabilitet.

** Övriga undersökningar (se bilagor)

skj = direkta skjuvförsök
komp = kompressionsförsök
korn = kornfördehnig

pac = packningsförsök

7

PROVTAGNING

LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

datum

datum

Kalkpelare med gipstillnads-
parallellförsök, E4 Sille - Pålkrög

PROVTAGNINGSPREDSKAP

GÖDKÄND DEN

Dnr 1-287/80

Laboratorieförst. LEF/JR

Littera, uppräpnar e. likn.

Tabeller, planschir e. likn.

Sektion/borrhål Djup/nivå	Benämning	Densitet ρ t/m ³	Vatten- kvot w %	Finleks- tal w _F %	Skjuvhållfasthet (oreducerad T _f kPa *)		w _p %	(CRS) M _L kPa	Övriga under- sök- ningar**)	Anm.
					Oml- rört	Tryckprov Konprov				
G.	Blandning före kalk/gipstillsats									
	9/906 V10 2,0-2,6, 3,0-3,6, 4,0-4,6		80	66	0,600		28			¹ Stor spridning
	efter inblandning 17 kg/m, 100% kalk									
	1 dygn	1,53	65	112	19	35	59			
	9 dygn	1,56	66	106	24	47	53			
	30 dygn	1,54	67	105	32	84	57			
	~135 dygn	1,57	66	98	82	308 ¹	68	7300*		*112 dygn ¹ T _{fu} =250-444 kPa
	~360 dygn	1,57	65	105	196	591 ¹	72	16125		¹ T _{fu} =510-756 kPa
	624 dygn	1,56	64	112	344	826 ¹				¹ T _{fu} =640-1234 kPa
	1082 dygn	1,54	64	105	587	826 ¹	74			¹ T _{fu} =640-1384 kPa
H.	före kalk/gipsinblandning									
	9/906 V10 5,0-5,6, 6,0-6,6, 7,0-7,6		85	67	0,610		27			
	efter inblandning 17 kg/m, 100% kalk									
	1 dygn	1,54	71	113	17	30	55			håligheter
	8 dygn	1,55	70	113	22	50	56			
	30 dygn	1,54	71	107	31	111	64			
	~135 dygn	1,56	70	107	88	346 ¹	73	8600*		*112 dygn ¹ T _{fu} =250-444 kPa
	~360 dygn	1,53	70	102	244	510 ¹	76	32500		¹ T _{fu} =444-694 kPa
	623 dygn	1,52	69	112	276	756 ¹				¹ T _{fu} =640-1000 kPa
	1082 dygn	1,51	68	110	435	694 ¹	75			¹ T _{fu} =475-1000 kPa

*) Understreckning av värden anger att skjuvhållfastheten bör reduceras. Rekommenderade korrektionsfaktorer anges i ledig kolumn eller i bilaga

1 kPa = 1 kN/m² = 0,1 Mp/m²

Lediga kolumner är avsedda för resultat av specialundersökningar, t. ex. Atterbergs gransar, glädgningsförlust, kapillaritet, tjälfarlighet, permeabilitet.

**) Övriga undersökningar (se bilagor)

skj = direkta skjuvförsök
komp = kompressionsförsök
korn = kornfördelning
pac = packningsförsök

Provtagning
PROVTAJNINGSGREDSKAP
LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
Projekt
LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
SAMMANSTÄLLNING AV
LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
Kalkpelare med gipstillsats -
parallellförsök, E4 Sille - Piltrogg
Dnr 1-287/80
Laboratorieföretag
L.Pn./J.R.
Littera. uppgifter e. likn.
Tabeller, figurer e. likn.
8

Sektion/borrhål Djup/nivå	Benämning	Densitet ρ t/m ³	Vatten- kvot w %	Finleks- tal w _F %	Sensiti- vitet enl. konprov S _t	Skjuvhållfasthet (oreducerad) τ_f kPa *)		(CRS) M _L kPa	Övriga undersök- ningar**)	Anm. Spridning på konförsöken	PROVTAJNING	LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
						Tryckprov	Konprov				PROVTAJNINGSDREDSKAP	LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
Laboratorieresultat från kalk-gipspelare, 220-260 dygn efter pelarinstallation												
1,5-2,0	50% kalk + 50% gips, 17 kg/m	1,58	63	120		26	147	12400		T _{fu} =111-237 kPa		
"	"	1,49	64	107		-	123			62-1000		
"	"	1,52	64	121		-	123			81-1000		
2,5-3,0	50% kalk + 50% gips, 17 kg/m	1,54	74	110		14	54	2300		34-160		
"	"	1,50	73	113		16	34			28-37		
"	"	1,48	72	109		24	84			62-89		
1,5	75% kalk + 25% gips, 17 kg/m	(1,43)	69	116		-	416	6200		118-1384		
"	"	1,54	68	114		18	137			65-4000		
"	"	1,51	73	119		12	166			62-390		
"	"	1,52	71	110		12	206			67-510		
2,5	75% kalk + 25% gips, 17 kg/m	1,47	73	107		37	308	5700		160-475		
"	"	1,49	72	113		20	81			49-114		
"	"	1,50	75	115		20	111			48-416		
1,5-1,8	100% kalk, 17 kg/m	1,61	57	104		57	475	15600		250-1234		
"	"	1,59	57	100		56	510			181-1000		
"	"	1,61	53	94		65	390			250-1000		
2,6-3,0	100% kalk, 17 kg/m	1,50	71	104		-	277	19000		111-640		
"	"	1,49	68	115		34	262			114-1000		
"	"	1,45	66	103		34	390			262-475		

*) Understräckning av värden anger att skjuvhållfastheten bör reduceras. Rekommenderade korrektionsfaktorer angavs i ledig kolumn eller i bilaga

1 kPa = 1 kN/m² ≈ 0,1 Mp/m²

Lediga kolumner är avsedda för resultat av specialundersökningar, t. ex. Alterbergs gränser, glödningstförlust, kapillaritet, tjälfarlighet, permeabilitet.

**) Övriga undersökningar (se bilagor)

skj = direkta skjuvförsök pac = packningsförsök
komp = kompressionsförsök
korn = kornfördelning

Sektion/borrhål Djup/nivå	Benämning	Densitet ρ t/m ³	Vatten- kvot w %	Finlekt- tal w _F %	Sensiti- viteten enl. konprov S _t	Skjuvhållfasthet (oreducerad) τ_f kPa *)		w _p %	Övriga undersök- ningar**)	Anm. Spridning på konförsöken	PROVAVNING	LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
						Tryckprov	Konprov				datum	LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
Blandning L. (STÄKET)	före kalk/gipsblandning Bh 1 3,0-4,0 och 6,0-8,0 Bh 2 3,5-4,5 och 6,5-7,5 efter inblandning 13 kg/m, 67% kalk/33% gips		55	45				22			datum	LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
	1 dygn	1,70	49	88	41	71	44		$\tau_{fu} = 206-292$ kPa 292-416 367-475 367-548	GODKÄND den	LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR	
	23 dygn	1,72	48	89	108	250	51			82-12		
	43 dygn	1,71	49	86	128	346	-					
	93 dygn	1,71	49	88	264	416	-					
	366 dygn	1,71	48	88	340	444	52					
M. (TÄBY)	före kalk/gipsblandning Bh 1, 2 och 3 3,0-4,0 efter inblandning 20 kg/m, 67% kalk/33% gips		60,5								datum	LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
	1 dygn	1,66	52	82	38	45	39		$\tau_{fu} = 42-50$ kPa 89-111 86-367 262-475 548-826	GODKÄND den	LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR	
	20 dygn	1,65	51	92	62	97	43			82-12		
	44 dygn	1,68	51	97	96	173	47					
	98 dygn	1,66	51	93	200	346	53					
	338 dygn	1,66	52	90	277	640	56					

*) Underströkning av värden anger att skjuvhållfastheten bör reduceras. Rekommenderade korrektionsfaktorer anges i ledig kolumn eller i bilaga

1 kPa = 1 kN/m² \approx 0,1 Mp/m²

Lediga kolumner är avsedda för resultat av specialundersökningar, t. ex. Atterbergs gränser, glödgningsförlust, kapillaritet, tjälfarlighet, permeabilitet.

**) Övriga undersökningar (se bilagor)

skj = direkta skjuvförsök
komp = kompressionsförsök
korn = kornfördelning
pac = packningsförsök

Användning av kalk-flygaska vid djupstabilisering av jord

GÖRAN HOLM, HELEN ÅHNBERG

FÖRORD

Vid diskussioner inom Vattenfalls Kol-Hälsa-Miljö-projekt KHM initierades föreliggande utredning som syftar till klarläggande av möjligheterna att använda flygaska som tillsatsmedel vid kalkpelartillverkning. Projektet utformades som ett samverkansprojekt mellan KHM, Vägverket och Statens geotekniska institut (SGI). Installation av kalk-flygaskapelare bekostades av Linden Alimak AB och kalk och flygaska tillhandahölls av AB Cementsa, för vilket vi framför vårt tack.

Linköping i december 1983

Göran Holm

Helen Åhnberg

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid
SAMMANFATTNING	65
SUMMARY	66
1. INLEDNING	67
2. FÖRSÖK MED KALK-FLYGASKA SOM STABILISERINGSMEDEL	68
2.1 Typer av flygaska och kalk	69
2.2 Ursprunglig jord	69
2.3 Stabiliserad jord - laboratorieförsök	70
2.4 Stabiliserad jord - fältförsök	81
2.5 Slutsatser om kalk-flygaskastabilisering	83
3. SYNPUNKTER PÅ DIMENSIONERING	86
3.1 Blandningsförhållande kalk:flygaska	86
3.2 Egenskaper hos pelare	89
REFERENSER	

SAMMANFATTNING

Inblandning av stabiliseringsmedel bestående av kalk och flygaska i olika blandningsförhållanden har utförts på laboratorium i tre olika typer av jordar (lera, gyttjig lera och silt). I en av blandningarna användes 1% CaCl_2 som extra tillsatsmedel för lera.

Provpelare av kalk-flygkastabiliserad lera och gyttjig lera har tillverkats i fält. Totala mängder stabiliseringsmedel var 22 kg respektive 33 kg kalk-flygaska per meter pelare ($\varnothing 500$ mm) och blandningsförhållandet kalk:flygaska var 1:4.

De utförda inblandningsförsöken med kalk-flygaska visar på att möjligheter finns att utvidga det nuvarande användningsområdet för djupstabilisering med kalkpelarmetoden, också till jordar där enbart kalk som stabiliseringsmedel har otillräcklig effekt. En bättre effekt fås av inblandning av kalk-flygaska än av enbart kalk i organisk lera och silt. Det förhållandet att flygaskan i dag kan fås för ett betydligt lägre pris än kalken gör dessutom att kalk-flygaska kan utgöra ett billigare alternativ än enbart kalk även vid stabilisering av lera.

SUMMARY

Quick lime together with fly ash has been tested in laboratory as stabilizing agent for three types of soil (clay, clayey gyttja and silt). Different ratios of lime:fly ash were used. In one of the tests 1% CaCl_2 was used as an extra additive.

Test columns of lime-fly ash stabilized clay and clayey gyttja were installed in situ by the Swedish lime column method. The total amounts of stabilizing agent were 22 kg and 33 kg lime-fly ash per metre ($\varnothing 500$ mm-column) and the ratio lime:fly ash used was 1:4.

The results of the investigations with lime-fly ash as stabilizing agent indicate that it is possible to further widen the field of applications for the lime column method by using lime-fly ash mixtures. A better stabilizing effect can be obtained by using lime-fly ash instead of lime in organic soil and in silt. The fact that fly ash today is considerably cheaper than lime implies that lime-fly ash in some cases can provide a cheaper alternative than lime also in clay.

1. INLEDNING

I början av 1970-talet utvecklades i Sverige kalkpelarmetoden för djupstabilisering av lös lera. Denna metod innebär att pelare tillverkas in situ genom mekanisk inblandning av osläckt kalk i jorden. Kalkinblandningen medför en ökning av jordens skjuvhållfasthet samt en minskning av dess kompressibilitet. Kalkpelare utförs i dag (1983) med diametern 0,5 m och längden maximalt 15 m.

Erfarenheter från ett antal forskningsprojekt och ett stort antal praktiska tillämpningar av kalkpelarmetoden visar att stabilisering med kalk ofta är ekonomiskt och tekniskt fördelaktigt relativt andra grundförstärkningsalternativ då jorden utgörs av lera med vattenkvoter i intervallet 40-100%. För att utöka användningsområdet för djupstabilisering till att omfatta även organisk lera (där effekten av kalkinblandning oftast är dålig) organisk jord (där inte någon effekt erhålls alls) samt silt (där effekten också oftast är dålig) har forskning påbörjats vid SGI med andra material än enbart kalk som stabiliseringsmedel. Flygaska blandad med kalk i olika proportioner och även gips blandad med kalk, har använts som stabiliseringsmedel vid försök på några olika jordar.

Flygaska som är en restprodukt vid förbränning av kol har ofta tydligt puzzolana egenskaper, dvs den innehåller bl a kiselsyra som reagerar med kalk och vatten och binder ihop leraggregaten till en fast, vitteringsmotståndig produkt. Då flertalet leror i Sverige endast är svagt puzzolana, kan dessa förväntas reagera effektivare ur cementationssynpunkt om flygaska plus kalk tillsätts än om enbart kalk tillförs. Vid inblandning av kalk och flygaska i enbart vatten fås först en icke-kristallin gel vilken så småningom kristalliseras till kalciumsilikathydrat och kalciumaluminathydrat, en sammansättning liknande den som fås vid hydratering av cement. Flygaska som produceras i allt större mängder i Sverige men som nyttiggörs bara till en mindre del, betingar ett lågt pris på marknaden jämfört med kalk - 5 à 10% av kalkpriset i dag (1983).

De försök med andra stabiliseringsmedel än kalk som utförts vid institutet har pågått under som mest tre år (1983). I rapporten ges en be-

skrivning av hittills framkomna resultat av forskningen rörande kalk-flygaska som stabiliseringsmedel.

En litteraturstudie av möjligheten att använda kalk-flygaska som stabiliseringsmedel i lera och silt har tidigare utförts (Holm & Åhnberg, 1981).

2. FÖRSÖK MED KALK-FLYGASKA SOM STABILISERINGSMEDEL

Litteraturstudien av tidigare rapporterade försök där flygaska använts för stabilisering av lösa jordar, såsom lera, silt och organisk jord, visade att resultaten av dessa utländska försök inte direkt kunde överföras till svenska förhållanden för djupstabilisering. Oftast har syftet med försöken varit att uppnå god effekt vid ytstabilisering av jord. Den stabiliserade jorden har t ex packats enligt Standard Proctor vilket inte motsvarar den betydligt mindre packning som fås i fält vid djupstabilisering med kalkpelarmaskin. Inblandning av stabiliseringsmedel har skett efter torkning av jorden vilken inte heller återspeglar förhållandena för kalkpelare. Dessutom har de rapporterade stabiliseringsförsöken huvudsakligen utförts på betydligt fastare leror än de aktuella svenska, lösa lerorna. Undersökningsresultaten tyder dock på att kalk-flygaskastabilisering av lös svensk jord med befintlig djupstabiliseringsteknik borde ge relativt god effekt och vara konkurrenskraftig gentemot ren kalkstabilisering. Inblandning av kalk-flygaska i lera och silt gav som regel en ökad hållfasthet, en lägre flytgräns, en högre plasticitetsgräns, minskad svällningsbenägenhet samt ett förhöjd pH-värde (Holm & Åhnberg, 1981).

Efter litteraturstudien inleddes försök med kalk-flygaskastabiliserad jord dels i laboratoriet på SGI och dels i fält vid en försöksplats i Torrekulla strax söder om Göteborg. Tre olika jordar, lera och gyttjig lera från Torrekulla samt silt från Borlänge användes för försöken i laboratoriet. I Torrekulla installerades tolv provpelare i jordlagren av lera och gyttjig lera. Som stabiliseringsmedel användes kalk-flygaska med varierande proportioner. För siltjorden utfördes även inblandning av enbart kalk i olika halter.

I Torrekulla hade tidigare i samband med ett vägprojekt installerats kalkpelare och utförts laboratorieförsök med kalkinblandning i lera och organisk jord varför jämförelser kunde göras med dessa tidigare försök vad gällde effekten av enbart kalk som stabiliseringsmedel.

2.1 Typer av flygaska och kalk

Endast en flygaska användes för försöken. Den kom från kolkraftverket i Västerås där den bildats vid förbränning av ryskt kol. Flygaskans ungefärliga sammansättning framgår av Tabell 1.

Kalken som användes var osläckt kalk från Köping. Den var hårdbränd med en CaO-halt >80%. Kornstorleken var 0-0,2 mm och dess flytbarhet ≥70.

TABELL 1. Flygaskans sammansättning

Flygaska från Västerås	%
CaO(tot)	6,0
SiO ₂	56,4
Al ₂ O ₃	18,5
Fe ₂ O ₃	6,1
K ₂ O	1,1
Na ₂ O	0,9
MgO	2,7
SO ₃	0,5
fri kalk	1,4
restkolhalt	7,0
spårelement *	0,0
spec yta (m ² /kg)	644
siktrest > 45 m	22

* tungmetaller

2.2 Ursprunglig jord

Ursprunglig jord utgjordes av lera, gyttjig lera-lerig gyttja och silt. De två förstnämnda jordarna kom från Torrekulla utanför Göteborg medan silten kom från Tunaslätten utanför Borlänge. Jordarnas geotekniska egenskaper finns närmare beskrivna i Tabell 2.

TABELL 2. Beskrivning av ursprunglig jord.

Jord	Grå sulfidfläckig lera med snäckskal	Gröngrå gyttjig lera - lerig gyttja med växt-delar	Grå lerig silt
Djup	5-10 m	1,2-2 m	1-2 m
Densitet	1,55 t/m ³	1,40 t/m ³	1,93 t/m ³
Vattenkvot w_N	84%	97%	29%
Flytgräns w_L	50%	150%	27%
Plasticitetsgräns w_p	33%	47%	19%
Sensitivitet S_t	>230	9%	
pH	8,2	5,4	8,1
Skjuvhållfasthet τ_f (konförsök)	14 kPa	13 kPa	≈60 kPa
Skjuvhållfasthet τ_f (tryckförsök)	17 kPa	17 kPa	
kompressionsmodul M_L	200-350 kPa	250 kPa	(≈4500 kPa)
förkonsolideringstr. σ'_c	50-65 kPa	40 kPa	(≈ 40 kPa)

2.3 Stabiliserad jord - laboratorieförsök

Inblandning av stabiliseringsmedel gjordes med 3 olika förhållanden kalk:flygaska, nämligen 1:2, 1:4 och 1:8. Den totala mängden kalk-flygaska valdes olika för de olika jordarna med 2 olika mängder för varje jord. Dessutom användes 1% CaCl₂ som extra tillsatsmedel i en av blandningarna. Försök med inblandning av CaCl₂ har tidigare utförts och rapporterats ge god effekt vid tillsats av lägre halter (Holm & Åhnberg, 1981). Valda blandningsförhållanden framgår av Tabell 3 där även mängden kalk i de parallella kalkinblandningsförsöken redovisas.

TABELL 3. Inblandningsförhållanden

Jord	Tot mängd, % av torr vikt		Blandnings- förhållande kalk:flygaska	Extra till- satsmedel
	kalk-flygaska	kalk		
Lera	15		1:2, 1:4, 1:8	
	25		1:2, 1:4, 1:8	
	15		1:4	1% CaCl ₂
		9	-	
Gyttjig lera	20		1:2	
	30		1:2	
		11	-	
Silt	10		1:2, 1:4, 1:8	
	20		1:2, 1:4, 1:8	
		5	-	
		10	-	

Inblandade prover lagrades vid temperatur av ca +8°C, dvs ungefär marktemperatur. Laboratorieundersökningar utfördes vid 5 olika tidpunkter under ca ett års tid.

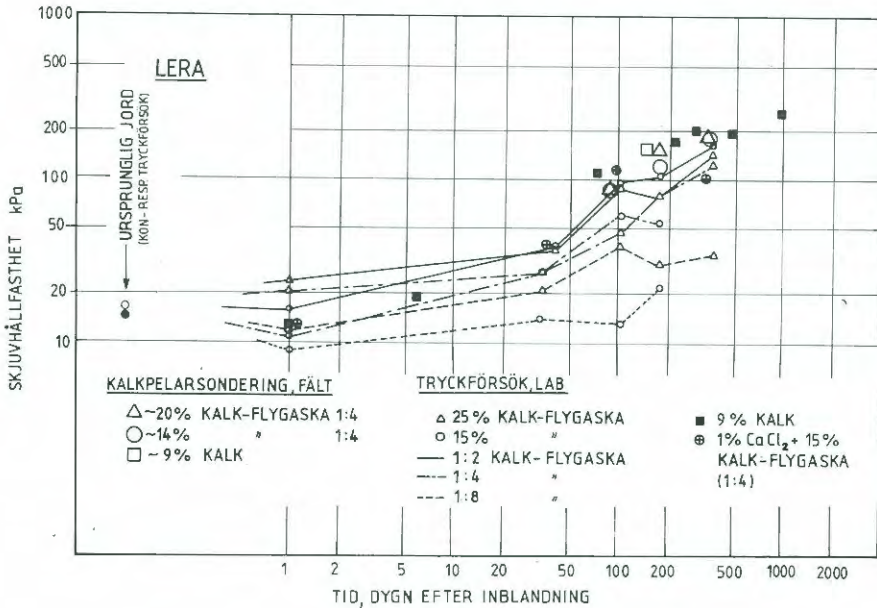
Proverna undersöktes med avseende på densitet, vattenkvot, flytgräns samt skjuvhållfasthet enligt konförsök och enligt enaxligt tryckförsök vid samtliga tillfällen. Dessutom utfördes vid två à tre tillfällen bestämning av plasticitetsgräns, sensitivitet och pH samt bedömning av provernas kompressionsegenskaper genom ödometerförsök.

Skjuvhållfasthet

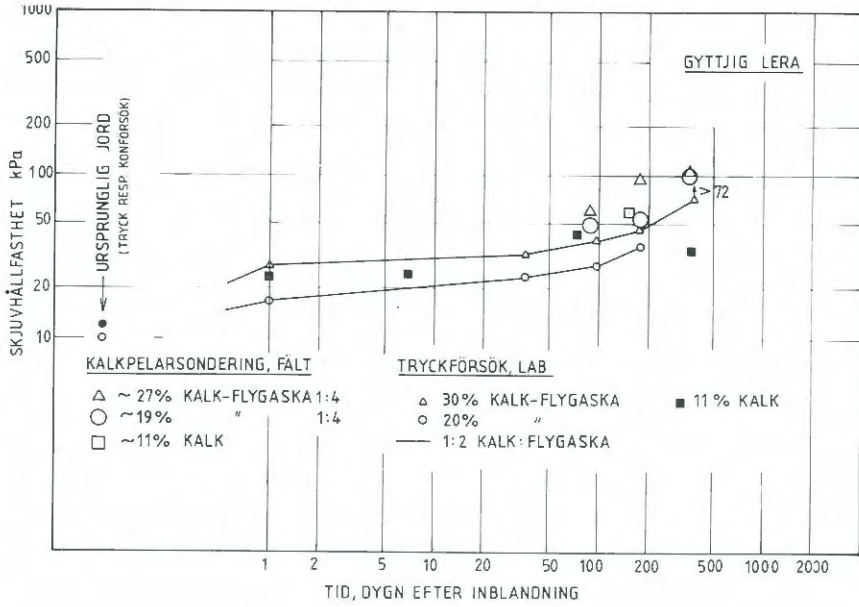
De olika blandningarnas skjuvhållfasthet som funktion av tiden efter inblandning finns uppritade i Figur 1.

Resultaten av undersökningarna visar på en relativt god effekt av kalk-flygaskainblandning på alla tre jordarna. Skjuvhållfasthetstillväxten är ungefär densamma som vid ren kalkinblandning - något sämre för leran och något bättre framför allt för silten men även för den gyttjiga leran.

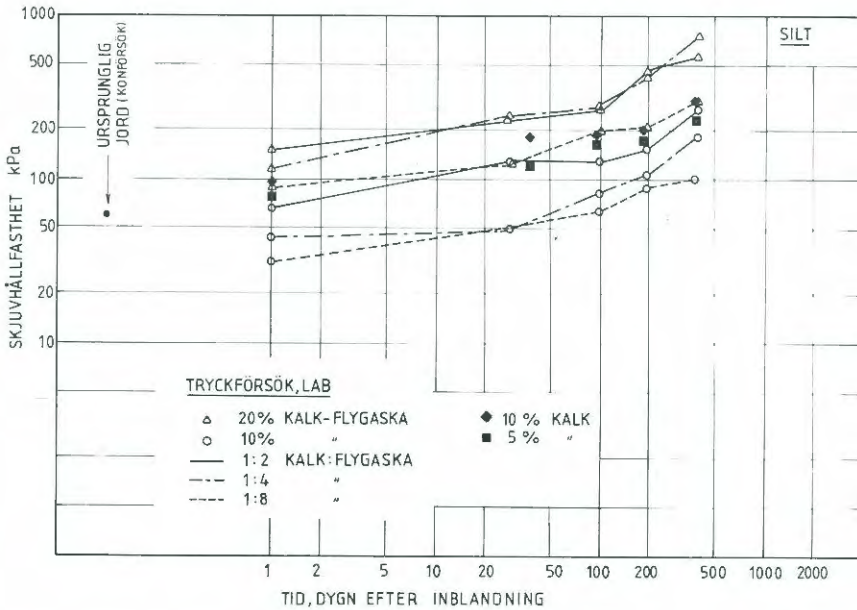
Skjuvhållfastheten 3 månader och 1 år efter inblandning i lera var ca 100 kPa respektive 200 kPa vid stabilisering med endast kalk. Motsvarande värden för kalk-flygaska var ca 90 kPa respektive 150 kPa vid blandningsförhållandet 1:2 (kalk:flygaska). Sämst effekt erhöles för blandningsförhållandet 1:8 vilket gav endast ca 20 kPa och ca 30 kPa i skjuvhållfasthet 3 månader respektive 1 år efter inblandning. Den gyttjiga leran hade vid stabilisering med endast kalk en hållfasthet av ca 40 kPa både 3 månader och 1 år efter inblandning. Stabilisering med kalk-flygaska i proportionen 1:2 gav ungefär samma skjuvhållfasthet som kalk fram till ca 6 månaders ålder. 1 år efter inblandning var dock hållfastheten högre än 70 kPa vilket var högre än vid ren kalkstabilisering.



a) stabiliserad lera

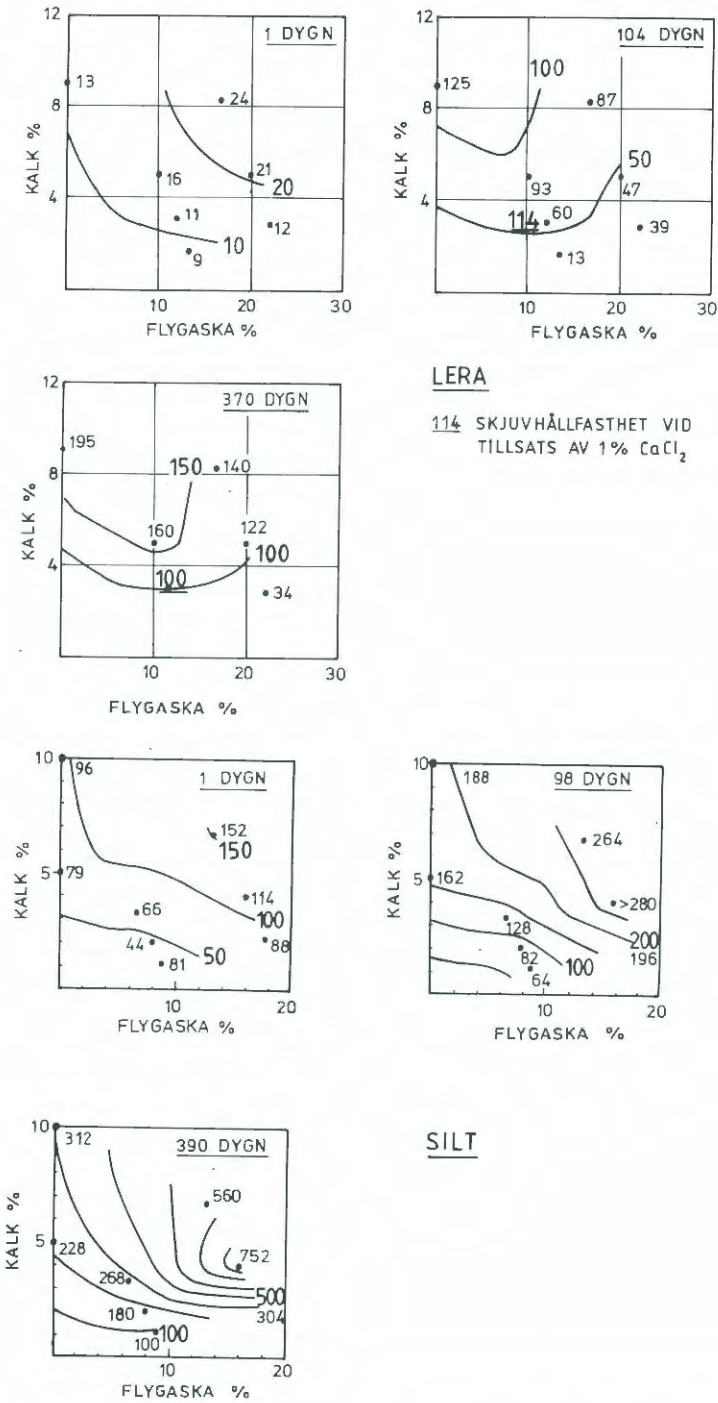


b) stabiliserad gyttjig lera



c) stabiliserad silt

FIGUR 1. Skjuvhållfasthet hos stabiliserad lera, gyttjig lera och silt.



FIGUR 2. Skjuvhållfasthet (kPa) för stabiliserad lera respektive silt vid varierande tillsatser av kalk och flygaska.

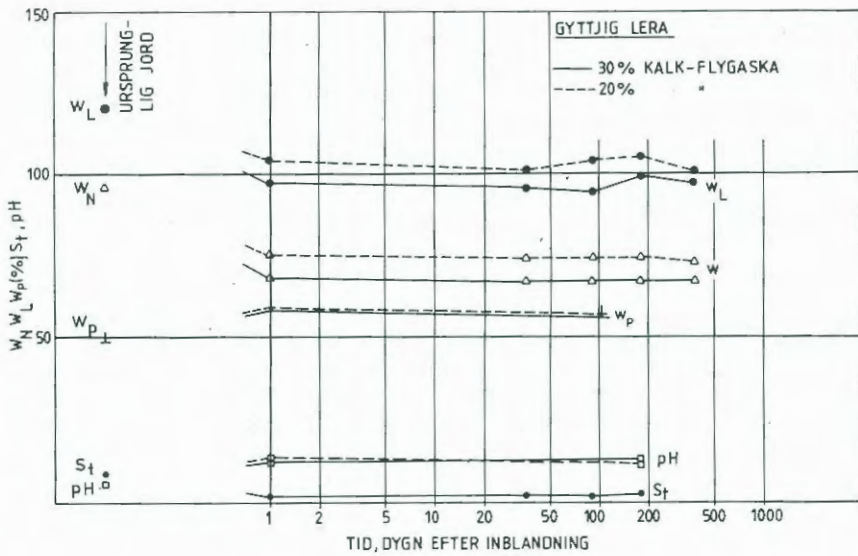
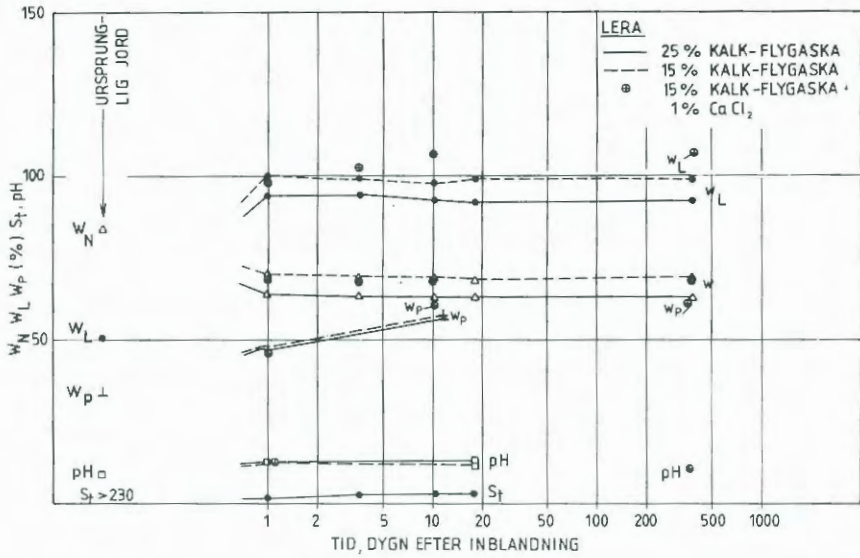
Silten hade skjuvhållfastheten ca 180 kPa och ca 300 kPa vid stabilisering med ren kalk 3 månader respektive 1 år efter inblandning. Kalk-flygaskastabilisering gav som mest ca 280 kPa och ca 700 kPa vid motsvarande tider efter inblandning. Effekten minskade med minskad mängd kalk-flygaska. Sämst värden, ca 60 kPa och ca 100 kPa 3 månader respektive 1 år efter inblandning erhöles för den mindre totala mängden kalk-flygaska vid blandningsförhållandet 1:8.

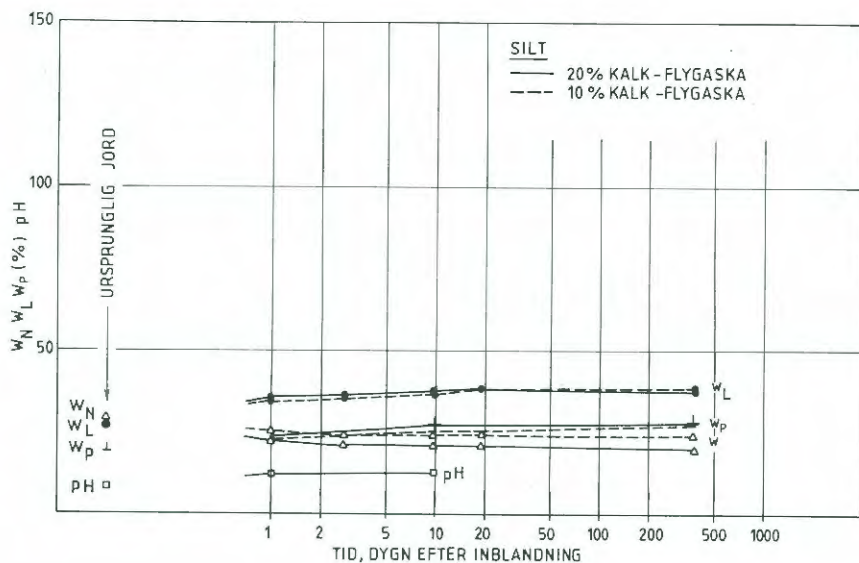
Den extra tillsatsen av 1% CaCl_2 visade sig ge en mycket god effekt vad gällde den stabiliserade lerans egenskaper främst under de första sex månaderna. En månad efter inblandning var skjuvhållfastheten 50% högre än för motsvarande blandning utan tillsats av CaCl_2 och sex månader efter inblandning var den dubbelt så hög.

Optimal kalk- och flygaskahalt kan uppskattas genom att rita hållfasthetskonturer i diagram med kalk- och flygaskamängder redovisade på vertikala respektive horisontella axeln. Figur 2 visar hållfasthetskonturer för stabiliserad lera och stabiliserad silt. Bästa blandningsförhållande när det gäller leran förefaller vara 1:2 à 1:3 med en kalkhalt av 3-5% eller mer och en flygaskahalt av 5-12%. För silt är bästa blandningsförhållande 1:4 à 1:5 med en kalkhalt av ca 4% och en flygaskahalt av 15-20%.

Vattenkvot, flytgräns m m

Vattenkvot, flytgräns, plasticitetsgräns, sensitivitet och pH-värde hos jorden påverkades alla av inblandningen av stabiliseringsmedel. I Figur 3 har medelvärdena av varje parameter för de två inblandningsmängderna i respektive jordar ritats in. För leran gäller att en viss skillnad föreligger i flytgräns och plasticitetsgräns för prover vid olika blandningsförhållande kalk:flygaska på så sätt att dessa gränser minskar något med ökande mängd flygaska. Övriga parametrar uppvisar endast obetydliga skillnader. För silten har endast obetydliga skillnader erhållits för samtliga parameterar.



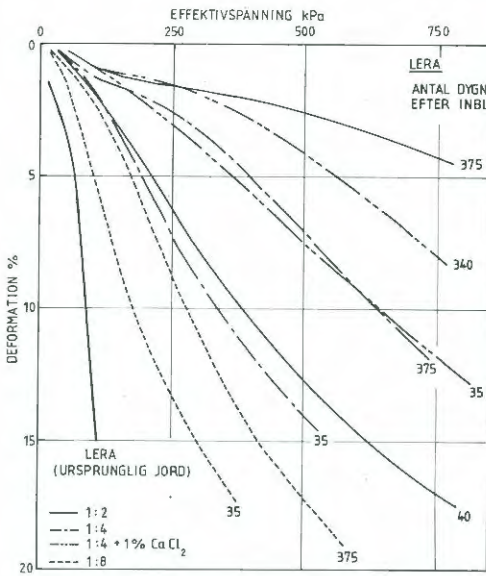


FIGUR 3. Inverkan av inblandning med kalk-flygaska på vattenkvot w , flytgräns w_L , plasticitetsgräns w_p , sensitivitet S_t och pH för leran, gyttjiga leran och silten (medelvärden).

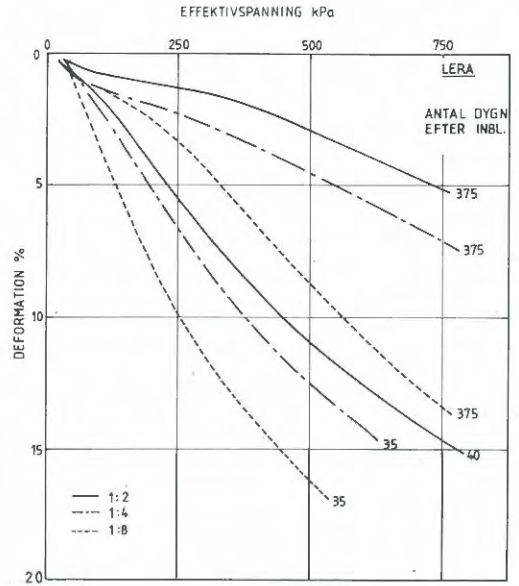
Deformationsegenskaper

Kompressionsförsöken visar på en avsevärd förbättring av deformationsegenskaperna för alla blandningar.

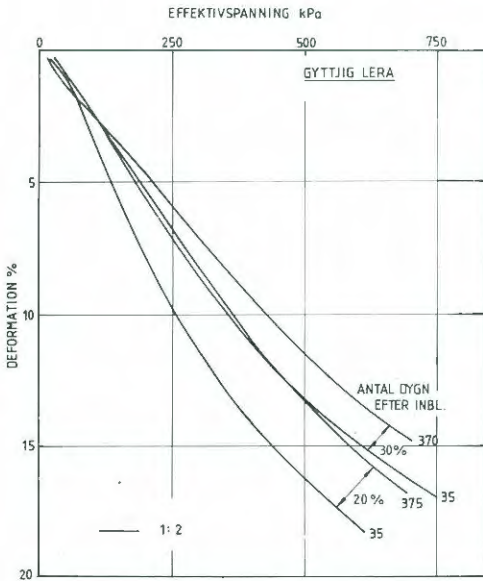
Stabiliseringsmedlets gynnsamma inverkan ökar ju större mängd som tillsätts och ju större andel kalk som används. Detta visas i Figur 4, där ödometerkurvor från försöken har sammanställs. Förbättringen med tiden som också framgår av dessa figurer, kan även läsas ut av Figur 5, där en kompressionsmodul utvärderats och ritats mot tiden. Kompressionsmodulen har utvärderats inom spänningsintervallet ca 100-400 kPa.



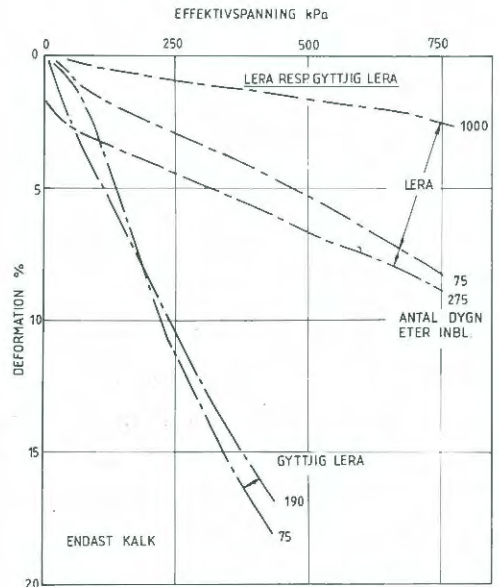
a) Lera: 15% kalk-flygaska



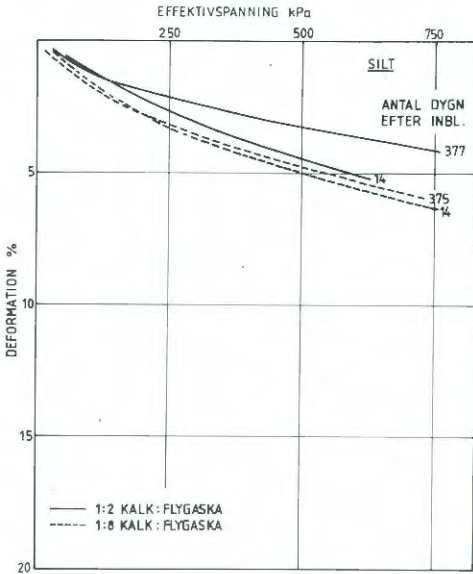
b) Lera: 25% kalk-flygaska



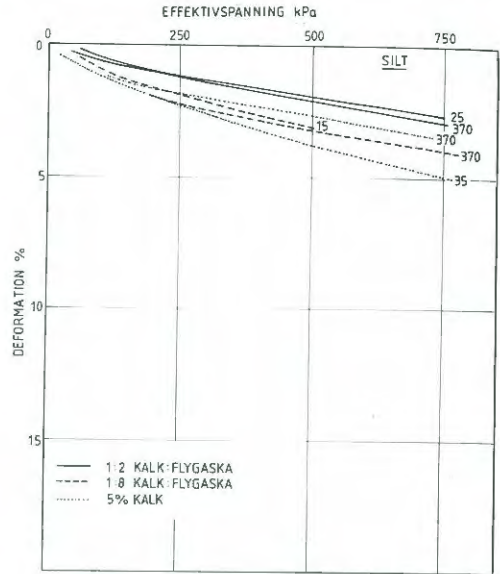
c) Gyttjig lera: 20 respektive 30% kalk-flygaska



d) Lera och gyttjig lera: 9% respektive 11% kalk



e) Silt: 10% kalk-flygaska

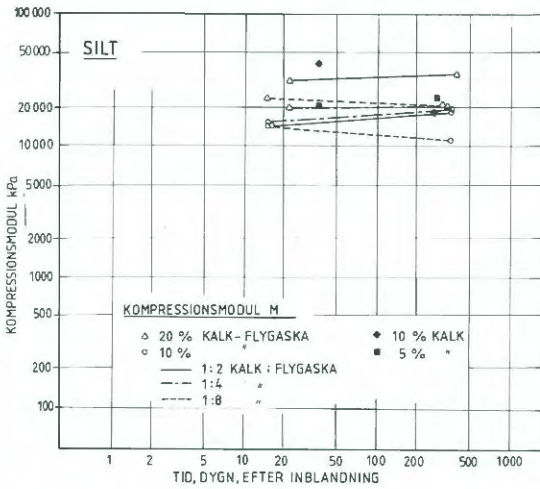
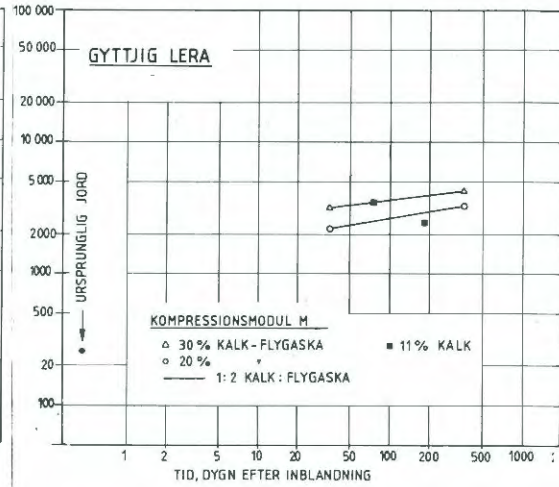
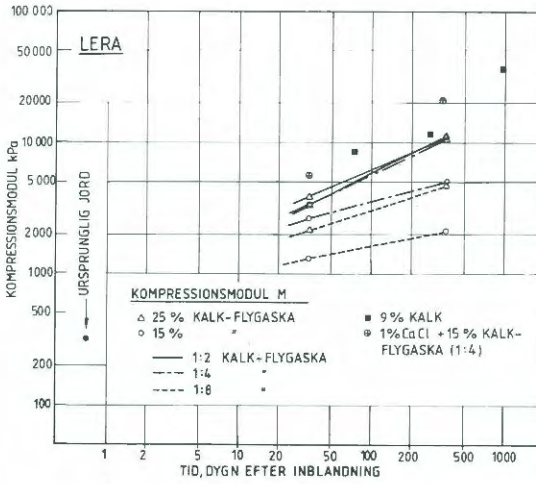


f) Silt: 20% kalk-flygaska, 5% kalk

FIGUR 4. Ödometerförsök, typ CRS, på stabiliserad jord.

Inblandning av kalk-flygaska i leran ökade kompressionsmodulen med som mest en faktor 10, till ca 4000 kPa, 1 månad efter inblandning och en faktor 30 1 år efter inblandning. Ren kalkinblandning gav ytterligare något högre värden. Kompressionsmodulen hos den leriga gyttjan ökade på motsvarande sätt med faktorerna 12 och 17, till 3000 och 4000 kPa, ca en månad respektive 1 år efter inblandning av kalk-flygaska. Ren kalkinblandning gav ungefär samma resultat som kalk-flygaskainblandningen vid 2,5 månaders ålder men visade därefter inte någon ökning med tiden. För den kalk-flygaskastabiliserade silten uppmättes kompressionsmodulerna 20000-30000 kPa med en svag ökning i värden från en halv månad till ett år efter inblandning för alla blandningar utom de med förhållandet 1:8. Ren kalkinblandning med 10% kalk gav en kompressionsmodul av ca 40000 kPa 1 månad efter inblandning men övriga kalkinblandningar gav kompressionsmoduler av 20000 kPa 1 månad och 1 år efter inblandning.

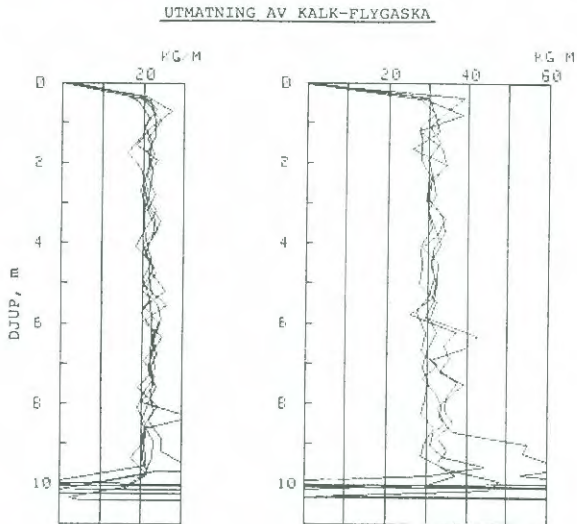
Tillsättandet av 1% CaCl_2 ökade kompressionsmodulen ytterligare med faktorerna 2 och 4 en månad respektive 1 år efter inblandning.



FIGUR 5. Kompressionsmoduler hos stabiliserad jord.

2.4 Stabiliserad jord - fältförsök

Syftet med fältförsöken var dels att få jämförelse med resultaten av skjuvhållfasthetsbestämningarna på laboratoriet och dels att testa dagens kalkpelarmaskin för andra stabiliseringsmedel än kalk. Två olika mängder kalk-flygaska användes för provpelarna, ca 22 kg per meter pelare och ca 33 kg per meter pelare i vardera sex pelare. Den senare mängden var ungefär vad kalkpelarmaskinen i sin nuvarande utformning maximalt klarade av. Pelarna installerades till ca 10 m djup. Spridningen i kalk-flygaskautmatning framgår av Figur 6. Kalkutmatningen avbröts några decimeter under markytan. Blandningsförhållandet kalk: flygaska var 1:4 i samtliga pelare.

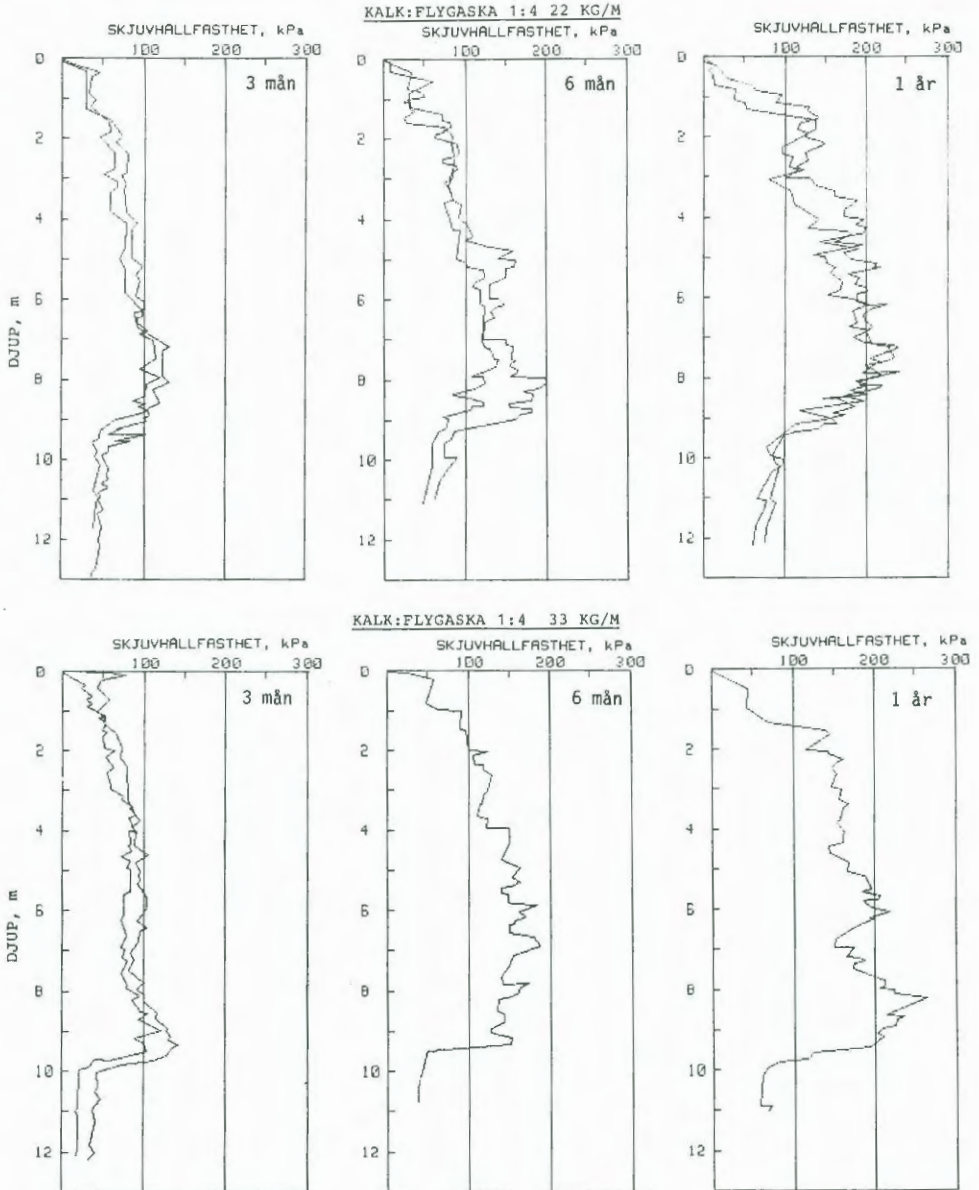


FIGUR 6. Kalk-flygaskautmatning vid installation av provpelare i Torrekulla med ca 22 kg/m respektive ca 33 kg/m.

Mängden stabiliseringsmedel motsvarade 14% (räknat på jordens torra vikt) respektive 20% i lerlagret på 5-10 m djup och 19% respektive 27% i de gyttjiga lagren, på 1,2-2 m djup. Mängderna av stabiliseringsmedel var således något lägre i fält än motsvarande mängder på laboratoriet.

Provpelarna testades vid 3 tidpunkter efter installation under ett års tid genom sondering med kalkpelarsond. Sonderingarna visar att pelarna är homogena. Utmatningen av kalk-flygaska och inblandningen

med leran har således fungerat. En sammanställning av resultaten visas i Figur 7. I figuren visas skjuvhållfasthet utvärderad enligt Holm m fl (1981), som 1/10 av sonderingsmotståndet mot kalkpelarsondens vinge. En viss skillnad i skjuvhållfasthet för de två olika mängderna stabiliseringsmedel finns, men framför allt märks hållfasthetstillväxten med tiden.



FIGUR 7. Resultat av sondering med kalkpelarsond i pelare med kalkflygaska som stabiliseringsmedel.

Utvärderad skjuvhållfasthet för de två jordlagren som även undersöktes genom inblandningsförsök på laboratoriet finns inritad i Figur 1 där även resultatet från kalkpelarsonderingen i rena kalkpelare alldeles intill kalk-flygaskapelarna finns inlagd. Skjuvhållfastheten är ca 85 kPa och 180 kPa tre månader respektive 1 år efter installation för lera och ca 50 kPa och 100 kPa för den gyttjiga lera vid motsvarande tidpunkter. Sonderingar i rena kalkpelare 5 månader efter installation visar på ungefär samma hållfasthet som kalk-flygaskapelare.

Värdena från fältförsöken ligger något över de från laboratorieförsöken. Tidigare erfarenhet från djupstabilisering med ren kalk har visat att det normalt blir högre värden i fält än på laboratoriet under de första månaderna efter kalkinblandningen. Förklaringen till detta är delvis att temperaturen i pelarna under en viss tid efter installation är betydligt högre än lagringstemperaturen (normal marktemperatur) på laboratoriet. En högre temperaturnivå under härdningen ger normalt en snabbare hållfasthetstillväxt hos en stabiliserad jord.

2.5 Slutsatser om kalk-flygaskastabilisering

Utförda laboratorie- och fältförsök visar på att

1. skjuvhållfastheten hos lera, gyttjig lera och silt ökar genom inblandning av kalk-flygaska. Ökningen blir större ju större mängd som tillsätts.
2. skjuvhållfastheten hos kalk-flygaskastabiliserad lera, gyttjig lera och silt ökar med tiden fram till åtminstone ett års ålder. I de undersökta jordarna ökar skjuvhållfastheten (för blandningar med bästa effekt) ungefär enligt följande:

	Före inbland. τ_0 , kPa	1 månad efter inbl. τ , kPa; (τ/τ_0)	1 år efter inbl. τ , kPa; (τ/τ_0)
Lera	15	25 (1,7)	150 (10)
Gyttjig lera	12	25 (2,1)	80 (6,5)
Silt	60	250 (4,2)	700 (11)

Motsvarande värden för ren kalkinblandning är

	1 månad	1 år
Lera	50 (3,4)	200 (13)
Gyttjig lera	35 (2,9)	35 (3)
Silt	170 (2,8)	300 (5)

- Optimalt blandningsförhållande kalk:flygaska ur skjuvhållfasthets-synpunkt varierar för olika jordar. En viss minimimängd kalk behö-
ver användas, för att försäkra sig om inverkan av denna vid härd-
ningsprocessen. Lämpliga kvantiteter kalk och flygaska kan vara
3% kalk eller mer och 5-12% flygaska för lera respektive 2% kalk
eller mer med blandningsförhållandet ca 1:4 för silt.
- kompressibiliteten hos lera, gyttjig lera och silt minskas genom
inblandning av kalk-flygaska. Effekten blir större ju större mängd
som tillsätts.
- kompressibiliteten hos kalk-flygaskastabiliserad lera och gyttjig
lera minskar med tiden fram till åtminstone ett års ålder. I de
undersökta jordarna ökar kompressionsmodulen (i spänningsinterval-
let ca 100-400 kPa och för blandningar med bästa effekt) ungefär
enligt följande:

	Före inbland.	1 månad efter inbl.	1 år efter inbl.
	M_0 kPa	M, kPa; (M/ M_0)	M, kPa; (M/ M_0)
Lera	300	4500 (15)	11000 (37)
Gyttjig lera	250	3000 (12)	4500 (18)
Silt	≈4000	30000 (7,5)	40000 (10)

Motsvarande värden för ren kalkinblandning är

	1 månad	1 år
Lera	8000 (27), 2 mån-värde	19000 (63)
Gyttjig lera	3500 (14), 2 mån-värde	2500 (10), 6 mån-värde
Silt	40000 (10)	25000 (6)

6. bästa blandningsförhållande kalk:flygaska ur deformationssynpunkt överensstämmer ungefär med det ur skjuvhållfasthetssynpunkt, se punkt 3.
7. flytgränsen hos lera och silt ökar efter inblandning av kalk-flygaska och minskar hos gyttjig lera. Detsamma gäller vid enbart kalkinblandning.
8. plasticitetsgränsen hos lera, gyttjig lera och silt ökar efter inblandning av kalk-flygaska. I stabiliserad lera och silt ökar plasticitetsgränsen med tiden fram till åtminstone 3-4 månaders ålder. Detta gäller också vid enbart kalkinblandning.
9. sensitiviteten hos lera och gyttjig lera minskar till 2 à 3 efter inblandning av kalk-flygaska. Detta sker också vid enbart kalkinblandning.
10. pH-värdet hos lera, gyttjig lera och silt ökar till ca 12 efter inblandning av kalk-flygaska. Detta sker också vid enbart kalkinblandning.
11. 1% kalciumklorid som extra tillsatsmedel förbättrar ytterligare skjuvhållfastheten och kompressionsegenskaperna hos kalk-flygaskastabiliserad lera under det första året efter inblandningen. Den största förbättringen fås under det första halvåret.
12. goda möjligheter finns att använda kalk-flygaska för djupstabilisering av andra typer av jordar än de som idag stabiliseras med kalkpelarmetoden. Detta gäller framför allt silt men även organisk lera är möjlig att stabilisera.
13. då flygaskan idag kan fås för ett betydligt lägre pris än kalken medför detta att kalk-flygaska kan utgöra ett billigare alternativ än kalk även vid djupstabilisering av lera.

3. SYNUNKTER PÅ DIMENSIONERING

3.1 Blandningsförhållande kalk:flygaska

Ett sätt att skaffa sig en uppfattning om billigaste alternativ vad gäller stabiliseringsmedlets sammansättning är att använda sig av diagram liknande de i Figur 8, diagram 1 (Johanson m fl 1960).

- **Diagram 1:** Förutom hållfasthetskonturer som dras med hjälp av skjuvhållfasthetsbestämningarna på laboratoriet har ytterligare linjer lagts in för bedömning av tekniskt och ekonomiskt fördelaktigt alternativ. Punkt A representerar den maximala kalkhalt som är ekonomiskt fördelaktig jämfört med alternativa förstärkningsåtgärder såsom pålning, förbelastning etc. Punkt B fås genom att minska kalkhalten med ett värde motsvarande kostnaden för hantering av två stabiliseringsmedel i stället för ett. En kostnadslinje (jämförelselinje) B-D dras som visar den mängd flygaska som kan fås till samma pris som en viss mängd kalk - flygaskan har förutsatts kosta 1/15 av kalken. Om då mängden pelare vid en eventuell grundförstärkning med kalk-flygaskapelare är densamma som vid alternativet med kalkpelare medför detta att alla billigare lösningar jämfört med andra förstärkningsåtgärder då ligger på eller under linjen A-B-D. Slutligen dras en begränsningslinje C-E representerande den minimimängd kalk som är erforderlig med hänsyn till att de kemiska reaktionerna skall vara säkerställda i hela pelaren.
- I exemplet i Figur 8 **diagram 2** har antagits en skjuvhållfasthet av ca 300 kPa för optimal dimensionering av antal pelare vid ren kalkstabilisering. Kostnadslinjen parallellförskjuts nedåt tills den tangerar 300 kPa-kurvan, linje B'-D' för en bedömning av billigaste blandningsförhållande vid en motsvarande kalk-flygaskastabilisering. Besparingen (B-B') är i detta fall lika med kostnaden för ca 4% kalk.
- Då man vid dimensionering kan utnyttja att en högre hållfasthet hos pelarna ger möjlighet att öka pelaravstånden, dvs minska antalet pelare, måste även detta tas hänsyn till vid val av lämpligt blandningsförhållande.

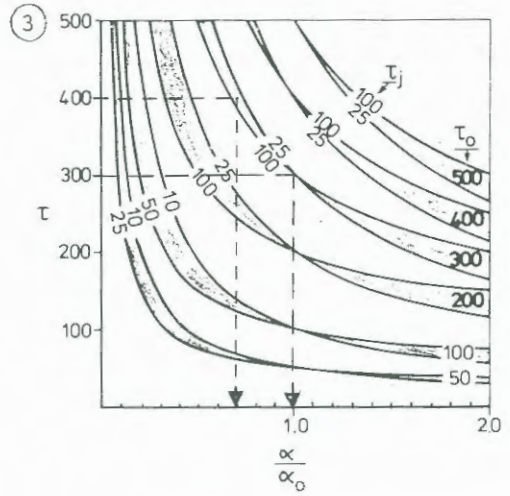
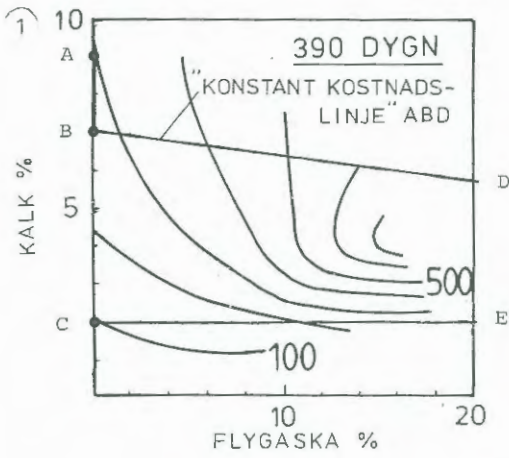
- **Diagram 3** i Figur 8 visar hur en ändrad skjuvhållfasthet hos pelare påverkar den erforderliga mängden pelare vid dimensionering med hänsyn till stabilitet vid belastningar. Utnyttjas enligt exemplet i Figur 13 diagram 3 en skjuvhållfasthet hos kalk-flygaskapelare av 400 kPa i stället för 300 kPa medför detta att erforderlig mängd pelare minskas med 30%. Om kostnaden för stabiliseringsmedlet (dvs kalk) bedöms vara ca 1/3 av kostnaden för en pelare innebär detta att, utan att fördyra grundförstärkningen, mer kalk-flygaska kan köpas för en kostnad motsvarande $3 \times 30\%$ av kalkkostnaden vid den rena kalkstabiliseringen.
- I **diagram 4** har konstant kostnadslinjen ($B_{400}-D_{400}$) ritats in vilken representerar de blandningar av kalk och flygaska som kan fås för samma kostnad som det billigaste alternativet med kalk-flygaskapelare då dessa har 400 kPa som dimensionerande skjuvhållfasthet.

Den totala besparingen jämfört med ren kalkpelarförstärkning är då summan av $(B_{300}-B_{400})$ och $3 \times 30\%$ av A_{300} dvs ungefär en kostnad motsvarande $3,5 + 8 \approx 11\%$ kalk. Detta innebär att användandet av kalk-flygaska i stället för kalk skulle förbilliga förstärkningen ca 40%.

Uppenbarligen kan i detta fall ytterligare besparingar göras om ännu högre hållfasthet väljs för dimensionering. Vad som begränsar antalet valmöjligheter är att kalpelarmaskinen har en begränsad kapacitet, vad gäller utmatning av stabiliseringsmedel, samt att pelaravstånden inte kan vara hur stora eller hur små som helst.

Begränsningar i exemplet:

- Mängd stabiliseringsmedel ≤ 35 kg/m pelare
- Pelaravstånd $c > 0,5$ m och $c < 2$ m, vilket motsvarar $0,25 c_0^2 < \frac{\alpha}{\alpha_0} < 4 c_0^2$ i diagram 2 i Figur 13 (c_0 är rena kalkpelares centrumavstånd).



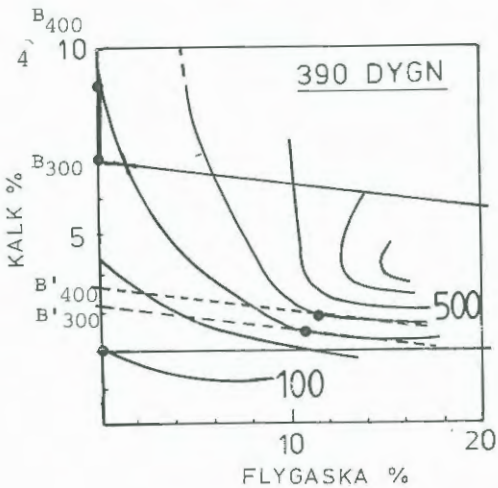
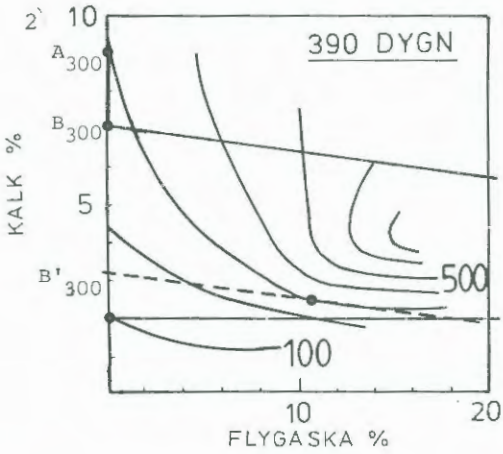
τ_0 = kalkpelarnas skjuvhållfasthet (kPa)

τ_j = jordens (urspr) "-"

τ = kalk-flygaskapelarnas "-"

α_0 = antal kalkpelare/m

α = antal kalk-flygaskapelare/m



FIGUR 8. Ekonomisk bedömning av förstärkningsalternativ.

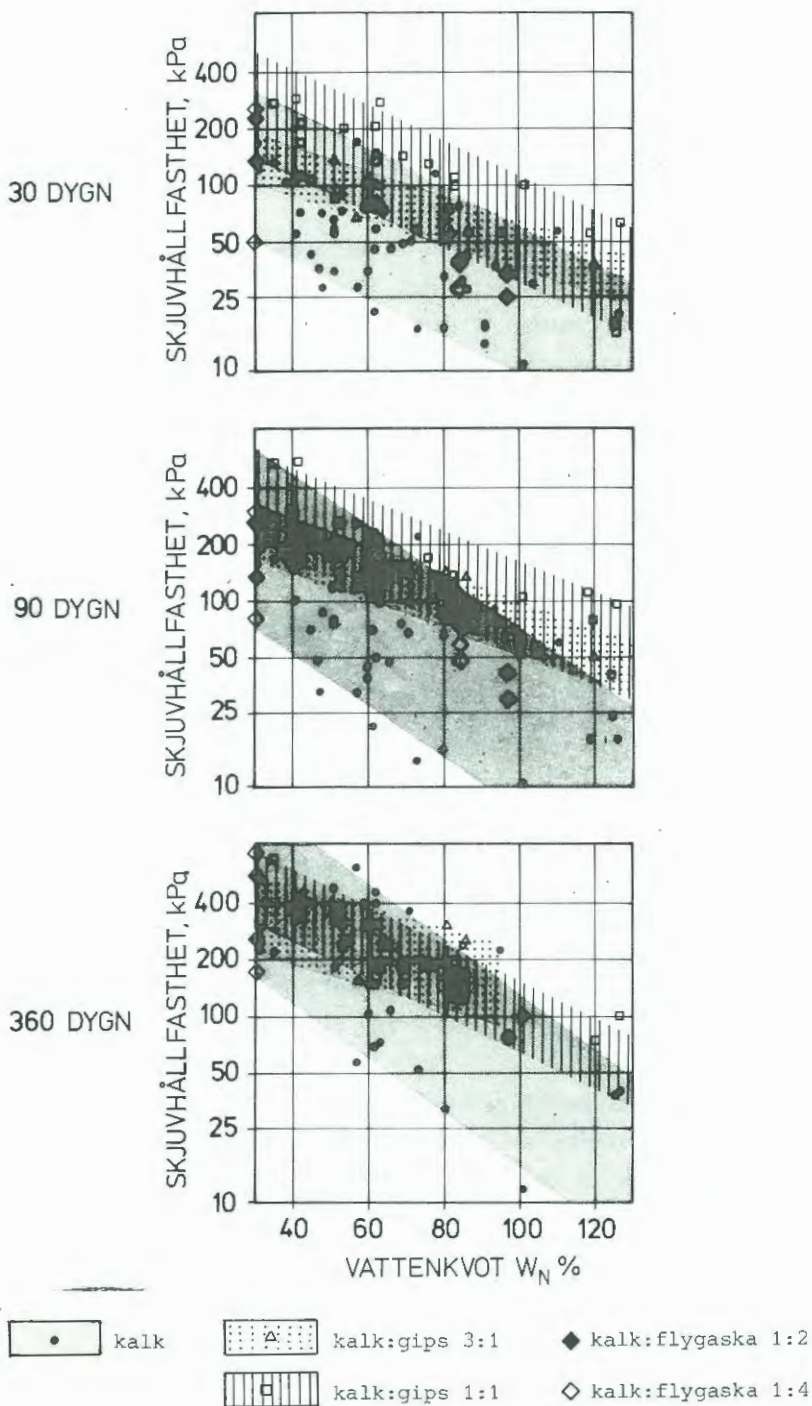
3.2 Egenskaper hos pelare

För en slutlig dimensionering av en pelarförstärkning måste inblandningsförsök på prover från aktuell jord göras på laboratoriet och provpelare eventuellt installeras i fält.

För en grov preliminär dimensionering eller bedömning av djupstabiliseringsmetodens användbarhet för ett specifikt byggprojekt kan skjuvhållfasthetsvärden från diagrammen i Figur 9 användas. Dessa visar resultaten av skjuvhållfasthetsbestämningar som utförts på SGI på kalk-, kalk-flygaska och kalk-gipsstabiliserad jord. Spridningen i värden är stor men detta beror främst på att många olika typer av jordar finns representerade samtidigt som variationen i använd mängd stabiliseringsmedel också är relativt stor.

Som en uppskattning av kalkstabiliserad jords kompressionsegenskaper kan för preliminär dimensionering kompressionsmodulen M erfarenhetsmässigt sättas till $(75 \pm 25) \times$ skjuvhållfastheten hos kalkstabiliserad jord. Försöken på kalk-flygaskastabiliserad jord visade på ungefär samma förhållande mellan modul och skjuvhållfasthet som vid kalkstabilisering. Kompressionsmodulens tillväxttakt tycks dock minska något med tiden och till viss del även med mängd kalk varför de högre värdena kan anses gälla för kalk-flygaskastabiliserad jord ungefär en månad efter inblandning och de lägre ett år eller mer efter inblandning. Hittills utförda undersökningar på kalk-gips uppvisar ett något lägre förhållande mellan modul och skjuvhållfasthet. Modulen kan i kalk-gipsstabiliserad jord förväntas vara $(50 \pm 20) \times$ skjuvhållfastheten.

Förekomsten av bl a tungmetaller måste beaktas vid användande av kalk-flygaska för stabilisering av jord. En bedömning av vattenströmning och eventuell påverkan på omgivningen måste göras.



FIGUR 9. Skjuvhållfasthet hos kalk-, kalk-flygaska- respektive kalk-gipsstabiliserad jord.

REFERENSER

Johnson, AW., Herrin, M., Davidson, DT. & Handy, RL., 1960. Soil Stabilization. Highway Engineering Handbook. KB Woods (Ed), McGraw-Hill, 1960.

Holm, G., Bredenberg, H. & Broms, B., 1981. Lime columns as foundation for light structures. Int Conf SMFE X, Stockholm 1981. Vol 3.

Holm, G. & Åhnberg, H., 1981. Jordstabilisering med restprodukter från kolkraftverk. SGI Projekt 1-335/80.



**Om inverkan av härdningstemperaturen
på skjuvhållfastheten hos kalk- och
cementstabiliserad jord**

HELEN ÅHNBERG, GÖRAN HOLM



FÖRORD

Föreliggande rapport behandlar den forskning som bedrivits vid SGI under 1983/84 rörande härdningstemperaturens inverkan på skjuvhållfastheten hos kalk- och cementstabiliserad lera. Forskningen har bekostats med interna medel och bedrivits i projekt nr 511938326-2.

I samband med fältmätningarna erhöles hjälp av BPA Byggproduktion AB och vägförvaltningen i Stockholms län för vilket framförs ett varmt tack.

Linköping augusti 1984

Helen Åhnberg

Göran Holm

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid
SAMMANFATTNING	99
SUMMARY	102
1. BAKGRUND	105
2. FÄLTUNDERSÖKNINGAR	110
2.1 Försöksplats	110
2.2 Kalkpelare	111
2.3 Utförda temperaturmätningar	112
2.4 Resultat av temperaturmätningar	114
2.5 Utförda hållfasthetsmätningar	118
2.6 Resultat av hållfasthetsmätningar	119
3. LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR	122
3.1 Ursprunglig jord	122
3.2 Använd kalk	122
3.3 Utförda laboratorieförsök	123
3.4 Resultat av laboratorieförsöken	124
4. MOGNADSTAL FÖR FITTJAFÖRSÖKEN	125
4.1 Användande av mognadstal enligt Saul och enligt Rastrup	125
4.2 Mognadstal anpassat till de utförda undersökningarna	127
5. GENERELLT MOGNADSTAL M_T	132
5.1 En mer generell ekvation M_T för anpassning till andra jordar och andra stabiliseringsmedel	132
5.2 Svenska jordar	132
5.3 Utländska jordar	133
5.4 K-värdet	139
6. SLUTSATSER	143
REFERENSER	145

SAMMANFATTNING

Djupstabilisering av lös lera med kalkpelarmetoden har använts i Sverige under mer än 10 års tid. Vid dimensionering av kalkpelarförstärkningar har hittills mycket liten hänsyn tagits till inverkan av temperaturen under härdning på hållfastheten hos stabiliserad jord. Kontroll av skjuvhållfastheten hos pelare i fält har genomgående visat på högre värden under de första åren än vad laboratorieprovning givit i laboratorietillverkade prover. Skillnader i hållfasthet har till stor del bedömts bero på en högre härdningstemperatur i fält än den som används på laboratoriet. Provning på laboratoriet utförs normalt på prover som lagrats vid 8°C. Kunskap har emellertid saknats om vilken temperaturnivå som erhålls för pelare i fält och i vilken utsträckning temperaturen under härdning inverkar på hållfastheten hos stabiliserad jord.

Föreliggande rapport redovisar utförande och resultat av fält- och laboratorieundersökningar som utförts av SGI under ca 1 års tid rörande härdningstemperaturens inverkan på skjuvhållfastheten hos kalkstabiliserad lera. Resultaten visar att betydligt högre härdningstemperatur råder i fält än den som hittills använts vid förundersökningar på laboratorium. Temperaturer av upp till 70°C uppmättes några timmar efter installation. Ännu ett år efter installation råder en temperatur i kalkpelarområdet (ca 10-15°C) som är högre än den före installation. Temperaturmätningar utfördes i och mellan pelare i områden med några olika c/c-avstånd mellan pelarna.

Kontroll av pelarnas skjuvhållfasthet i fält har utförts vid ett antal tidpunkter efter installation. På laboratoriet har skjuvhållfasthetsbestämningar utförts på jordprover som tagits vid försöksplatsen i fält och som stabiliserats med kalk. Dessa kalkstabiliserade jordprover har dels lagrats under konstant temperatur av ca 8°, 21°, 30° eller 40°C och dels varierande (sjunkande) temperaturer av 45° → 16°C och 28° → 8°C.

Några i litteraturen förordade s k mognadstal och mognadsregler, dvs uttryck för hur temperaturen inverkar på härdningsförloppet, har prövats på resultaten av laboratorieförsöken. Dessa mognadstal och regler har dock visat sig oanvändbara för de utförda försöken. En relation

mellan tid och temperatur som däremot ger god överensstämmelse åt resultaten från försöken med kalkinblandning är mognadstalet

$$M_T = \left[20 + (T - 20) \cdot 0,5 \right]^2 \cdot \sqrt{t} \quad (\text{°C}^2 \times \sqrt{\text{dygn}})$$

där T = temperatur (°C)

t = tid (dagar)

Detta har utvecklats till det generella mognadstalet

$$M_t = \left[20 + (T - 20) \cdot K \right]^2 \cdot \sqrt{t} \quad (\text{°C}^2 \times \sqrt{\text{dygn}})$$

där K är en faktor som beror av använt stabiliseringsmedel, typ av jord och i vissa fall även av temperaturnivån. K -värdet har bestämts för ett antal jordar utifrån resultat av i litteraturen redovisade undersökningar av temperaturens inverkan på skjuvhållfastheten vid kalkstabilisering, kalk-flygaskastabilisering och cementstabilisering. Dessa undersökningar har främst utförts utomlands. Varje värde av M_T motsvarar en viss skjuvhållfasthet hos stabiliserat material. Förhållandet mellan M_T och skjuvhållfasthet är inte konstant utan utgör en kurva för varje material.

Stabilisering av några svenska leror med osläckt kalk har gett ett värde på K av 0,5. Detta innebär bl a att hållfasthetenstillväxten vid härdningstemperaturen 20°C går ca 4 gånger snabbare än vid 8°C och tillväxten vid 30°C ca 10 gånger snabbare än vid 8°C.

En kortare provningstid än den som idag krävs på laboratoriet för projektering av en kalkpelarförstärkning kan således åstadkommas genom att lagra proverna vid högre temperatur. Med stöd av mognadstalet M_T kan hållfasthetensutvecklingen för andra härdningstemperaturer uppskattas. K -värdet kan uppskattas empiriskt utifrån redovisade undersökningar. Provningsprogrammet bör dock utökas något i förhållande till det hittills använda. Detta för att få en säkrare bedömning och för att bygga upp erfarenhet av olika jordars beteende vid inblandning av olika stabiliseringsmedel. Temperaturnivån i fält vid kalkstabilisering av lera kan också bedömas utgående från resultaten från här redovisade försök. Flera undersökningar krävs dock för att bedöma trolig temperatur i fält under andra stabiliseringsförhållanden än de här redovisade.



SUMMARY

Deep stabilization of soft clay by the lime column method has been used in Sweden for about 10 years. In design of lime columns very little consideration has thus far been taken to the effect of the curing temperature on the shear strength of the stabilized soil. Testing of lime columns in situ has revealed higher values of shear strength during the first couple of years than the corresponding samples stabilized in the laboratory. These differences in shear strength have been considered to be largely caused by a higher curing temperature in situ than in the laboratory. Testing of stabilized soil in the laboratory is normally made on samples stored at a temperature of 8°C. There has, however, previously been little understanding of what the temperatures are in the field and how the curing temperatures affect the strength of the stabilized soil.

This report describes test procedures and results from research at SGI during a one year period concerning the effect of curing temperature on shear strength of clay stabilized with quick lime. The results show that considerably higher curing temperatures prevail in situ than what hitherto has been used at investigations in the laboratory. Temperatures of 70°C were measured a couple of hours after installation of the columns. A year after installation the temperature in the lime column area is still higher than before installation of the columns. Measurements of temperatures were made inside columns and between columns in different areas with different spacing between the column.

Testing of the shear strength of the columns has been made a number of times after installation. In the laboratory the shear strength of soil taken from the test field and stabilized with quick lime has been tested. Samples stabilized in the laboratory were stored at temperatures held constant at 8°, 21°, 30° and 40°C or at varying (decreasing) temperatures 45° → 16°C and 28° → 8°C.

A number of earlier suggested maturity rules from literature, i.e. equations for how the temperature affects the curing process, have been tried for the results from the laboratory tests. None of these maturity rules, however, proved to be useful for the stabilized soil

in question. A relation between time and temperature which was found to give good agreement for the test results is the maturity number M_T

$$M_T = [20 + (T - 20) \cdot 0.5]^2 \cdot \sqrt{t} \quad (^\circ\text{C}^2 \times \sqrt{\text{days}})$$

where T = temperature ($^\circ\text{C}$)
 t = time (days)

This relation was developed to the general maturity number

$$M_T = [20 + (T - 20) \cdot K]^2 \cdot \sqrt{t} \quad (^\circ\text{C}^2 \times \sqrt{\text{days}})$$

where K is a factor varying with type of stabilizing agent, type of soil and in some cases also the curing temperature. The K -value has been determined for a number of soils, mainly from investigations reported abroad on the effect at temperature on shear strength of soils stabilized with lime, fly-ash and cement. Each value of M_T corresponds to a certain shear strength of the stabilized material. The relation between M_T and shear strength is not constant but constitutes a curved relation for each material, see figure S1.

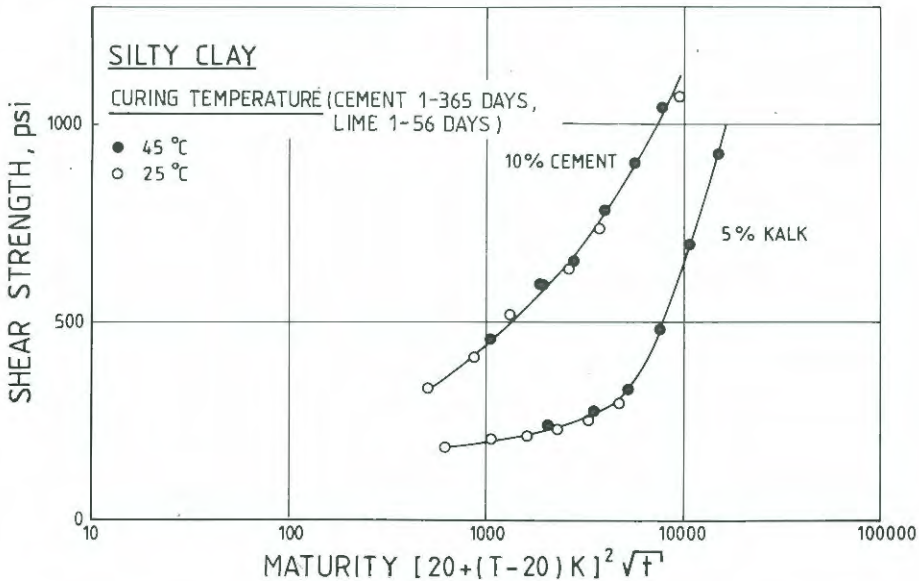


Figure S1. Shear strength (from Dumbleton & Sherwood, 1966) vs maturity rule M_T for a silty clay from Great Britain. $K=0.5$ for cement as stabilizing agent and $K=1.0$ for lime as stabilizing agent.

Stabilization of some Swedish soft clays with quick lime has given a value of $K=0.5$. This means that in these clays the increase in shear strength at e.g. a curing temperature of 20°C is about 4 times as fast as at 8°C and the increase at 30°C is about 10 times as fast as that at 8°C .

A shorter testing time in the laboratory at design of a lime column project, can be achieved by storing the samples at higher temperature. Using the maturity number M_T makes it possible to estimate the development of the shear strength at other curing temperatures. Until further investigations have been made, K -values can be estimated from the presented results coupled with a somewhat larger testing program than normally used. The additional testing should be made in order to get safe estimates of K and to build up experience about the behaviour of soils when stabilized by different additives. Until further investigations have been made, estimates of the temperatures in the field after installation of lime columns can be made from the results presented in the report. Further investigations are necessary for estimates of in situ temperatures in other types of soil and when using other stabilizing agents than quick lime.

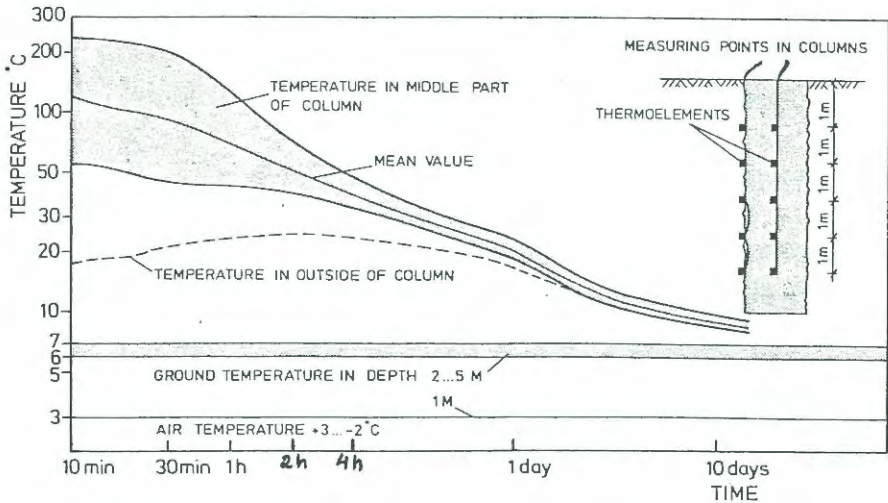
1. BAKGRUND

Tekniken för cementstabilisering av jord i vägbyggnadssammanhang togs fram på 1910-talet i Europa och används idag i stor omfattning för vägbyggnad, flygplatsbyggnad m m över hela världen. Även andra typer av stabiliseringsmedel utnyttjas idag, framförallt kalk i olika former samt flygaska. Tillsammans ger dessa möjligheter till förstärkning av flertalet olika typer av lösa jordar. Inblandning av stabiliseringsmedel i jord har tidigare skett huvudsakligen som ytstabilisering men djupstabilisering har fått en ökad användning - om än liten i förhållande till den förra - och inneburit en möjlighet till teknisk och ekonomisk lösning på många geotekniska problem, inte bara i vägbyggnadssammanhang.

Djupstabilisering med kalkpelarmetoden har använts i Sverige sedan mitten av 1970-talet. Metoden innebär att pelare med 0,5 eller 0,6 meters diameter och upp till 15 meters längd (Sverige 1984) tillverkas i jorden genom mekanisk inblandning av osläckt kalk eller något annat stabiliseringsmedel. Ett normalt förfarande vid projektering av en kalkpelarförstärkning har hittills varit att göra inblandningar på jordprover i laboratorium. Då de geotekniska egenskaperna normalt förbättras med tiden efter inblandning har proverna lagrats i fuktrum under normal marktemperatur, ca 8°C. Skjuvhållfasthet och andra egenskaper har sedan undersökts vid ett antal tidpunkter efter inblandningen. Med tiden har det dock blivit alltmer uppenbart att överensstämmelsen är relativt dålig mellan laboratorieprovningar och de egenskaper som erhålls hos pelare i fält. Detta gäller framförallt under första halvåret efter inblandning. Laboratorieprovningarna ger normalt lägre värden än provningar i fält vilket innebär att val av dimensionerande hållfasthetsvärden på basis av enbart laboratorieförsök oftast leder till överdimensionering av kalkpelarförstärkningarna. Ett medvetande har funnits om att härdningstemperaturen inverkar på hållfastheten och att temperaturen i fält, då osläckt kalk blandats i jorden och släcks under avgivande av värme, är högre än den lagringstemperatur som normalt används på laboratorium. Kunskap har dock saknats om vilken temperaturnivå som erhålls i fält samt om sambanden mellan härdningstemperatur och hållfasthet.

Detta har inneburit att dimensionerande skjuvhållfasthet normalt valts högre än vad laboratorieförsök utvisar - men ändå försiktigt - om även resultat från installerade provpelare funnits. Har fältprovningar saknats har hållfastheter valts som motsvarat laboratorieförsöken eller endast mycket litet överstigit dessa.

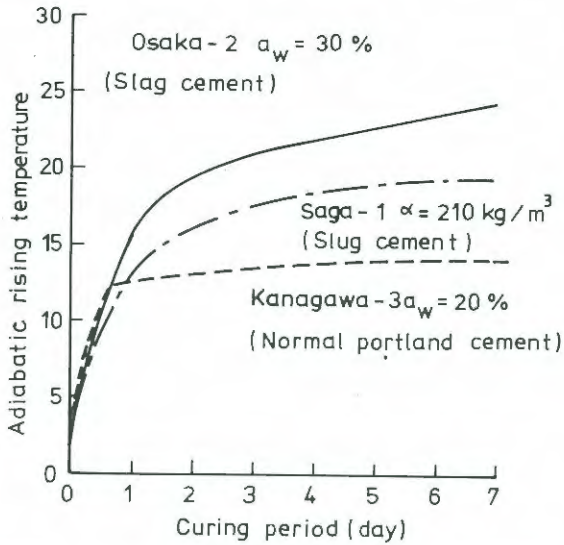
Mätningar av temperaturen i fält vid djupstabilisering med kalk som visar på höga temperaturer i pelare alldeles efter installation har utförts av Kujala (1984), se figur 1.



FIGUR 1. Temperatur hos kalkpelare, som funktion av tiden.
(Från Kujala, 1984.)

Mätningar av temperaturen vid stabilisering med cement har utförts av Suzuki (1982). Dessa visar på temperaturhöjningar av 10 till 25 grader i stabiliserade jordprover vilka isolerats för att fullständigt förhindra värmetransport, se figur 2. Båda dessa undersökningar visar på att en betydligt högre härdningstemperatur råder i fält än den som hittills använts vid förundersökningar på laboratorium.

Det faktum att härdningstemperaturen inverkar på hållfastheten hos stabiliserad jord är inte någon ny upptäckt. Forskning om samband mellan temperatur och hållfasthet har bedrivits för andra användningsområden, bl a inom betongindustrin, men även för olika former av ytstabilisering. För att få en korrelation mellan skjuvhållfasthet vid olika tider och temperaturer har skognadstal använts med varierande fram-



FIGUR 2. Relation mellan temperaturstegring i proven och härdningstid.
(Från Suzuki, 1982.)

gång. Varje värde av dessa mognadstal, M , som är funktioner av temperaturen och tiden, motsvarar en viss hållfasthet hos det stabiliserade materialet. Förhållandena mellan M och hållfasthet är inte konstanta utan utgör kurvor för varje material. Ett antal olika mognadstal har förordats i olika sammanhang. Enligt Bergström (1953) är ett mognadstal föreslaget av Saul (1951) tillämpligt för betong.

$$M = \sum t \cdot (T - \theta)$$

där

t = tid

T = temperatur

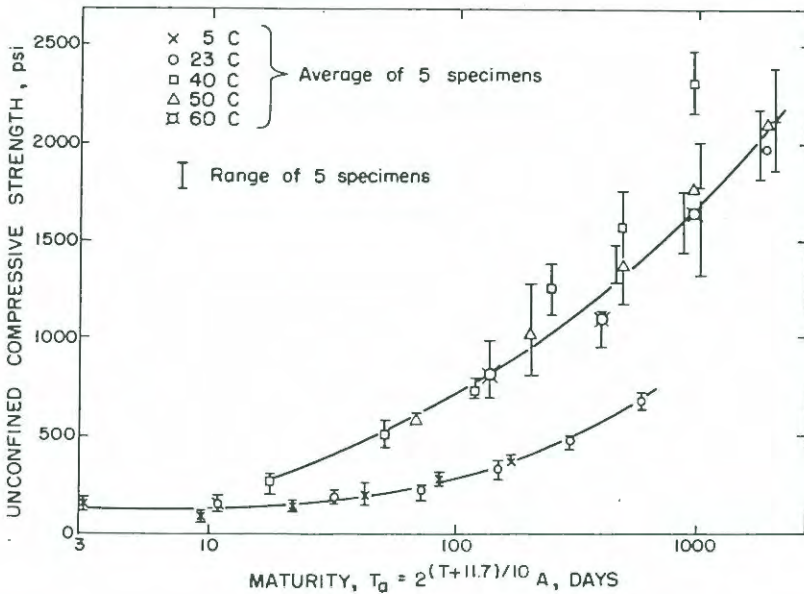
θ = referenstemperatur

Ett annat mognadstal, även det för betong, togs fram av Rastrup (1954)

$$M = \int_0^t \frac{T - \theta}{10} dt$$

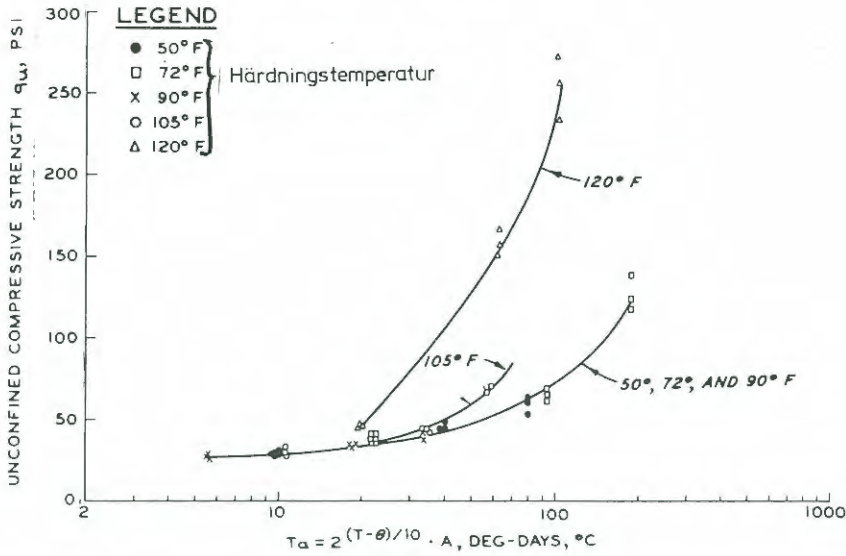
Försök att tillämpa dessa mognadstal vid undersökningar på jord och cement och senare även jord och kalk eller flygaska har gett varierande resultat. Sauls mognadstal har som regel visat sig vara oanvändbart i dessa sammanhang (Metcalf, 1963). Rastrups mognadstal har använts och ansetts ge ett acceptabelt resultat, om än med viss spridning, vid plottning av skjuvhållfasthet mot mognadstal (Metcalf, 1963),

(Townsend & Donaghe, 1976). Värdet på θ sattes ursprungligen för betong till -10°C i formeln $M = t(T-\theta)$ (Saul, 1951) och användes därefter också för Rastrups mognadstal. Andra värden har uppgetts ge bättre anpassning för Rastrups mognadstal vid jordstabilisering (Ruff & Ho, 1966) men måste anses mer avspegla effekten av ändrade skalor i diagrammen. Oavsett om Rastrups mognadstal ansågs oanvändbart (Ruff & Ho, 1966), eller utmärkt att använda i vissa fall (Townsend & Donaghe, 1976) så visade båda dessa författare på att överensstämmelser i resultat endast gällde inom olika temperaturintervall, se figur 3 och 4.

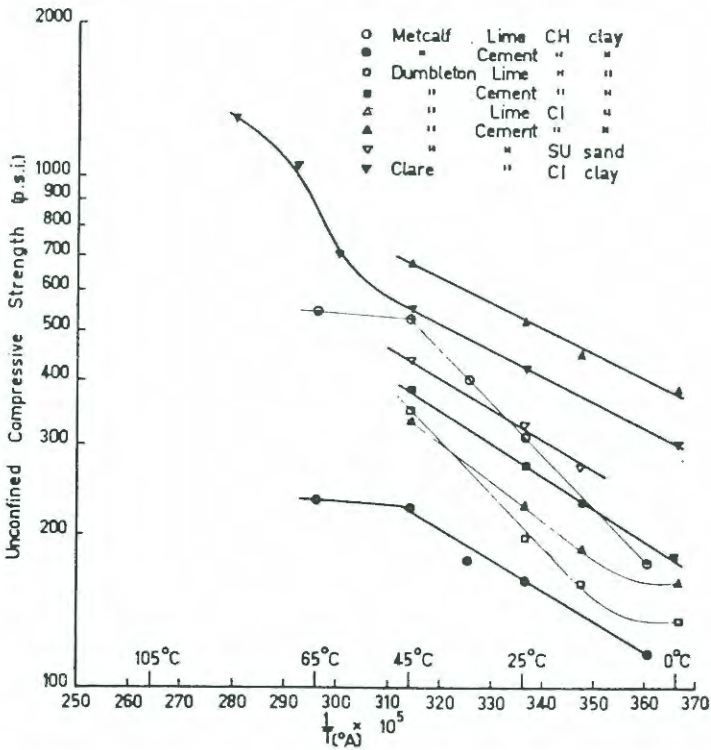


FIGUR 3. Relation mellan exaxlig tryckhållfasthet och mognadstal enligt Rastrup för en kalkstabiliserad lera.
(Från Ruff & Ho, 1966.)

Förutom metoden med mognadstal har en del andra angreppssätt provats för att få fram användbara samband mellan hållfasthet, tid och temperatur. Plottas skjuvhållfastheten som $\log \tau = B' - B''/T$ där B' och B'' är konstanter och T är absolut temperatur ger detta enligt Metcalf (1963) samma lutning på kurvor representerade cement och jord eller för fallet med kalk och jord, samma lutning för likartade jordarter, se figur 5.



FIGUR 4. Rastrup's mognadsregel för en siltig lera + 6 procent kalk. (Från Townsend & Donaghe, 1976.)



FIGUR 5. Skjuvhållfasthet vs temperatur efter 7 dygns härdning. (Från Metcalf, 1963.)

Biswa (1972) har föreslagit en normalisering av tiden genom användning av olika skalor på tidsaxeln för olika temperaturer så att ungefär samma skjuvhållfasthet erhålls. En variant av denna metod har utvecklats av Townsend (1976) för att från 7-dygnsprovningar med olika temperaturer, med hjälp av lämpliga skalfaktorer (K) och med graddagar (dvs $K \cdot t(T-\theta)$) förutsäga långtidshållfasthet hos prover med normal temperatur.

Någon allmänt använd metod finns emellertid inte. Detta kan förklaras av att olika material oftast ger olika resultat och olika god anpassning till metoderna. Samtidigt kan så varierande tillämpningsområden som betonghärdning, cement-, kalk- eller flygaskastabilisering av jord samt kombinationer eller varianter av dessa knappast förväntas uppträda på ett helt enhetligt sätt. I syfte att öka kunskapen om svenska jordars beteende i dessa sammanhang, har forskning påbörjats på SGI med ett antal undersökningar i fält och på laboratorium rörande härdningstemperaturens inverkan på kalkstabiliserad lös lera.

2. FÄLTUNDERSÖKNINGAR

2.1 Försöksplats

Som försöksplats valdes Fittja söder om Stockholm där en större kalkpelarförstärkning skulle utföras för en ny väg utmed Albysjön. Jorden på platsen utgjordes av överst ca 1 meter fyllning huvudsakligen bestående av sand och därunder ca 10-11 m varvig lera underlagrad av silt. Den varviga lerans ungefärliga egenskaper framgår av tabell 1.

TABELL 1. Jordprofil

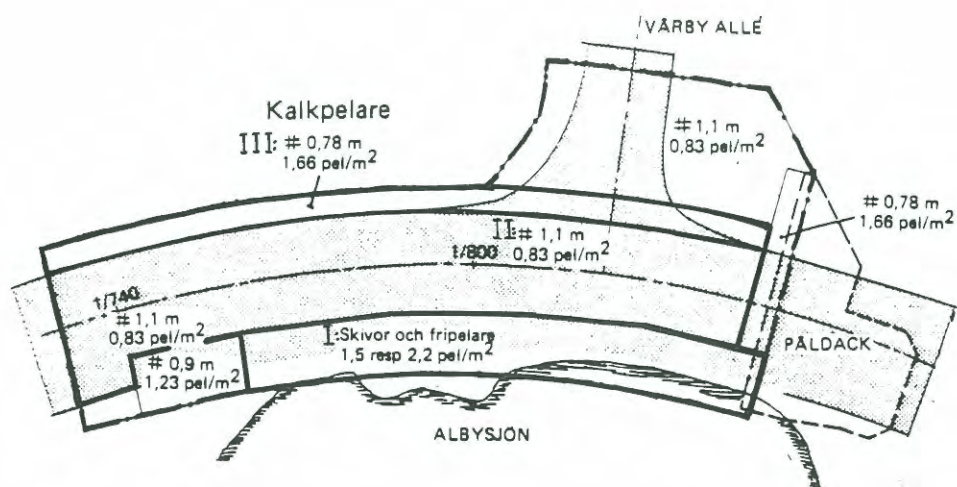
Djup (m)	Jord	ρ (t/m ²)	w_N (%)	w_L (%)	S_t	τ_f (konprov) (kPa)
0-1	Silt/Sand	1,80	20			
1-4	v Lera	1,60	70	60	17	10
4-7	v Lera	1,65	65	55	18	15
7-12	v Lera <u>si</u>	1,71	50	50	18	19

v = varvig, si = med siltskikt

2.2 Kalkpelare

Kalkpelarna installerades under augusti månad 1983. De hade en diameter på 0,5 m och installerades från markytan och ned till silten under leran. Kalkpelarlängd var 11-12 m. Använd kalkmängd var 16 kg/m pelare. Kalkpelare installerades med olika centrumavstånd. I stort delades kalkpelarförstärkningen upp i 3 st delområden inom vilka enhetliga installationsmönster följdes, se figur 6.

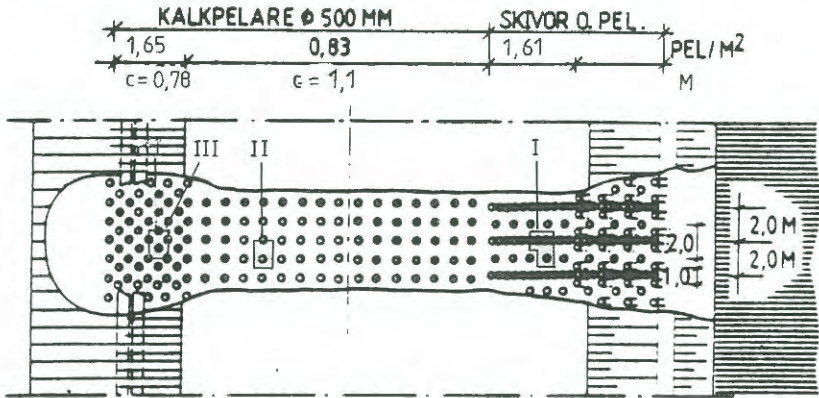
- I område I, som låg närmast Albysjön, installerades pelarna radvis. Varannan rad utformades som en skärm vinkelrätt väglinjen med ett centrumavstånd (c) hos pelarena på 0,45 m och varannan rad som singelpelare med centrumavstånd lika med 1,0 m. Avståndet mellan varje rad var 1,0 m. Ungefär halva området, slänten närmast sjön, var tidigare förstärkt med pelare i rutmönster c/c 1,0 m. Området bredd var ca 10 m.
- I område II installerades pelarna i rutmönster med centrumavstånd 1,1 m. Områdets bredd var ca 17 m.
- Område III förstärktes med kalkpelare i rutmönster med centrumavståndet 0,78 m. Områdets bredd var ca 5 m.



FIGUR 6. Plan över kalkpelarförstärkningen. (Från Bjerin m fl, 1984.)

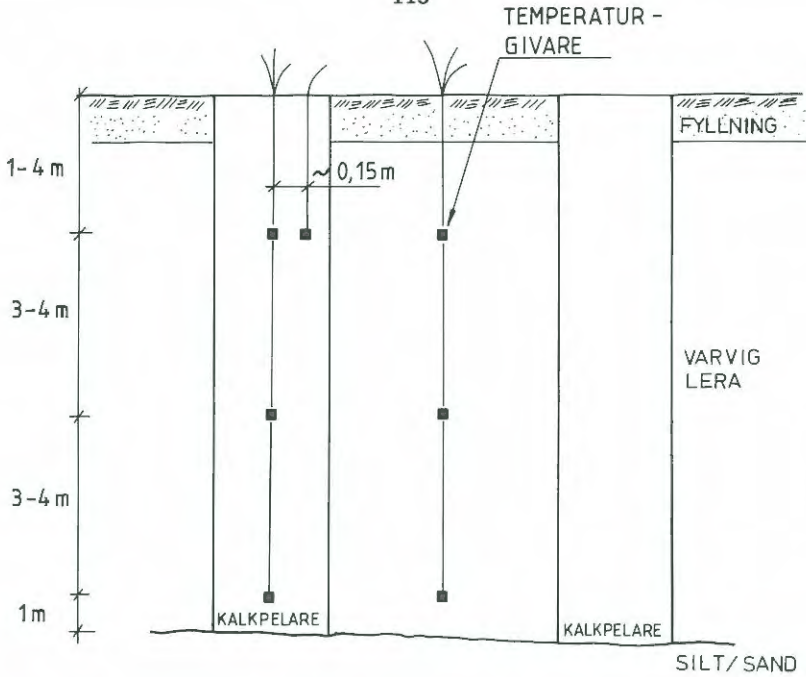
2.3 Utförda temperaturmätningar

Mätningar av temperaturen i kalkpelare och i leran mellan kalkpelare utfördes i 3 olika mätstationer, en i vardera området. Mätstationerna var belägna ungefär vid sektion 1/800. Deras läge inom varje område framgår av figur 7.

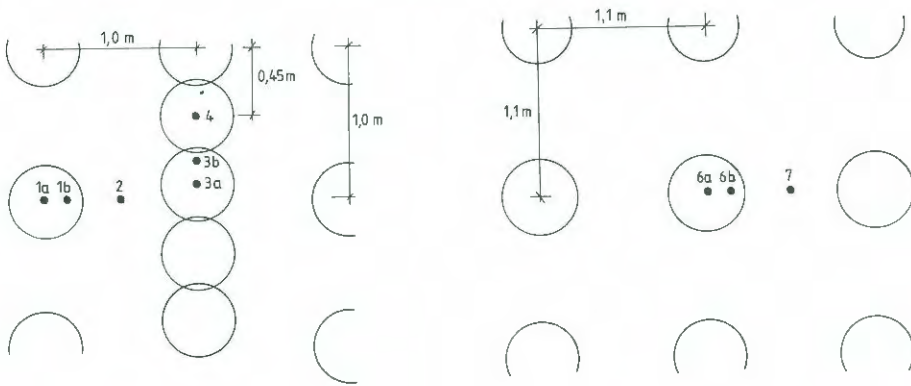


FIGUR 7. Mätstationernas läge inom de olika kalkpelarområdena.

Temperaturgivarna som användes var resistansgivare av typ Pt 100. Givarna installerades på 3 olika nivåer, dels i centrum av kalkpelarna och dels i leran mitt emellan pelarna. Ca 0,15 m ut ifrån centrum av kalkpelarna installerades dessutom en givare på samma nivå som den övre givaren i kalkpelarcentrum, se figur 8. Figur 9 visar mätpunkternas benämning och läge i plan inom de olika mätstationerna. De olika nivåerna vid respektive mätpunkt framgår av tabell 2.



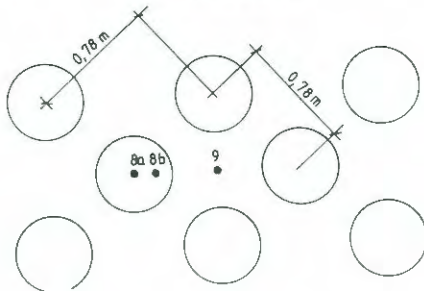
FIGUR 8. Temperaturgivarnas placering i djupled. Principfigur.



a. Område I

b. Område II

FIGUR 9. Mätpunkternas benämning och läge i plan.



c. Område III

TABELL 2. *Temperaturgivarnas placering i djupled.*

Mätområde	Mätpunkt (nr)	Djup (m u my)		
I (singelpelare + skärm)	1a	3	7	11
	1b	3		
	2 (1era)	3	7	11
	3a	3	7	11
	3b	3		
	4	1	5	9*)
II (c = 1,1 m)	6a	4	7	10
	6b	4		
	7	4	7	10
III (c = 0,78 m)	8a	4	7	10
	8b	4		
	9 (1era)	4	7	10

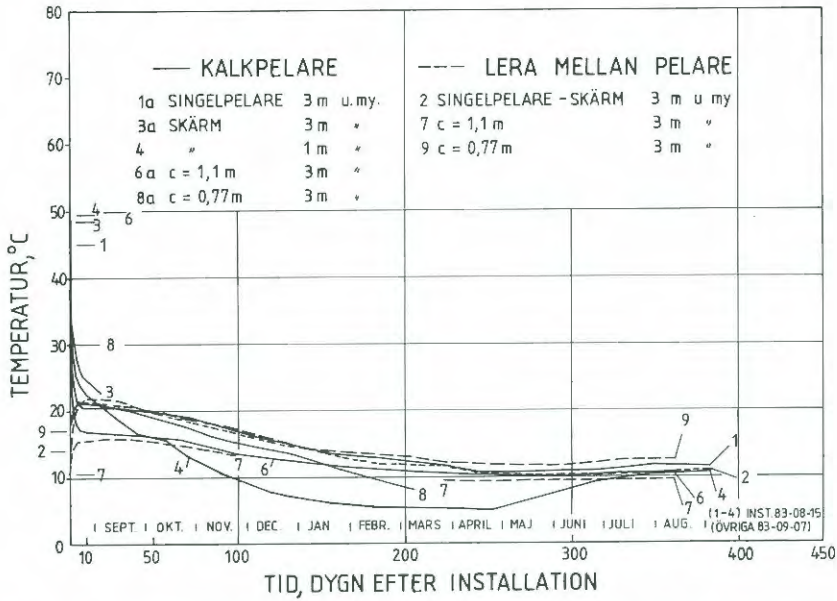
*) Stopp vid kalkpelarinstallation vid 10 m djup under markytan.

Mätningarna av temperaturen påbörjades 2-4 timmar efter det att kalkpelarna vid respektive mätpunkt hade installerats. Mätintensiteten var 1 à 2 gånger om dagen de första två dyggen för att därefter successivt glesas ut till ca 1 gång per månad efter 3 månader. Mätningar har nu pågått under ca 1 års tid (augusti 1984).

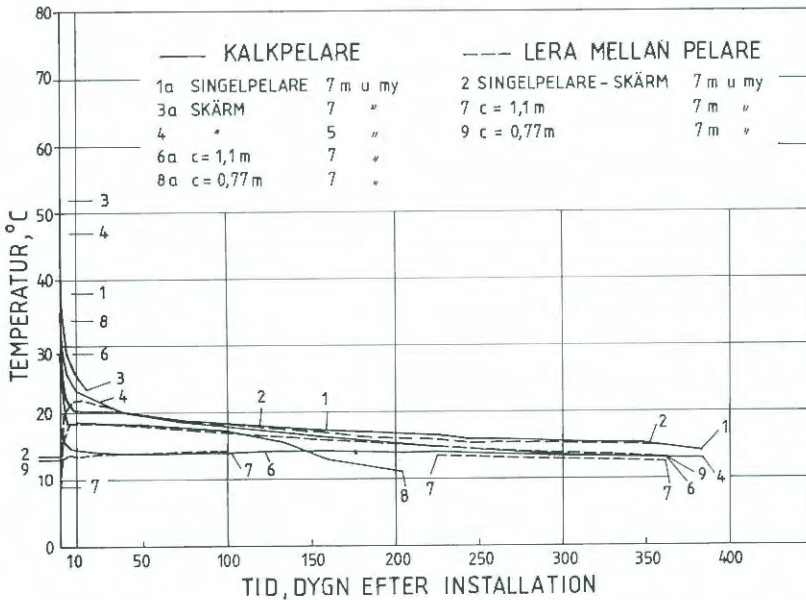
2.4 Resultat av temperaturmätningar

Figur 10 visar uppmätt temperatur som funktion av tid efter installation av kalkpelare. Redovisade utgångsvärden är lika med temperaturen 2-4 timmar efter pelarinstallationen. Mätningar i punkt 3 avbröts efter ca 15 dagar då givarna drogs upp för att användas vid mätområde II. Mätvärdena i punkt 8 spårar ur efter 4 månader, troligtvis på grund av fukt i kabeln.

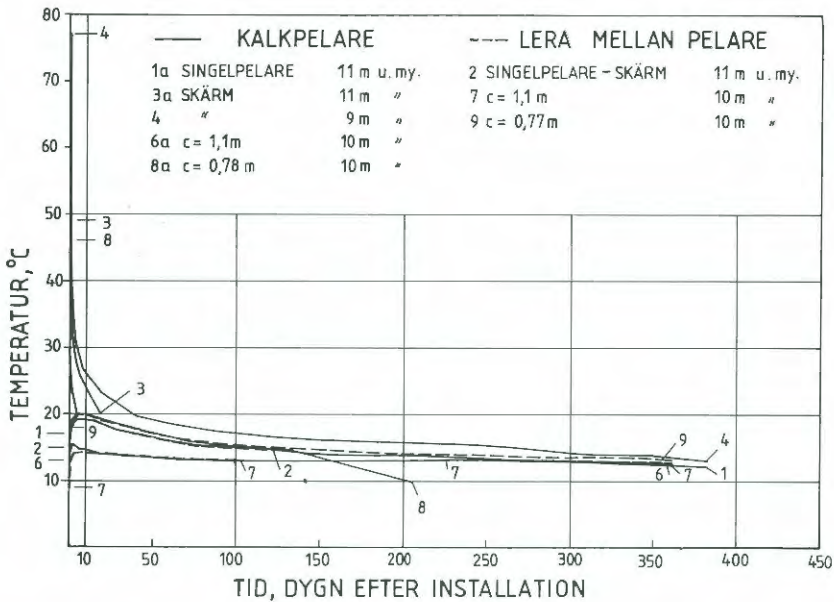
Vid ett tillfälle 8 månader efter installation skadades samtliga mätkablar av arbetsmaskiner vid iordningställandet av vägöverbyggnaden. Reparationen av dessa kablar kan ha påverkat mätresultaten något då temperaturen mättes med hjälp av resistansgivare och sådana faktorer som kabellängd och skarvar inverkar på resultaten. Mätnoggrannheten uppskattas dock till att vara ca $\pm 0,5^\circ\text{C}$ både före och efter denna händelse.



FIGUR 10a. Uppmätta temperaturer vid kalkpelarnas övre del (i centrum av pelare respektive mellan pelare).



FIGUR 10b. Uppmätta temperaturer vid ungefär halva kalkpelardjupet (i centrum av pelare respektive mellan pelare).



FIGUR 10c. Uppmätta temperaturer vid kalkpelarnas nedre del (i centrum av pelare respektive mellan pelare).

Uppmätta temperaturer i kalkpelarna 2-4 timmar efter installationen varierar mellan 30-50°C, 29-59°C och 13-77°C vid kalkpelarnas övre del, vid halva kalkpelardjupet respektive vid kalkpelarnas nedre del. Den stora spridningen i temperatur alldeles efter pelarinstallation vid kalkpelarnas nedre del beror sannolikt på att installationen av temperaturgivarna gått något snett vid mätpunkt 1a och 6a varvid givarna längst ned hamnat vid utkanten av pelarna samt att kalkutmatningen i kalkpelaren vid mätpunkt 4 varit något högre än normalt längst ned.

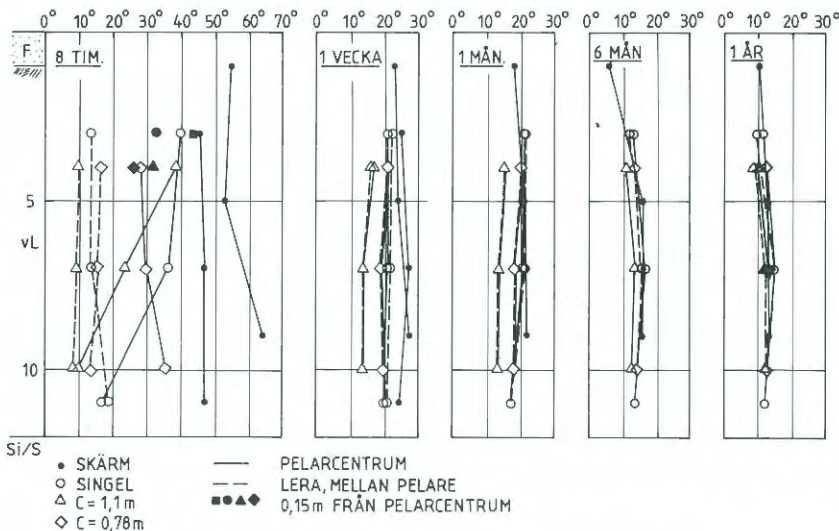
De uppmätta maximala värdena var ej så höga som släckning av kalk i samband med jordstabilisering ansetts kunna ge, dvs temperaturer runt 100°C eller högre, men detta kan bero på att mätningarna kunde utföras först 2-4 timmar efter kalkpelarinstallationen. Kujala (1984) uppmätte betydligt högre initiella temperaturer men efter 2-4 timmar hade dessa sjunkit till samma nivå som de som uppmättes i Fittja, jämför figur 1.

På 0,15 m avstånd från pelarcentrum var temperaturen vid de första mätningarna upp till 12° lägre än vid pelarcentrum. Troligen finns en viss kalkansamling i centrum av pelarna. Efter en halv till en vecka efter installationen var temperaturen densamma utmed pelarens tvärsnitt.

Utgångstemperaturen vid mätningarna i leran mellan pelarna varierade mellan 9 och 18°C. Värdena återspeglar förhållandet att jorden i större eller mindre grad var uppvärmd av tidigare installerade intilliggande pelare. Ursprunglig temperatur i jorden mättes ej men kan uppskattas till 7 à 8°C vilket är normalvärde för Mellansverige.

Efter knappt en vecka var temperaturen i leran mellan pelarna ungefär densamma som den i pelarna. Vid denna tidpunkt, då temperaturen för område I och III var 20-25° och temperaturen för område II var 14-17° började temperaturförändringar att gå betydligt långsammare. Så småningom blev temperaturen för de olika nivåerna ungefär densamma över hela förstärkningsområdet. Åtta månader efter kalkpelarinstallation var temperaturen 10-12°C 3 meter under markytan, 14-16°C 7 meter under markytan och 13-15°C 10-11 meter under markytan (1 m ovanför kalkpelarfot). Drygt 8 månader efter det mätningarna påbörjats lades vägbanken ut ovanpå kalkpelarna. Banken utgjordes till större delen av cellplast (1,5 m) varför markytan i princip isolerades och värmeströmningen upp ur marken minskade. Detta framgår också av mätningarna av de översta givaren som visar på ökande temperatur efter 8 månader.

I figur 11 har temperaturprofilerna vid de olika mätpunkterna ritats upp för några olika tidpunkter efter installation. Även dessa diagram



FIGUR 11. Temperaturprofiler vid olika tidpunkter efter installation.

visar hur värmespridningen gått i horisontalled, med en relativt snabb utjämning mellan pelare och lera och en något långsammare utjämning mellan de olika mätområdena, samt i vertikalled där en värmetransport framförallt uppåt men också nedåt till friktionsjorden märks efter 6 månader.

2.5 Utförda hållfasthetsmätningar

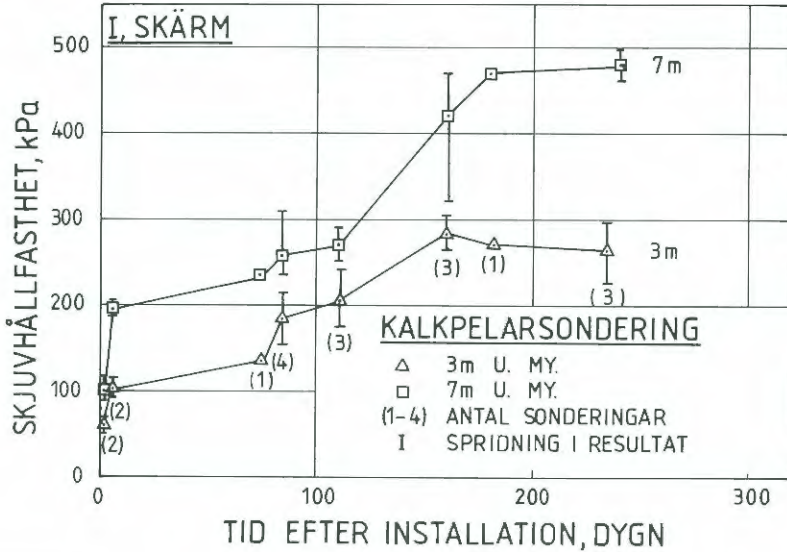
För att få en jämförelse mellan skjuvhållfasthet hos kalkstabiliserad jord bestämd vid laboratorieförsök och vid fältförsök samt mellan skjuvhållfasthet hos pelare med olika härdningstemperatur, utfördes ett antal sonderingar med kalkpelarsond intill mätstationerna inom de olika kalkpelarområden. Ett stort antal sonderingar gjordes dessutom som normal produktionstest för kalkpelarförstärkningen. Eftersom jordlagerförhållandena var tämligen likartade för området har vid redovisning av resultaten av kalkpelarsonderingarna, se nedan, även de produktionstester som låg närmast pelarena där temperaturmätningen utfördes, tagits med. Tidpunkter och antal sonderingar inom de olika områdena framgår av Tabell 3.

TABELL 3. *Utförda kalkpelarsonderingar.*

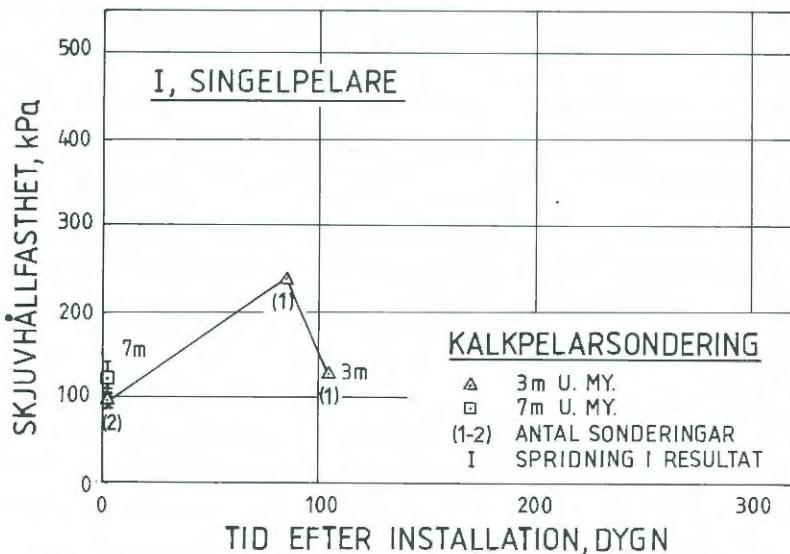
Kalkpelare	Tid efter installation (dygn)	Totalt antal (st)	Ung avstånd till temperaturmätt pelare (m)
I (skärm)	2, 6, 75, 85, 110, 160, 182, 235	20	2-45
I (singel-pelare)	2, 85, 105	4	1-45
II (c=1,1 m)	12, 33, 50, 75, 140, 155, 180	20	2-50
III (c=0,77 m)	60, 154	4	1-5

2.6 Resultat av hållfasthetsmätningar

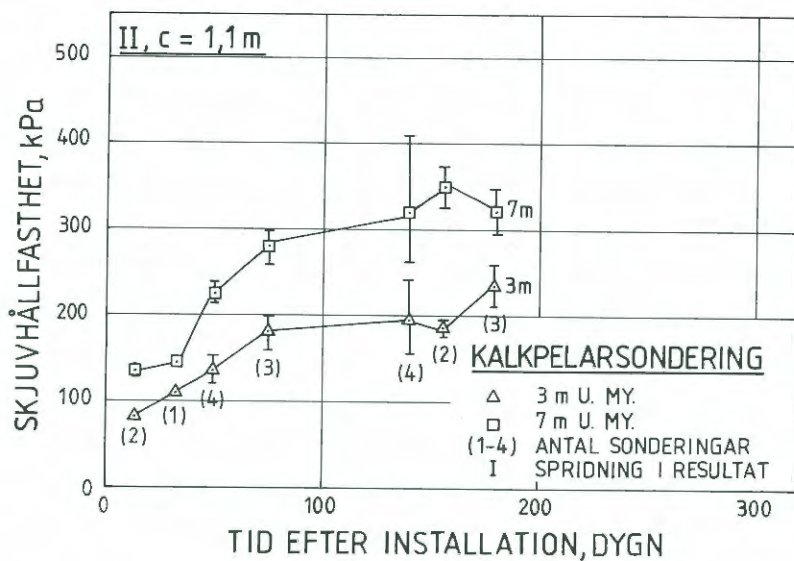
Skjuvhållfastheten hos kalkpelarna utvärderades som 1/10 av sonderingsmotståndet vid kalkpelarsondering enligt Holm m fl (1981). Resultaten av sonderingarna visas i figur 12, där skjuvhållfastheten på 3 m och 7 m djup redovisas mot tiden efter installation.



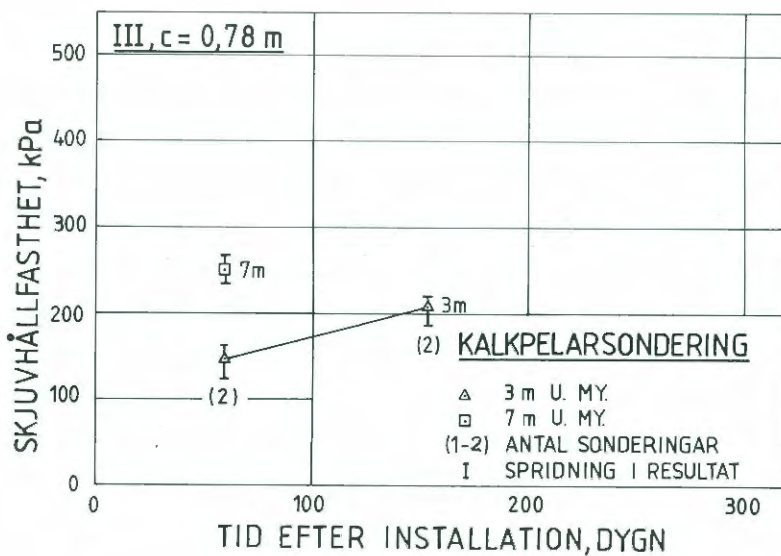
FIGUR 12a. Område I. Pelare installerade i skärmrad, $c = 0,45$ m.



FIGUR 12b. Område I. Pelare installerade som singelpelare, $c = 1,0$ m.



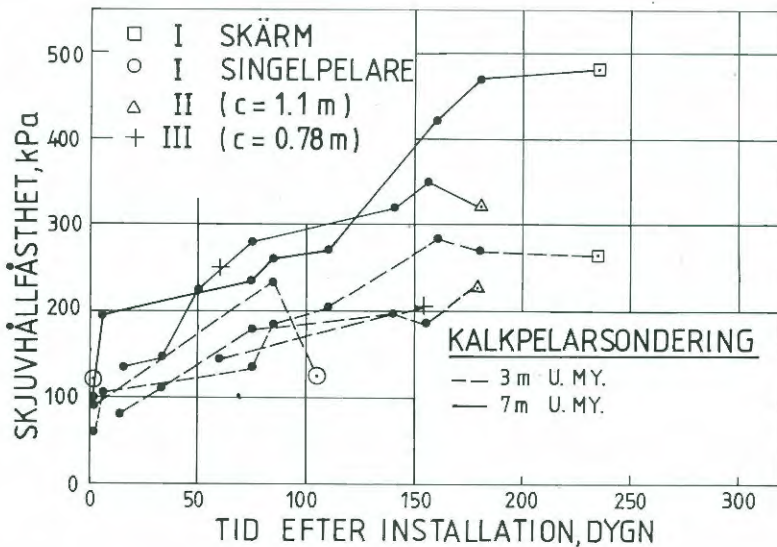
FIGUR 12c. Område II. Pelare med $c = 1,1 \text{ m}$.



FIGUR 12d. Område III. Pelare med $c = 0,78 \text{ m}$.

Vid ett flertal av de sonderingar som utfördes styrde sonden ut ur pelarcentrum på ca 3-8 m djup under markytan. Osäkerheten i värden är således större för 7 m djup än för 3 m djup. Risken att sonden böjer ut är större vid högre hållfastheter varför osäkerheten i värden för pelare med hög hållfasthet är större än för pelare med låg hållfasthet. Ett relativt stort antal sonderingar har emellertid utförts i pelarskärmen i område I samt i pelare inom område II. Sonderingarna i framförallt pelarskärmarna visar på en mycket snabb hållfasthetstillväxt de första dagarna efter installation. Skjuvhållfasthetstillväxten därefter går något långsammare och är ungefär densamma vid 3 m djup som vid 7 m djup, möjligen något snabbare vid det större djupet. Skjuvhållfasthetstillväxten är således störst under den period där temperaturen i pelarna är mycket hög, jämför figur 10, för att därefter markant minska med tiden.

Skjuvhållfasthetstillväxten visas även i figur 13 där en sammanställning gjorts av sonderingarna i de olika områdena. Någon större skillnad i skjuvhållfasthet mellan pelare i olika områden har inte uppmätts. Möjligen kan uppmätt skjuvhållfasthet hos pelare i område II sägas vara ungefär lika med den i område III och skjuvhållfastheten i område I var högre än den i båda dessa områden, med något högre värden för singelpelare än för skärmpelare.



FIGUR 13. Skjuvhållfasthetstillväxt hos kalkpelare inom olika områden.

Skjuvhållfasthetstillväxten tycks vara något lägre hos skärmpelarna än hos övriga pelare under perioden ca 1 vecka till 3 à 4 månader efter installation trots att temperaturen i skärmen då är ungefär densamma som i singelpelarna och till och med något högre än i pelarna i område II och III. Fördröjningen kan ha berott på att flera skärmpelare har en högre kalkhalt än övriga pelare, beroende på överlappningen mellan pelarna. Överlappningen blev ibland större än avsett vid installation, 10 à 15 cm i stället för 5 cm. För kalkstabiliserade jordprover som lagrats vid 7 à 8° temperatur i laboratorium ger normalt för låga och för höga kalkhalter en lägre skjuvhållfasthet än optimalt under lång tid (mer än ett år). Å andra sidan, om några av de sonderade skärmpelarna haft en upp till 40% högre kalkhalt så borde de dock i genomsnitt (6 sonderingar) inte haft så hög kalkhalt att detta helt skulle förklara en långsammare tillväxt.

3. LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

3.1 Ursprunglig jord

Jorden som användes för stabiliseringsförsök på laboratorium var varviga lera från Fittja, tagen från 4-9 m djup ungefär vid sektion 1/800 där mätningarna i fält utfördes, se Tabell 1. Försök med högre lagringstemperatur än normalt, dvs högre än 7 à 8°C, utfördes på jord från 4-9 m djup tagen mellan pelare i område II (c=1,1). Jämförelse gjordes med tidigare stabiliseringsförsök på prover från 5-8 m djup, lagrade vid en temperatur av ca 8°C och utförda i samband med projektering av kalkpelarförstärkningen.

3.2 Använd kalk

Kalken som användes var osläckt kalk med samma egenskaper som den som användes i fält. Den var hårdbränd med en CaO-halt > 80%. Kornstorleken var 0-0,2 mm och flytbarheten 70.

Kalkhalten hos stabiliserade prover var ca 7,5% vilket motsvarade den kalkmängd som användes för kalkpelarna i fält, dvs 16 kg/m pelare.

3.3 Utförda laboratieförsök

5 st försöksserier utfördes parallellt på prover med samma jord och samma kalkhalt men med olika lagringstemperatur. Proven (ett prov/försöksserie) har undersökts vid 5 olika tillfällen under ett halvt års tid med avseende på densitet, vattenkvot, flytgräns samt skjuvhållfasthet enligt konprov och enligt tryckprov. Dessutom har kompressionsförsök och bestämning av plasticitetsgräns utförts vid 1 à 2 tillfällen.

Lagringstemperaturerna för de olika serierna var 20°, 30°, 40°, sjunkande temperatur 45° → 16°C vilket ungefär motsvarar temperaturutvecklingen inom kalkpelarområde I och sjunkande temperatur 30° → 12°C vilket ungefär motsvarar temperaturutvecklingen inom kalkpelarområde II, se Tabell 4.

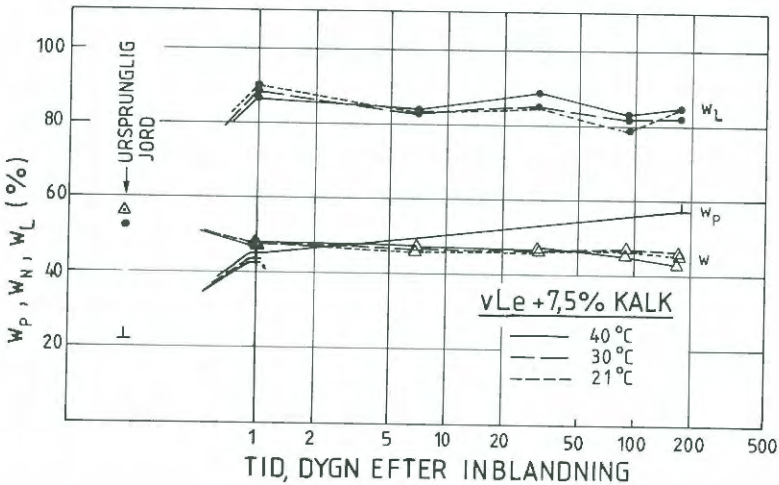
Vid analys av resultaten har även resultat från tidigare undersökningar på prover lagrade vid ca 8° temperatur tagits med som jämförelse.

TABELL 4. Provningsprogram

Provserie	Urspr. jord	Kalkhalt, % av torr vikt	Lagringstempera- tur, °C (tid, dagar)	Provnings- tillfälle, dygn efter inbl.
T-20	varvig Lera $w_L=53\%$ $w_N=56\%$ $w_p=22\%$ $\rho = 1,69 \text{ t/m}^3$ $\tau f(\text{kon})=16 \text{ kPa}$	7,5	21°	1, 7, 31, 93, 176
T-30			30°	
T-40			40°	
T-45/16			45°(1)→41(2)→35 (4)→21(53)→18(40) →16(50) →17°	
T-30/12			28°(1)→14°(89)→ 12°(73)→8°	
S-8 (vägproj)	som ovan	som ovan	8°	1, 8, 15, 94 212, 500

3.4 Resultat av laboratorieförsöken

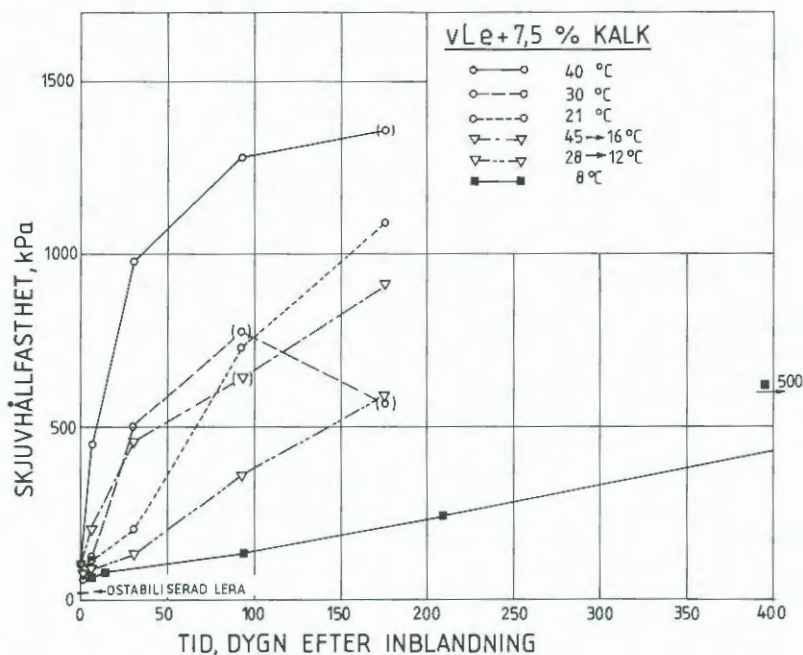
Undersökning av densitet och vattenkvot (w) utfördes för kontroll av eventuell uttorkning hos proverna och av att packningen av proverna blivit jämnt utförd. Flytgräns (w_L) och plasticitetsgräns (w_p) undersöktes för att se i vilken utsträckning härdningstemperaturen inverkar på dessa parametrar. Figur 14 visar resultaten av undersökningar av w , w_L och w_p för provserierna T-20, T-30 och t-40.



FIGUR 14. Vattenkvot, plasticitetsgräns och flytgräns vid olika tidpunkter för prover med olika härdningstemperatur.

Resultaten visar inte på någon markant skillnad i värden på w_p och w_L för prover med olika härdningstemperatur. Vattenkvoten håller sig relativt konstant för alla fem provserierna, möjligen med en viss tendens till uttorkning efter 3 månader, framförallt vid lagringstemperaturen 40°C. Densiteten var tämligen lika i de olika proverna, i medeltal 1,70 t/m³ och som lägst och högst 1,67 respektive 1,73 t/m³.

Skjuvhållfastheten hos prover med olika härdningstemperatur är ritad mot tiden efter inblandning i figur 15. Redovisade värden är skjuvhållfasthet enligt enaxliga tryckförsök (skjuvhållfastheten enligt konförsök var 1,5-2,5 gånger högre för respektive prov). Av figuren framgår att skjuvhållfasthetstillväxten går mycket snabbt den första tiden efter inblandning, snabbare ju högre härdningstemperatur proverna har.



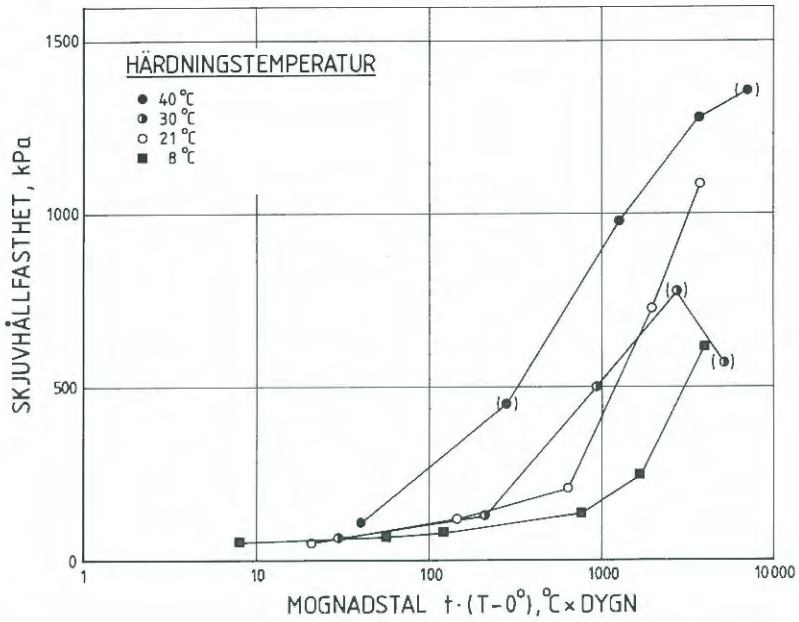
FIGUR 15. Skjuvhållfasthet enligt enaxliga tryckförsök för prover med olika härdningstemperatur.

Tillväxttakten avtar först för prover lagrade vid högre temperatur (efter 1 à 2 veckor) medan tillväxten hos prover med härdningstemperatur ca 8°C är tämligen konstant under ca 1,5 års tid.

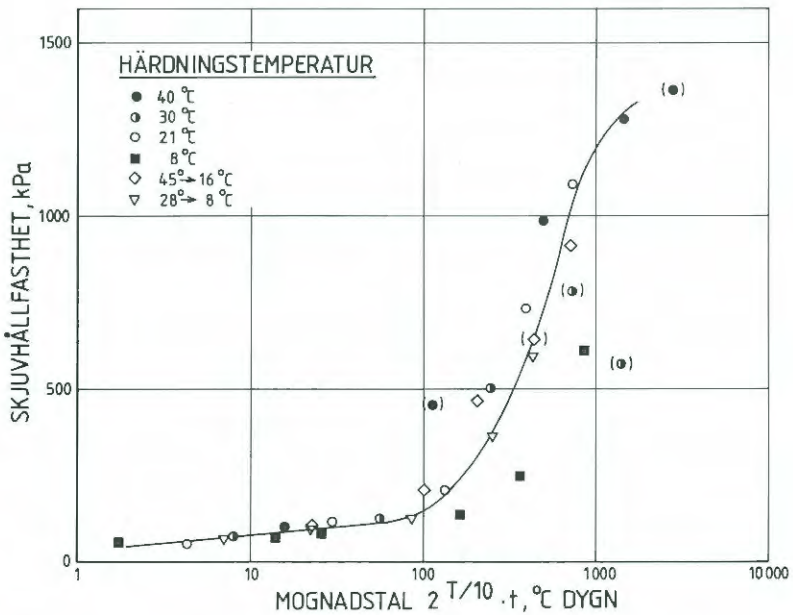
4. MOGNADSTAL FÖR FITTJAFÖRSÖKEN

4.1 Användande av mognadstal enligt Saul och enligt Rastrup

Figur 16 och 17 visar skjuvhållfasthetsvärden från laboratorieförsöken för mognadstal $t \cdot (T - \theta)$ enligt Saul (1951) respektive $2 \cdot 10^{-\theta} \cdot t$ enligt Rastrup (1954). I båda fallen har $\theta = 0^\circ\text{C}$ använts som den temperatur över vilken härdning kan fortgå.



FIGUR 16. Skjuvhållfasthet vs mognadstal enl Saul, för varvig lera från Fittja.



FIGUR 17. Skjuvhållfasthet vs mognadstal enligt Rastrup, för varvig lera från Fittja.

Detta ger en något bättre anpassning till uppmätta skjuvhållfasthetsvärden än vad $\theta = -10^\circ\text{C}$ gör men anpassningen är ändå dålig. $\Sigma \Delta t \cdot (T - \theta)$ är klart oanvändbart som mognadstal i detta fall. Rastrups mognadstal i figur 17 ger en relativt god anpassning för mognadstal under ca 100. Över 100 är anpassningen visserligen relativt god för proven med härdningstemperaturer ca $15\text{--}30^\circ\text{C}$ men värdena för prover med härdningstemperaturerna 8° och 40° visar att härdningsprocessen i verkligheten går något långsammare respektive snabbare vid lägre respektive högre temperaturer, än vad mognadstalet enligt Rasturp anger.

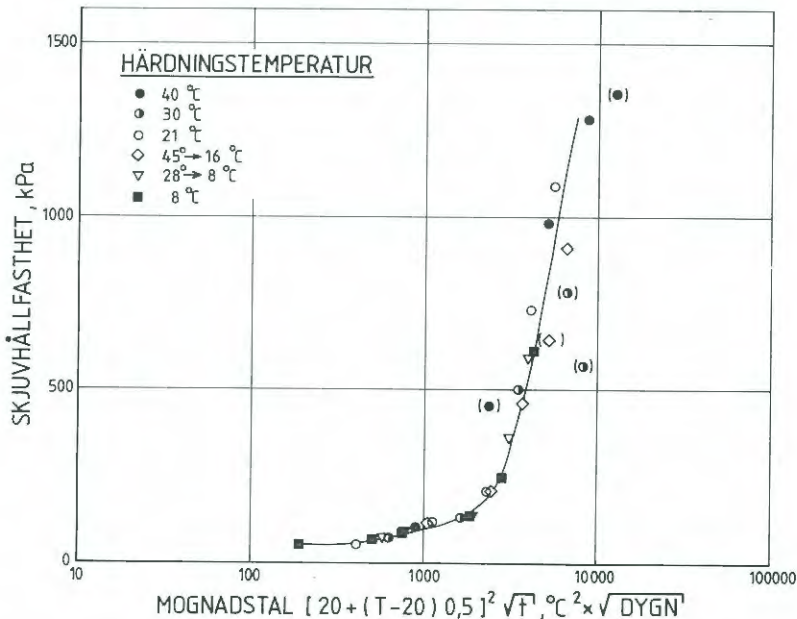
4.2 Mognadstal anpassat till de utförda undersökningarna

Laboratorieförsöken

För de utförda laboratorieundersökningarna på den varviga lera från Fittja har ett mognadstal

$$M_T = [20 + (T - 20) \cdot 0,5]^2 \sqrt{t}$$

visat sig ge en god anpassning till de erhållna värdena, se figur 18.

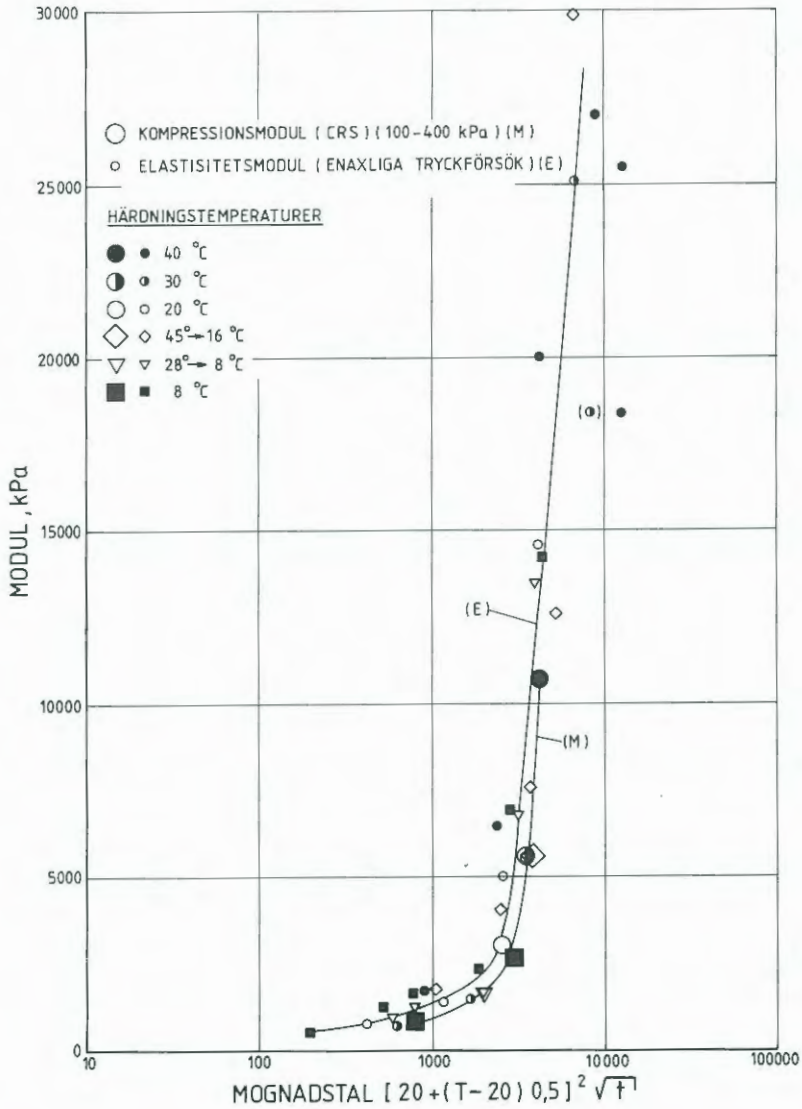


FIGUR 18. Skjuvhållfasthet vs mognadstal M_T för varvig lera från Fittja.

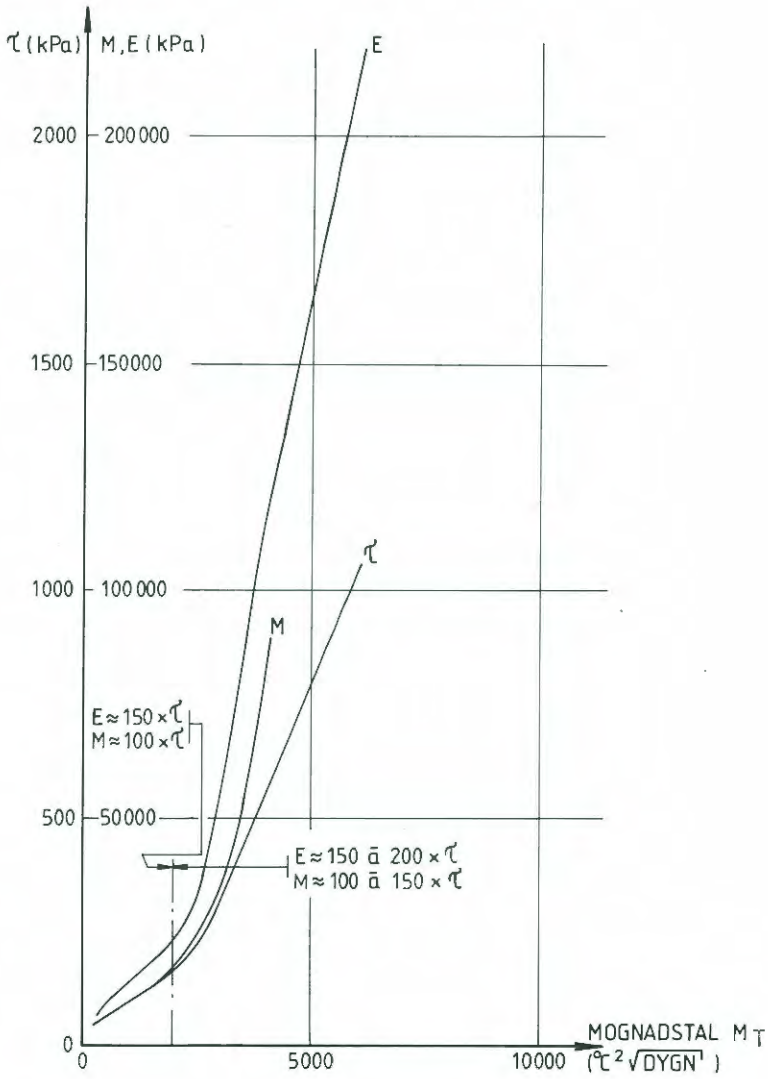
Detta mognadstal utgår från härdningstemperaturen 20°C där härdningsprocessen antas följa en funktion $T^2 \cdot \sqrt{t}$. För högre och lägre härdningstemperaturer gäller något olika förlopp men dessa har relaterats till förloppet vid 20°C genom en ansatt temperaturnivå motsvarande en höjning/sänkning med halva temperaturskillnaden till 20°C .

En kontinuerlig, om än allt långsammare, skjuvhållfasthetstillväxt sker vid samtliga härdningstemperaturer ännu efter 6 månader. En fortsatt tillväxt enligt figur 18 innebär att skjuvhållfastheten 6 månader efter inblandning för prover lagrade vid 40°C , motsvarar den som prover lagrade vid 8° skulle komma att ha ca 10 år efter inblandning. Prover lagrade vid 20°C skulle ha samma skjuvhållfasthet efter ca 2,5 år.

Även den stabiliserade jordens deformationsegenskaper tycks i stort följa ett mognadsförlopp enligt M_T . Figur 19 visar deformationsmoduler bestämda från enaxliga tryckförsök för spänningar upp till ca 70 à 80% av brottspänningen (E) och från kompressionsförsök, CRS, i spänningsintervallet ca 100-400 kPa (M). Värden på E ligger ca 1,5 gånger högre än M. I figur 20 har medelkurvan för skjuvhållfasthet och moduler lagts in i samma diagram. Av figuren framgår att E och M är ungefär lika med $150 \times \tau$ respektive $100 \times \tau$ fram till ett mognadstal av 2000 à 3000 $^{\circ}\text{C}^2 \times \text{DyGN}^{\frac{1}{2}}$. Vid högre mognadstal sker en snabbare ökning av moduler än av skjuvhållfasthet. Uppmätta värden för E är här 150 à 200 $\times \tau$ och för M 100 à 150 $\times \tau$.



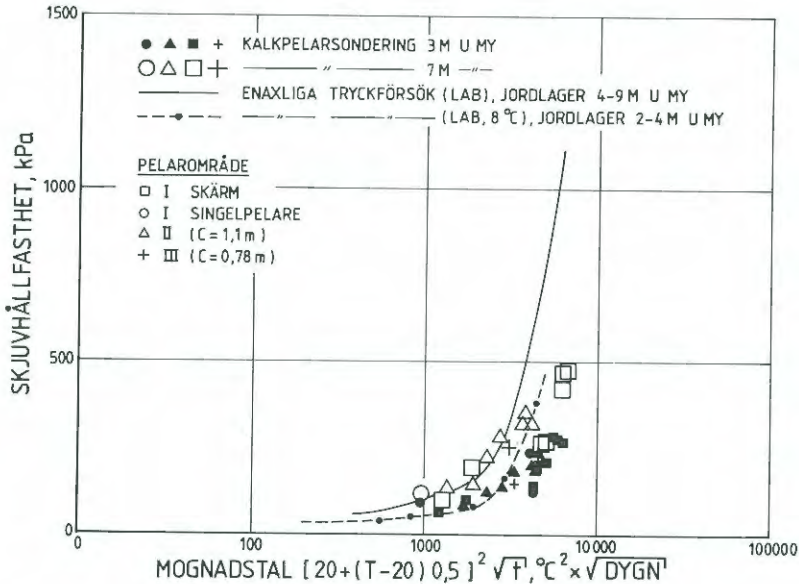
FIGUR 19. Deformationsmodul vs mognadstal M_T , för varvig lera från Fittja.



FIGUR 20. Medelkurva för skjuvhållfasthet och deformationsmoduler, för varvig lera från Fittja.

Fältförsök

Även skjuvhållfasthetsvärdena från kalkpelarsonderingarna i fält kan sammanställas ritade mot mognadstal, se figur 21. Samma ekvation för mognadstal som använts för laboratorieförsöken ger en relativt god anpassning för den första delen av härdningsförloppet, med värden på skjuvhållfastheten 7 m under markytan 60-80% större än den 3 m under markytan.



FIGUR 21. Skjuvhållfasthet bestämd för pelare i fält jämfört med den bestämd för prover på laboratorium, för varvig lera från Fittja.

Medelkurvan för skjuvhållfasthetsbestämningar på laboratoriet visar på en med tiden klart avvikande skjuvhållfasthetstillväxt jämfört med den bestämd genom kalkpelarsondering i fält. Skjuvhållfasthetstillväxten går långsammare i fält än på laboratorium, i Fittja märks detta tydligt när mognadstal på 3000 à 4000 uppnåtts. (Ett mognadstal på ca 3000 motsvarar vid temperaturen 20-30° tiden 2-3 mån.) Detta kan till stor del bero på de annorlunda förhållanden som råder i fält jämfört med på laboratorium, såsom annan packning vid inblandning, olika homogen inblandning, inverkan av spänningar och portryck i jorden eller ändrat vatteninnehåll i pelarna. Det kan även till viss del vara ett utslag av en osäker utvärdering av kalkpelarsonderingar framförallt vid högre hållfasthet hos pelarna.

5. GENERELLT MOGNADSTAL M_T 5.1 En mer generell ekvation M_T för anpassning till andra jordar och andra stabiliseringsmedel

Ett mognadstal som ger användbar anpassning åt resultat från stabilisering av andra jordar med några olika stabiliseringsmedel har den mer generella formen

$$M_T = [20 + (T - 20) \cdot K]^2 \cdot \sqrt{t}$$

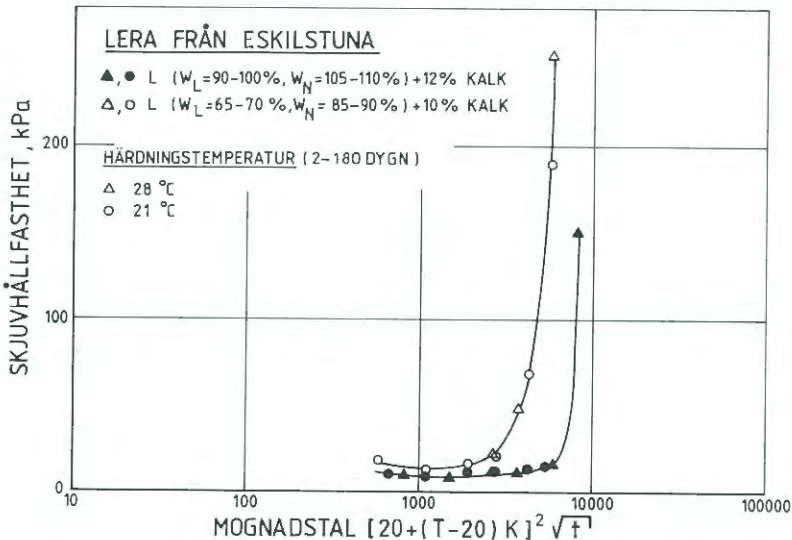
där T = härdningstemperaturen ($^{\circ}\text{C}$)

t = härdningstiden (dygn)

K = faktor som varierar beroende på jordart, stabiliseringsmedel och härdningstemperatur

5.2 Svenska jordar

Mognadstalet M_T med $K = 0,5$ gav god anpassning för försöken på den varviga lera ($w_L = 50-55\%$, $w_N = 50-60\%$) från Fittja. Stabiliseringsmedlet var ca 8% kalk och härdningstemperaturen 8-40 $^{\circ}\text{C}$.

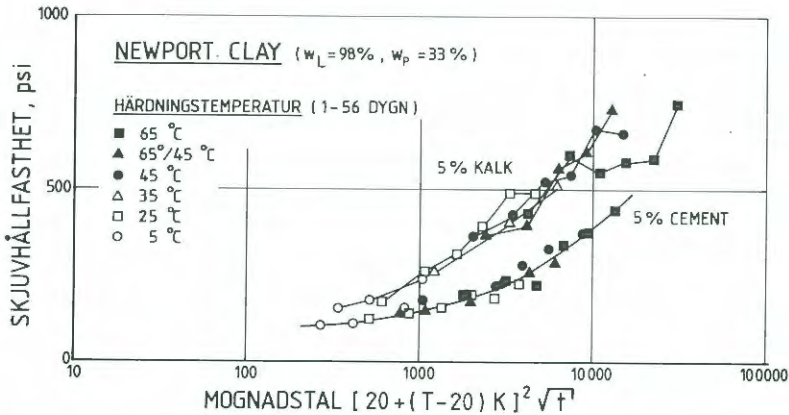


FIGUR 22. Skjuvhållfasthet vs mognadstal där $K=0,5$, för lera från Eskilstuna.

För ett forskningsprojekt på SGI angående laboratorierutiner för kalkstabiliseringsförsök har stabilisering av två leror ($w_L=90-100\%$, $w_N=105-110\%$ respektive $w_L=65-70\%$, $w_N=85-90\%$) från Eskilstuna utförts med lagring av prover vid temperaturen ca 21-28°C. Använt stabiliseringsmedel var ca 12% respektive ca 10% kalk. Även här ger mognadstalet M_T med $k = 0,5$ en god anpassning, se figur 22.

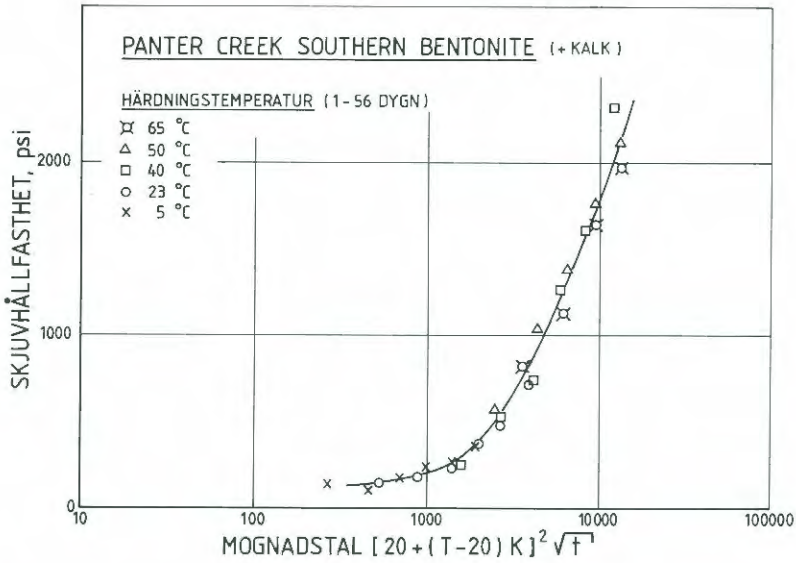
5.3 Utländska jordar

Metcalf (1963) har redovisat undersökningar på montmorillonitisk lera ($w_L=98\%$, $w_p=65\%$) från Newport, Australien som stabiliserats med 5% kalk och med 5% cement. Använd härdningstemperatur var 5-65°C. Figur 23 visar redovisade skjuvhållfasthetsvärden ritade mot mognadstal M_T . $K=0,5$ för cement och 0,4 och 1,0 för kalk vid härdningstemperaturen 5°C respektive 25-65°C.



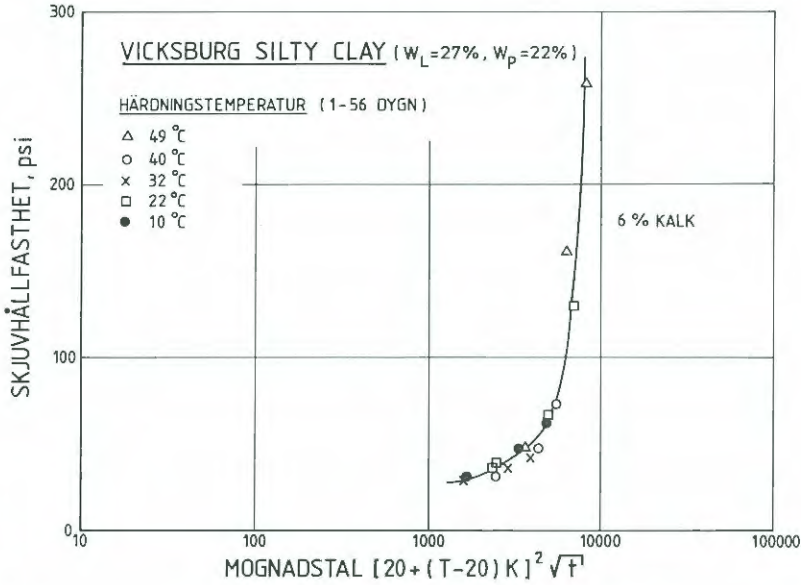
FIGUR 23. Skjuvhållfasthet (från Metcalf, 1963) vs mognadstal M_T för lera från Newport, Australien.

Ruff och Ho (1966) har studerat härdningstemperaturens inverkan på kalkstabiliserad "Panter Creek Southern" bentonitlera från Mississippi, USA. Använd härdningstemperatur var 5-60°C. Figur 24 visar redovisade skjuvhållfasthetsvärden ritade mot mognadstal M_T . Värden på K av 0,25 och 1,0 har använts för härdningstemperaturerna 5°C respektive 23-60°C. Figur 24 kan jämföras med figur 3 som visar skjuvhållfasthet vs mognadstal enligt Rastrup för samma jord.

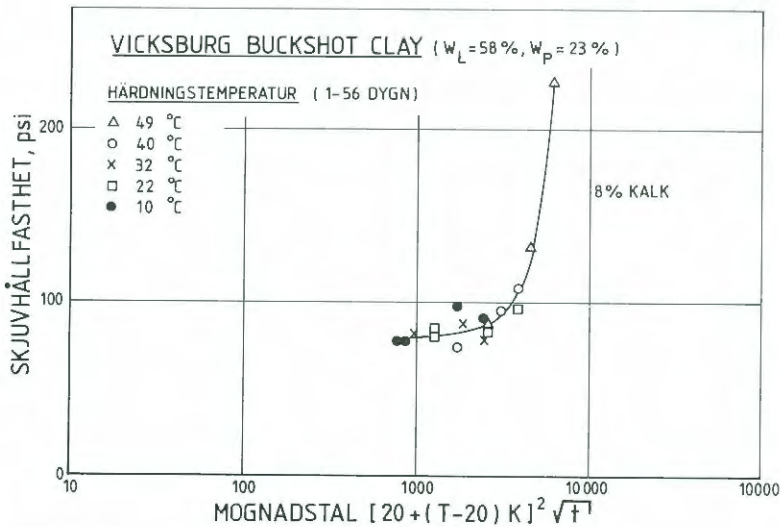


FIGUR 24. Skjuvhållfasthet (från Ruff & Ho 1966) vs mognadstal M_T för lera från Mississippi, USA. $K = 0,25$ och $1,0$ för härdningstemperaturen 5°C respektive $23-65^\circ\text{C}$.

Townsend och Donaghe (1976) har studerat härdningstemperaturens inverkan på bl a kalkstabiliserad siltig lera och lera från Vicksburg, USA. Använd kalkmängd motsvarande 6% för den siltiga leran och 8% för leran. Härdningstiden var 7-56 dygn vid temperaturerna $10-22^\circ\text{C}$ men endast 1-5 dygn vid temperaturerna $32-49^\circ\text{C}$. Figur 25 och 26 visar redovisade skjuvhållfasthetsvärden ritade mot mognadstal M_T . För den siltiga leran har $K = 0,2$ och $0,8$ använts för härdningstemperaturerna 10°C respektive $22-49^\circ\text{C}$. För leran har motsvarande K -värden varit $0,2$ respektive $1,1$. Jämför figur 4 som visar skjuvhållfasthet och mognadstal enligt Rastrup för den siltiga leran.

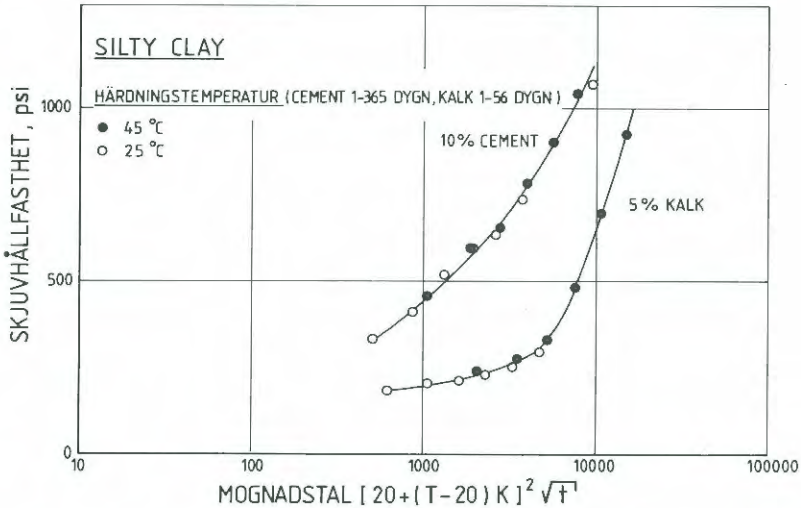


FIGUR 25. Skjuvhållfasthet (från Townsend & Donaghe 1976) vs mognadstal M_T för siltig lera från Vicksburg, USA. $K = 0,2$ och $0,8$ för härdningstemperaturen 10°C respektive $22-49^\circ\text{C}$.



FIGUR 26. Skjuvhållfasthet (från Townsend & Donaghe 1976) vs mognadstal M_T för lera från Vicksburg, USA. $K = 0,2$ och $1,2$ för härdningstemperaturen 10°C respektive $22-49^\circ\text{C}$.

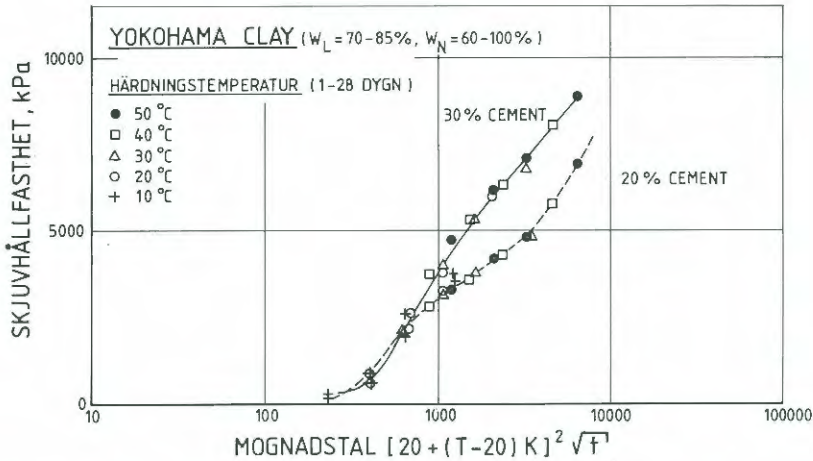
Dumbleton och Sherwood (1966) har redovisat försök på siltig lera från Storbritannien som stabiliserats med 5% kalk och med 10% cement. Använd härdningstemperatur var 25-45°C. Figur 27 visar redovisade skjuvhållfasthetsvärden ritade mot mognadstal M_T . $K = 0,5$ för cement och 1,0 för kalk.



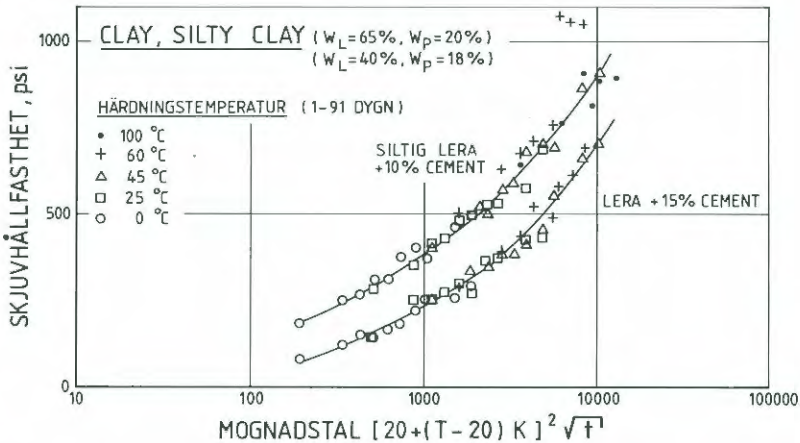
FIGUR 27. Skjuvhållfasthet (från Dumbleton & Sherwood 1966) vs mognadstal M_T för siltig lera från Storbritannien. $K = 0,5$ för cement och 1,0 för kalk.

Härdningstemperaturens inverkan vid cementstabilisering av lera ($w_L=70-85\%$, $w_N=60-100\%$) från Yokohama, Japan har studerats av Suzuki (1982). Använd cementmängd motsvarade 20% och 30% och härdningstemperaturen var 10-50°C. Figur 28 visar redovisade skjuvhållfasthetsvärden ritade mot mognadstal M_T för $K = 0,5$.

Härdningstemperaturens inverkan vid cementstabilisering har studerats även av Clare och Pollard (1954). Undersökta jordar var bl a lera ($w_L=65\%$, $w_p=18\%$) från Brockenhurst, siltig lera ($w_L=40\%$, $w_p=18\%$) från Harmondsworth samt organisk sand från Lyndhurst, samtliga England. Använd cementshalt var 10% för den siltiga leran och sanden samt 15% för leran. Härdningstemperaturen var 0-60°C för leran och sanden och 0-100°C för den siltiga leran. Figur 29 visar redovisade skjuvhållfasthetsvärden för leran och den siltiga leran ritade mot mognadstal M_T . Använt K-värde är 0,3 och 0,5 vid härdningstemperaturen 0°C respektive 25-100°C.

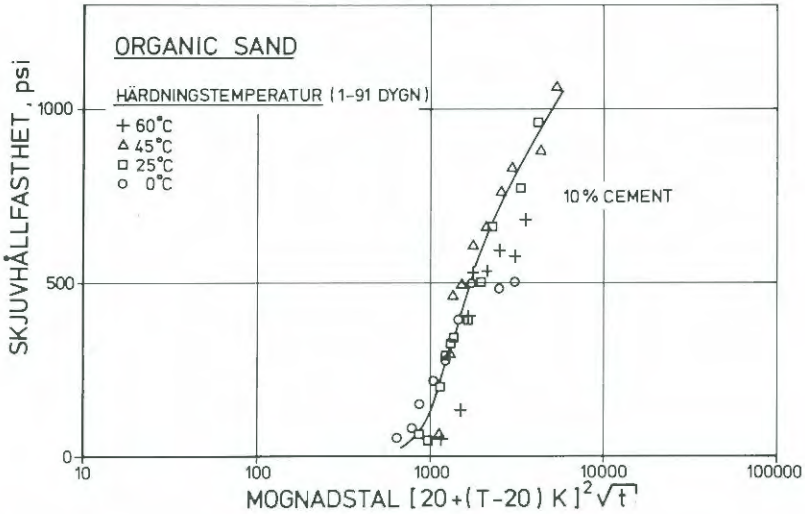


FIGUR 28. Skjuvhållfasthet (från Suzuki 1982) vs mognadstal M_T för lera från Yokohama, Japan. $K = 0,5$.



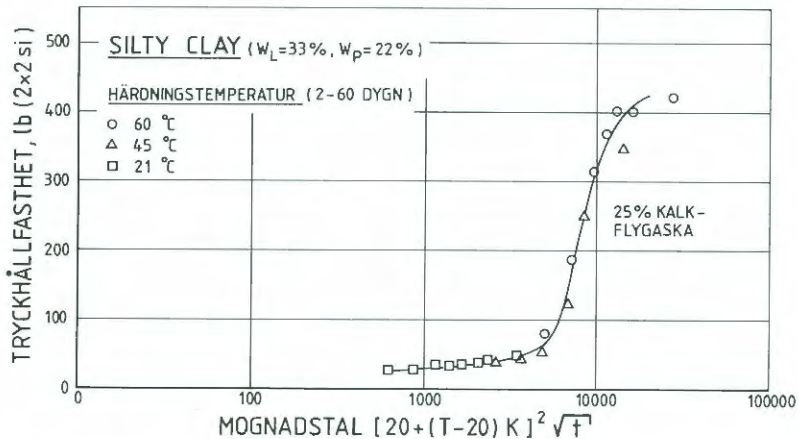
FIGUR 29. Skjuvhållfasthet (från Clare & Pollard 1954) vs mognadstal M_T för lera från Brockenhurst och siltig lera från Harmonds-worth, England. $K = 0,3$ och $0,5$ för härdningstemperaturerna 0°C respektive $25-100^\circ\text{C}$.

Vid stabilisering av den organiska sanden uppstod en fördröjning i skjuvhållfasthetstillväxt under de 5-6 första dygn efter inblandning. Vid härdningstemperaturen 0°C stannade dessutom skjuvhållfasthetstillväxten upp efter ca 1 månad. Mognadstalet M_T ger en relativt dålig anpassning åt de redovisade värdena, framförallt för härdningstemperaturen 0°C , se figur 30 där $K = 0,1$ för härdningstemperaturen 0°C och $K = 0,15$ för $25-60^\circ\text{C}$.



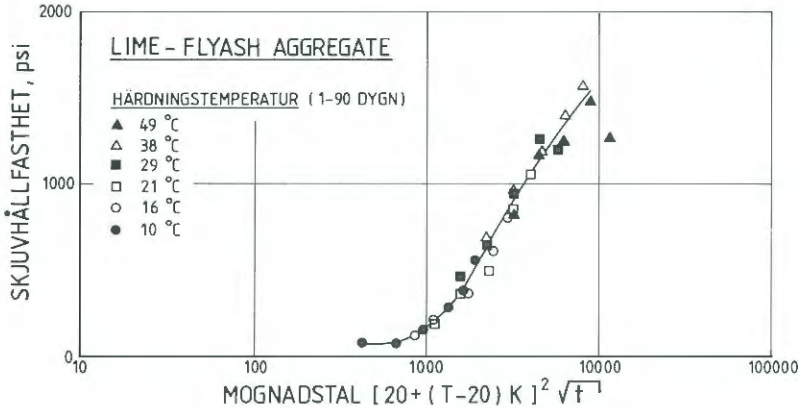
FIGUR 30. Skjuvhållfasthet (från Clare & Pollard 1954) vs mognadstal M_T för organisk sand från Lyndhurst, England. $K = 0,1$ för härdningstemperaturen 0°C och $K = 0,15$ för $25\text{--}60^\circ\text{C}$.

Undersökningar av härdningstemperaturens inverkan vid kalk-flygaskastabilisering av siltig lera ($w_L=33\%$, $w_p=22\%$) från USA har utförts av Goecker m fl (1956). Använd kalk-flygaska var 25% i blandningsförhållandet 1:2. Härdningstemperaturen var $21\text{--}60^\circ\text{C}$. Figur 31 visar redovisade skjuvhållfasthetsvärden ritade mot mognadstal M_T för $K = 1,0$.



FIGUR 31. Skjuvhållfasthet (från Goecker m fl 1956) vs mognadstal M_T för siltig lera från USA. $K = 1,0$.

Undersökningar av härdningstemperaturens inverkan vid kalk-flygaskastabilisering av blandningar av grövre material (\approx grus) från USA, finns redovisade i National Cooperative Highway Research Program 37 (1976). Härdningstemperaturen var 10-40°C. Figur 32 visar redovisade skjuvhållfasthetsvärden ritade mot mognadstal M_T för $K = 0,4$ och $0,5$ vid härdningstemperaturen 10°C respektive 16-49°C.

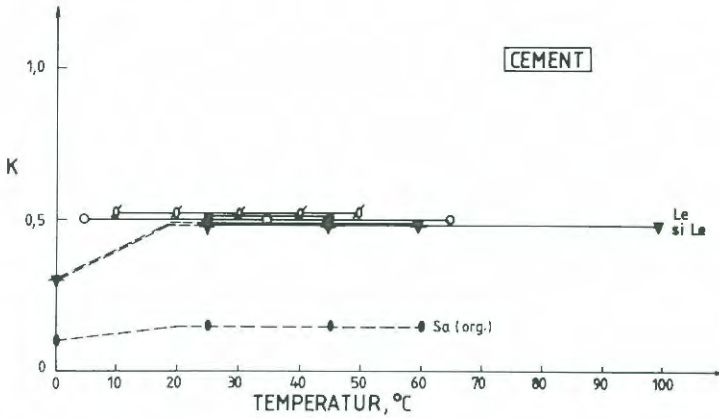
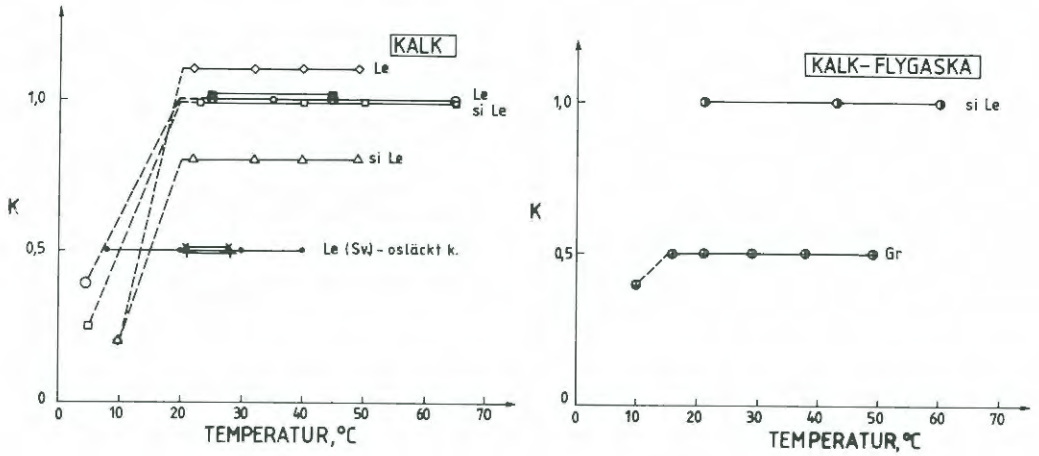


FIGUR 32. Skjuvhållfasthet (från Nat. Coop. Highw. Res. Program 37, 1976) vs mognadstal M_T för grusigt material från USA.

5.4 K-värdet

K-värdet för olika jordar och olika stabiliseringsmedel finns sammanställt i figur 33. De redovisade resultaten från försöken på svensk lera visar på ett K-värde lika med 0,5 vid stabilisering med osläckt kalk. Detta är lägre än vad försök med stabilisering av lera utomlands givit. K-värdet har i det senare fallet varit 1,0-1,1 för rena leror och något lägre, 0,8-1,0 för siltiga leror vid härdningstemperaturer över 20°C. Vid lägre härdningstemperaturer har skillnaden i inverkan på skjuvhållfastheten jämfört med den vid 20°C varit lägre vilket givit K-värden av 0,2-0,4. Utomlands har släckt kalk använts. Även blandnings- och packningsförfarandet vid preparering av prover har skilt sig från det svenska utförandet. Variationer i utförande förekommer även mellan de olika utländska undersökningarna.

Endast två undersökningar med kalk-flygaskastabiliserad jord finns redovisade i figur 33. Resultaten tyder dock på ett något lägre K-värde för grövre material jämfört med ett finare.

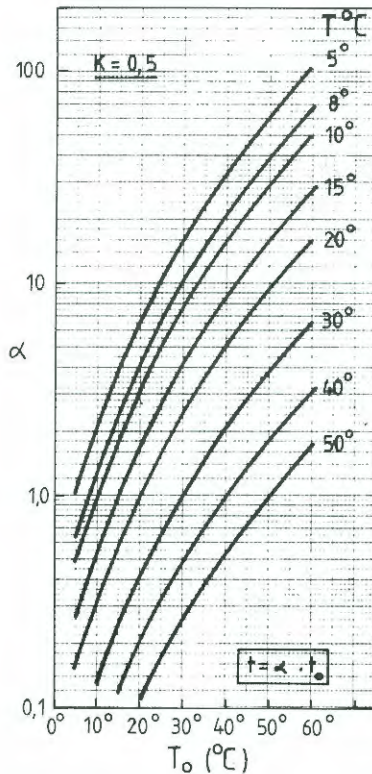


	Jord	w_F (%)	w_n (%)	w_p (%)	stab.- medel
•	Lera (Sverige)	50-55	50-65	22	8% osl. kalk
+	"-	65-70	85-90		10% "-"
x	"-	90-100	105-110		12% "-"
○	Lera (Austr)	98	-	65	5% sl. kalk
	"-	98	-	65	5% cement
□	Lera (USA)	-	-	-	sl. kalk
◇	"-	58	-	23	8% "-"
△	Siltig lera (USA)	27	-	22	6% "-"
■	Siltig lera (Storbr)	-	-	-	5% "-"
	"-	-	-	-	10% cement
	"-	40	-	18	10% "-"
▼	Lera (Storbr)	65	-	20	15% cement
●	Org. sand (Storbr)	-	-	-	10% "-"
∅	Lera (Japan)	70-85	60-100	-	20% "-"
	"-	70-85	60-100	-	30% "-"
⊙	Siltig lera (USA)	33	-	22	25% kalk-flygaska
⊕	Grus (USA)				kalk-flygaska

FIGUR 33. K-värde för olika jordar och olika stabiliseringsmedel vs härdningstemperatur.

Sammanställningen av undersökningar på cementstabiliserad jord har för lera och siltig lera visat på ett K-värde lika med ca 0,5 vid härdningstemperaturer från 8-100°C. Försök med härdningstemperaturen 0°C har givit K-värdet 0,3. Resultaten av undersökningarna på den organiska sanden gav en relativt dålig anpassning till mognadstalet M_T men antyder möjligen även här på ett lägre K-värde för grövre än för finare material.

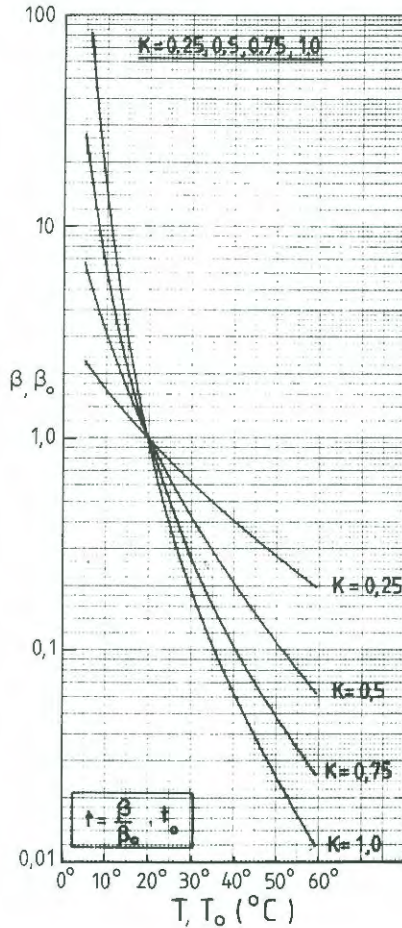
Figur 34 kan, för $K = 0,5$, användas vid beräkning av hur mycket snabbare/långsammare skjuvhållfasthetstillväxten går vid en ändring av härdningstemperatur. En temperatur på t ex 15°C ger för $K = 0,5$ en ca 4,2 gånger långsammare tillväxt än vad en härdning vid 30°C gör, se exempel i figur 34.



$$\frac{ex}{t_{15^\circ}} = 4,2 \cdot t_{30^\circ}$$

FIGUR 34. Nomogram för beräkning av förändring i tillväxttakt vid förändrad temperaturnivå, för $K = 0,5$. (T =temperatur, t =tid för att uppnå en viss skjuvhållfasthet.)

Figur 35 kan användas vid beräkning av hur mycket skjuvhållfasthets-tillväxten förändras vid olika K-värden. Skulle K-värdet istället vara 1,0 i exemplet ovan, ger detta en tillväxttakt enligt $t_{15^\circ} \approx 16 \cdot t_{30^\circ}$, se exempel i figur 35. Är däremot K-värdet 0,25 vid härdningstemperatu-ren 15°C och 1,0 vid 30°C innebär detta en tillväxttakt enligt $t_{15^\circ} \approx 6,5 \cdot t_{30^\circ}$.



$$\begin{aligned} \text{ex} \\ K=1,0 \rightarrow t_{15^\circ} &= \frac{3,15}{0,2} \cdot t_{30^\circ} \\ &\approx 16 \cdot t_{30^\circ} \end{aligned}$$

FIGUR 35. Nomogram för beräkning av förändring i tillväxttakt relativt den vid 20°C för olika härdningstemperaturer. $K = 0,25, 0,5, 0,75$ och $1,0$. (T =temperatur, t =tid för att uppnå en viss skjuvhållfasthet.)

6. SLUTSATSER

De utförda fält- och laboratoriuundersökningarna samt sammanställningarna av tidigare utförda utländska undersökningar visar att

- djupstabilisering av jord med kalk eller med cement ger en förhöjd temperaturnivå såväl i stabiliserad jord som i jorden mellan pelarna. Temperaturnivån beror bl a på mängden stabiliseringsmedel, ursprunglig temperatur hos jorden samt hur tätt pelarna installeras och den avtari entakt beroende framförallt av geometri och termiska egenskaper hos det stabiliserade området.
- Vid beräkning av temperaturens inverkan på skjuvhållfastheten hos stabiliserad jord kan ett mognadstal

$$M_T = [20 + (T - 20)K]^2 \cdot \sqrt{t}$$

användas där T = härdningstemperatur (°C), t = tid efter inblandning (dygn) och K = konstant beroende av jordtyp, temperatur och använt stabiliseringsmedel. En uppskattning av hur en ändring av härdningstemperaturen påverkar härdningsförloppet i ett visst fall kan göras genom att välja K-värde med ledning av figur 33. Tills ytterligare erfarenhet vunnits av temperaturens inverkan vid kalkstabilisering av svenska jordar kan ett antagande om skjuvhållfasthetsutvecklingen i detta fall ske med utgångspunkt från K-värdet 0,5. Hur eventuella avvikelser i K-värde påverkar tidsutvecklingen kan uppskattas med hjälp av diagrammet i figur 35.

Ytterligare undersökningar bör utföras av temperaturens inverkan vid kalkstabilisering av svenska leror för att verifiera giltigheten av K = 0,5. Undersökningar av K-värdet bör utföras även för andra jordar, såsom siltig lera och organisk lera, och för andra stabiliseringsmedel än enbart kalk.

- Provning på laboratorium inför projektering av en kalkpelarförstärkning bör kunna utföras med lagring av prover vid en temperatur av t ex 30°C i stället för som nu, vilket är standard i Sverige, 8°C.

Detta skulle för ett K-värde lika med 0,5 innebära en 10-faldig avkortning av provningstiden.

Antaget K-värde har stor betydelse vid bedömning av hållfasthetstillväxt. Tills vidare bör därför vid provning på laboratoriet ett par kompletterande försök utföras på prover lagrade vid annan temperatur, t ex 8°C och 20°C, för att verifiera antaget K-värde.

- Ytterligare undersökningar av värmeutvecklingen i stabiliserad jord i fält bör utföras för olika stabiliseringsmedel och för olika jordar. Likaså bör inverkan av det stabiliserade områdets storlek och form samt pelarnas centrumavstånd på temperaturen i fält undersökas vid olika tidpunkter efter installation. Tills vidare kan för kalkstabiliseringsprojekt liknande det i Fittja antas en motsvarande härdningstemperatur för pelare, dvs ca 15-20°C fram till 3 månaders ålder och ca 10-15°C under 1 års tid.
- Uppmätt skjuvhållfasthetstillväxt hos pelarna i Fittja var något långsammare än den som proverna på laboratoriet visade på för motsvarande härdningstemperatur. Jämförande undersökningar bör utföras på flera platser för att klarlägga om och på vilket sätt de speciella förhållandena i fält påverkar hållfasthetsutvecklingen. En vidareutveckling av kalkpelarsonden bör ske för att säkerställa att sonderingar sker centriskt i pelare och att ett relevant värde på skjuvhållfastheten erhålls för testade pelare.

REFERENSER

Bergström, S.G., 1953. Curing Temperature, Age and Strength of Concrete. Magazine of Concrete Research, Vol 5, No 14, 1953.

Biswas, B., 1972. Study of Accelerated Curing and Other Factors Influencing Soil Stabilization, Ph.D.Thesis, Texas A+M University, Texas, 1972.

Bjerin, L., Ekström, A. & Andersson, Ö., 1984. Väg 588 i Fittja - Ett exempel på aktiv design vid vägbyggnad, NGM-84, Linköping 1984.

Clare, K.E. & Pollard, A.E., 1954. The Effect of Curing Temperature on the Compressive Strength of Soil-Cement Mixtures, Geotechnique, Vol IV, 1954.

Dumbleton, M.J. & Sherwood, P.T., 1966. The Use of Lime and Mixtures of Lime and Pulverized Fuel Ash for Soil Stabilization in Britain. Chemistry and Industry, Oct 1966.

Goecker, W.L., Moh, Z.C., Davidsson, D.T. & Chu, TY., 1956. Stabilization of Fine and Coarse-Grained Soils with Lime-Flyash Admixtures. Highway Research Board, Bull 129, 1956.

Holm, G., Bredenberg, H. & Broms, B., 1981. Lime Columns as Foundation for Light Structures, 10th ICSMFE, Stockholm 1981.

Kujala, K., 1984. Faktorer som inverkar på djupstabiliserade jordars mekaniska egenskaper. Proc. NGM-84, Linköping, 1984.

Metcalf, J.B., 1963. The Effect of High Curing Temperature on the Unconfined Compressive Strength of a Heavy Clay stabilized with Lime and with Cement. Proc. 4th Australian-New Zealand Conf. on SMFE, Adelaide, 1963.

National Cooperative Highway Research Program, Syntheses 37, 1976. Lime-Fly Ash-Stabilized Bases and Subbases. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1976.

Plowman, J.M., 1956. Maturity and the Strength of Concrete. Mag. of Concrete Research, Vol 8, No 22, 1956.

Rastrup, E., 1954. Heat of Hydration in Concrete. Mag. of Concrete Research, Vol 6, No 17, 1954.

Ruff, C.G. and Ho Clara, 1966. Time-Temperature Strength-Reaction Product Relationships in Lime-Bentonite-Water Mixtures, Highway Research Record No 139, 1966.

Saul, A.G.A., 1951. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. Magazine of Concrete Research Vol 2, No 6, 1951.

Suzuki, Y., 1982. Deep Chemical Mixing Method Using Cement as Hardening Agent. Symp. on Soil and Rock Improvement Techn. including Geotextiles. Reinforced Earth and Modern Piling Methods, Bangkok, 1982.

Townsend, F. & Donaghe, R., 1976. Investigation of Accelerated Curing of Soil-Lime and Lime-Fly Ash-Aggregate Mixtures. Technical Report S-76-9, US Army Eng. Waterways Experiment Station, 1976.

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
Swedish Geotechnical Institute
S-581 01 LINKÖPING
Tel: 013 - 11 51 00

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
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. Grundläggningskostnadernas fördelning B. Carlsson	1979
9. Horisontalarmerade fyllningar på lös jord. J. Belfrage	1981
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 fills at Väsby, Sweden. Y.C.E. Chang	1981

RAPPORT/REPORT No		År
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
20.	Portrycksvariationer i leror i Göteborgsregionen. J. Berntson	1983
21.	Tekniska egenskaper hos restprodukter från kol-förbränning - 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

RAPPORT/REPORT

No

År

28. Deponering av avfall från Kol- och torveldning.
T. Lundgren, P. Elander

1986

29. Consolidation of soft soils.
R. Larsson

1986

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT

Besöksadress: Olaus Magnus Väg 35

Postadress: 58101 Linköping

Telefon: 013-115100