



Svensk Djupestabilisering  
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Rapport I

# Erfarenhetsbank för kalk-cementpelare

Torbjörn Edstam

## **Svensk Djupstabilisering**

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

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

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

Ytterligare upplysningar om verksamheten lämnas av SD:s projektledare Göran Holm, tel: 013-20 18 61, 070-521 09 39, fax: 013-20 19 13, e-mail: holm@geotek.se

## **Swedish Deep Stabilization Research Centre**

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

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

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

Further information on the Swedish Deep Stabilization Research Centre can be obtained from the Project Manager, Mr G Holm, tel: +46 13 20 18 61, fax: +46 13 20 19 13 or e-mail: holm@geotek.se



**Svensk Djupstabilisering**  
Swedish Deep Stabilization Research Centre

## **Rapport 1**

# Erfarenhetsbank för kalk-cementpelare

Torbjörn Edstam  
Chalmers Tekniska Högskola

Linköping 1997

<b>Rapport</b>	Svensk Djupstabilisering c/o Statens geotekniska institut 581 93 Linköping
Beställning	Tel: 013-20 18 62 Fax: 013-20 19 13 E-post: <a href="mailto:sussyl@geotek.se">sussyl@geotek.se</a>
ISSN	1402-2036
ISRN	SD-R--97/1--SE
Upplaga	400
Tryckeri	Roland Offset AB, Linköping, mars 1997

# Förord

Svensk Djupestabilisering har tagit fram en omfattande FoU-plan för att öka kunskapen om djupestabilisering med kalk-cementpelare. Som ett led i FoU-planen har detta projekt genomförts, i syfte att samla in och sammanställa erfarenheter från användning av kalk-cementpelare. Dessutom skall rapporten fungera som ett underlag för eventuell revidering av FoU-planen.

Materialet har samlats in under perioden december 1995 till april 1996, med hjälp av en arbetsgrupp där följande personer ingick:

*Eva Claesson*, Banverket

*Per-Ole Danfors*, J&W

*Torbjörn Edstam*, Chalmers Tekniska Högskola (SGI fr o m maj 1996)

*Maria Eriksson*, SGI (J&W fr o m april 1996)

*Mats Olsson*, Vägverket

Dessutom har ett stort antal personer bidragit med information och upplysningar.

Representanter för beställare, entreprenörer, konsulter och forskare har fungerat som referensgrupp under projektet. I referensgruppen ingick:

Håkan Bredenberg, Stabilator

Björn Dehlbom, Banverket

Jan Ekström, Kjessler & Mannerstråle

Håkan Eriksson, Hercules

Anders Hallingberg, Banverket

Lars Holmqvist, L-C Markteknik

Ulf Johnson, Vägverket/Bo Orre Markråd AB

Matti Kiveló, Kungliga Tekniska Högskolan

Ulf Lindblom, Chalmers Tekniska Högskola

Marianne Nyberg, Vägverket

Göran Sällfors, Chalmers Tekniska Högskola

Helen Åhnberg, Statens geotekniska institut

Ett stort tack riktas till samtliga ovanstående personer.

Linköping i mars 1997

Torbjörn Edstam

Leif Pettersson



# Innehåll

<b>Förord</b>	
<b>Summary</b> .....	8
<b>Sammanfattning</b> .....	11
<b>1. Inledning</b> .....	15
1.1. Syfte .....	15
1.2. Omfattning .....	15
<b>2. Databasen</b> .....	18
2.1. Inledning .....	18
2.2. Databasens struktur och innehåll .....	19
2.2.1. Inledning .....	19
2.2.2. Deldatabasen Allmänt .....	20
2.2.3. Deldatabasen Jordan-lagerföljd .....	21
2.2.4. Deldatabasen Jordan-lerans egenskaper .....	23
2.2.5. Deldatabasen Jordan-inblandningsförsök .....	24
2.2.6. Deldatabasen Pelare-provsonderingar .....	26
2.2.7. Deldatabasen Pelare-installationsdata .....	28
2.2.8. Deldatabasen Pelare-kontrollsonderingar .....	30
2.2.9. Deldatabasen Uppföljning-rörelser, portryck och beräkningar .....	31
2.3. Kortfattad manual för sökning i databasen KCPELARE .....	32
2.3.1. Förutsättningar .....	32
2.3.2. Tillvägagångssätt vid sökning .....	32
<b>3. Resultat av sökningar i databasen</b> .....	35
3.1. Inledning .....	35
3.2. Generell statistik .....	35
3.2.1. Konstruktionstyper och belastningar .....	35

3.2.2. Funktionstyper .....	37
3.2.3. Pelarmönster .....	40
3.2.4. Stabiliseringsmedel .....	40
3.2.5. Pelardiameter .....	43
3.2.6. c/c-avstånd .....	44
3.3. Stabiliserad jords hållfasthet .....	46
3.3.1. Resultat från inblandningsförsök .....	46
3.3.2. Resultat från fältsonderingar .....	49
3.4. Pelarnas funktionssätt .....	52
3.4.1. Uppmätt och beräknad sättning .....	52
3.4.2. Uppmätt sättning i förhållande till påförd belastning .....	53
3.5. Synpunkter och erfarenheter som kan ge underlag för fortsatt forskning .....	54
3.5.1. Om projektering .....	54
3.5.2. Om tillverkning .....	55
3.5.3. Om kontroll .....	55
3.5.4. Om funktion .....	56
<b>4. Arkivering av bakgrundsmaterial till databasen .....</b>	<b>57</b>
4.1. Inledning .....	57
4.2. Objekt där översiktlig information insamlats .....	57
4.3. Objekt där detaljerad information insamlats .....	58
<b>5. I rapporten använd nomenklatur .....</b>	<b>60</b>
<b>6. FoU-rapporter, examensarbeten, artiklar och pågående FoU-projekt om kalk-cementpelare .....</b>	<b>63</b>
6.1. Inledning .....	63
6.2. Allmänt: allmänt hållna beskrivningar, state-of-the-art .....	65
6.3. Rekommendationer, anvisningar och handböcker om projektering .....	69
6.4. Provning av stabiliserad jord .....	70
6.4.1. Provning i både fält och laboratoriet .....	70
6.4.2. Provning i fält .....	72
6.4.3. Provning i laboratoriet .....	75
6.5. Förstärkning av bankar (vägbankar, järnvägsbankar, provbankar) .....	77
6.6. Förstärkning av byggnader .....	81
6.7. Förstärkning av schakter, skärningar och slänter .....	82



6.8. Förstärkning av broar (typ slutna rambroar) .....	84
6.9. Förstärkning för att reducera vibrationer .....	84
6.10. Övriga tillämpningar .....	85
6.11. Sammanfattningar från FoU-rapporter och examensarbeten .....	86
6.12. Pågående/ej publicerade projekt .....	142
<b>7. Uppdatering och utökning av databasen .....</b>	<b>148</b>
7.1. Dataformulär lämpligt att använda för s.k. översiktlig informationsinsamling .....	148
7.2. Material som bör ingå vid s.k. detaljerad informationsinsamling .....	152

# Summary

The purpose of this project has been to collect, compile, structure and to some extent analyse experience of deep stabilization with lime-cement columns. This report contains the results of the project, but a database has also been created. Furthermore, the collected material has been filed and made accessible for use in future R&D work forming part of the Swedish Deep Stabilization project.

The material comprises information of a more general nature describing where, when, how and why deep stabilization has been carried out. Extensive information has also been acquired from 57 well-documented measuring sections, including details of the properties of the natural clay, the properties of the columns, expected and observed behaviour, and so on.

The collected information comprises over five million metres of lime-cement columns installed throughout Sweden, mainly during the period 1985-1995.

A general analysis of the collected material has been made, based on the results of searches in the database. Some of the conclusions that can be drawn from these searches are described below.

In addition, a draft glossary has been produced as a basis for further work on creating standardised and unambiguous communication when lime-cement columns are being discussed.

## **General results**

The conclusions that can be drawn include the following:

- Lime-cement columns are mainly used for soil improvement beneath road and railway embankments, which together account for almost 90 % of the cases.
- Where the soil beneath road and railway embankments has been stabilized with lime-cement columns, the embankment has normally been 2-4 m high. In some cases, the embankment was up to 9 m high.

- The principal purpose of the lime-cement columns has been to reduce the settlements and to increase stability, which occur in about 67 % of the cases.
- Rectangular grids are the most common installation pattern and are used in about 75 % of the cases.
- A mixing proportion of 50 % lime and 50 % cement is used in about 75 % of the cases.
- In 67 % of the cases, the columns have a diameter of 600 mm.

### **Laboratory results**

An investigation has been made of the variation in shear strength with water content when the stabilized samples were 30-60 days old. A classification has been made on the basis of mixing proportion, mixing quantity and geographical location. In most cases, the corrected undrained shear strength of the unstabilized clay is about 10-20 kPa. In occasional cases, however, values as low as 5 kPa or as high as 25 kPa were noted. The following general conclusions can be drawn:

- The results show a large variation, probably because the laboratories used different procedures for sample preparation.
- The strength is at least 200 kPa at 25 % water content and at least 50 kPa at 100 % water content when a mixing proportion of 50 % lime and 50 % cement was used. Between these water contents, there is a linear variation in the lower limit for strength.
- With a mixing proportion of 50 % lime and 50 % cement, strength does not appear to increase noticeably with an increasing amount of additive.
- When 100 % lime is used, there is no clear relationship between water content and strength, but shear strength normally increases to at least 100 kPa.
- When 100 % cement is used the shear strength is at least 200 kPa. However, there is no clear relationship between water content and strength.
- Higher strength is obtained if 100 % cement is used instead of 50 % lime and 50 % cement.
- No clear effect of geographical location can be seen.

## Field results

An investigation has been made of the variation in sounding resistance with the water content when the samples were 30-60 days old. A classification has been made on the basis of mixing proportion, mixing quantity and geographical location. In most cases, the corrected undrained shear strength of the unstabilized clay is about 10-20 kPa. In occasional cases, however, values as low as 5 kPa or as high as 25 kPa were noted. The following general conclusions can be drawn:

- The results show a large variation, probably because different manufacturing methods have been used. In addition, different sounding methods have been used.
- When the mixing proportion is 50 % lime and 50 % cement, an increased quantity of additive does not necessarily lead to increased sounding resistance. On the other hand, a relatively clear tendency towards reduced shear strength with increased water content is observed. The evaluated shear strength is above the same boundary as that obtained in the laboratory tests.
- If lime alone is used as additive, there is no clear tendency towards reduced strength with increased water content. The evaluated shear strength is above the same boundary as that obtained in the laboratory tests.
- No clear effect of geographical location can be seen.

## Function

In connection with preloading of road and railway embankments, the results from a large number of settlement observations have been compiled. The following general conclusions are drawn:

- In almost all the cases studied, the final settlement has been considerably less than expected. On average, the actual settlement is about 40 % of that predicted. However, the size of the final settlement is based on a relatively short measuring period (at most about 1 year).
- The final settlement is about 100 mm when the embankment is about 2 m high, increasing to about 350 mm when the embankment is about 8 m high. Naturally, the settlements are not due solely to the size of the load, but also to the stiffness of the clay and columns, and the spacing of the columns. However, the above observations provide an indication of the size of the settlements that can normally be expected.

# Sammanfattning

Syftet med detta projekt har varit att samla in, sammanställa, strukturera och till viss del analysera erfarenheter kring djupstabilisering med kalk-cementpelare. Resultatet av projektet utgörs av föreliggande rapport, men dessutom har en databas skapats. Vidare finns allt insamlat material arkiverat och tillgängligt för att utnyttjas i kommande FoU-projekt, som bedrivs i regi av Svensk Djupstabilisering.

Materialet omfattar information av mer översiktlig karaktär, som belyser var, när, hur och varför djupstabilisering genomförts. Dessutom har mer omfattande information inhämtats från 57 väldokumenterade mätsektioner, med uppgifter om den oförstärkta lerans egenskaper, pelarnas egenskaper, förväntat och erhållet beteende, m.m.

Den insamlade informationen innefattar drygt 5 miljoner meter kalk-cementpelare som installerats i Sverige (från Västernorrlands län i norr till Hallands och Kalmar län i söder), huvudsakligen under tidsperioden 1985-1995.

En översiktlig analys av det insamlade materialet har utförts, baserat på resultat från ett antal sökningar i databasen. De slutsatser som kan dras av dessa sökningar redovisas nedan.

Dessutom har ett utkast till ordlista tagits fram som kan tjäna som en utgångspunkt för fortsatt arbete med att skapa ett standardiserat och entydigt språkbruk då kalk-cementpelare diskuteras.

## Allmänt

De slutsatser som kan dras är bl a:

- Kalk-cementpelare har huvudsakligen använts vid förstärkning under väg- och järnvägsbankar, vilka tillsammans utgör knappt 90 % av de fall som berörts.

- Då jorden under väg- och järnvägsbankar stabiliserats med kalk-cementpelare har bankhöjden vanligen varit 2-4 m. I några fall har bankhöjden varit upp till 9 m.
- Pelarnas huvudsakliga funktion har varit att samtidigt reducera sättningarna och öka stabiliteten, vilket förekommer i ca 2/3 av fallen.
- Kvadratisk rutnät är det i särklass vanligaste installationsmönstret, vilket förekommer i ca 3/4 av fallen.
- Inblandningsproportionen 50 % kalk och 50 % cement är dominerande och förekommer i ca 3/4 av fallen.
- Pelarna har vanligen diametern 600 mm, vilken förekommer i ca 2/3 av fallen.

### **Inblandningsförsök**

Skjuvhållfasthetens variation med den ursprungliga vattenkvoten utfördes i laboratoriet, då de stabiliserade proven uppnått en ålder av 30-60 dygn, har undersökts. Indelning har skett med avseende på inblandningsproportion, inblandningsmängd och geografisk lokal. Den ostabiliserade lerans korrigerade odränerade skjuvhållfasthet uppgår i huvuddelen av fallen till ca 10-20 kPa. I enstaka fall förekommer dock så låga värden som 5 kPa eller så höga värden som 25 kPa. De generella slutsatser som kan dras är:

- Resultaten uppvisar stor spridning, vilket troligen beror på att olika laboratorier använder olika förfaranden vid tillverkningen av provkroppar.
- Hållfastheten uppgår till minst ca 200 kPa vid 25 % vattenkvot och till minst ca 50 kPa vid vattenkvoten 100 %, då inblandningsproportionen 50 % kalk och 50 % cement används. Hållfasthetens undre gräns varierar rätlinjigt mellan dessa vattenkvoter.
- Vid inblandningsproportionen 50 % kalk och 50 % cement förefaller hållfastheten inte öka nämnvärt med ökande mängd inblandningsmedel.
- Då 100 % kalk används finns inget samband mellan vattenkvot och hållfasthet men skjuvhållfastheten uppgår vanligen till minst 100 kPa.

- Då 100 % cement tillsats överstiger skjuvhållfastheten 200 kPa, men någon koppling till lerans ursprungliga vattenkvot är svår att finna.
- Ingen tydlig effekt av geografisk lokal kan hittas.

### **Sonderingsresultat**

Sonderingsmotståndets variation med vattenkvoten, då de inblandade proven uppnått en ålder av 30-60 dygn, har undersökts. Indelning har skett med avseende på inblandningsproportion, inblandningsmängd och geografisk lokal. Den ostabiliserade lerans korrigerade odränerade skjuvhållfasthet uppgår i huvuddelen av fallen till ca 10-20 kPa. I enstaka fall förekommer dock så låga värden som 5 kPa eller så höga värden som 25 kPa. De generella slutsatser som kan dras är:

- Resultaten uppvisar stor spridning, vilket troligen beror på olika tillverkningsförfarande hos olika tillverkare. Dessutom har olika sonderingsmetoder använts (FOPS, KPS, FKPS och OKPS).
- Då inblandningsproportionen är 50 % kalk och 50 % cement leder ökande mängd tillsatsmedel nödvändigtvis inte till ökande sonderingsmotstånd. Däremot kan en relativt tydlig tendens till minskande hållfasthet med ökande vattenkvot utläsas. Den utvärderade skjuvhållfastheten ligger ovanför samma begränsningslinje som erhöles vid inblandningsförsöken.
- Då enbart kalk använts som inblandningsmedel finns ingen klar tendens till att hållfastheten minskar med ökande vattenkvot. Den utvärderade skjuvhållfastheten överstiger dock genomgående 100 kPa. Motsvarande observation kan även göras vid inblandningsförsöken.
- Ingen effekt av geografisk lokal kan utläsas.

### **Funktion**

I samband med förbelastning av väg- och järnvägsbankar har resultat från en mängd sättningsuppföljningar sammanställts. De generella observationerna är:

- I så gott som samtliga studerade fall är slutsättningen betydligt mindre än vad som förväntats. I genomsnitt uppgår den verkliga sättningen till ca 40 % av vad som prognostiserats. Slutsättningens storlek baseras dock på en relativt kort mätperiod (maximalt ca 1 år).

- Slutsättningen uppgår till ca 100 mm, då bankhöjden uppgår till ca 2 m, för att öka till ca 350 mm då bankhöjden uppgår till ca 8 m. Självklart beror sättningsarna inte enbart på lastens storlek utan även på t.ex. lerans och pelarnas styvhet samt hur tätt pelarna installerats. Ovanstående observationer indikerar dock vilken sättningsstorlek som normalt kan förväntas.



# I. Inledning

## Syfte

Syftet med detta projekt har varit att samla in erfarenheter kring jordförstärkning med \*kalkcementpelarmetoden. Baserat på materialet i databasen presenteras en del slutsatser i denna rapport. Dessa skall ligga till grund vid bedömning och prioritering av framtida forskningsprojekt. Vidare skall databasen, och det tillhörande bakgrundsmaterialet, i framtiden användas vid fortsatt forskning kring kalk-cementpelare. Databasen kan t ex användas som ett verktyg för att snabbt och enkelt identifiera och få tillgång till relevant information kring den aktuella frågeställningen.

## Omfattning

Den insamlade informationen omfattar huvudsakligen \*\*byggobjekt genomförda under tidsperioden 1985-1995. Samtliga objekt har utförts i Sverige, och är spridda från Västernorrlands län i norr till Hallands och Kalmar län i söder, se *Figur 1.1*.

Informationen som samlats in har varit av dels översiktlig och dels detaljerad karaktär. Till information av översiktlig karaktär kan t ex hänföras information om plats, varför jordförstärkningen utfördes och vilken typ av pelare som användes. Denna information finns arkiverad i form av formulär omfattande en A4-sida per objekt. Den mer detaljerade informationen innefattar dessutom

---

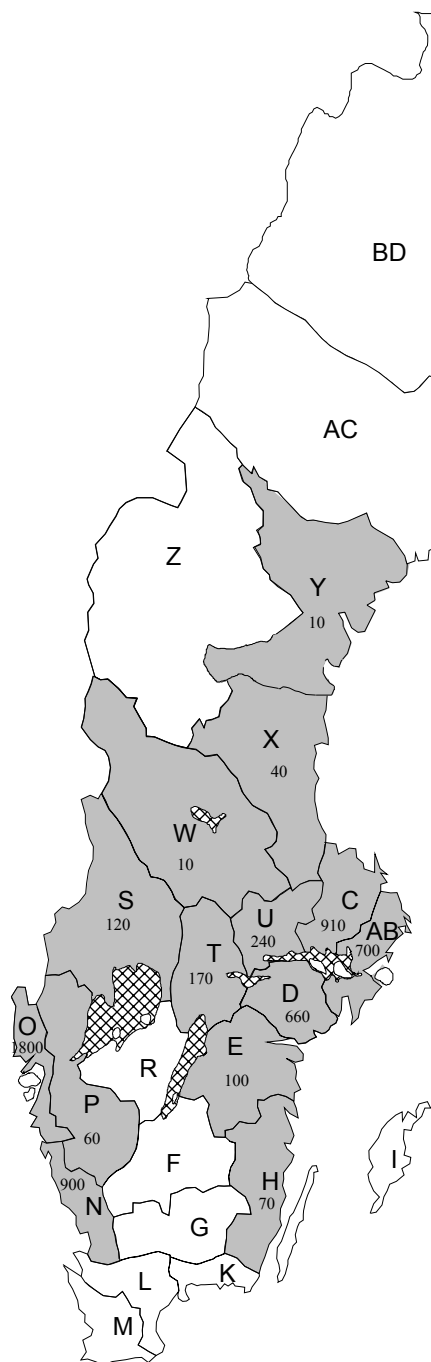
\* I denna rapport används termen kalk-cementpelare genomgående om pelare som består av enbart kalk, cement, gips eller kombinationer av dessa. Vilket material pelarna tillverkats av framgår dock av sammanhanget i den texten.

\*\* I denna rapport kan termen objekt ha två olika betydelser: då termen objekt används i samband med översiktligt informationsinsamling avses ett byggprojekt (eller en del av ett byggprojekt) med relativt likartade förhållanden; då termen objekt används i samband med detaljerad informationsinsamling avses en mycket liten del (tvärsektion e. dyl.) av ett byggprojekt.

uppgifter om jordlagerföljd, jordegenskaper, pelarhållfasthet och rörelsemätningar. Denna information finns lagrad i pärmar som innehåller ritningar och undersökningsresultat i form av protokoll, diagram, etc.

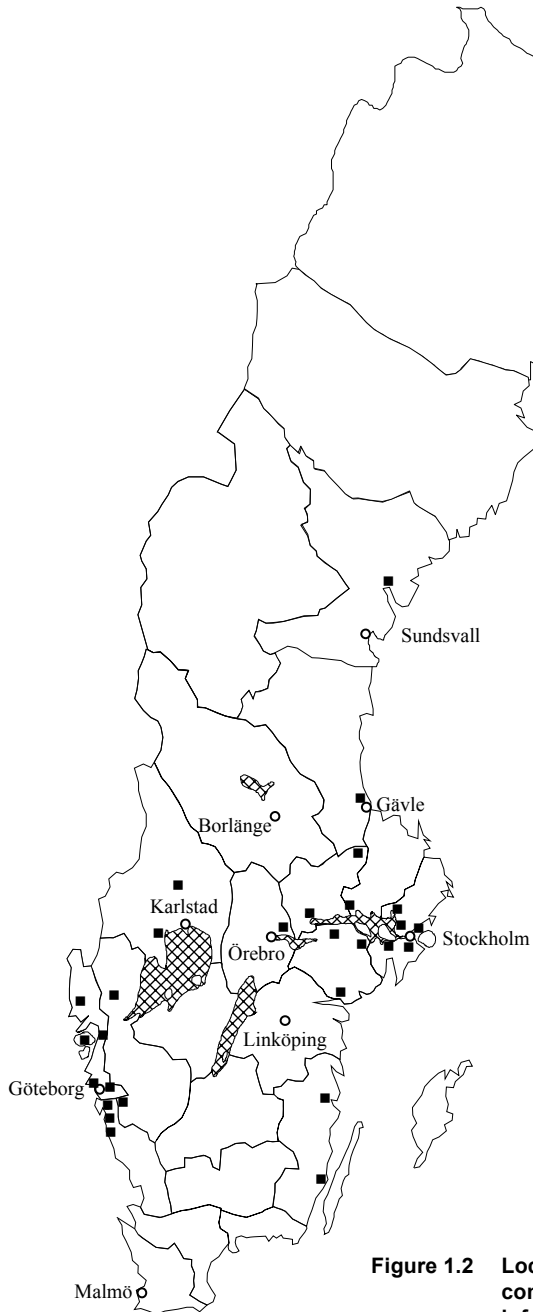
Som tidigare nämnts finns delar av ovanstående material inmatat i databasen.

Totalt berörs ca 230 objekt, varav ca 170 innehåller information av översiktlig karaktär, medan 57 objekt innehåller information av detaljerad karaktär. Den geografiska spridningen av objekten där detaljerad informationsinsamling har skett framgår av *Figur 1.2*.



**Figure 1.1** Location of the objects contributing information to the database. The map shows the counties and the figures indicate the length of columns (in thousands of metres) included in the database.

**Figur 1.1** Geografisk spridning av de objekt som bidrar med information till erfarenhetsbanken. Kartan visar länsindelningen och siffrorna anger mängden pelare i 1000-tal meter, som ingår i erfarenhetsbanken.



**Figure 1.2** Location of the objects contributing detailed information to the database.

**Figur 1.2** Geografisk spridning av de objekt som bidrar med detaljerad information till erfarenhetsbanken.

## 2. Databasen

### 2.1 INLEDNING

Syftet med att skapa en databas som behandlar djupstabilisering med kalk-cementpelare var delvis att på ett smidigt sätt hålla ordning på all den information som samlats in. Dessutom gör databasen det möjligt att på ett enkelt sätt bearbeta och presentera informationen. Hur detta sker beskrivs i Kapitel 2.3.

Databasen omfattar ca 170 st objekt där allmän information har insamlats (se Kapitel 4.2) och 57 st objekt där en mer detaljerad informationsinsamling har skett (se Kapitel 4.3). Varje objekt har tilldelats ett unikt objektnummer, som gör det möjligt att identifiera de objektpärmar (objekt där mer detaljerad information finns) alternativt dataformulär (objekt där allmän information har insamlats), som utgör bakgrundsmaterial till den information som matats in i databasen. De objekt som har objektnummer mindre än 100 utgör objekt där mer omfattande information samlats in. För övriga objektnummer gäller att endast översiktlig information samlats in.

För att göra databasen någorlunda hanterbar innehåller den huvudsakligen numeriska värden som beskriver jordens egenskaper, pelarhållfastheter, jordrörelser, etc. De uppgifter som finns i databasen utgör därför en koncentrerad, och ofta förenklad, beskrivning av de förhållanden som rådde vid varje objekt. Databasen skall således inte utnyttjas som ett redskap för att exakt förutsäga hur kalk-cementpelare kommer att uppföra sig under olika förhållanden. Däremot kan den användas för att åskådliggöra generella trender för hur kalk-cementpelare fungerat i olika situationer. Dessutom är den ett utmärkt redskap för enkel identifiering av objekt av en viss natur, för vidare studier av de objektpärmar som utgör bakgrundsmaterial till den inmatade informationen i databasen.

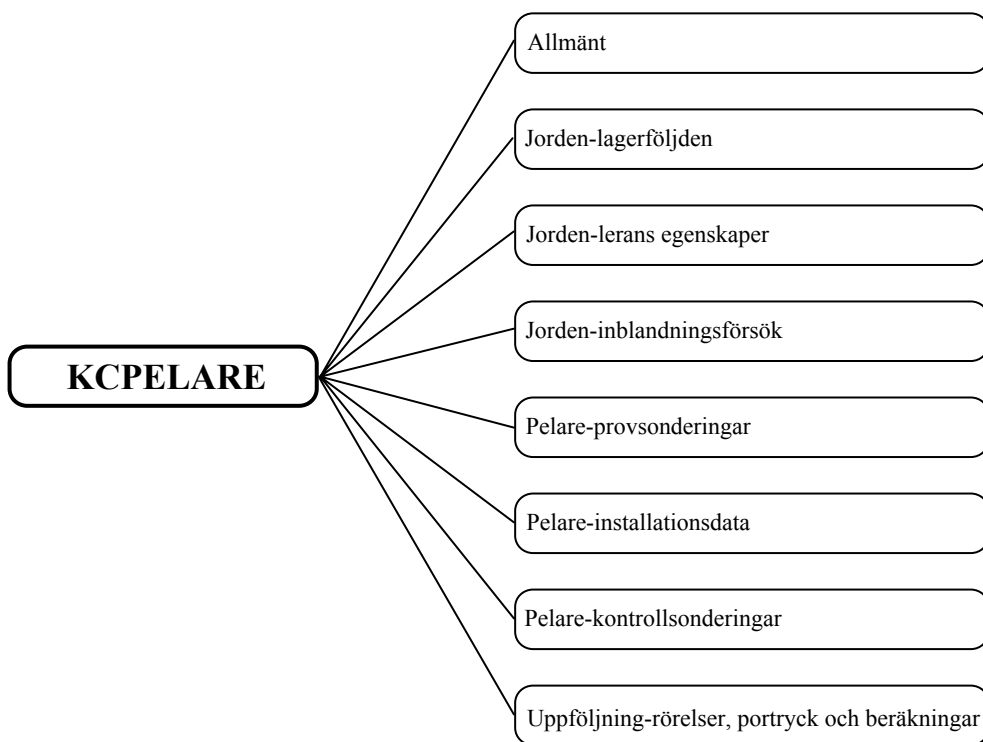
Nedan redogörs för databasens struktur och dess innehåll. Dessutom ges en kort beskrivning av hur en sökning i databasen sker.

## 2.2 DATABASENS STRUKTUR OCH INNEHÅLL

### 2.2.1 Inledning

För att göra databasen KCPELARE mer överskådlig är den indelad i en mängd deldatabaser som kan samköras (se Kapitel 2.3). I *Figur 2.1* visas databasens principiella uppbyggnad. Varje deldatabas har namngivits för att återspegla dess informationsinnehåll.

En mer ingående beskrivning av respektive deldatabas innehåll ges i de följande kapitlen (2.2.2-2.2.9).



**Figur 2.1** Principiell uppbyggnad databasen KCPELARE.

Figure 2.1 General structure of the database for lime-cement columns.

## 2.2.2 Deldatabasen Allmänt

I denna deldatabas finns information av mer allmän natur. Den information som finns lagrad är:

- **objektnr**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som är unik för varje objekt. Den kan användas för att identifiera de objektspärmar, alternativt dataformulär, som finns arkiverade om varje objekt. Dessutom är objektsnumret nödvändigt för att deldatabaserna skall kunna samköras.

- **län**

Denna post innehåller en länsbokstav som gör det möjligt att lokalisera objektets geografiska läge i grova drag.

- **longitud [°,']**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver objektets geografiska läge med en felmarginal som är mindre än 10 kilometer.

- **latitud [°,']**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver objektets geografiska läge med en felmarginal som är mindre än 10 kilometer.

- **byggår [årtal]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver det år då kalkcementpelarna installerades.

- **tillämpning**

Denna post innehåller ett eller flera sökord som beskriver vilken konstruktionstyp som grundlagts på kalk-cementpelare. De sökord som finns i deldatabasen är ”FoU-projekt”, ”järnvägsbank”, ”provbankar”, ”schakt”, ”skärning”, ”slänt”, ”vägbank”, ”vägport”. I de fall då flera ord förekommer är dessa separerade med ”och” eller ”vid”.

- **belastning, undre gräns [m] eller [m] och [1:n]**

Denna post innehåller en eller flera siffror som beskriver den undre gränsen för belastningen i det aktuella objektet. De sifferkombinationer som finns i deldatabasen är siffror (representerar bankhöjd [m] eller schaktdjup [m]) eller siffror+1:siffror (representerar slänthöjd [m] och släntlutning [1:n]).

- **belastning, övre gräns [m] eller [m] och [1:n]**

Denna post innehåller en eller flera siffror som beskriver den övre gränsen för belastningen i det aktuella objektet. De sifferkombinationer som används i deldatabasen är siffror (representerar bankhöjd [m] eller schaktdjup [m]) eller siffror+1:siffror (representerar slänthöjd [m] och släntlutning [1:n]).

- **funktionstyp**

Denna post innehåller ett eller flera ord som beskriver kalkcementpelarnas funktion. De sökord som an-

vänds i deldatabasen är ”sättnred”, ”stabhöjande” samt ”stabhöjande och sättnred”.

### 2.2.3 Deldatabasen Jorden-lagerföljd

I denna deldatabas finns information om jordprofilen i de olika objekten. Den information som finns lagrad är:

- **objektnr**

- **fyllning [m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver tjockleken på eventuell fyllning.

- **torrskorpa [m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver tjockleken på eventuell torrskorpa.

- **gyttja, torv e dyl [m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver tjockleken på eventuell gyttja, torv eller liknande.

- **lera [m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver tjockleken på lerlagret.

- **skikt i leran**

Denna post innehåller ett sökord, samt eventuellt kompletterande text, för att ange om leran innehåller någon form av skikt. Sökorden är ”Ja” eller ”Nej”.

- **djup gvy [m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver djupet till grundvattenytan, innan pelarinstallationen, i de fall då dess läge har bestämts.

- **porövertryck [kPa]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver porövertrycket i leran, innan pelarinstallationen, i de fall då detta har bestämts.



Fram till idag (1996) har ca 10 miljoner meter kalk-cementpelare tillverkats i Sverige. Det motsvarar ca 1 miljon pelare. Ca 90 % av dessa förstärker lera under vägar och järnvägar.



## 2.2.4 Deldatabasen Jordan-lerans egenskaper

I denna deldatabas finns information om lerans egenskaper i de olika objekten. För varje objekt har *ett* numeriskt värde angivits för respektive jord-egenskap. Detta innebär att beskrivningen av lerans egenskaper är en kraftig förenkling av den verkliga situationen. Den information som finns lagrad är:

- **objektnr**

- **w [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver medelvärdet för den naturliga vattenkvoten i lerlagret.

- **wL [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver medelvärdet för konflytgränsen i lerlagret.

- **organisk halt [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver medelvärdet för den organiska halten i lerlagret.

- **skjuvhållfasthet [kPa]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver den odränerade, okorrigerade skjuvhållfastheten i lerlagret bestämd genom vingborrförsök och/eller konförsök.

- **hållfasthetstillväxt [kPa/m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver den odränerade, okorrigerade skjuvhållfasthetens tillväxt med djupet.

- **St [-]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver medelvärdet för sensitiviteten i lerlagret.

- **OCR [-]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver medelvärdet för överkonsolideringsgraden i lerlagret.

- **ML [kPa]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver medelvärdet för ödometermodulen  $M_L$  i lerlagret.

- **k [ $10^{-10}$  m/s].**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver medelvärdet för permeabiliteten i lerlagret.

## 2.2.5 Deldatabasen Jorden-inblandningsförsök

I denna deldatabas finns information om de inblandningsförsök som utförts i laboratoriet i de olika objekten. Den information som finns lagrad är:

- **objektnr**

- **överkant [m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver djupet från markytan till den nivå som utgör överkanten för leran som använts vid inblandningsförsöket.

- **underkant [m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver djupet från markytan till den nivå som utgör underkanten för leran som använts vid inblandningsförsöket.

- **w [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver vattenkvoten för leran innan inblandningen.

- **wL [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver konflytgränsen för leran innan inblandningen.

- **inblmängd 1 [kg/m för pelare med 500 mm diameter]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver den inblandade mängden stabiliseringsmedel per meter pelare.

- **inblmängd 2 [kg/m<sup>3</sup>]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver den inblandade mängden stabiliseringsmedel per m<sup>3</sup> ostabiliserad jord.

- **ålder [dygn]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver tiden som förflutit från inblandningstillfället till provtillfället.

- **K [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver hur stor andel av stabiliseringsmedlet som utgörs av kalk.

- **C [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver hur stor andel av stabiliseringsmedlet som utgörs av cement.

- **G [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver hur stor andel av stabiliseringsmedlet som utgörs av gips.

- **Ö [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver hur stor andel av stabiliseringsmedlet som utgörs av något annat material än kalk, cement eller gips.

- **hållf [kPa]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver skjuvhållfastheten som det stabiliserade materialet hade vid provtillfället. Hållfastheten har i samtliga fall bestämts genom enaxliga tryckförsök.

- **temp [C]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver den temperatur som provet lagrats i från inblandningstillfället till provtillfället.

- **M [kPa]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver den deformationsmodul som det stabiliserade materialet hade vid provtillfället. Deformationsmodulen bestämdes i samtliga fall genom ödometerförsök.

- **permeab [ $10^{-10}$  m/s]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver den permeabilitet som det stabiliserade materialet hade vid provtillfället. Permeabiliteten bestämdes i samtliga fall genom ödometerförsök.

- **inblmetod**

Denna post innehåller ett sökord som anger vilket laboratorium som utfört inblandningsförsöket. Sökorden är ”SGI”, ”VBB-VIAK”, ”BI-KONOL”, ”Jordlabbet”, ”SCC” samt ”Geolab”.

## 2.2.6 Deldatabasen Pelare-provsonderingar

I denna deldatabas finns information om de sonderingar som utförts i provpelare i de studerade objekten. Med provpelare avses här pelare som tillverkats i syfte att finna lämplig inblandningsmängd vid den storskaliga produktionen. Den information som finns lagrad är:

- **objektnr**

- **inblmängd 1 [kg/m pelare]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver medelvärdet för den inblandade mängden stabiliseringsmedel. Om utmatningsdiagram finns (se nedan) har den verkliga inblandningsmängden angivits, annars har nominell inblandningsmängd angivits.

- **inblmängd 2 [kg/m<sup>3</sup>]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver medelvärdet för den inblandade mängden stabiliseringsmedel. Om utmatningsdiagram finns (se nedan) har den verkliga inblandningsmängden angivits, annars har nominell inblandningsmängd angivits.

- **K [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver hur stor andel av stabiliseringsmedlet som utgörs av kalk. Om utmatningsdiagram finns (se nedan) är den verkliga kalkandelen angiven, annars har nominell kalkandel angivits.

- **C [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver hur stor andel av stabiliseringsmedlet som utgörs av cement. Om utmatningsdiagram finns (se nedan) är den verkliga cementandelen angiven, annars har nominell cementandel angivits.

- **G [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver hur stor andel av stabiliseringsmedlet som utgörs av gips. Om utmatningsdiagram finns (se nedan) är den verkliga gipsandelen angiven, annars har nominell gipsandel angivits.

- **Ö [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver hur stor andel av stabiliseringsmedlet som utgörs av något annat än kalk, cement eller gips. Om utmatningsdiagram finns (se nedan) är den verkliga gipsandelen angiven, annars har nominell gipsandel angivits.

- **sondmetod**

Denna post innehåller ett sökord som beskriver vilken sonderingsmetod som använts vid pelarsonde-

ringen. Sökorden är ”FKPS”, ”FOPS”, ”KPS” samt ”OKPS”. (FKPS innebär Försonderad KPS).

- **area [mm \* mm]**

Denna post innehåller ett sökord som beskriver vilken den använda sondens vingarea. Sökorden är ”15\*400”, ”20\*400” samt ”20\*500”.

- **pelartopp [m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver djupet från markytan till pelarens topp.

- **pelarbotten [m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver djupet från markytan till pelarens botten, alternativt till den nivå där sonden troligen gått ur pelaren.

- **motstånd [kN]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver sonderingsmotstånd på pelartoppens nivå.

- **tillväxt [kN/m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver ett medelvärde för sonderingsmotståndets tillväxt med djupet. Tillväxten har reducerats med utvärderad stågfriktionen för att erhålla motståndet mot sondens spets.

- **ålder [dygn]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver den tid som förflutit från tidpunkten för pelartillverkningen till provtillfället.

- **utmdiagram**

Denna post innehåller ett sökord som anger om utmatningsdiagram för den aktuella pelaren finns tillgänglig. Sökorden är ”Ja” och ”Nej”.

## 2.2.7 Deldatabasen Pelare-installationsdata

I denna deldatabas finns information rörande pelarinstallationen. Den information som finns lagrad är:

- **inblmängd 1 [kg/m pelare]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver pelarnas nominella inblandningsmängd.

- **inblmängd 2 [kg/m<sup>3</sup>]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver pelarnas nominella inblandningsmängd.

- **K [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver hur stor andel av stabiliseringsmedlet som utgörs av kalk.

- **C [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver hur stor andel av stabiliseringsmedlet som utgörs av cement.

- **Ö [%]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver hur stor andel av stabiliseringsmedlet som utgörs av något annat material än kalk, cement eller gips.

- **diameter [mm]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver pelarens diameter.

- **längd [m]**

Denna post innehåller en eller flera siffror som beskriver den ungefärliga längden på pelarna. I vissa fall anges en längd och i vissa fall anges minlängd-maxlängd.

- **mönster**

Denna post innehåller ett sökord som beskriver det mönster som pelarna bildar. Sökorden är ”block”, ”bågar”, ”gitter”, ”kvadratisk rutnät”, ”rektangulärt rutnät”, ”skivor”, ”triangulärt” samt ”zigzag”. I vissa fall förekommer flera mönster, vilket anges genom att flera sökord har kombinerats.

- **min c/c [m]**

Denna post innehåller en eller flera siffror som beskriver de minsta c/c-avstånden i det geometriska mönster som pelarna bildar. I vissa fall anges två c/c-avstånd separerade av ordet ”resp”, vilket innebär att flera mönster kombinerats och att c/c-avstånden skrivs i den ordning som de olika mönstren skrivits.

- **max c/c [m]**

Denna post innehåller en eller flera siffror som beskriver de största c/c-avstånden i det geometriska mönstret som pelarna bildar. I vissa fall anges två c/c-avstånd separerade av ordet ”resp”, vilket innebär att flera mönster kombinerats och att c/c-avstånden skrivs i den ordning som de olika mönstren skrivits.

- **grundltyp**

Denna post innehåller ett sökord som beskriver om pelarna har installerats till lerans underkant. Sökorden är ”Fast” och ”Svävande”.

- **tot pelarlängd [m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver den totala mängden pelare som installerats i det aktuella objektet.

- **max stigning [mm/varv]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver den maximala stigningen som föreskrivits vid pelartillverkningen.

- **rothast [varv/min]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver den ungefärliga rotationshastighet som använts vid pelartillverkningen.

## 2.2.8 Deldatabasen Pelare-kontrollsonderingar

I denna deldatabas finns information om de sonderingar som utförts i kontrollpelare i de studerade objekten. Med kontrollpelare avses här utvalda pelare som kontrollerats i samband med den storskaliga produktionen. Den information som finns lagrad är:

- **objektnr**

- **sondmetod**

Denna post innehåller ett sökord som beskriver vilket sonderingsmetod som använts vid pelarsonderingen. Sökorden är ”FKPS”, ”FOPS”, ”KPS” samt ”OKPS”. (FKPS innebär Försonderad KPS).

- **area [mm \* mm]**

Denna post innehåller ett sökord som beskriver vilken area den använda pelarsonden hade. Sökorden är ”15\*400”, ”20\*400” samt ”20\*500”.

- **pelartopp [m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver djupet från markytan till pelarens topp.

- **pelarbotten [m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver djupet från markytan till pelarens botten, alternativt till den nivå där sonden troligen gått ur pelaren.

- **motstånd [kN]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver sonderingsmotstånd på pelartoppens nivå.

- **tillväxt [kN/m]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver ett medelvärde för sonderingsmotståndets tillväxt med djupet. Tillväxten har reducerats med stågfriktionen för att er-hålla motståndet mot sondens spets.

- **ålder [dygn]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver den tid som förflutit från tidpunkten för pelartillverkningen till kontrolltillfället.

- **utmdiagram**

Denna post innehåller ett sökord som anger om utmatningsdiagram för den aktuella pelaren finns tillgänglig. Sökorden är ”Ja” och ”Nej”.



## 2.2.9 Deldatabasen Uppföljning-rörelser, portryck och beräkningar

- **objektnr**

- **mätmetod**

Denna post innehåller ett sökord som beskriver vilken mätmetod som använts vid mätning av portryck eller rörelse. Sökorden är ”inklino-meter”, ”mätslang” (dvs slang-sättningsmätning), ”pegel”, ”bälgslang”, ”syftlinje”, ”temperaturmätning” samt ”magnetmätare”.

- **mätvärde [mm], [kPa] eller [°C]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver erhållet mätvärde vid det sista mättillfället.

- **tid då mätvärdet stabiliserats [dygn]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver tidpunkten då mätvärdet uppnått ett ”stabilt slutvärde”, räknat från tidpunkten för referensmätningen.

- **mätperiod [dygn]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver tidpunkten för den sista avläsningen, räknat från tidpunkten för referensmätningen.

- **antal mättillfällen [stycken]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver antalet tillfällen som en avläsning, exklusive referensavläsningen, skett.

- **beräknad sättning [mm]**

Denna post innehåller ett numeriskt värde som beskriver storleken på den beräknade sättningen. I samtliga fall avses sättningen då 100 % konsolidering uppkommit.

- **övrigt**

Denna post innehåller en textsträng som kortfattat redogör för belastningssituationen, m.m. under mätperioden.

## **2.3 KORTFATTAD MANUAL FÖR SÖKNING I DATABASEN KCPELARE**

### **2.3.1 Förutsättningar**

För att kunna använda databasen KCPELARE krävs, förutom disketten med databasen KCPELARE, att programmet ACCESS (helst version 2.0) finns installerat i datorn. Detta program är ett av de mest populära databasprogrammen som finns utvecklade för Windowsmiljö. ACCESS har utvecklats av Microsoft och ingår i det s.k. Office-paketet, som även inkluderar programmen Excel, Word och Powerpoint.

I och med att databasen "KCPELARE" finns i Windowsmiljö är det relativt enkelt att lära sig att köra den, speciellt om man har vana av att jobba med Word, Excel och liknande program. Dessutom är det mycket enkelt att "lyfta in" sökresultat från databasen till t.ex. Excel för vidare matematisk bearbetning och/eller grafisk presentation av resultaten.

### **2.3.2 Tillvägagångssätt vid sökning**

Nedan ges en kort beskrivning av hur en typisk sökning i databasen tillgår. Beskrivningen förutsätter vana vid att arbeta med Excel och liknande program. Med ACCESS kan mycket mer "avancerade" frågor göras än vad som beskrivs här. Detta kräver dock omfattande kunskap om hur ACCESS är uppbyggt och skall användas. Sådan kunskap kan erhållas ur den (ca 800 sidor tjocka) användarhandbok som hör till programmet ACCESS.

1. Starta ACCESS och öppna databasen KCPELARE på samma sätt som när filer i Excel öppnas. På skärmen visas nu bl.a. namnet på de 8 deldatabaser som tillsammans utgör databasen KCPELARE.
2. För att göra en sökning klicka på knappen till vänster som är märkt med "fråga".
3. Klicka på knappen "Ny". (Om du vill modifiera en befintlig fråga markerar du den och klickar därefter på "Design". Om du vill se sökresultatet från en befintlig fråga markerar du den och klickar därefter på "Öppna".)
4. Klicka på knappen "Ny fråga" i menyn som nu visas.

5. Markera den deldatabas du vill söka i och klicka på ”Lägg till”. Upprepa detta tills du lagt till alla deldatabaser som krävs i den aktuella sökningen (vanligen behöver endast en eller ett par deldatabaser samköras). Klicka på ”Stäng” när du är klar.
6. I övre halvan av det fönster som nu finns på skärmen visas de valda deldatabaserna. I den nedre halvan av fönstret visas ett antal celler som påminner om kalkylbladet i Excel. Det är genom att fylla i dessa celler som frågan du vill ha svar på formuleras.

För att ACCESS skall förstå hur de olika deldatabaserna är länkade till varandra måste du placera markören på ”objektnr” i deldatabasen längst till vänster, tryck därefter ned den vänstra musknappen samtidigt som du ”drar” markören till ”objektnr” i databasen näst längst till vänster. Släpp musknappen när markören står på ”objektnr”. En länk har nu bildats vilken framträder på skärmen som en linje mellan deldatabaserna. Upprepa proceduren om mer än två deldatabaser skall samköras.

I varje kolumn kan en av de poster som beskrivs i Kapitel 2.2.2-2.2.9 väljas genom att först klicka på ”pilknappen” i cellen på raden ”Fält:” och därefter markera önskad post. Om kolumnen är för smal för att du skall kunna se namnet på önskad post kan du öka kolumnens bredd på samma sätt som i kalkylblad i Excel. Observera att endast de poster som delvis utgörs av ”små bokstäver” innehåller information som du kan använda.

Genom att klicka i cellen på raden ”Sortera:” och markera önskat alternativ kan informationen sorteras i bokstavs- eller nummerordning. (Tänk på att ju längre till vänster en kolumn är desto högre prioritetsordning har den.)

Genom att klicka i cellen på raden ”Villkor:” kan du ange de kriterier som du vill att ett objekt skall uppfylla för att redovisas i sökningen. Om posten som valts i ”Fält:” utgör ett numeriskt värde används matematiska symboler för att filtrera data t.ex. ”=”, ”>”, ”<”, ”<=” eller ”ICKE =”, etc... följt av önskat numeriskt värde. Om posten som valts i ”Fält:” utgör ett sökord (inte ett numeriskt värde) används istället ”SOM”, ”ICKE SOM”, etc... följt av önskat sökord. I båda fallen kan flera kriterier kombineras genom att separera dessa med ”OCH” eller ”ELLER”.

Välj en ny kolumn för varje post som du vill ta fram information om genom att upprepa proceduren.

7. Frågan ställs till datorn genom att klicka på tredje knappen från vänster i verktygsfältet som finns överst på skärmen. Resultatet redovisas på skärmen i form av kolumner och rader. Genom att markera och kopiera kolumnerna kan informationen enkelt lyftas över till Excel för vidare bearbetning.

Genom att klicka på en kolumn framträder en förklarande text längst ned på skärmen, vilken utgör en enkel beskrivning av innehållet i den aktuella kolumnen.

8. Om du vill modifiera den ställda frågan klickar du på första knappen från vänster i verktygsfältet som finns överst på skärmen.
9. Frågan sparas och ACCESS avslutas på samma sätt som när kalkylblad i Excel sparas.

## 3. Resultat av sökningar i databasen

### 3.1 INLEDNING

Delar av den information som finns i databasen KCPELARE har analyserats och presenteras i de följande kapitlen. Syftet har varit att dels redovisa generell statistik (Avsnitt 3.2) och dels att belysa trender avseende pelarnas hållfasthet och funktion (Avsnitt 3.3 och 3.4). Det bör påpekas att all information som finns i databasen inte har utnyttjats, vilket innebär att ytterligare aspekter kring kalk-cementpelare kommer att blottläggas genom framtida bruk av databasen.

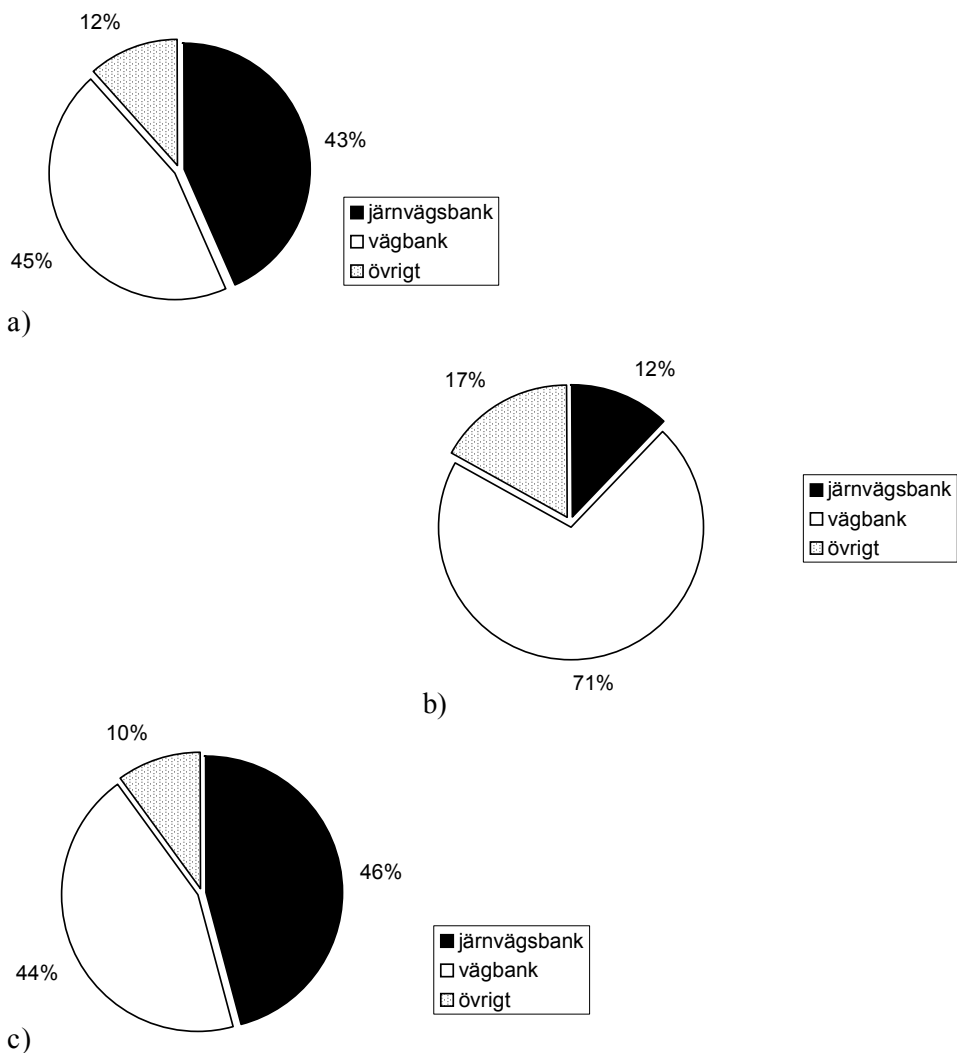
### 3.2 GENERELL STATISTIK

Baserat på information från i stort sett samtliga objekt som finns lagrade i databasen presenteras en del generell statistik i de följande kapitlen. Informationen presenteras i form av cirkeldiagram.

#### 3.2.1 Konstruktionstyper och belastningar

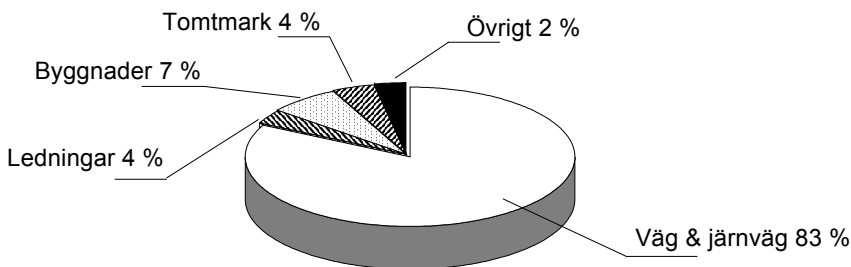
Jordförstärkning med någon form av kalk-cementpelare har huvudsakligen använts vid förstärkning under järnvägsbankar och vägbankar, se *Figur 3.1a*. Dessa två användningsområden står för knappt 90 % av det material som berörts i denna undersökning. I skrivande stund (maj 1996) utför Banverket, Östra Regionen, en inventering av i vilken omfattning kalk-cementpelare har använts vid utbyggnaden av järnvägsnätet i Mälardalen. Avsikten är att även deras resultat så småningom skall ingå i databasen, vilket innebär att den andel som utgörs av förstärkning av järnvägsbankar kommer att bli större än vad som redovisas här. Utöver ovannämnda användningsområden har kalk-cementpelare även använts som förstärkningsåtgärd i anslutning till vägportar, schakter, slänter och byggnader. Tillsammans utgör sådana objekt 12 % av de undersökta objekten. Liknande resultat redovisas av Åhnberg et al (1995), se *Figur 3.2*.

Om enbart kalkpelare betraktas är det dominerande användningsområdet vägbankar, vilket förekommer i 70 % av objekten, se *Figur 3.1b*. Andelen järnvägsbankar är i detta fall enbart drygt 10 %. För kalk-cementpelare med proportionen 50 % kalk och 50 % cement erhålls ungefär samma fördelning som då



**Figur 3.1** Fördelning mellan konstruktionstyper där kalk-cementpelare använts.  
a) Samtliga objekt där konstruktionstypen är känd (231 st).  
b) Objekt med pelare som består av 100 % kalk (totalt 41 st.)  
c) Objekt med pelare som består av 50 % kalk och 50 % cement (totalt 148 st).

**Figure 3.1** Design types where lime-cement columns were used.  
a) All objects where the design type is known (231).  
b) Objects with columns consisting of 100 % lime (total 41).  
c) Objects with columns consisting of 50 % lime and 50 % cement (total 148).



**Figur 3.2.** Olika användningsområden för djupstabilisering enligt kalk-cement-pelarmetoden i början av 1990-talet (Åhnberg et al, 1995).

**Figure 3.2** Different applications of deep stabilisation according to the lime-cement column method at the beginning of the 1990s (Åhnberg et al, 1995).

samtliga objekt beaktas, jfr *Figur 3.1a* och *3.1c*. Denna samstämmighet beror på att objekt där pelare med proportionen 50 % kalk och 50 % cement utgör den dominerande andelen objekt som finns i databasen.

Som tidigare framgått används kalk-cementpelare framförallt under vägbankar och järnvägsbankar. Dessa har en höjd på upp till ca 9 meter (exklusive eventuell temporär överlast vid förbelastning). Vanligast är dock förstärkning för bankar med maximala höjden ca 2-4 meter, vilket förekommer i nästan hälften av objekten, se *Figur 3.3a*. Såväl något högre som något lägre bankar förekommer dock också förhållandevis ofta.

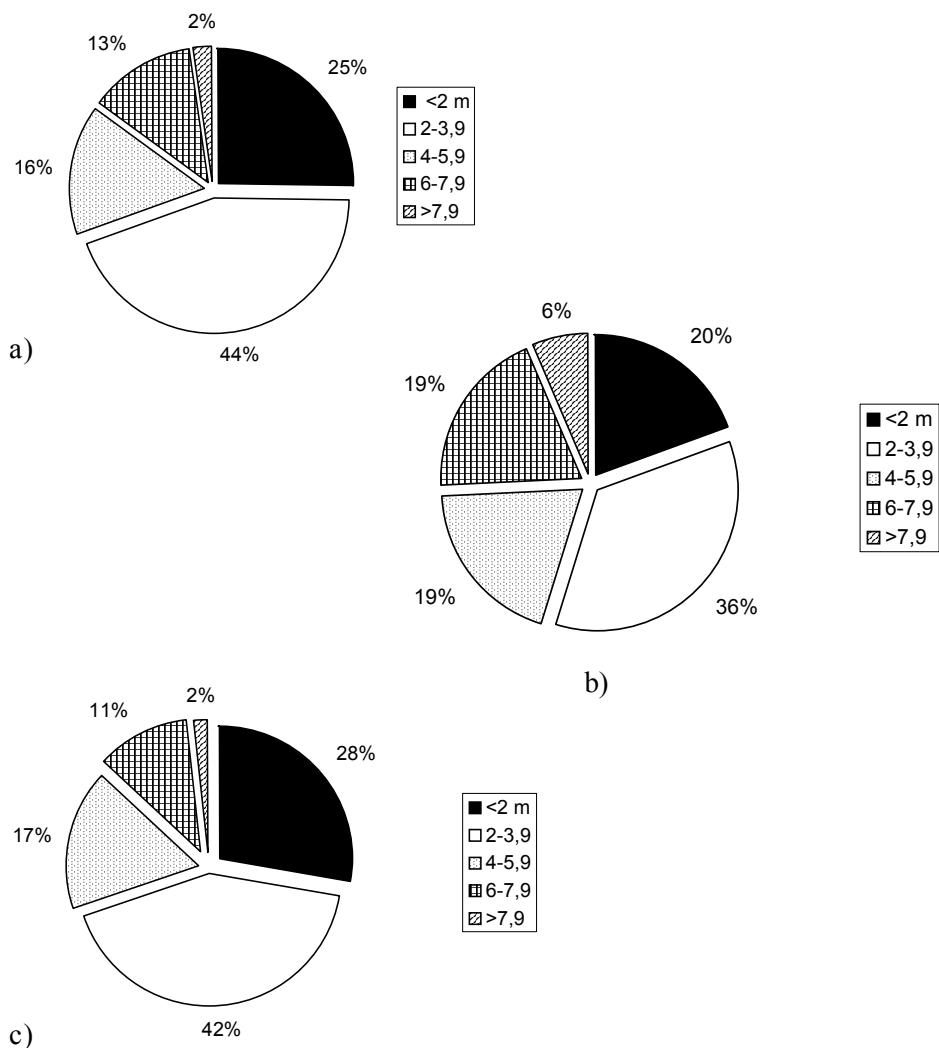
Om enbart kalkpelare eller kalk-cementpelare med proportionen 50 % kalk och 50 % cement beaktas, erhålls likartade fördelningar, se *Figur 3.3b* och *c*.

### 3.2.2 Funktionstyper

Syftet med kalkcementpelarna var i nästan 2/3 av objekten att reducera både sättningarna och förbättra stabiliteten, se *Figur 3.4a*. De fall då enbart en sättningsreducerande eller stabilitetshöjande funktion eftersträvats uppgår till ca 1/6 vardera. Övriga tillämpningar som förekommer är vibrationsdämpande eller enbart dränerande, men detta förekommer endast i 3 % av objekten.

Om enbart kalkpelare eller kalk-cementpelare med proportionen 50 % kalk och 50 % cement beaktas, erhålls likartade fördelningar, se *Figur 3.4b* och *c*.

Det bör påpekas att kalk-cementpelare ibland använts tillsammans med andra åtgärder, t ex tryckbankar och/eller lättfyllning, vilka bidrar till att uppnå avsedd effekt. Information om sådana åtgärder finns dock inte i databasen.



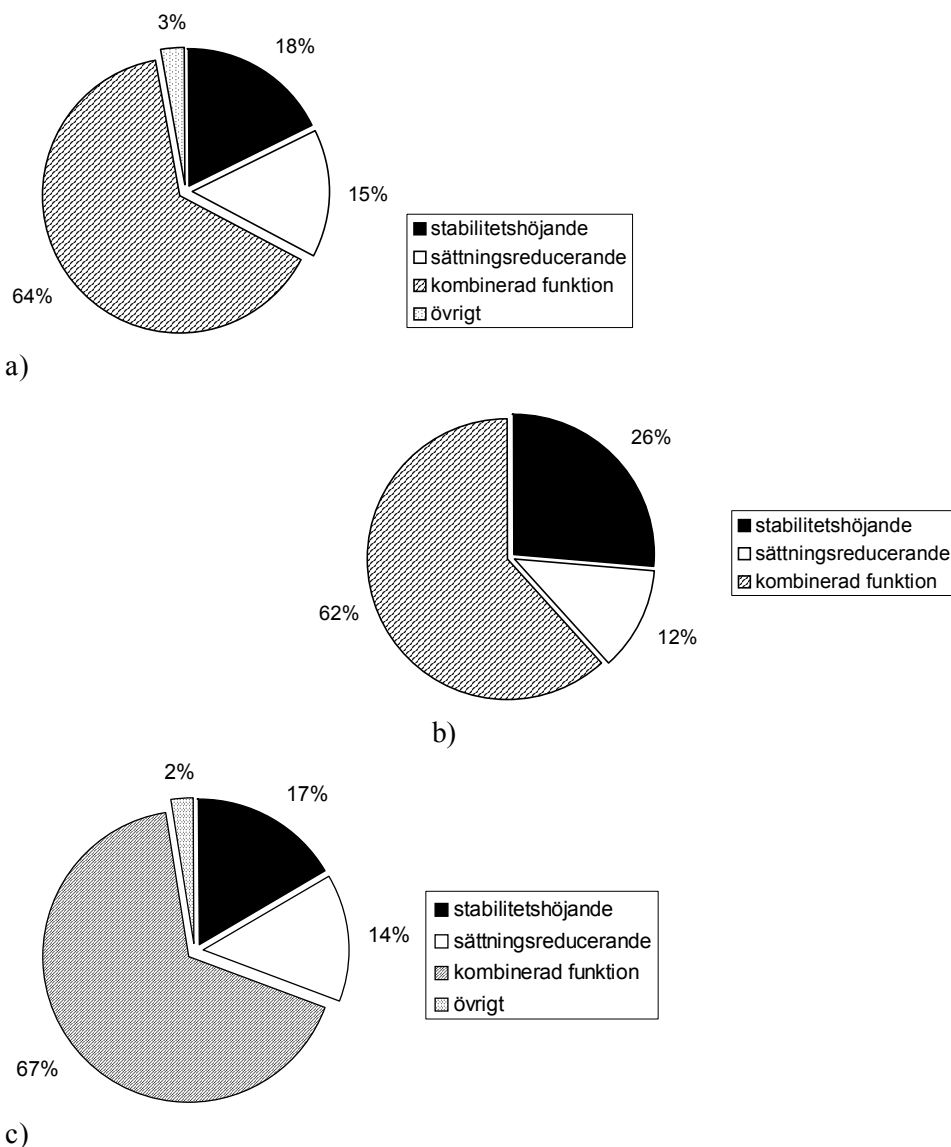
**Figur 3.3** Fördelning mellan maximala bankhöjder vid förstärkning av väg- och järnvägsbankar [m].

- a) Samtliga objekt där den maximala bankhöjden är känd ( 186 st).
- b) Objekt med pelare som består av 100 % kalk (31 st.)
- c) Objekt med pelare som består av 50 % kalk och 50 % cement (122 st).

**Figure 3.3** Maximum embankment height in strengthening of road and railway embankments (m).

- a) All objects where the maximum embankment height is known (186).
- b) Objects with columns consisting of 100 % lime (31)
- c) Objects with columns consisting of 50 % lime and 50 % cement (122).



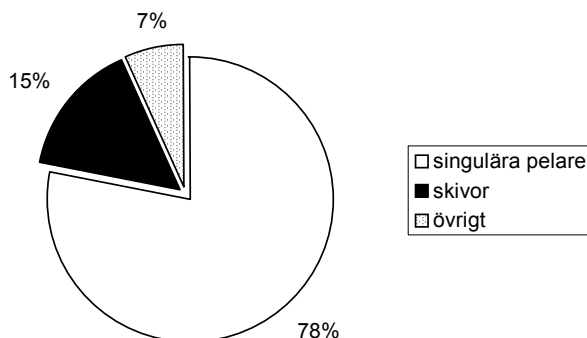


**Figur 3.4** Fördelning mellan funktionstyper där kalk-cementpelare använts.  
a) Samtliga objekt där funktionstypen är känd ( 174 st).  
b) Objekt med pelare som består av 100 % kalk (34 st.)  
c) Objekt med pelare som består av 50 % kalk och 50 % cement (126 st).

**Figure 3.4** Function types where lime-cement columns were used.  
a) All objects where the function type is known (174).  
b) Objects with columns consisting of 100 % lime (34).  
c) Objects with columns consisting of 50 % lime and 50 % cement (126).

### 3.2.3 Pelarmönster

Pelarna har vanligen placerats så att ett kvadratisk rutnät bildats, se *Figur 3.5*. Detta mönster förekommer i drygt 3/4 av objekten, medan objekt där pelarna placerats i skivor utgör 15 %. I ett fåtal objekt förekommer gitter, bågar, block, trianglar eller andra mer komplicerade mönster.



**Figur 3.5** Fördelning mellan de mönster pelarna bildar vid installationen. Fördelningen relateras till antalet objekt i databasen där mönstret är känt (215 st).

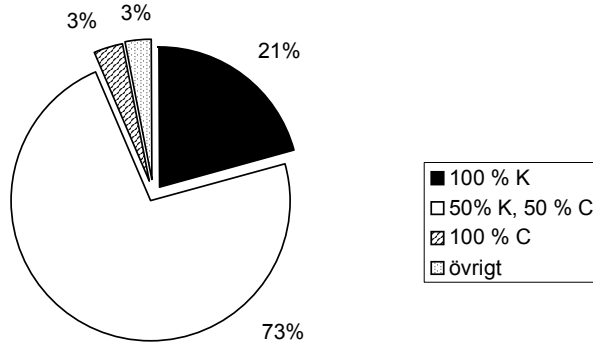
**Figure 3.5** Patterns formed by the columns at installation. The distribution relates to the number of objects in the database where the pattern is known (215).

### 3.2.4 Stabiliseringsmedel

Det i särklass vanligaste stabiliseringsmedlet är en blandning av kalk och cement. Särskilt proportionen 50 % kalk och 50 % cement har förekommit mycket ofta och utgör nästan 3/4 av objekten, se *Figur 3.6*. Liknande resultat redovisas av Åhnberg et al (1995), se *Figur 3.7*.

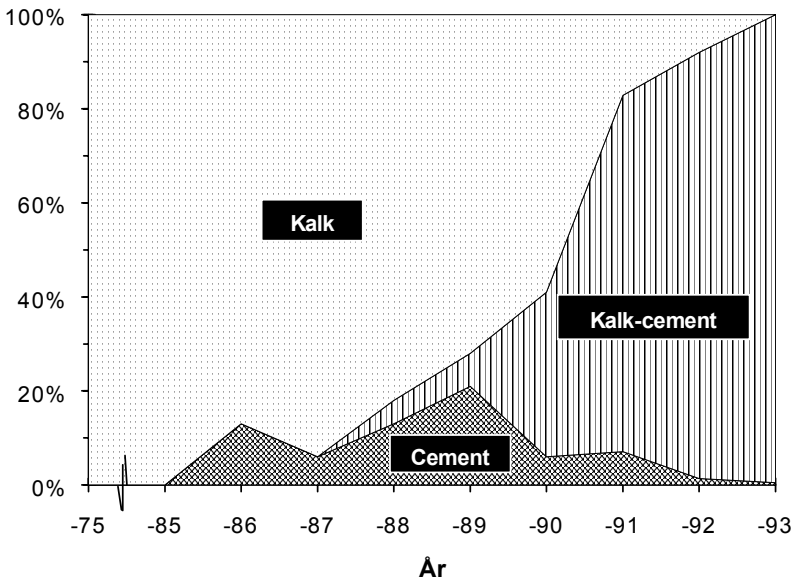
Rena kalkpelare är också relativt vanligt (21 %) medan rena cementpelare endast förekommer sparsamt (3 %). Även andra proportioner mellan kalk och cement har använts men dessa utgör endast 3 % av det insamlade materialet.

Mängden inblandningsmedel som använts ligger i intervallet 50-130 kg/m<sup>3</sup> stabiliserad jord. Vanligast är dock att 80-100 kg/m<sup>3</sup> tillsatts pelaren, se *Figur 3.8a*, vilket har skett i nästan 2/3 av de studerade objekten. Även högre inblandningsmängder har använts relativt ofta och tillsatser över 100 kg/m<sup>3</sup> förekommer i 1/4 av objekten.



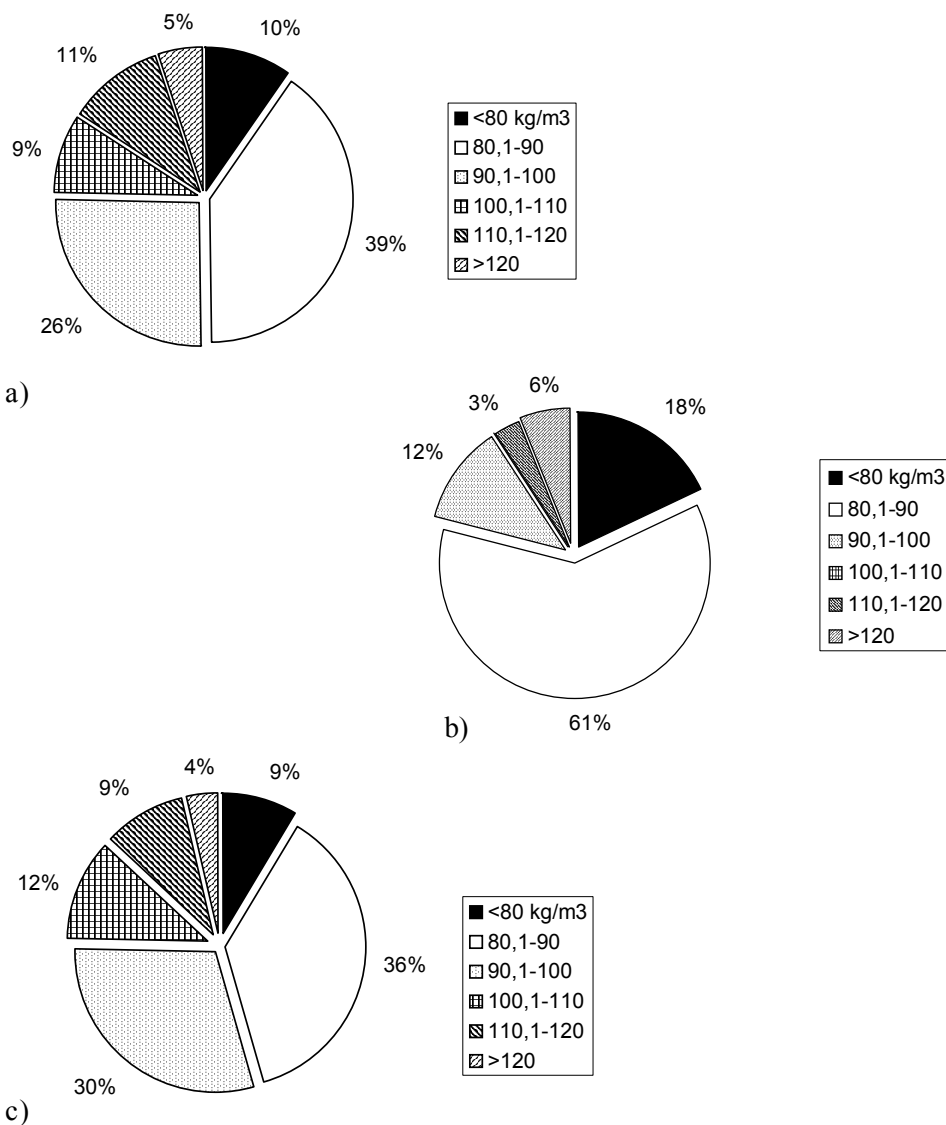
**Figur 3.6** Fördelning mellan olika typer av inblandningsmedel. Fördelningen relateras till antalet objekt i databasen där inblandningsproportionerna är kända (201 st).

**Figure 3.6** Different types of additives. The distribution relates to the number of objects in the database where the mixing proportions are known (201).



**Figur3.7.** Fördelning av använd typ av stabiliseringsmedel 1975-1993 (Åhnberg et al, 1995).

**Figure 3.7** Types of stabilising agent used in 1975-1993 (Åhnberg et al, 1995).



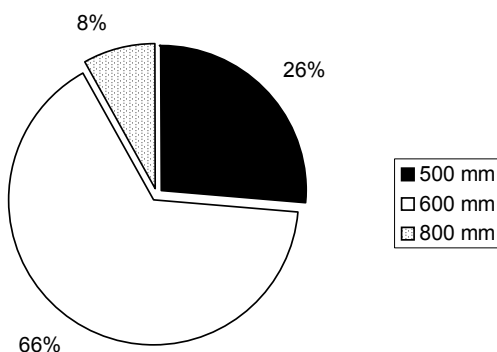
**Figur 3.8** Fördelning mellan olika mängd inblandningsmedel [kg/m<sup>3</sup>].  
 a) Samtliga objekt där inblandningsmängden är känd (183 st).  
 b) Objekt med pelare som består av 100 % kalk (33 st.)  
 c) Objekt med pelare som består av 50 % kalk och 50 % cement (138 st).

**Figure 3.8** Different amounts of additive (kg/m<sup>3</sup>).  
 a) All objects where the additive amount is known (183).  
 b) Objects with columns consisting of 100% lime (33).  
 c) Objects with columns consisting of 50% lime and 50% cement (138).

Om enbart kalkpelare betraktas tillsätts 80-90 kg/m<sup>3</sup> i nästan 2/3 av fallen, se *Figur 3.8b*. För kalk-cementpelare med proportionen 50 % kalk och 50 % cement erhålls i stort sett samma fördelning som då samtliga objekt betraktas, jfr *Figur 3.8a* och *3.8c*. Denna samstämmighet beror, som tidigare påpekats, på att objekt där pelare med proportionen 50 % kalk och 50 % cement använts utgör den dominerande andelen objekt som finns i databasen.

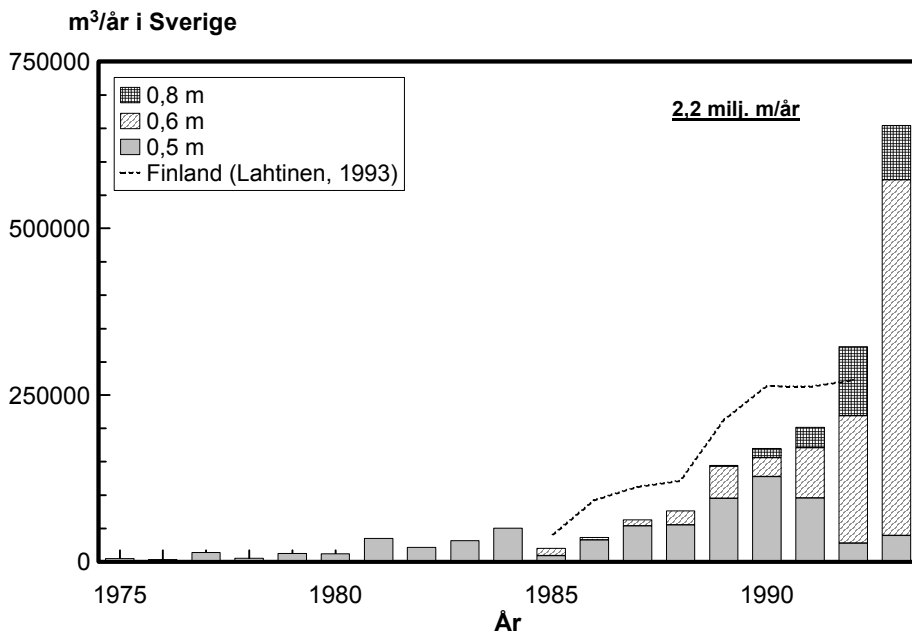
### 3.2.5 Pelardiameter

Den i särklass vanligaste pelardiametern är 600 mm, vilket förekommer i drygt 2/3 av fallen, se *Figur 3.9*. Pelare med diametern 500 mm förekommer relativt ofta (26 %) medan 800 mm diameter är betydligt ovanligare. Trenden är dock att 500 mm pelardiameter är vanligare i äldre objekt och att större pelardiametrar oftare förekommer i relativt nyligen utförda objekt. Liknande resultat redovisas i Åhnberg et al (1995), se *Figur 3.10*.



**Figur 3.9** Fördelning mellan olika pelardiametrar. Fördelningen relateras till antalet objekt i databasen där pelardiametern är känd (189 st).

**Figure 3.9** Different column diameters. The distribution relates to the number of objects in the database where the column diameter is known (189).



**Figur 3.10 Pelarproduktion under perioden 1975-1993 (Åhnberg et al, 1995).**

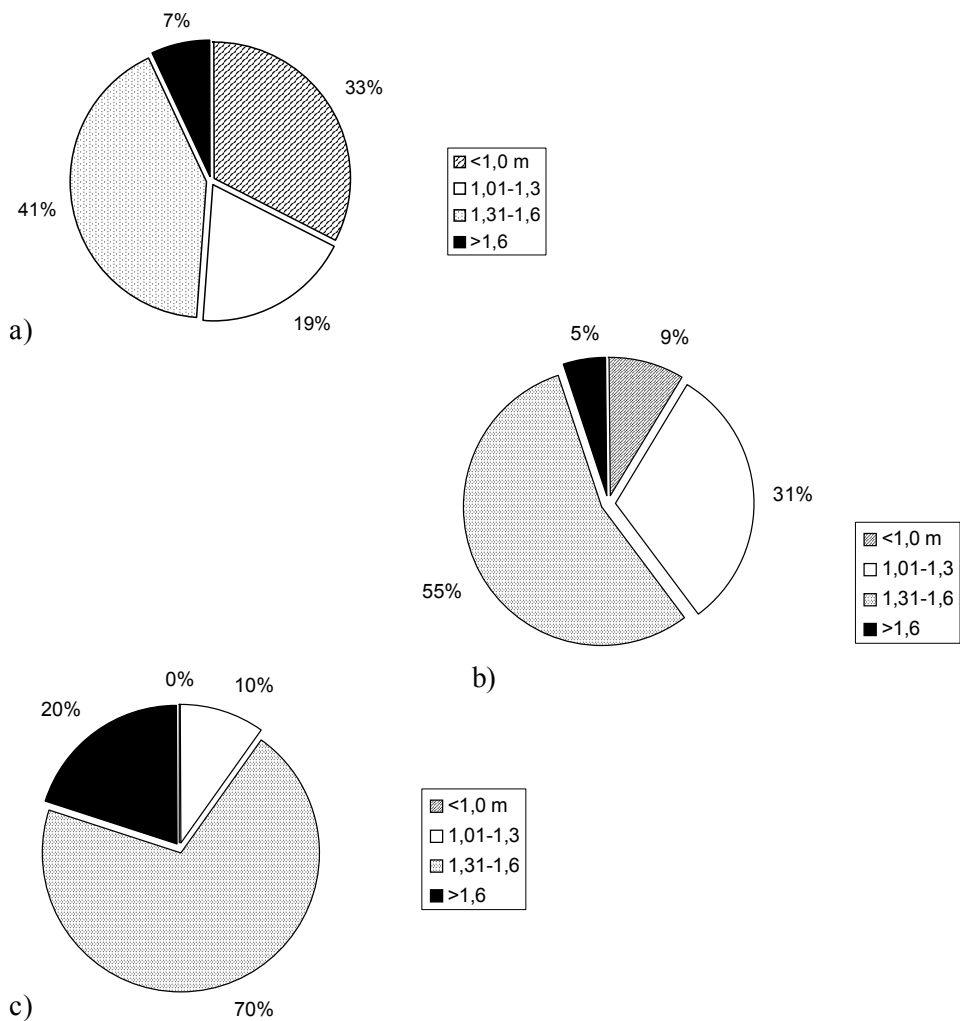
Figure 3.10 Column production during the period 1975-1993 (Åhnberg et al, 1995).

### 3.2.6 c/c-avstånd

Som tidigare visats (Avsnitt 3.2.3) är kvadratiska rutnät det överlägset mest vanliga mönster som pelarna placerats i. De c/c-avstånd som förekommer i dessa fall ligger mellan ca 0,8 och 2,0 meter, men fördelningen inom detta intervall är något olika beroende på pelarnas diameter.

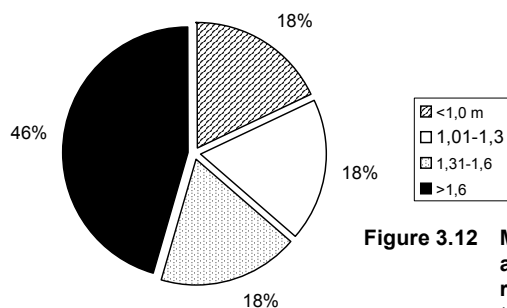
Oavsett pelarnas diameter är det vanligaste c/c-avståndet i intervallet 1,3-1,6 meter, se *Figur 3.11 a-c*. Det går dock att urskilja en tendens till ökande c/c-avstånd med ökande pelardiameter, vilket är väntat eftersom det för pelare med samma c/c-avstånd gäller att ökande pelardiameter innebär att en ökande andel av jorden förstärks.

För pelare som placerats i skivor gäller att skivornas c/c-avstånd varierar mellan ca 0,8 och 2,0 meter, se *Figur 3.12*. Vanligen ligger dock c/c-avståndet i intervallet 1,6-2,0 meter. Antalet objekt där mönstret bildat skivor är relativt få vilket medfört att endast pelare med diametern 600 mm har redovisats.



**Figur 3.11** Fördelning mellan maximalt c/c-avstånd då pelarna installerats som kvadratiska rutnät [m]. Fördelningen relateras till totala antalet objekt där c/c-avståndet är känt (43, 101 respektive 10 objekt).  
 a) 500 mm pelardiameter;  
 b) 600 mm pelardiameter;  
 c) 800 mm pelardiameter

**Figure 3.11** Maximum c/c distance when the columns are installed according to a quadratic grid (m). The distribution relates to the total number of objects where the c/c distance is known (43, 101 and 10 objects respectively).  
 a) 500 mm column diameter  
 b) 600 mm column diameter  
 c) 800 mm column diameter



**Figure 3.12** Maximum c/c distance when the columns are installed as slices. The distribution relates to the total number of objects where the c/c distance is known (22 objects). Only columns with a diameter of 600 mm are included.

**Figur 3.12** Fördelning mellan maximalt c/c-avstånd då pelarna installerats som skivor. Fördelningen relateras till totala antalet objekt där c/c-avståndet är känt (22 objekt). Endast pelare med 600 mm diameter är redovisade.

### 3.3 STABILISERAD JORDS HÅLLFASTHET

Baserat på enbart information i databasen redovisas i de följande avsnitten generella trender för hur pelarnas hållfasthet beror av lerans naturliga vattenkvot. Eftersom hållfastheten växer till med tiden har endast resultat från prov med åldern ca 30-60 dygn tagits med, för att erhålla någorlunda jämförbara värden. Resultaten är indelade i olika kategorier baserat på inblandningsproportion, inblandningsmängd och geografisk lokal. Den ostabiliserade lerans korrigerade odränerade skjuvhållfasthet uppgår i huvuddelen av fallen till ca 10-20 kPa. I enstaka fall förekommer dock så låga värden som 5 kPa eller så höga värden som 25 kPa.

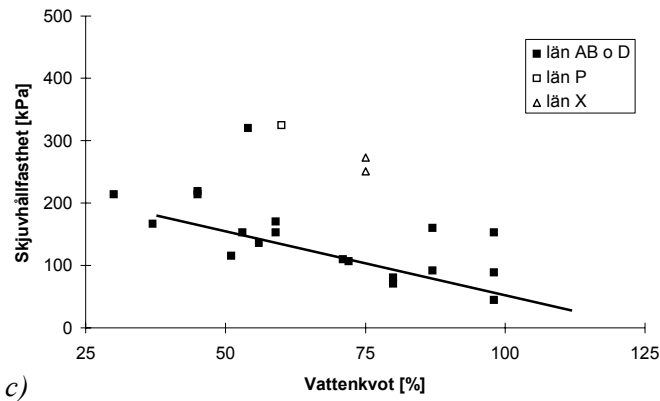
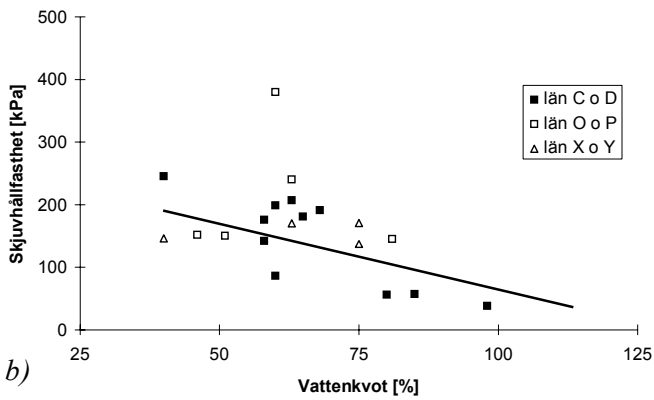
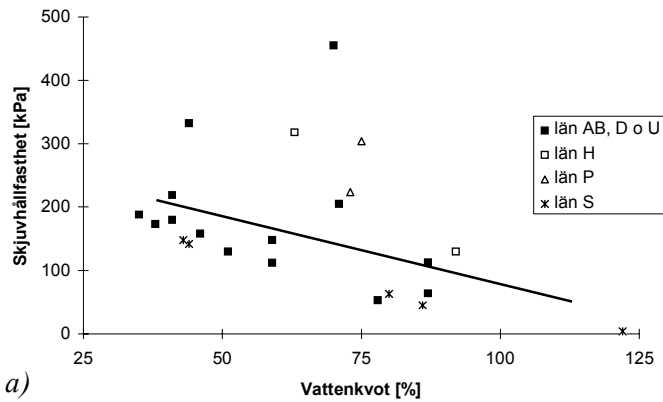
#### 3.3.1 Resultat från inblandningsförsök

Vid inblandningsförsöken baseras skjuvhållfastheten på resultat från enaxliga tryckförsök. Lerans ursprungliga vattenkvot baseras vanligen på information från laboratorieprotokoll.

#### **K/C 50/50:**

Generellt sett är spridningen ganska stor, men en hel del trender kan trots detta utläsas, se *Figur 3.13 a-c*. Genomgående ökar hållfastheten med minskande ursprunglig vattenkvot. En ökning av mängden tillsatsmedel över 81 kg/m<sup>3</sup> har en viss effekt på hållfastheten, men i stort kan hållfastheten sägas uppgå till minst ca 200 kPa vid 25 % vattenkvot och till minst ca 50 kPa vid 100 % vattenkvot. Hållfasthetens undre gräns varierar rätlinjigt mellan dessa vattenkvoter. Någon skillnad i hållfasthet som går att hänföra till det geografisk läget är svår att finna.





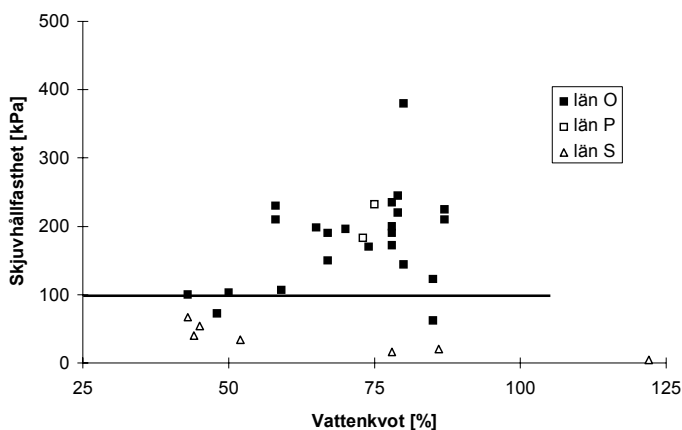
**Figure 3.13**  
 Dependence of the undrained shear strength on the original water content of the clay, based on the results of unconfined compression tests on laboratory mixed samples. Lime-cement proportion 50/50 and age 29-60 days.  
 a) Amount added: about 81 kg/m<sup>3</sup>.  
 b) Amount added: 86-102 kg/m<sup>3</sup>.  
 c) Amount added: 107-127 kg/m<sup>3</sup>.

**Figur 3.13** Hållfasthetens beroende av den ursprungliga vattenkvoten, baserat på resultat från enaxliga tryckförsök på laboratorieinblandade prover. Kalk/cement-proportion 50/50 och ålder 29-60 dygn.  
 a) inblandningsmängd ca 81 kg/m<sup>3</sup>.  
 b) inblandningsmängd 86-102 kg/m<sup>3</sup>.  
 c) inblandningsmängd 107-127 kg/m<sup>3</sup>.

Den stora spridningen i försöksresultat försvårar och omöjliggör i vissa avseenden mer rättvisande tolkning. Denna spridning beror sannolikt på alltför stora skillnader i rutinerna kring inblandningsförsöken mellan olika laboratorier, t. ex. inpackningsförfarande och lagringstemperatur. Andra faktorer som t.ex. lerans organiska halt spelar sannolikt också stor roll, men denna information saknas vanligen.

### K/C 100/0:

Spridningen i försöksresultaten är här ännu större och ingen tendens till ökande hållfasthet med minskande (ursprunglig) vattenkvot finns, se *Figur 3.14*. Om man bortser från resultaten från S-län uppgår hållfastheten dock generellt till minst 100 kPa. Databasen innehåller i nuläget inte tillräcklig information om försök med olika inblandningsmängd för att några slutsatser om hållfasthetens beroende av mängden inblandningsmedel skall kunna dras.

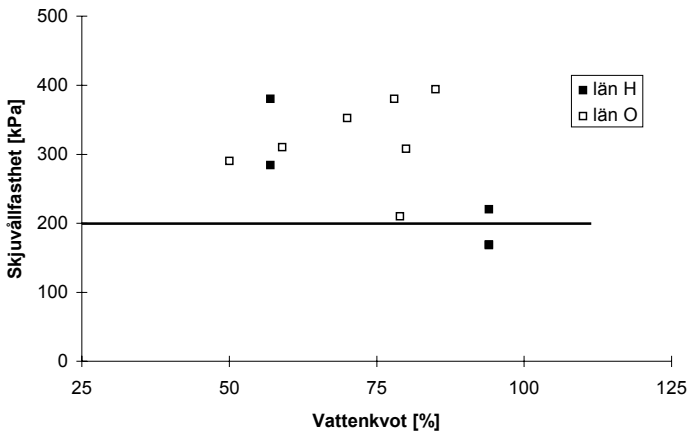


**Figur 3.14** Hållfasthetens beroende av den ursprungliga vattenkvoten, baserat på resultat från enaxliga tryckförsök på laboratorieinblandade prover. Kalk/cement-proportion 100/0, inblandningsmängd 66-86 kg/m<sup>3</sup> och ålder 29-60 dygn.

**Figure 3.14** Dependence of the undrained shear strength on the original water content of the clay, based on the result from unconfined compression tests on laboratory mixed samples. Lime-cement-proportion 100/0, mixture amounts 66-86 kg/m<sup>3</sup> and age 29-60 days.

### K/C 0/100:

Även i detta fall är spridningen stor även om materialet är något mer begränsat i omfattning, se *Figur 3.15*. Någon klar tendens till minskande hållfasthet med ökande ursprunglig vattenkvot kan inte noteras, men hållfastheten uppgår allmänt till minst 200 kPa. Jämfört med resultat med inblandningsproportionen



**Figur 3.15 Hållfasthetens beroende av lerans ursprungliga vattenkvot, baserat på resultat från enaxliga tryckförsök på laboratorieinblandade prover. Kalk/cement-proportion 0/100, inblandningsmängd 102-127 kg/m<sup>3</sup> och ålder 29-60 dygn.**

**Figure 3.15 Dependence of the undrained shear strength on the original water content of the clay, based on the results of unconfined compression tests on laboratory mixed samples. Lime-cement proportion 0/100, amount added 102-127 kg/m<sup>3</sup> and age 29-60 days.**

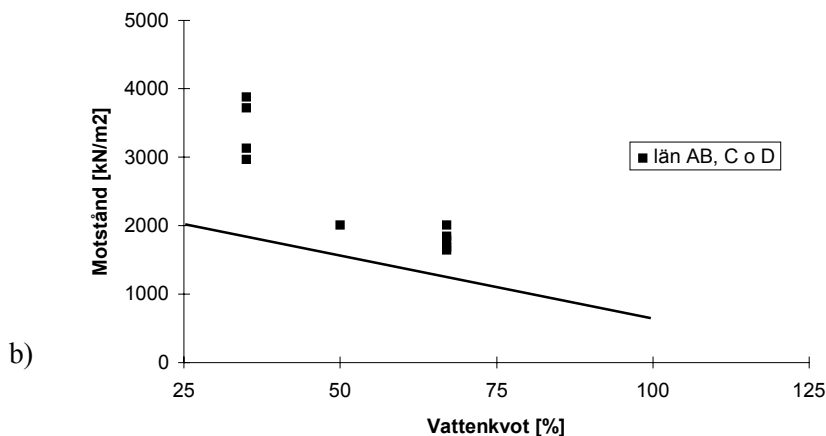
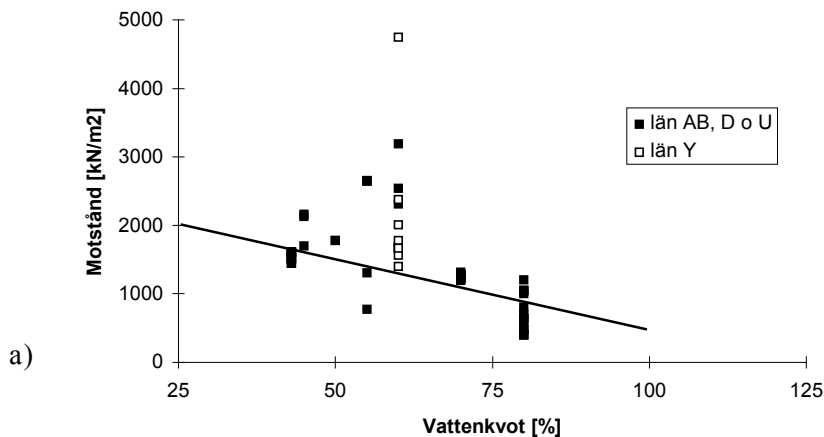
K/C 50/50 är hållfastheten betydligt högre. Databasen innehåller i nuläget för lite information för att några slutsatser om inblandningsmängdens eller det geografiska lägets betydelse skall kunna dras. Förklaringen till den relativt stora spridningen torde vara densamma som tidigare.

### 3.3.2 Resultat från fältsonderingar

Vid fältsonderingarna baseras motståndet på resultat från sonderingar enligt såväl FOPS, KPS, FKPS som OKPS. Eftersom sonderingsmotståndet vanligen varierar med djupet redovisas ett medelvärde för respektive pelares sonderingsmotstånd. Motståndet har normaliserats genom att dividera det uppmätta motståndet (reducerat med uppskattad mantelfriktion) med tvärsnittets nettoarea. Pelarnas skjuvhållfasthet kan i sin tur uppskattas genom att dividera det normaliserade motståndet med faktorn 10. Lerans ursprungliga vattenkvot baseras på ett medelvärde vid den aktuella objektet.

#### **K/C 50/50:**

Här finns en relativt tydlig tendens till minskande hållfasthet med ökande vattenkvot även om spridningen är påtaglig, se *Figur 3.16 a-b*. En ökande mängd



**Figur 3.16** Sonderingsmotståndets beroende av vattenkvoten. Kalk/cementproportion 50/50 och ålder 29-60 dygn. Skjuvhållfastheten i pelarna kan uppskattas genom att dividera sonderingsmotståndet med faktorn 10.

a) inblandningsmängd 79-82 kg/m<sup>3</sup>.

b) inblandningsmängd 88-102 kg/m<sup>3</sup>.

**Figure 3.16** Dependence of the sounding resistance on the original water content of the clay. Lime-cement proportion 50/50 and age 29-60 days. The undrained shear strength of the columns may be estimated by dividing the sounding resistance by a factor of 10.

a) Amount added 79-82 kg/m<sup>3</sup>.

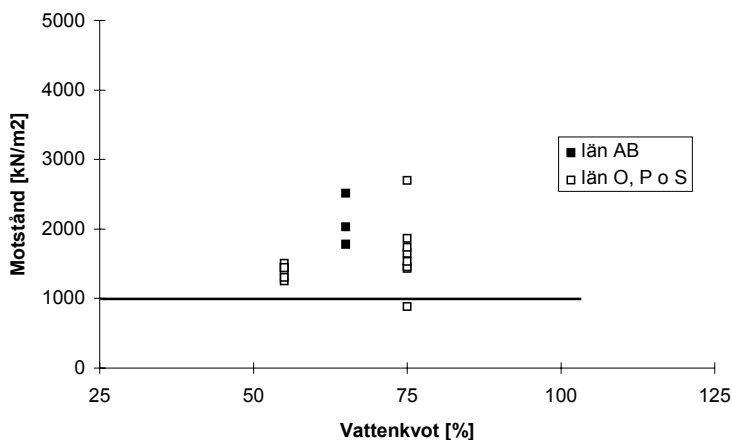
b) Amount added 88-102 kg/m<sup>3</sup>.

tillsatsmedel visar dock ingen klar tendens till ökande sonderingsmotstånd. Skjuvhållfastheten (omräkningsfaktorn 10 antagen) överstiger genomgående 200 kPa vid 25 % vattenkvot och 50 kPa vid 100 % vattenkvot. Detta stämmer

väl med observationerna från inblandningsförsöken (Figur 3.13). Den stora spridningen i resultat kan säkerligen hänföras till ett flertal olika faktorer, t.ex. olika tillverkningsmetodik, varierande organisk halt, olika sonderingsålder, etc. Några slutsatser om hållfasthetens beroende av det geografiska läget låter sig inte göras.

### K/C 100/0:

Här finns ingen tendens till att hållfastheten minskar med ökande vattenkvot, se *Figur 3.17*. Det är intressant att notera att motsvarande observation även kan göras vid inblandningsförsöken, se *Figur 3.14*, även om spridningen är påtaglig och antalet sonderingar är relativt begränsat. Skjuvhållfastheten överstiger i samtliga fall 100 kPa, vilket stämmer relativt väl med resultaten från inblandningsförsöken (*Figur 3.14*). Den stora spridningen i sonderingsresultat kan säkerligen hänföras till tidigare påtalade faktorer. Några slutsatser om hållfasthetens beroende av det geografiska läget låter sig inte göras.



**Figur 3.17** Sonderingsmotståndets beroende av lerans ursprungliga vattenkvot. Kalk/cement-proportion 100/0, ålder 28-49 dygn och inblandningsmängd 81-82 kg/m<sup>3</sup>. Skjuvhållfastheten i pelarna kan uppskattas genom att dividera sonderingsmotståndet med faktorn 10.

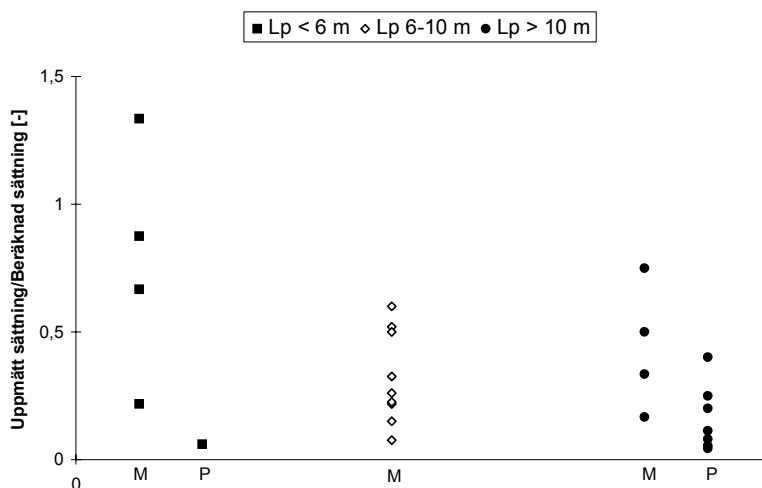
**Figure 3.17** Dependence of the sounding resistance on the original water content of the clay. Lime-cement proportion 100/0, age 28-49 days and amount added 81-82 kg/m<sup>3</sup>. The shear strength of the columns may be estimated by dividing the sounding resistance by a factor of 10.

### 3.4 PELARNAS FUNKTIONSSÄTT

#### 3.4.1 Uppmätt och beräknad sättning

I de objekt där både uppmätta och förväntade rörelser är kända har dessa jämförts. I samtliga fall har rörelsemätningen skett genom slangställningsmätning och/eller med hjälp av pglar. Dessa mätmetoder har i några fall kompletterats med t.ex. bälgställningsmätningar. Mätningarna har utförts i samband med väg- och järnvägsobjekt där mätperioden vanligtvis omfattat ca 1 till 12 månaders tidig utläggning, ofta i kombination med temporär överlast. Endast de fall där sättningstakten förefaller att ha avstannat, eller där så många mättillfällen finns att denna kunnat uppskattas genom extrapolering, har inkluderats i jämförelsen för att göra den så rättvisande som möjligt.

I nästan samtliga fall är de uppmätta sättningarna väsentligt lägre än de förväntade, se *Figur 3.18*. I genomsnitt uppgår den verkliga sättningen endast till ca 40 % av vad som förväntades. En tendens finns till ökad överskatning av



**Figur 3.18** Jämförelse mellan beräknade och uppmätta sättningar. Informationen omfattar endast de objekt där den uppmätta sättningen har avstannat.

**M** = mätning utförd med slangställningsmätning,  
**P** = mätning utförd med pglar.

**Figure 3.18** Comparison between calculated and measured settlements. The information comprises only those objects where the measured settlement has ceased.

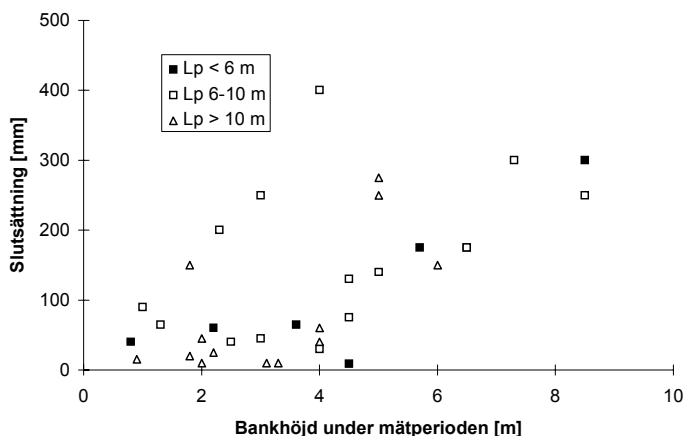
**M** = Measurement by hose settlement gauge.  
**P** = Measurement by water level gauge.

sättningarna då pelarlängden ökar. En möjlig förklaring till detta är att sättningen inte hunnit utbildas under de relativt korta mätperioderna om pelarna är långa och att den extrapolering som utförts för att uppskatta slutsättningarna leder till för små slutsättningar. Vidare är det ibland tveksamt om referensmätningen utförts innan några sättningar hunnit uppkomma. Detta är speciellt fallet då peglar använts, vilket troligen förklarar varför mätningar med peglar leder till den största överskattningen.

Utöver de redovisade objekten förekommer det i något fall att sättningstakten inte avstannat efter mycket lång tid (flera år). I detta fall är dock pelarna inte installerade till fast botten och ingen temporär överlast påförd, vilket innebär att de fortgående sättningarna kan bero på konsolidering i de underliggande lerlagren.

### 3.4.2 Uppmätt sättning i förhållande till påförd belastning

En jämförelse mellan bankhöjd och sättning visar att ett någorlunda linjärt samband finns även om spridningen är stor, se *Figur 3.19*. Generellt förefaller slutsättningen uppgå till ca 100 mm då bankhöjden uppgår till ca 2 m för att öka till ca 350 mm då bankhöjden uppgår till ca 8 m. Sättningens storlek förefaller dock inte vara särskilt avhängig av pelarlängden, åtminstone inte då pelarna installerats ned till lerans underkant.



**Figur 3.19** Sättningens variation med påförd belastning (bankhöjd) då pelarna installerats till lerans underkant.

**Figure 3.19** Variation in settlement with applied load (embankment height) when the columns are installed down to firm layers.

De mätningar som finns då pelarna inte går till fast botten har utförts för bankhöjden ca 3,5-4 m. I dessa fall uppgår slutsättningen till ca 50-150 mm, vilket är av samma storleksordning som då pelarna går till lerans underkant.

Självklart beror sättningarna inte enbart på lastens storlek utan även på t.ex. lerans och pelarnas styvhet samt hur tätt pelarna installerats. Ovanstående observationer indikerar dock vilken sättningsstorlek som normalt kan förväntas.

### **3.5 SYNUNKTER OCH ERFARENHETER SOM KAN GE UNDERLAG FÖR FORTSATT FORSKNING**

I detta projektet har arbetet koncentrerats på att samla in och sammanställa information om belastningar, pelaregenskaper och funktionsuppföljningar i ett antal väldokumenterade objekt. I samband med detta har även en mängd andra synpunkter/erfarenheter framkommit. Nedan har de ”frågetecken” som tycks förekomma tagits upp. Det bör dock påpekas att dessa är att betrakta som subjektiva åsikter och inte information som finns dokumenterade i någon organiserad form. Trots de osäkerheter som man nämner anser man vanligen att pelarna uppfyller de föreskrivna kraven. Detta beror troligen på det stora antalet pelare som samverkar och avlastar de relativt få pelare vars kvalitet blivit sämre än avsett.

#### **3.5.1 Om projektering**

Kunskap efterlyses om hur valet av pelarmönster och pelardiameter egentligen påverkar pelarnas funktion. Teoretiskt kan olika pelarmönster, pelardiametrar och c/c-avstånd användas för att erhålla samma sättning eller säkerhet, men hur är det i verkligheten? Hur mycket bättre är det att t.ex. placera pelarna i skivor i stället för i rutnät om stabilitetshöjning eftersträvas? Är pelare med diametern 800 mm bättre än pelare med diametern 600 mm?

Kunskap efterlyses om vilka krav som bör ställas i samband med pelartillverkningen, t.ex. avseende rotationshastighet (varv/min), stigning (mm/varv) och utblåsningstryck samt toleranser vad avser utmatningsmängder. Å andra sidan anser vissa att detta problem skall lämnas över till pelartillverkaren som ”får göra vad han vill” bara han ser till att den förutsatta pelarhållfastheten uppnås. Tilläggas bör att dagens krav på toleranser (ca 10 %) vid utmatning troligen inte uppfylls i praktiken p.g.a. tillverkningsprocessen och yttre miljöfaktorer trots att utmatningsdiagrammet indikerar detta.



Klara standarder (anvisningar) för hur inblandningsförsök bör genomföras efterlyses. Olika laboratorier använder i vissa avseenden olika metoder vid inblandningsförfarande, inpackning och lagring.

### **3.5.2 Om tillverkning**

Ibland blir pelarna ”rörformade”, dvs huvuddelen av inblandningsmaterialet hamnar i pelarens periferi. Å andra sidan förefaller inblandningsmedlet ibland även hamna nära centrum av pelaren. Mer kunskap om lämplig rotationshastighet, stigning, utblåsningstryck och typ av inblandningsverktyg anses kunna råda bot på dessa problem.

Ibland är pelarnas kontinuitet inte tillfredsställande trots att utmatningsdiagrammet inte indikerar några avvikelser. Bättre utmatningsmetoder och bättre mätning av utmatningsflödet efterlyses.

Ibland verkar delar av pelarna ha skjuvats i sidled vilket gör att pelarna inte blir helt kontinuerliga i vertikalled. Orsaken till detta kan vara att lera pressas i sidled vid pelartillverkningen. Om de intilliggande pelare inte uppnått tillräcklig hållfasthet pressas eventuellt leran in i dessa. Förslag till bättre installationsordning efterlyses därför.

### **3.5.3 Om kontroll**

Flera sonderingsmetoder finns (FKPS, KPS, OKPS och FOPS) och dessutom med olika utseende och dimension på sondaerna. Någon form av standard efterlyses.

Vid användning av KPS går sonden ofta ur pelaren efter några meters sondering vilket gör dess användning begränsad och dessutom blir tolkningen av resultatet osäkert.

Vid användning av FOPS-metoden har man i några fall observerat att inblandningsmedlet troligen läckt ut, vilket medfört att pelarens sammansättning över tvärsnittet inte blivit homogen (mer material i centrum). Detta innebär att den efterföljande sonderingen överskattat den aktuella pelarens hållfasthet. Därmed är inte den aktuella provpelarens egenskaper representativ för objektet. Ibland hävdas att eftersom man i förväg vet vilka pelare som skall testas kan dessa tillverkas extra noggrant och att de av denna anledning inte är representativa för objektet. Genom ordentlig kontroll kan dock dessa problem troligen undvikas.

Utmatningsdiagram anses inte tillförlitliga som kontrollmetod då svaghetszoner på en viss nivå i pelare vanligen inte kan hänföras till en motsvarande minskning i utmatad mängd inblandningsmedel.

### **3.5.4 Om funktion**

Hur samverkar pelarna med leran då pelarnas styvhet och hållfasthet ökar?  
Kan de teorier som finns framtagna för rena kalkpelare tillämpas även då pelarna innehåller cement?

Osäkerhet finns rörande pelarnas beständighet då de ofta skall uppfylla sitt jordförstärkande syfte under lång tid, t. ex. i samband med väg- och järnvägsbyggnad. Några problem med beständigheten är dock inte kända.

# 4. Arkivering av bakgrundsmaterial till databasen

## 4.1 INLEDNING

Trots att informationsmängden i den tidigare beskrivna databasen är omfattande utgör den en koncentrerad och förenklad beskrivning av de förhållanden som rådde vid varje specifikt objekt. Det material som utgör bakgrundsinformation till databasen finns därför arkiverat i strukturerad form. Nedan följer en kort redogörelse för vilka uppgifter som finns framtagen och hur den är sorterad. De objekt där endast översiktlig information samlats in är arkiverade i form av formulär omfattande en A4-sida per objekt. I de fall där mer detaljerad information insamlats har arkiveringen skett i form av en pärm per objekt.

## 4.2 OBJEKT DÄR ÖVERSIKTLIG INFORMATION INSAMLATS

Informationen om de objekt där information av översiktlig karaktär samlats in finns arkiverade i form av formulär omfattande en A4-sida per objekt. Omfattningen av den information som har samlats in framgår av nedanstående lista. För flertalet av objekten är formulären relativt väl ifyllda, men för en del objekt är informationen ganska ofullständig.

- **Allmänna data**
  - Uppgiftslämnare
  - Projekt
  - Syfte med K/C-pelarna
  - Belastningstyp och laststorlek
  - Förbelastning
- **Pelardata**
  - Pelardiameter
  - Mängd bindemedel
  - Bindemedelsfördelning kalk/cement/gips
  - Pelarmönster

- Ungefärligt c/c-avstånd
- Ungefärlig pelarlängd
- Ungefärlig dimensionerande pelarhållfasthet
- Ungefärlig mängd pelare i projektet

- **Jorddata**

- Ungefärligt lerdjup [m]:
- Lerans ungefärliga skjuvhållfasthet:

- **Resultat**

- Fungerade K/C-pelarna som avsett?
- Finns sektioner/testytor där omfattande uppföljningar gjorts?

### 4.3 OBJEKT DÄR DETALJERAD INFORMATION INSAMLATS

Informationen om de objekt där information av detaljerad karaktär samlats in finns, som tidigare nämnts, arkiverade i form av en pärm per objekt. Materialet i varje objektspärm ger en detaljerad bild av förutsättningar, genomförande och resultat av jordförstärkningen i en mätsektion.

Materialet har sorterats i ett flikssystem enligt nedanstående lista, som även utgör innehållsförteckningen för pärmarna. Samtliga pärmar är organiserade enligt samma flikssystem, trots att informationen för vissa objekt är begränsad. Detta innebär att det saknas material under vissa flikar, men det gör det å andra sidan enkelt att hitta i pärmarna.

- **Sammanfattning**

Under denna flik finns en koncentrerad sammanfattning av objektet i form av ett ifyllt formulär, omfattande två A4-sidor

- **Tvär- och längdsektioner**

Under denna flik finns ritningar som visar jordprofil och belastningssituationen.

- **Utsättningsritningar K/C-pelare**

Under denna flik finns ritningar som visar var och hur pelarna installerats.

- **BGEO**

Under denna flik finns den byggnadstekniska beskrivningen av de geotekniska förutsättningarna och de åtgärder som erfordrats.

- **Den ostabiliserade jordens egenskaper**

Under denna flik finns protokoll, tabeller och diagram från rutinundersökningar och CRS-försök, vilket ger en bild av den ostabiliserade jordens egenskaper.

- **Resultat från inblandningsförsök**

Under denna flik finns protokoll, tabeller och diagram från inblandningsförsök, vilket ger en bild av den stabiliserade jordens egenskaper baserat på laboratorieförsök.

- **Pelarsondering-provning**

Under denna flik finns protokoll, tabeller och diagram från pelarsonderingar, vilket ger en bild av pelarnas hållfasthet. Resultaten under denna flik avser endast pelare som provats innan den storskaliga produktionen påbörjats.

- **Pelarsondering-kontroll**

Under denna flik finns protokoll, tabeller och diagram från pelarsonderingar, vilket ger en bild av pelarnas hållfasthet. Resultaten under denna flik avser endast pelare som kontrollerats i samband med den storskaliga produktionen.

- **Uppföljning rörelser och/eller portryck**

Under denna flik finns protokoll, tabeller och diagram som visar jordrörelser och/eller portryck vid belastning och/eller vid pelarinstallationen.

- **Dimensioneringsberäkningar**

Under denna flik finns beräkningar, tabeller och diagram, vilket ger en bild av storleken på de beräknade jordrörelserna och/eller säkerhetsfaktorer före och/eller efter förstärkningsåtgärderna.

## 5. I rapporten använd nomenklatur

En mängd begrepp förekommer då kalk-cementpelare diskuteras. I dagsläget existerar ingen allmänt accepterad ordlista som entydigt definierar dessa begrepp. Detta innebär att vissa ord har flera innebörder vilket leder till olyckliga och onödiga missuppfattningar. Nedan följer en ordlista som definierar de begrepp som förekommer i denna rapport och i databasen. Många andra uttryck förekommer, men de har inte inkluderats här. Förhoppningsvis kan dock nedanstående lista tjäna som en utgångspunkt för fortsatt arbete med att skapa ett standardiserat och entydigt språkbruk då kalkcementpelare diskuteras.

**block:** Rutnät där c/c-avståndet mellan pelarna är lika med, eller mindre än, pelardiametern.

**borrad längd:** Den sammanlagda längden av pelarlängd och tomborrad längd, mätt från markytan.

**c/c-avstånd:** centrumavståndet mellan pelarna [m].

**FKPS:** (Försonderad KalkPelarSondering) Sondering med specialutformad sond som sker från pelarens ovkant och nedåt. Ett centriskt hål har skapats genom försondering för att styra sonden.

**FOPS:** (Förinstallerad Omvänd PelarSondering) Sondering med specialutformad sond som sker från pelarens underkant och uppåt. Pelarsonden installeras innan pelaren tillverkas.

**gitter:** Pelarmönster där pelarna tillsammans bildar rektangulära celler, där pelarraderna utgör rektanglarnas sidor. Vanligen bildas rätvinkliga rektanglar, men även icke-räta rektanglar förekommer.

**hållfasthet baserad på fältprovning:** Den skjuvhållfasthet som erhålls genom provning av pelare i fält, vanligtvis genom sondering.

**hållfasthet baserad på labprovning:** Den skjuvhållfasthet som erhålls genom provning av materialprover tillverkade i laboratoriet, vanligtvis genom enaxliga tryckförsök.

**KCx00y+z:** Kortfattad och entydig beskrivning av kalcementpelarens geometri och sammansättning enligt följande: KC=kalk-cementpelare; x00=pelardiameter [mm] (vanligen 500-800 mm); y=mängd kalk som blandas in [kg/m]; z=mängd cement som blandas in [kg/m].

**KPS:** (KalkPelarSondering) Sondering med specialutformad sond som sker från pelarens ovkant och nedåt.

**lagringstemperatur:** Temperaturen i det utrymme där provkroppar förvaras från inblandningstillfället till provtillfället.

**OKPS:** (Omvänd KalkPelarSondering) Sondering med specialutformad sond som sker från pelarens underkant och uppåt. Pelarsonden installeras vanligen omedelbart efter tillverkningen av pelaren.

**kontrollpelare:** Pelare som installerats under den storskaliga produktionen och som väljs ut för att kontrollera att önskad hållfasthet uppnåtts.

**pelarlängd:** Den längd, mätt i pelarens längdriktning, som tillförs stabiliseringsmedel enligt föreskrift.

**pelarmönster:** Det geometriska mönster som de enskilda pelarna tillsammans bildar vinkelrätt mot pelarnas längsaxel.

**provpelare:** Pelare som installeras innan den storskaliga produktionen, vanligen för att bestämma vilken pelartyp (inblandningsmängd, proportioner, etc.) som skall väljas för att uppnå erforderlig hållfasthet.

**pelarsond:** Verktyg bestående av två vingar, fästade i ena änden av en sondstång alternativt wire, som används för att kontrollera pelarens kontinuitet och hållfasthet. Vingens tvärsnittsmått är vanligen 15x400, 20x400 eller 15x500 mm<sup>2</sup>.

**rotationshastighet:** Avser den hastighet varmed inblandningsverktyget roterar [varv/sekund].

**rutnät:** Pelarmönster där de singulära pelarna tillsammans bildar ”rutor” (rektanglar eller kvadrater), med pelarna i rutornas hörnpunkter.

**singulär pelare:** Pelare som ej är i direkt kontakt med annan pelare.

**skivor:** Pelarmönster där pelarna tillsammans bildar parallella rader. Syftet är att förbättra samverkan vid upptagande av horisontella kraftkomponenter. Pelarna kan placeras så att c/c-avståndet är lika med eller mindre än pelardiametern.

**sondering:** Metod för att kontrollera pelarens kontinuitet och hållfasthet.

**sonderingsmotstånd:** Det motstånd som uppmäts vid sondering [kN].

**stigning:** Avser den vertikala sträcka blandningverkyget förflyttats samtidigt som blandningsverkyget roterat ett varv [mm/varv]. Stigningen är vanligen i storleksordningen 15-25 mm/varv.

**tomborrad längd:** Den borrning från markytan och/eller annan del, som utförs utan tillsättning av stabiliseringsmedel, mätt i pelarens riktning, som erfordras för att utföra pelare.

**triangulärt mönster:** Pelarmönster där singulära pelare tillsammans bildar ”trianglar” (liksidiga), med pelarna i triangelarnas hörnpunkter.

**utblåsningstryck:** Avser det tryck som används för att pressa ut stabiliseringsmedlet i jorden [kPa].

**utmatningsdiagram:** Visar utmatad mängd inblandningsmedel vid pelarinstallationen. Redovisning förekommer enligt två principer:

1. *Snittkurva kg/m:* Registreringen anger antalet kg stabiliseringsmedel som vägts ut från behållarna samtidigt som inblandningsverkyget stigit den senaste 1 meter.
2. *Akkumulerad kurva kg/m:* Registreringen anger hur mycket stabiliseringsmedel som totalt vägts ut från behållarna från det att inblandningsverkyget börjar att stiga vid pelarens botten.



# 6. FoU-rapporter, examensarbeten, artiklar och pågående FoU-projekt om kalk-cementpelare

## 6.1 INLEDNING

Nedan ges en sammanställning av publicerade rapporter och artiklar, samt pågående FoU-projekt, som behandlar kalk- och kalk-cementpelare. Det sammanställda materialet är begränsat till arbeten som behandlar användning i Sverige och uppgår till ca 120 publicerade publikationer (rapporter, examensarbeten och artiklar) samt 10 forskningsprojekt som inte avslutats/publicerats i skrivande stund (maj 1996). Materialet har insamlats genom kontakter med följande institutioner:

- Institutionen för geoteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg
- Avdelningen för Jord- och Bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm
- Institutionen för geoteknik, Luleås Tekniska Högskola, Luleå
- Statens geotekniska institut, Linköping och Göteborg
- Litteratursökning utförd av bibliotekstjänsten, Statens geotekniska institut, Linköping

Redovisningen av materialet sker i undergrupper baserat på vilket problemområde som behandlas. De huvudsakliga problemområden som har kunnat urskiljas ur det insamlade materialet har resulterat i följande uppdelning:

- Allmänt: allmänt hållna beskrivningar, state-of-the-art
- Rekommendationer, anvisningar och handböcker rörande projektering
- Provning av stabiliserad jord
  - Provning i både fält och laboratoriet
  - Provning i fält
  - Provning i laboratoriet
- Förstärkning av bankar: vägbankar, järnvägsbankar, provbankar
- Förstärkning av byggnader

- Förstärkning av schakter, skärningar och slänter
- Förstärkning av broar (typ slutna rambroar)
- Förstärkning för att reducera vibrationer
- Övriga tillämpningar

Den ovanstående indelningen innebär att respektive publikation i vissa fall kan innehålla information som kan hänföras till andra problemområden/undergrupper. Framförallt gäller detta publikationer som placerats i undergrupperna ”Förstärkning...” där pelarnas egenskaper vanligtvis också diskuteras. I de fall då publikationens huvudinriktning inte entydigt går att hänföra till endast en undergrupp återkommer den i flera undergrupper.

Avsikten har varit att redovisa publikationerna enligt nedanstående mall. I vissa fall har dock inte all information kunnat erhållas. För markerade publikationer (vissa FoU-rapporter och examensarbeten) redovisas utförligare sammanfattningar i Kapitel 6.12.

*Författare*

*Titel*

*Journal, tidning, proceeding, etc..., årtal*

*Sammanfattning (i förekommande fall, endast ett fåtal rader)*

*Nyckelord (i förekommande fall)*

## 6.2 ALLMÄNT: ALLMÄNT HÅLLNA BESKRIVNINGAR, STATE-OF-THE-ART

### **Jordförstärkning med kalk- och kalkcementpelare**

Seminarium, Göteborg, 1992-05-05, Stockholm 1992-05-06.

Statens geotekniska institut, 1992

Pile, Lime, Cement, Soil stabilization, Design, Additive, Equipment, Control, Laboratory test, Conference, Göteborg, Stockholm, 1992, Swedish

*Assarson, KG, Broms, B, Granholm, S, Paus, K*

### **Deep stabilization of soft cohesive soils**

Linden-Alimak AB, 1977

Clay, Soft clay, Mat foundation, Pile foundation, Floating foundation, Preloading, Excavations, Earthfill, Berm, Soil stabilization, Lime, Pile, Equipment, Bearing capacity, Stress, Settlement, English

*Boman, P, Broms, B*

### **Stabilisering av kohesionsjord med kalkpelare**

Nordisk Geoteknikermöde i Köbenhavn 22.-24.5. 1975. Foredrag. s 265-279, 1975.

Clay, Soil stabilization, Lime, Pile, Construction, Bearing capacity, Conference, Copenhagen, 1975, Swedish

*Broms, B, Boman, P*

### **Stabilisation of soil with lime columns**

Ground Engineering. 1979, vol 12, nr 4, s 23-32, 1979.

Soft clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Design, Shear strength, Bearing capacity, Settlement, Analysis, Useful in practice, English

*Broms, B, Boman, P*

### **Lime columns - a new foundation method**

ASCE. Geotechnical Engineering Division. Journal., vol 105, nr GT4, s 539-556, 1979.

Clay, Settlement, Soil stabilization, Pile, Lime, Shear strength, Bearing capacity, English

*Broms, B*

### **Stabilization of soft clay with lime columns**

Seminar on soil improvement and construction techniques in soft ground, Singapore, 10-11 January, 1984. s 120-133, 1984.

Soft clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Shear strength, Settlement, Conference, Singapore, 1984, English

*Ekström, J*

### **Kalk och cementpelare-Metod under utveckling**

Grundläggningdag 92. Grundläggningsteknik på väg. Stockholm 4 mars 1992, 1992.

Clay, Pile, Lime, Cement, Design, Control, Sweden, Conference, Stockholm, 1992, Swedish

*Hansbo, S*

**Specialist ground treatment by other methods**

International conference on advances in piling and ground treatment, London, March 1983. Proceedings. s 47-76, 1983.

/Preloading, compaction by blasting and stabilized columns/

Preloading, Compaction, Blasting, Pile, Lime, State of the art review, Bibliography, Conference, London, 1983, English

*Hartlén, J, Carlsten, P*

**Improvement of soft soil**

New technology for foundation engineering, NTFE '92. International geotechnical conference, Hanoi, Oct. 1992. Proceedings, vol. 2, 1992.

/Modern methods used in Sweden as technical and economic alternatives to deep foundations on piles. Different methods are more or less appropriate for different soil types. The following applications are dealt with: Load adjustment, especially lightweight materials such as coal ash, plastic foam (EPS) and foamed concrete; Soil improvement, lime and lime/cement columns; Soil reinforcement, especially geotextiles; Deep compaction/Soft ground, Soil stabilization, Pile, Lime, Cement, Lightweight fill, Reinforced soil, Fabric, Compaction, Vibro wing method, Case history, State of the art review, Sweden, Conference, Hanoi, 1992, English

*Hartlén, J, Holm, G*

**Deep stabilization of soft soils with lime-cement columns**

Bengt B. Broms symposium on geotechnical engineering, Singapore, Dec. 1995. Proceedings. s 173-179, 1995.

/In Sweden deep stabilisation of soft soils with lime-cement columns has been used extensively during the last five years mainly in infrastructure projects. The interaction between the columns and the unstabilised soil is normally used to get a more economical solution still having the required safety and function. Quick lime and cement and the combination of these have been used in several soft soils ranging from clayey silt to organic soils/

Pile, Lime, Cement, Soil stabilization, Design, Sweden, Conference, Singapore, 1995, English

*Hellman, L, Holm, G*

**Grundförstärkning med kalkpelare. Förundersökningar och kravspekifikationer**

Samarbetsorganisationen för Fordon-Markforskning. Meddelande; 1979:27. s 58-61, 1979.

Soil stabilization, Pile, Lime, Site investigation, Laboratory test, Specification, Design, Conference, Stockholm, 1978, Swedish

*Holm, G*

**Kalkpelarmetoden**

Samarbetsorganisationen för Fordon-Markforskning. Meddelande; 1979:27. s 45-57, 1979.

Soil stabilization, Clay, Soft clay, Pile, Lime, Shear strength, Analysis, Design, Equipment, Conference, Stockholm, 1978, Swedish

*Holm, G*

**Kalkpelarmetoden - nya möjligheter**

Bygg och Teknik. 1985, vol 77, nr 8/9, s 37-39, 1985.

Pile, Lime, Shear strength, Gypsum, Fly ash, Cement, Temperature effect, Control, Swedish

*Holm, G*

**Kalkpelarmetoden. Djupstabilisering av lös lera**

Byggeforskningsrådet; T22:1986, 1986.

Soft clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Specification, Swedish

*Holm, G, Lingfors, R, Holmqvist, L*

**Djupstabilisering med cementpelare**

Väg- och Vattenbyggaren. 1987, nr 4, s 54-55, 1987.

Soft clay, Soil stabilization, Pile, Cement, Swedish

Holm, G, Holmqvist, L

Kalkpelarmetoden

AMA-Nytt. Mark Hus. Informationsdel. 1986, nr 1, s 5-7, 1986.

Soil stabilization, Pile, Lime, General features only, Swedish

*Holm, G*

**Deep stabilization by admixtures**

International conference on soil mechanics and foundation engineering, 13, New Delhi, Jan. 1994. Proceedings, vol. 5. s 161-162, 1994.

/Contribution from panelist/

Soft clay, Organic content, Soil stabilization, Additive, Lime, Cement, Pile, Compressive strength, Conference, New Delhi, 1994, English

*Holm, G*

**Svensk Djupstabilisering - branschgemensam FoU-satsning på djupstabilisering med kalk-cementpelare**

Bygg och Teknik. 1995, vol 87, nr 8, s 46-48, 1995.

/Svensk Djupstabilisering (Swedish Deep Stabilization Research Center) initierar, samordnar och genomför forskning och utveckling inom djupstabilisering med kalk-cementpelare till nytta för samhälle och industri/ /Framgångsrik förstärkningsmetod; Stor utvecklingspotential; Kraftfull branschgemensam FoU-satsning; Genomförande av forskningen; Redovisning av FoU-resultat; Finansiering; Organisation; Kontakter/ Pile, Lime, Cement, Soil stabilization, Research project, Sweden, Swedish

*Jonsson,R, Svensson,PL*

**Cementpelare - är de för starka?**

Bygg & Teknik. 1993, vol 85, nr 8, s 20-22, 1993.

/Kalk- kontra cementpelare/

Pile, Cement, Soil stabilization, Design, Japan, Sweden, Swedish

*Orre,B*

**Jordförstärkning med kalk- och kalk-cementpelare**

AMA-nytt. Informationsdel. Mark / Hus. 1993, nr 2, s 10-12, 1993.

/Förstärkningsmetod med många fördelar; Dimensionering och utformning; Kontroll och provning/

Soft clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Cement, General features only, Swedish

*Paus,K*

**Lerans hållfasthet ökar med kalkpelare som armering**

Byggmästaren. 1979, vol 58, nr 4, s 12-14, 1979.

Clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Case history, Swedish

*Persson,I*

**Cementpelargrundläggning**

Cementa. 1987, vol 13, nr 2, s 20-21, 1987.

/Väg E66, trafikplats Skälby, Kalmar/

Pile, Cement, Case history, Kalmar, Sweden, Swedish

*Svensson,PL*

**Jordförstärkningsteknik. "State of Art Report"**

Byggforskningsrådet. T12:1990, 1990.

/Tillämpningar, Metoder; teknik, ekonomi, miljö, Kvalitetsfrågor, Teknik på frammarsch/  
Soil stabilization, Injection, Pile, Lime, Reinforced soil, Compaction, Preloading, Quality,  
State of the art review, Useful in practice, Bibliography, Swedish

*Svensson, PL, Holm, G, Minsér, A*

**Jorförstärkning- en dåligt utnyttjad resurs**

Bygg och Teknik nr 8 1987 (s 26-28), 1987.

*Wikström,J, Östman,H, Paus,K*

**Kalkpelarmetoden**

Byggteknisk Information Meddelande; 2/78, 1978.

Clay, Soil stabilization, Lime, Pile, Use, Design, Analysis, Swedish

*Åhnberg, H, Holm, G*

**Kalkpelarmetoden. Resultat av 10 års forskning och praktisk användning samt framtida utveckling**

Statens geotekniska institut. SGI Rapport; 31, 1986.

Soil stabilization, Pile, Lime, Use, Specification, Sweden, Costs, Norway, Finland, Japan, Information documentation, Research project, Bibliography, Swedish

*Åhnberg, H*

**Jordstabilisering med kalk och cement ökar**

Cementa. 1991, vol 17, nr 2, s 6-9, 1991.

Pile, Lime, Cement, Soil stabilization, Sweden, Norway, Finland, Swedish

\*\*\*\*\*

## **6.3 REKOMMENDATIONER, ANVISNINGAR OCH HANDBÖCKER OM PROJEKTERING**

*Broms, B*

**Stabilization of soil with lime columns. Design handbook**

Lime Column AB, 1984.

Clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Design, Textbook, Useful in Practice, English

*Broms, B, Boman, P*

**Stabilization of soil with lime columns. Design handbook**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och Bergmekanik, 1977.

Clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Design, Textbook, Useful in practice, English

*Broms, B, Boman, P*

**Stabilization of soil with lime columns. Design handbook. Second Edition.**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och Bergmekanik, 1978.

Clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Design, Textbook, Useful in practice, English

*Carlsten, P*

**Jordförstärkning med kalk-, cement- och kalk/cementpelare.**

**Allmän teknisk beskrivning. Metoder**

Vägverket. Geoteknik. Publikation 1991:42, 1991.

/Laboratorieförsök på provkroppar av stabiliserad jord; Provning av funktion hos kalk- och cementpelare i fält; Broar på kalkpelare; Nya erfarenheter beräffande dimensionering och utförande av kalk- och cementpelarförstärkningar - Upprättande av bygghandling; Beräkningsmodell/ Förslag till ändringar och tillägg till de dimensionerings- och utförandemetoder som anges i VV publ. 1986:72/

Pile, Lime, Cement, Soil stabilization, Design, Laboratory test, Field test, Bridge, State of the art review, Swedish

*Carlsten, P, Ekström, J*

**Kalk- och kalk-cementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll**

Svenska Geotekniska Föreningen. SGF Rapport 4:95, 1995.

/Innehåll: Krav på pelarförstärkning; Dimensioneringsförutsättningar; Dimensionering; Stabiliseringsmedel; Projekteringsråd; Utförande, Kontroll; Appendix A: Geotekniska provningsmetoder - Förslag till laboratorieanvisning för inblandning, preparering av provkroppar, förvaring och undersökning av kalk/cementstabiliserande jordprover; B. Beskrivning av kontrollmetoder för kalk- och kalk-cementpelare i fält; C. Beräkningsexempel//17 ref//Title: Lime and lime-cement columns. Guidance for project planning, execution and inspection/

Pile, Lime, Cement, Soil stabilization, Reinforcement, Design, Control, Useful in practice, Swedish

*Åhnberg, H, Holm, G*

**Kalkpelare för ledningsgravar.**

**Förstärkning av schakter och grundläggning av ledningar**

Statens geotekniska institut. SGI Varia 336, 1991.

/Dagens praxis vid användning och dimensionering av kalkpelarförstärkning av ledningsgravar/

Pile, Lime, Soil stabilization, Conduit, Trench, Design, Swedish

*Vägverket*

**Kalkpelare. Grundförstärkning vid vägbyggnad**

Väg- och Brokonstruktion. Geoteknik. Publ; 1986:72, 1986

/Sammanfattning i Vägverket. Väg- och Brokonstruktion. Geoteknik. Publ; 1986:87

Pile, Lime, Soil stabilization, Highway, Design, Control, Specification, Sweden, Swedish

\*\*\*\*\*

## **6.4 PROVNING AV STABILISERAD JORD**

### **6.4.1 Provning i både fält och laboratoriet**

*Almqvist, L, Erikmats, K*

**Djupstabilisering med kalk-cementpelare.**

**En fält- och laboratoriestudie av inverkan av faktorer.**

Examensarbete X 1994:5, Chalmers tekniska högskola, 1994.

*Axelsson, A, Larsson, S*

**Provningsmetoder på kalk-cementpelare - Svealandsbanan**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och Bergmekanik. Examensarbete 94/10, 1994.

/Svealandsbanan; Jordförstärkning med kalk-cementpelare; Kalkpelarsondering; Studie av kalkpelarsonderingar vid Grundbro och Malmby; Studie av pelarsonderingar vid Årja; Laboratieförsök på prover upptagna från kalk-cementpelare/

Pile, Lime, Cement, Soil stabilization, Railroad, Shear strength, Unconfined compression test, Field test, Laboratory test, Sweden, Swedish



*Axelsson, K*

**Down hole-mätning i kalk-cementpelare**

Examensarbete 96/3, Avdelningen för Jord- och bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan, 1996.

*Björkman, J Ryding, J*

**Kalk-cementpelares mekaniska egenskaper**

Examensarbete 96/1, Avdelningen för Jord- och bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan, 1996.

*Ekström, J*

**Kan vi lita på KC-pelarförstärkningar?-Kvalitetskontroll i laboratorium och fält.**

VTI's och KBF's forskardagar Linköping 1995, 1995.

*Holm, G, Tränk, R, Ekström, A*

**Improving lime column strength with gypsum**

Improvement of ground. European conference on soil mechanics and foundation engineering, 8, Helsinki, May 1983. Proceedings, Vol. 2. s 903-907, 1983.

Clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Gypsum, Shear strength, Binder content, Conference, Helsinki, 1983, English

*Holm, G, Tränk, R, Ekström, A*

**Kalkpelare med gips som tillsatsmedel**

Statens geotekniska institut. SGI Rapport; 30, s 5-58, 1987.

Soil stabilization, Pile, Lime, Additive, Gypsum, Binder content, Research oriented, Swedish

*Holm, G, Åhnberg, H*

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

Statens geotekniska institut. SGI Rapport; 30, s 59-91, 1987.

Soil stabilization, Pile, Lime, Fly ash, Binder content, Research oriented, Swedish

*Larsson, S, Olofsson, C*

**Kalkpelarmetoden - en undersökning av kalkpelares bärighet i Hörningsnäsområdet.**

Examensarbete, Jord- och Bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan., 1976.

*Pettersson, J, Ulvehed, P*

**Skjuvhållfasthet hos kalk/cementpelare**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och Bergmekanik. Examensarbete. Rapport 92/9, 1992.

Clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Shear strength, Laboratory test, Field test, Laboratory test, Swedish

Åbjörn, S, Linnér, R.

**Kalk-cementpelares deformationsegenskaper - provbelastning i fält.**

Examensarbete X 1995:4, Chalmers Tekniska Högskola, 1995.

Åhnberg, H, Bengtsson, PE, Holm, G

**Prediction of strength of lime columns**

International conference on soil mechanics and foundation engineering, 12, Rio de Janeiro, Aug. 1989. Proceedings, Vol. 2, s 1327-1330, 1989.

Soil stabilization, Pile, Lime, Cement, Shear strength, Temperature effect, Conference, Rio de Janeiro, 1989, English

Åhnberg, H, Holm, G

**Kalk-flygaska och kalk-gips för djupstabilisering**

NGM-84. Nordiska Geoteknikermötet, Linköping, Juni 1984. Vol. 2. s 957-964, 1984.

Soil stabilization, Lime, Fly ash, Gypsum, Laboratory test, Field test, Pile, Conference, Linköping, 1984, Swedish

Åhnberg, H, Holm, G

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

Statens geotekniska institut. SGI Rapport; 30, s 93-146, 1987.

Soil stabilization, Pile, Lime, Cement, Binder content, Shear strength, Temperature effect, Research oriented, Swedish

Åhnberg, H, Johansson, SE, Retelius, A, Ljungkrantz, C, Holmqvist, L, Holm, G

**Cement och kalk för djupstabilisering av jord. En kemisk - fysikalisk studie av stabiliseringseffekter**

Statens geotekniska institut, SGI. Rapport 48, 1995

/Jordar och stabiliseringsmedel; Kemisk - fysikaliska processer; Fysikalisk laboratorieprovning av stabiliserad jord; Kemisk laboratorieprovning av stabiliserad jord samt gränzson stabiliserad/ostabiliserad jord; Fältförsök/

Soft ground, Soil stabilization, Additive, Cement, Lime, Pile, Laboratory test, Field test, Analysis, Bibliography, Swedish

\*\*\*\*\*

## 6.4.2 Provning i fält

Boman, P

**Kalkpelarmetoden. Uppföljning av en rörgravs stabilisering i Sollentunaholm.**

**Del II: Kontroll av kalkpelare**

Statens råd för byggnadsforskning. Projekt; 780745-7, 1979

Soil stabilization, Pile, Lime, Design, Control, Penetration, Shear strength, Measurement, Equipment, Load test, Trench, Conduit, Swedish

*Broms, B, Boman, P, Ingelsson, I*

**Investigation of lime columns at Smistavägen, Huddinge, Sweden**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och Bergmekanik/Linden-Alimak AB, 1978.

Pile, Lime, Control, Cone penetrometer test, Vane shear test, Sampler, Sweden, English

*Ekström, J*

**Kontroll av cementpelare. Delrapport 2 omfattande fältförsök i Håby.**

Rapport B 1993:11. Institutionen för geoteknik, Chalmers Tekniska Högskola, 1993.

*Ekström, J*

**Kontroll av cementpelare. Delrapport 1 omfattande fältförsök i Halmstad.**

Rapport B 1993:13. Institutionen för geoteknik, Chalmers Tekniska Högskola, 1993.

*Ekström, J*

**Kontroll av cementpelare. Slutrapport med redovisning av fältförsöken i Ljungskile.**

Rapport B 1994:3. Institutionen för geoteknik, Chalmers Tekniska Högskola, 1994.

*Ekström, J*

**Djupstabilisering i gyttja och gyttjig lera.**

Ett bidrag till "Hansbok"-en hyllning till Professor Sven Hansbo på 70-årsdagen, 1995.

*Göransson, M., Larsson, J*

**Kalkpelares deformationsegenskaper - provbelastning i fält.**

Examensarbete X 1994:5, Chalmers Tekniska Högskola, 1994

*Holm, G, Bredenberg, H, Broms, B*

**Lime columns as foundation for light structures**

International conference on soil mechanics and foundation engineering, 10, Stockholm, June 1981. Proceedings, Vol. 3. s 687-694, 1981.

Small building, Soil stabilization, Pile, Lime, Settlement, Clay, Shear strength, Time factor, Cone penetrometer test, Equipment, Case history, Sweden, Conference, Stockholm, 1981, English

*Holm, G, Åhnberg, H, Holmqvist, L*

**Kalkpelarmetoden - försök med större pelardiameter**

Väg- och Vattenbyggaren, nr 7/8, s 39-40, 1984.

Pile, Lime, Size, Swedish

*Holmqvist, L*

**Kalkpelarmetoden. Byggherrar, geotekniker och markprojektörer: Prova mera - projektera! Om kvalitetssäkring, provning och aktiv design vid djupstabilisering**

Bygg och Teknik., vol 84, nr 7/8, s 40-42, 44, 1992.

/Med ett nytt provförfarande - FOPS-provning - finns det nu mycket goda möjligheter att i inledningsskedet direkt på arbetsplatsen konstatera resultatet av preliminärt valda

stabiliseringsåtgärder. Vid utvärdering av resultaten får man också med den självklart viktiga delen - kvaliteten i själva utförandet - där system för kvalitetssäkring och egenkontroll ingår och kan med geostatistiska metoder analysera precision och noggrannhet i de preliminära åtgärderna för att fastställa dimensionerande kravnivåer/  
Pile, Lime, Soil stabilization, Control, Quality, Sweden, Swedish

*Kivelö, M*

### **Odränerade provbelastningar av kalk-cementpelare i fält**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och bergmekanik. TRITA-AMI Report 3002, 1994.  
/Beskrivning av försöksområdet; Installation och kontroll av pelare; Provbekastning; Resultat av belastningsförsök på lera; Resultat av belastningsförsök på pelare; Resultat av belastningsförsök på pelare och lera; Resultat av belastningsförsök på pelargrupp/  
Clay, Pile, Cement, Lime, Soil stabilization, Bearing capacity, Undrained test, Field test, Swedish

*Kivelö, M*

### **Kalk-cementpelare som förstärkt jord eller pålar?**

Bygg & Teknik. , vol 86, nr 8, s 42-45, 1994.

/För att öka förståelsen om kalkcementpelarnas verkningssätt och samverkan mellan pelare och lera har belastningsförsök av enskilda pelare utförts. Syftet med försöken har varit att studera en enskild pelares lastkapacitet och bärförmåga samt deformations-egenskaper i fält/

Pile, Cement, Lime, Soil stabilization, Bearing capacity, Deformation, Swedish

*Kivelö, M*

### **Ostkustbanan - E4 över Norraladalen:**

#### **Stabilisering av höga bankar med kalk-cementpelare**

Bygg och Teknik. 1995, vol 87, nr 8, s 50-52,55, 1995

/Kalkcementpelarförstärkningar; Ostkustbanan - E4 Norraladalen; Geotekniska förhållanden; Provininstallation av kalk-cementpelare; Omfattande laboratorieundersökningar; Undersökningsresultat; Slutsatser; Fortsatt provning/

Pile, Lime, Cement, Soil stabilization, Embankment, Railroad, Highway, Direct shear test, Triaxial test, Soil-structure interaction, Deformation, Shear strength, Field test, Sweden, Swedish

*Nygren, M, Welander, AS*

### **Bestämning av egenskaperna hos kalk / cementpelare**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och Bergmekanik. Examensarbete. Rapport 91/5, 1991.

/Studie av olika undersökningsmetoder för bestämning av kalk / cementpelares egenskaper: vingsondering, pressometer, presso- permeameterförsök, kalkpelarsondering samt laboratieförsök/

Pile, Lime, Cement, Field test, Testfield, Kista, Sweden, Swedish

*Rejment, S*

**Kalkpelarmetoden. Belastningsförsök av kalkpelare i kv Myren, Huddinge kommun**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och Bergmekanik. Examensarbete, 1978.  
Pile, Lime, Load test, Bearing capacity, Research oriented, Case history, Huddinge, Sweden, Swedish

*Vilkenas, A, Bredenberg, H, Persson, O*

**Kalkpelarprovtagare**

K-Konsult, 1984.  
Pile, Lime, Control, Sampler, Case history, Sweden, Swedish

\*\*\*\*\*

### 6.4.3 Provning i laboratoriet

*Andersson, E*

**Kemisk stabilisering av jord- en studie av samband mellan kemisk/fysikaliska indexegenskaper och stabiliseringseffekter.**

Examensarbete LiTH-ITU-EX-102-SE, Univeristetet i Linköping, 1995.

/I projektet undersöktes olika parametrar av kemisk karaktär hos ostabiliserad jord för att finna eventuella samband mellan dessa och uppmätt skjuvhållfasthetstillväxt hos stabiliserad jord. 19 olika jordar studerades med avseende på organisk halt, innehåll av katjoner, sulfidinnehåll, resistivitet, klorider, pH och karbonathalt/  
Jordstabilisering, Kalk/Cement, Kemiska parametrar

*Björkman, J Ryding, J*

**Kalk-cementpelares mekaniska egenskaper**

Examensarbete 96/1, Avdelningen för Jord- och bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan, 1996.

*Eriksson, M, Carlsten, P*

**Tryckförsök på kemiskt stabiliserad jord**

Statens geotekniska institut, SGI. Varia 435, 1995

/Unconfined compression test on chemically stabilized soil/

Soil stabilization, Clay, Pile, Lime, Cement, Gypsum, Additive, Unconfined compression test, Laboratory test, Swedish

*Green, M, Smigan, R*

**Kalkcementpelare. Materialparametrar och datorsimulering av enskild pelares funktion**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och bergmekanik. Examensarbete 95/1, 1995.

/Historik och terminologi; Kalkcementpelarmetoden; Materialparametrar; FLAC-simulering av en enskild pelare/

Pile, Lime, Cement, Soil stabilization, Shear strength, Triaxial test, Swedish

*Hansson, A.*

**Kalk- och cementstabiliserad lera - Laboratoriestudie av vattvotens inverkan på hållfasthets-utvecklingen.**

Examensarbete X 91: 2, Chalmers Tekniska Högskola, 1991.

*Holm, G*

**Lime column stabilization - experiences concerning strength and deformation properties**

Väg- och Vattenbyggaren. nr 7/8, s 45-48, 1979.

Clay, Soil stabilization, Lime, Pile, Shear strength, Deformation, Analysis, English

*Rogbeck, Y*

**Stora triaxialförsök på kalkcementpelarprover**

Väg- och Vattenbyggaren. nr 5, s 34-36, 1995.

/Användningen av djupstabilisering av lös jord har ökat snabbt. Bara under de tre senaste åren har mängden pelare ökat från 650 000 meter till 3,8 miljoner meter. Förstärkningsmetoden är nu den vanligaste i Sverige. I mitten av 1970-talet användes enbart kalk som stabiliseringsmedel men sedan slutet av 1980-talet har en blandning av kalk och cement använts och denna ingår i huvudparten av de pelare som sätts idag. Men hur fungerar egentligen pelarna? För att klarlägga detta har bl a stora triaxialförsök (diameter 0,5 m) utförts på kalkcementpelarprover//Uppföljningsområdet; Fält- och laboratorieundersökningar; Provtagning och triaxialförsök av pelare i full skala; Erfarenheter/ Triaxial test, Pile, Lime, Cement, Sample, Size, Soil stabilization, Reinforcement, Railroad, Field test, Laboratory test, Sweden, Swedish

*Ulfheden, D, Gillholm, G*

Samverkan mellan kalk-cementpelare och lera - en parameterstudie.

Examensarbete X 1995:2, Chalmers Tekniska Högskola, 1995.

*Åhnberg, H, Holm, G, Holmqvist, L, Ljungcrantz, C*

**Use of different additives in deep stabilization of soft soils**

International conference on soil mechanics and foundation engineering, 13, New Dehli, Jan. 1994. Proceedings, vol.3 s 1191-1194, 1994.

/Use of deep stabilization in Sweden, and results from a current research project concerning the effects of the various additives in different types of soft soils. Effect of quick lime, cement and also mixtures of lime and cement have been studied. The soils studied range from peat and gyttja to different types of soft clay and clayey silt/ Soft ground, Soil stabilization, Additive, Lime, Cement, Pile, Sweden, Conference, New Dehli, 1994, English

*Åhnberg, H, Ljungkrantz, C, Holmqvist, L*

**Deep stabilisation of different types of soft soils**

European conference on soil mechanics and foundation engineering, 11, Copenhagen, May-June 1995. Proceedings, vol. 7. The interplay between geotechnical and engineering geology. Danish Geotechnical Society. DGF Bulletin 11. s 7.167-7.172, 1995.

/Results from research projects showing the effects of stabilisation in different soils ranging from clayey silt to very soft clay and organic soils/

Soft ground, Soil stabilization, Lime, Cement, Additive, Pile, Research project, Sweden, Conference, Copenhagen, 1995, English

\*\*\*\*\*

## **6.5 FÖRSTÄRKNING AV BANKAR (VÄGBANKAR, JÄRNVÄGSBANKAR, PROVBANKAR)**

*Bjerin, L, Ekström, A, Andersson, Ö*

**Väg 588 vid Fittja - ett exempel på aktiv design vid vägbyggnad**

NGM-84. Nordiska Geoteknikermötet, Linköping, Juni 1984. Vol. 1. s 27-34, 1984.

Highway, Embankment, Pile, Lime, Lightweight fill, Case history, Fittja, Sweden, Conference, Linköping, 1984, Swedish

*Boman, P, Broms, B, Paus, K, Söderlind, G*

**Kalkpelarmetoden. Uppföljning i kv Myren, Huddinge**

Byggforskningen. Rapport; R138:1979, 1979.

Soil stabilization, Clay, Pile, Lime, Trench, Highway, Design, Construction, Deformation, Settlement, Bearing capacity, Ground water lowering, Control, Costs, Case history, Analysis, Sweden, Swedish

*Bredenbergh, H*

**Lime columns for ground improvement at new cargo terminal in Stockholm**

Improvement of ground. European conference on soil mechanics and foundation engineering, 8, Helsinki, May 1983. Proceedings, Vol. 2. s 881-884, 1983.

Soft clay, Soil stabilization, Lime, Pile, Settlement, Case history, Sweden, Conference, Helsinki, 1983, English

*Broms, B*

**Lime columns in theory and practice**

International conference of soil mechanics, Mexico, 1982. Commemorative technical conference 1957-1982. s 149-165, 1982.

Pile, Lime, Soil stabilization, Bearing capacity, Settlement, Trench, Case history, Conference, Mexico, 1982, English

*Broms, B, Boman, P*

**Kalkstabiliserade pelare - ny grundförstärkningsmetod vid vägbyggnad**

Väg- och Vattenbyggaren vol 21, nr 5, s 40-43, 1975.

Soil stabilization, Pile, Lime, Clay, Drainage, Reinforcement, Shear strength, Ion exchange, Compressibility, Design, Construction, Field test, Research oriented, Swedish

*Carlsten, P, Ouacha, M*

**Funktionsuppföljning av kalkpelare. Hageleden i Karlstad**

Statens geotekniska institut, SGI. Varia 407, 1993.

Soil stabilization, Reinforcement, Pile, Lime, Settlement, Highway, Karlstad, Sweden, Swedish

*Carlsten, P, Tränk, R*

**Deep stabilisation with lime and lime/cement columns - comparison of performance**

Nordiske geoteknikermöde, NGM-92, 11, Aalborg, maj 1992. Artikler, foredrag, generalrapporter og andre bidrag, vol. 1. s 25-30, 1992.

Soft clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Cement, Settlement, Highway, Norrköping, Sweden, Conference, Aalborg, 1992, Swedish

*Ekström, A*

**Kalkpelarmetoden vid vägbyggnad - Svenska erfarenheter och utvecklingstendenser**

Vägen och välståndet. Nordiska Vägtekniska Förbundets kongress, 14, Stockholm, juni 1984. Kongresshandlingar, del 2. s 222-227, 1984.

Pile, Lime, Soil stabilization, Embankment, Design, Construction, Sweden, Conference, Stockholm, 1984, Swedish

*Ekström, JC, Berntsson, JA, Sällfors, GB*

**Test fills of clays stabilized with cement columns**

International conference on soil mechanics and foundation engineering, 13, New Delhi, Jan. 1994. Proceedings, vol. 3. s 1183-1186, 1994.

/Results from full scale tests where cement columns were used for foundation of buildings. Deformation properties back calculated from measured settlements and properties measured by conventional site investigations and laboratory tests. The test fills were constructed on both a natural silty clay and on clay stabilized with cement columns down to 7-9 m depth/

Clay, Silt, Settlement, Soil stabilization, Pile, Cement, Field test, Embankment, Case history, Sweden, Conference, New Delhi, 1994, English



*Farokh,S, Zhoobin,S*

**Jämförelser mellan två jordförstärkningsmetoder för E4:an mellan Nyköping och Södertälje (kalkpelare och urgrävning)**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och bergmekanik. Examensarbete. Rapport 93/8, 1993.

/Projektbeskrivning; Urgrävning; Förstärkning med kalkpelare; Kostnadsjämförelse/ Soil stabilization, Pile, Lime, Replacement, Highway, Design, Costs, Case history, Sweden, Swedish

*Holm,G*

**Kalkpelarförstärkning för urgrävning och vägbank vid Stenungsund**

Nordiska geoteknikermötet, Esbo, maj 1979. Föredrag och artiklar. s 269-284, 1979.

Clay, Reinforcement, Lime, Pile, Embankment, Excavation, Settlement, Consolidation, Time factor, Laboratory test, Field test, Measurement, Control, Case history, Analysis, Sweden, Conference, Esbo, 1979, Swedish

*Holm,G, Adén,I*

**Höghållfasta kalk/cement- och cementpelare på Arlanda Bana 3**

Bygg & Teknik, vol 85, nr 8, s 23-24, 27-28, 1993.

/Bankhöjd 10-11 m. I Sverige har tidigare inte utförts djupstabilisering med kalk/cementpelare eller cementpelare för bankar med större bankhöjd än 6-8 m. Detta i kombination med att mycket stränga krav på sättningar ställs medför att en djupstabilisering för mellansta taxibanan ligger utanför det erfarenhetsområde som finns i Sverige/ Pile, Lime, Cement, Soil stabilization, Design, Bearing capacity, Runway, Case history, Arlanda, Sweden, Swedish

*Holm,G, Tränk,R, Ekström,A, Torstensson,BA*

**Lime columns under embankments - a full scale test**

Improvement of ground. European conference on soil mechanics and foundation engineering, 8, Helsinki, May 1983. Proceedings, Vol. 2. s 909-912, 1983.

Clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Embankment, Vertical drain, Field test, Settlement, Conference, Helsinki, 1983, English

*Jacklin,A, Larsson,U*

**Vägbank på kalkcementpelarförstärkt lera. Utredning av kollaps**

Examensarbete 1994:3, Institutionen för geoteknik, Chalmers Tekniska Högskola, 1994.

/Road embankment on lime/cement column reinforced soil. Investigation of the cause for a collapse/ /Jordlager; Vägbank och förstärkning; Kontroll av pelare; Stabilitetsberäkningar enligt traditionell metod; Pelarna fungerar som pålar; Beräkningar med aktivt och passivt jordtryck samt direkt skjuvning; Tänkbara orsaker till vägbankens brott/ Clay, Embankment, Highway, Pile, Lime, Cement, Settlement, Shear strength, Slope, Stability, Swedish

*Lingfors, R, Lindgren, J, Elfving, O, Norén, S*

**Cementpelar-metod för billig grundläggning**

Husbyggaren, vol 31, nr 6, s 10-12, 1989.

/Första praktikfallet med cementpelare/ /Laboratorie- och fältförsök har visat att det går att spara upp till 70 proc i pengar räknat genom att använda cementpelare vid jordförstärkning jämfört med de konventionella grundläggningsmetoderna. Detta utan att förstärkningarna förlorar i effekt/

Pile, Cement, Soil stabilization, Case history, Skälby, Kalmar, Sweden, Swedish

*Mellgren, KE*

**E4:an Stockholm-Nyköping fullt utbyggd 1984**

Byggindustrin, vol 51, nr 19, s 20-22, 1981

Highway, Construction, Pile, Lime, General features only, Case history, Sweden, Swedish

*Nord, M*

**Comparison between calculated and measured settlements for a road embankment reinforced with lime columns**

Young geotechnical engineers' conference, YGEC, 4, Delft, June 1990. Vol. 1, 1990.

Embankment, Highway, Soil stabilization, Pile, Lime, Settlement, Case history, Hagaliden, Sweden, Conference, Delft, 1990, English

*Oldfelt, P, Talani, R*

**Teknisk-ekonomisk jämförelse mellan olika förstärkningsåtgärder för en avfartsramp**

Linköpings Universitet. Teknisk utbildning. Byggnadsingenjörslinjen. LITH-ITU-EX—52, 1994.

/Statens geotekniska institut har på uppdrag av Vägverket projekterat en avfartsramp vid trafikplats Loddby norr om Norrköping, där kolaska använts som bankmaterial och förstärkning utförts med kalk-cementpelare och tryckbankar/ /Geotekniska förhållanden; Sättningar; Stabilitet; Beskrivning av projekterad konstruktion med kolaska; Ekonomisk sammanställning/

Soil stabilization, Pile, Lime, Cement, Embankment, Berm, Non-cohesive soil, Coal, Ash, Lightweight fill, Highway, Costs, Norrköping, Sweden, Swedish

*Pramborg, BO, Albertsson, B*

**Undersökning av kalk / cementpelare**

Nordiske geoteknikermöde, NGM-92, 11, Aalborg, maj 1992. Artikler, foredrag, generalrapporter og andre bidrag, vol. 1. s 149-156, 1992.

/Fält- och laboratorieundersökningar/

Soft clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Cement, Field test, Laboratory test, Shear strength, Settlement, Ärvinge, Stockholm, Conference, Aalborg, 1992, Swedish

*Pramborg,BO, Albertsson,B*

**Kalkcementpelare. Förstärker jord, begränsar sättningar**

Svenska byggbranschens utvecklingsfond, SBUF 93:37, 1993.

/Utförande och uppföljning av belastningsförsök på kalk-cementpelare installerade i ett område med glaciärrer vid Ärvinge, Kista norr om Stockholm//Provpelare; Provpåsar; Undersökning av provpelare; Belastning av provytan; Beräkningar; Valvverkan/  
Clay, Pile, Lime, Cement, Soil stabilization, Settlement, Load test, Design, Sweden, Swedish

*Rogbeck,Y, Tränk,R*

**Funktionsuppföljning av kalk- och kalk/cementpelare.**

**E4 delen Lövstad-Norrköping, Östergötlands län**

Statens geotekniska institut, SGI. Varia 426, 1995.

Soil stabilization, Pile, Lime, Cement, Settlement, Highway, Norrköping, Sweden, Swedish

*Vilkenas,A*

**Kalkpelare för lägre kostnad vid anläggande av VA-ledningar och gator i lös lera**

Byggnadskonst. 1983, vol 75, nr 7, s 13-16, 1983.

Soft clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Conduit, Case history, Sweden, Costs, Swedish  
Pile, Lime, Soil stabilization, Highway, Design, Control, Specification, Sweden, Swedish

\*\*\*\*\*

## 6.6 FÖRSTÄRKNING AV BYGGNADER

*Bredenberg,H, Broms,B*

**Lime columns as foundations for buildings**

International conference on advances in piling and ground treatment, London, March 1983. Proceedings. s 133-138, 1983.

Soft clay, Pile, Lime, Field test, Small building, Settlement, Case history, Sweden, Conference, London, 1983, English

*Broms,B, Bredenberg,H, Paus,K, Wikström,J*

**Grundläggning av småhus på kalkpelare.**

**Försöksomfattning, försöksutrustning, resultat och utvärdering**

Byggnadsrådet. Rapport; R52:1981, 1981.

Clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Small building, Mat foundation, Load test, Settlement, Research oriented, Swedish

*Holm,G, Bredenberg,H, Broms,B*

**Lime columns as foundation for light structures**

International conference on soil mechanics and foundation engineering, 10, Stockholm, June 1981. Proceedings, Vol. 3. s 687-694, 1981.

Small building, Soil stabilization, Pile, Lime, Settlement, Clay, Shear strength, Time factor, Cone penetrometer test, Equipment, Case history, Sweden, Conference, Stockholm, 1981, English

\*\*\*\*\*

## **6.7 FÖRSTÄRKNING AV SCHAKTER, SKÄRNINGAR OCH SLÄNTER**

*Andersson,M*

**Kalkpelarförstärkning i ny tappning - samverkan i skivor och bågar**

Byggindustrin, vol 62, nr 3, s 16-18, 1992.

/340 m rörgrav har grundförstärkts när Kållekärrs, Tjörns kommun, nya centrum byggs på 5 m gyttja och upp till 40 m lös lera/

Gyttja, Soft clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Conduit, Trench, Case history, Kållekärr, Sweden, Swedish

*Boman,P, Broms,B, Paus,K, Söderlind,G*

**Kalkpelarmetoden. Uppföljning i kv Myren, Huddinge**

Byggforskningen. Rapport; R138:1979, 1979.

Soil stabilization, Clay, Pile, Lime, Trench, Highway, Design, Construction, Deformation, Settlement, Bearing capacity, Ground water lowering, Control, Costs, Case history, Analysis, Sweden, Swedish

*Broms,B*

**Lime columns in theory and practice**

International conference of soil mechanics, Mexico, 1982. Commerative technical conference 1957-1982. s 149-165, 1982.

Pile, Lime, Soil stabilization, Bearing capacity, Settlement, Trench, Case history, Conference, Mexico, 1982, English

*Broms,B*

**Stabilization of slopes and deep excavations with lime and cement columns**

Soil improvement methods. International geotechnical seminar, 3, Singapore, Nov., 1985. Proceedings. s 127-135, 1985.

Pile, Lime, Soil stabilization, Soft clay, Slope, Excavation, Conference, Singapore, 1985, English

*Broms, B, Boman, P*

**Stabilization of deep cuts with lime columns**

European conference on soil mechanics and foundation engineering, 6, Vienna, Austria 1976. Proceedings, Vol. 1.1. 207-210, 1976.

Excavation, Cut, Slope, Stability, Retaining wall, Soil stabilization, Pile, Lime, Field test, Design, Shear strength, Active earth pressure, Research oriented, Conference, Vienna, 1976, English

*Ekström, A, Tränk, R*

**Kalkpelarmetoden. Tillämpningar för stabilisering av bröstöd och rörgrav**

Nordiska geoteknikermötet, Esbo, maj 1979. Föredrag och artiklar. s 258-268, 1979.

Clay, Soft clay, Reinforcement, Pile, Lime, Bridge, Pile foundation, Trench, Excavation, Slope, Stability, Control, Case history, Sweden, Conference, Esbo, 1979, Swedish

*Engström, P, Sjöquist, LE, Stål, T*

**Ödebyskredet**

NGM-84. Nordiska Geoteknikermötet, Linköping, Juni 1984. Vol. 1. s 67-76, 1984.

Landslide, Soil stabilization, Pile, Lime, Legal aspects, Case history, Vagnhärad, Sweden, Conference, Linköping, 1984, Swedish

*Hartlén, J, Stille, H (1993).*

**Stabilitetsproblem i anslutning till schakt.**

Grundläggningsdag 1993: Goda grunder-glada grannar, Stockholm 1993, 1993.

*Holm, G*

**Kalkpelarförstärkning för urgrävning och vägbank vid Stenungsund**

Nordiska geoteknikermötet, Esbo, maj 1979. Föredrag och artiklar. s 269-284, 1979.

Clay, Reinforcement, Lime, Pile, Embankment, Excavation, Settlement, Consolidation, Time factor, Laboratory test, Field test, Measurement, Control, Case history, Analysis, Sweden, Conference, Esbo, 1979, Swedish

*Redlund, M*

**Sveriges lägst belägna väg placerad i plastsäck. Laxöring får egen vägfil**

Byggindustrin, vol 64, nr 27, s 13-17, 1994.

/Tre meter under havsbotten i Ljungskileviken har en ny fyrfilig motorväg byggts. Det har krävt mycket nytänkande för att stänga ute havet och få vägen helt tät. Stora miljöhänsyn har också tagits, inte minst till de laxöringar, som varje år leker i de tre bäckar som mynnar ut i viken. Vägen ingår i Vägverkets satsning på en bra och trafiksäker E6a genom Bohuslän/

Highway, Pile, Lime, Cement, Sheet pile wall, Plastics, Case history, Ljungskile, Sweden, Swedish

*Redlund, M*

### **Branta lerslänter stabiliseras med kalkcementpelare**

Byggindustrin, vol 65nr 32, s 35, 1995.

/Förstärkning och djupstabilisering av dålig mark med kalk-cementpelare är en metod som på bara några få år ökat explosionsartat. Speciellt för infraprojekt är tekniken mycket använd. En nu pågående projekt är stabilisering av höga schaktslänter för Arlandabanan. Mäktiga lerlager blir stabila med osläckt kalk, cement och den befintliga leran/ Clay, Slope, Stability, Soil stabilization, Pile, Lime, Cement, Arlanda, Sweden, Swedish

*Sahlberg, O*

### **Kalkpelarmetoden. Uppföljning av en rörgravs stabilisering i Sollentunaholm.**

#### **Del I: Kalkpelarstabilisering av ledningsschakt i lös lera**

Statens råd för byggnadsforskning. Projekt; 780745-7, 1979.

Trench, Conduit, Clay, Soft clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Design, Costs, Case history, Sweden, Swedish

\*\*\*\*\*

## **6.8 FÖRSTÄRKNING AV BROAR (TYP SLUTNA RAMBROAR)**

*Bengtsson, PE, Carlsten, P, Tränk, R*

### **Bridge foundations on soft clay stabilised with lime columns**

European conference on soil mechanics and foundation engineering, 10, Florence, May 1991. Proceedings, vol. 1. s 303-306, 1991.

/Two case histories: Road E18, Enköping - Bålsta - Active design using lime column and EPS; Road 62, Karlstad - Munkfors - Bridge foundation on lime-stabilised clay/ Bridge, Soft clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Case history, Sweden, Conference, Florence, 1991, English

*Ekström, A, Tränk, R*

### **Kalkpelarmetoden. Tillämpningar för stabilisering av brostöd och rörgrav**

Nordiska geoteknikermötet, Esbo, maj 1979. Föredrag och artiklar. s 258-268, 1979.

Clay, Soft clay, Reinforcement, Pile, Lime, Bridge, Pile foundation, Trench, Excavation, Slope, Stability, Control, Case history, Sweden, Conference, Esbo, 1979, Swedish

\*\*\*\*\*

## **6.9 FÖRSTÄRKNING FÖR ATT REDUCERA VIBRATIONER**

*Beigler, SE*

### **Vibrationsdämpning med kalkpelare**

Byggnadsforskningsrådet, 1982.

Highway, Vibration, Damping, Cutoff wall, Pile, Lime, Case history, Sweden, Swedish

*Massarsch, R, Sanaee, F*

**Vibrationsisolering med hjälp av kalk-cementpelare**

Internrapport, Avdelningen för Jord- och bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan, 1993

*Melldahl, L-E*

**Åtta mil kalkpelare får Ullevi-aladåben att stelna**

Byggindustrin, nr 5, s 32, 1987.

Pile, Lime, Soil stabilization, Case history, Göteborg, Sweden, Swedish

*Rost, E*

**Taktfast rock kan rasera Ullevi - trots förstärkning för 20 miljoner**

Ny Teknik Teknisk Tidskrift, nr 19, s 4, 1987.

Soft clay, Soil stabilization, Pile, Lime, Case history, Göteborg, Ullevi, Swedish

*Tholén, O*

**Markförstärkning med pålar och kalkpelare - metoder att minska störande vibrations utbredning från vägtrafik**

Uppsala Universitet. Teknikum. UPTEC; 81 36 R, 1981.

Vibration, Protection, Highway, Vehicle, Pile, Lime, Swedish

\*\*\*\*\*

## 6.10 ÖVRIGA TILLÄMPNINGAR

*Bengtsson, PE, Holm, G*

**Kalkpelare som drän?**

NGM-84. Nordiska Geoteknikermötet, Linköping, Juni 1984. Vol. 1. s 391-398, 1984.

Clay, Embankment, Pile, Lime, Permeability, Settlement, Finite element method, Conference, Linköping, 1984, Swedish

*Hansbo, S*

**Design aspects of vertical drains and lime column installations**

Southeast Asian geotechnical conference, 9, Bangkok, Dec. 1987. Proceedings, Vol. 2. s 81-82, 1987.

Vertical drain, Pile, Lime, Design, Conference, Bangkok, 1987, English

*Sellgren, E*

**Konsten att tätta finsk/ryska läckor**

Bygg och Teknik. vol 83, nr 8, s 26-27, 1991.

/En ny intressant tillämpning att använda den sk kalkpelarmetoden är för att utföra tät-skärmar på djupet utan att behöva schakta eller slå spont. Tätskärmens uppgift kan t ex vara att minska läckage av rent eller förorenat vatten/

Cutoff wall, Pile, Lime, Cement, Bentonit, Use, Sweden, Swedish

## 6.11 SAMMANFATTNINGAR FRÅN FOU-RAPPORTER OCH EXAMENSARBETEN

Detta kapitel innehåller sammanfattningar hämtade direkt ur de FoU-rapporter och examensarbeten som markerats i föregående kapitel. Publikationerna är sorterade i bokstavsordning efter författarens/författarnas efternamn.

De publikationer som finns sammanfattade är:

- Almqvist, L, Erikmats, K.** Djupstabilisering med kalkcementpelare- En fält- och laboratoriestudie av inverkan av faktorer.
- Axelsson, A, Larsson, S.** Provningsmetoder på kalkcementpelare - Svealandsbanan.
- Axelsson, K.** Down hole-mätning i kalkcementpelare.
- Björkman, J Ryding, J.** Kalkcementpelares mekaniska egenskaper.
- Carlsten, P, Ouacha, M.** Funktionsuppföljning av kalkpelare. Hagaleden i Karlstad.
- Carlsten, P, Ekström, J.** Kalk- och kalkcementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll.
- Eriksson, M, Carlsten, P.** Tryckförsök på kemiskt stabiliserad jord.
- Green, M, Smigan, R.** Kalkcementpelare. Materialparametrar och datorsimulering av enskild pelares funktion.
- Göransson, M., Larsson, J.** Kalkpelares deformationsegenskaper - provbelastning i fält.
- Hansson, A.** Kalk- och cementstabiliserad lera - Laboratoriestudie av vattvotens inverkan på hållfasthets-utvecklingen.
- Holm, G, Tränk, R, Ekström, A.** Kalkpelare med gips som tillsatsmedel.
- Holm, G, Åhnberg, H.** Användning av kalk-flygaska vid djupstabilisering av jord.
- Jacklin, A, Larsson, U.** Vägbank på kalkcementpelarförstärkt lera. Utredning av kollaps.
- Kivelö, M.** Odränerade provbelastningar av kalkcementpelare i fält.
- Larsson, S, Olofsson, C.** Kalkpelarmetoden - en undersökning av kalkpelares bärighet i Hörningsnäsområdet.



- Massarsch, R, Sanaee, F.** Vibrationsisolering med hjälp av kalk-cementpelare
- Nygren, M, Welander, A.S.** Bestämning av egenskaperna hos kalk/cementpelare.
- Pettersson, J, Ulvehed, P.** Skjuvhållfasthet hos kalk/cementpelare.
- Rejment, S.** Kalkpelarmetoden. Belastningsförsök av kalkpelare i kv Myren, Huddinge kommun.
- Rogbeck, Y, Tränk, R.** Funktionsuppföljning av kalk- och kalk/cementpelare. E4 delen Lövstad-Norrköping, Östergötlands län.
- Ulfheden, D, Gillholm, G.** Samverkan mellan kalkcementpelare och lera - en parameterstudie.
- Åbjörn, S, Linnér, R.** Kalkcementpelares deformationsegenskaper - provbelastning i fält.
- Åhnberg, H, Holm, G.** Kalkpelarmetoden. Resultat av 10 års forskning och praktisk användning samt framtida utveckling.
- Åhnberg, H, Holm, G.** Om inverkan av härdningstemperaturen på skjuvhållfastheten hos kalk- och cementstabiliserad jord.
- Åhnberg, H, Johansson, S.E, Retelius, A, Ljungkrantz, C, Holmqvist, L, Holm, G.** Cement och kalk för djupstabilisering av jord. En kemisk - fysikalisk studie av stabiliseringseffekter.

*Almqvist, L, Erikmats, K*

## **Djupstabilisering med kalkcementpelare - En fält- och laboratoriestudie av inverkan av faktorer.**

Examensarbete X 1994:5, Chalmers Tekniska Högskola, 1994.

Djupstabilisering med kalk-cementpelare är en metod att förbättra lerjordars egenskaper på plats genom att osläckt kalk och cement blandas i leran. Det är emellertid delvis oklart vilka egenskaper hos jorden som avgör vilken hållfasthet en pelare kommer att erhålla vid inblandningen.

Avsikten i studien har varit att söka samband mellan skjuvhållfastheten vid enaxliga tryckförsök på laboratorieinblandade prover och olika egenskaper hos naturlig jord. Jordprover från tre lokaler, två i Mälardalen och en på västkusten, har använts.

Följande parametrar har studerats:

- Lerinnehåll
- Organisk halt
- Mineralogisk sammansättning
- Kemin hos porvattnet

Dessutom avsågs att kontrollera provpelare. Försök utfördes för att jämföra skjuvhållfastheten vid enaxliga tryckförsök på laboratorieinblandade prover med den hållfasthet som erhöles vid omvänd kalkpelarsondering i pelare i fält. Slutligen studerades hur väl kalkpelarmaskinens utmatningsdiagram representerar den verkligt utmatade mängden stabiliseringsmedel på olika nivåer. Detta gjordes genom att jämföra den mängd inblandningsmedel som kunde mätas i laboratorium på prover från olika nivåer i pelare med den mängd som angavs i ett utmatningsdiagram för samma nivåer.

### **Laboratorierutiner vid enaxliga tryckförsök på laboratorieinblandade prover**

Ett enhetligt packningsförfarande och en gemensam standard är av stor vikt vid genomförande av enaxliga tryckförsök. De laboratorierutiner som används idag ger ett för stort utrymme för variationer. Eventuella jämförelser av resultat från olika laboratorier bör göras med stor försiktighet.

## **Olika parametrars inverkan på skjuvhållfastheten vid enaxliga tryckförsök**

Andelen ler och silt i en lera påverkade skjuvhållfastheten hos kalk/cement-stabiliserad jord, på ett sådant sätt att en minskad lerhalt innebar en högre hållfasthet.

Det organiska innehållet påverkade skjuvhållfastheten. Skjuvhållfastheten föreföll vara högre vid en lägre organisk halt. Leran från västkusten uppnådde den högsta skjuvhållfastheten trots att den hade det högsta organiska innehållet jämfört med lerorna från Mälardalen.

Inget tydligt samband mellan mineralinnehåll och skjuvhållfasthet på laboratorieinblandade prover kunde urskiljas. Följande mineral ingick i den kvalitativa och kvantitativa undersökningen: kvarts, kalcit, plagioklas, kalifältpat, klorit, kaolinit, illit, blandskikt mineral, vermikulit och smektit.

Ett stort katjoninnehåll i lerans porvatten hade en positiv inverkan på skjuvhållfastheten. I studien kunde ett stort innehåll av natrium-, kalium- och kalciumjoner sammankopplas med hög skjuvhållfasthet.

### **Kontroll av provpelare**

Spridningen i skjuvhållfasthet var stor hos provpelarna. Detta kan framförallt hänföras till de stora variationerna i utmatning av stabiliseringsmedlen i olika pelare och på olika nivåer i pelarna. Jämförelser av skjuvhållfastheten i olika provpelare bör undvikas om skillnaderna i utmatat stabiliseringsmedel är stora. De flesta av de pelare som undersökts erhöll dock en högre skjuvhållfasthet än vad som kunde mätas vid enaxliga tryckförsök på laboratorieinblandade prover.

Jämförelsen mellan uppmätt mängd stabiliseringsmedel och den som angavs i utmatningsdiagrammet, tyder på att det inblandade stabiliseringsmedlet fördelats på avsedd nivå. Erhållna analysresultat tyder på att stabiliseringsmedlen fördelats ojämnt över tvärsnittet, på så sätt att koncentrationen av inblandningsmedlen är något mindre i centrum av pelaren.

## **Provningsmetoder på kalkcementpelare - Svealandsbanan**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och Bergmekanik.

Examensarbete 94/10, 1994.

Kemisk djupstabilisering av kohesionsjordar enligt kalkpelarmetoden har blivit en allt vanligare jordförstärkningsmetod inom järnvägsbyggandet. Under senare år har man mer och mer övergått från enbart kalk som stabiliseringsmedel, till kalk och cement, främst med förhållandet 50/50. Cementens inverkan ger en ökad förstärkningseffekt i siltiga leror och leror med höga vattenkvoter och organiskt innehåll, dvs kohesionsjordar som ofta får en dålig hållfasthetstillväxt med enbart kalk som stabiliseringsmedel. I Sverige används i regel relativt små inblandningsmängder, 20-35 kg/m, för pelare med diameter 600 mm. Detta motsvarar en kalkcementhalt på ca 6-8 % med avseende på lerans torra vikt.

Vid kontroll av kalk-cementpelares kontinuitet och hållfasthet utförs pelarsonderingar, som skall verifiera om de antaganden som gjorts vid projekteringen stämmer. Den konventionella kalkpelarsonden, som utvecklades i slutet av sjuttioalet och i början av åttiotalet, har idag fått konkurrens av den förinstallerade omvända kalkpelarsonden.

I examensarbetet har sonderingsmetoder i tre lokaler på Svealandsbanan studerats. De tre lokalerna är Ärja, Grundbro och Malmby och de ligger på sträckan Läggesta-Strängnäs. Examensarbetet har bl a omfattat studier av:

- Konventionell kalkpelarsondering
- Förinstallerad omvänd kalkpelarsondering
- Pelarvingssondering
- Okulär besiktning som en kompletterande metod vid pelarsondering

Vid dimensionering av erforderlig mängd stabiliseringsmedel i pelare, utförs normalt enaxliga tryckförsök på ett antal provkroppar tillverkade på laboratorie. Blandning utförs i jordprover tagna från aktuellt område. De enaxliga tryckförsöken utförs bl a för att få en approximativ skjuvhållfasthet hos de tillverkade provkropparna. Försöken ger en skjuvhållfasthet med antagandet att kalkcementinblandningen beter sig som ett kohesionsmaterial. Dvs en skjuvhållfasthet som är oberoende av konsolideringsspänningen. De pågående arbetena på Svealandsbanan ger oss möjlighet att ta prover från installerade kalk-cementpelare

och att studera hållfasthetsegenskaper hos dessa. De laboratorieförsök som utförts är följande:

- Skjuvboxförsök i skjuvapparat, typ Mullbert
- Direkta skjuvförsök, typ SGI
- Enaxliga tryckförsök i tryckpress, typ Geonor

Examensarbetet har bl a omfattat studier av:

- Kalk-cementpelares odränerade skjuvhållfasthetsegenskaper
- Residualskjuvhållfasthet
- Kalk-cementpelarens isotropa egenskaper,
- dvs provkroppsorienteringens betydelse
- Provkroppstorleken betydelse för den odränerade skjuvhållfastheten

I examensarbetet beskrivs olika arbetsmoment med tillhörande resultat och slutsatser. Nedan följer några av de viktigaste slutsatserna.

- Huvudsyftet med examensarbetet är att studera skillnader i utvärderade sonderingsresultat mellan förinstallerad omvänd kalkpelarsondering och konventionell kalkpelarsondering. 140 pelarsonderingar i 16 grupper indelade efter sonderingsmetod och ålder, studerades vid två lokaler, Grundbro och Malmby. Utvärderingen visar att den förinstallerade omvända kalkpelarsonderingen i regel ger mycket högre utvärderade sonderingsmotstånd, medel 1,7 ggr. Okulära besiktningar vid de två lokalerna visar att stabiliseringsmedel läckt ut mellan Kelleystång och sondvajer vid pelartillverkningen. Detta leder till att pelaren ej är representativ för övriga pelare i entreprenaden. Resultaten från denna utredning bör inte tolkas som ett förkastande av den förinstallerade omvända pelarsonderingen som sådan. Men den påvisar i dagsläget stora brister och den förinstallerade omvända kalkpelarsonderingen bör inte användas utan att det kontrolleras att pelaren är representativ för de övriga pelarna i entreprenaden. Metoden bör kompletteras med t ex konventionell kalkpelarsondering och/eller en okulär besiktning.
- Okulära besiktningar (i sonderade pelare) vid Malmby och Grundbro visar att kalkcement-inblandningen blivit mycket inhomogen. I princip hade alla studerade pelare en ansamling av stabiliseringsmedel i ytterkanten. Vidare observerades inga svaga centumpartier, utan de lösa, ofta helt ostabiliserade partierna, låg i zonen 100-200 mm från pelarcentrum. Orsaken till inhomogeniteterna kan sannolikt bero på flera faktorer. Lös till mycket lös sensitiv lera

i kombination med hög rotationshastighet hos inblandningsredskapet och högt tryck på utblåsningen av kalk och cement, kan vara en orsak.

- Okulär besiktning av kalk-cementpelare kan enligt våra erfarenheter utföras i en provgröp som grävs ned till ett djup där pelaren befinner sig i jordprofilens karakteristiska skikt. Pelartvärsnitt friläggs och homogenitet och hårdhet kan studeras med hjälp av en kniv och t ex en fickvingssond eller en fickpenetro- meter. De okulära intrycken bör dokumenteras under besiktningen genom en kort skriftlig beskrivning samt fotografering.
- Jämförelse mellan konventionell kalkpelarsondering och pelarvingssondering för kalk-cementpelare utfördes i 6 st pelare vid Ärja. Kvoten mellan de utvärderade skjuvhållfast-heterna enligt kalkpelarsondering och pelarvingsson- dering är beräknade för varje enmeters- nivå i pelarna. I de sex pelarna varierar kvoten i medeltal för varje pelare, från 0,7 till 1,4. Med tanke på den låga spridningen måste försöken anses som mycket lyckade. Fastän underla- get vid studien är mycket begränsat anser vi att pelarvingssonderingen kan användas som en kompletterande och kalibrerande metod. En förutsättning är dock att pelartvär-snitten är relativt homogena, vilket kan studeras genom en okulär besiktning.
- Skjuvboxförsök i skjuvapparat, typ Mullbert och direkta skjuvförsök i skjuvap- parat, typ SGI, på prover tagna från pelare i två lokaler, Ärja och Grundbro visar att den odränerade skjuvhållfastheten består av en kohesionsdel och en friktionsdel. Försöken är utförda i normalspänningsintervallet 50-160 kPa. Kohesionen varierar mellan 23 och 85 kPa och den inre friktionsvinkeln mellan 14 och 45 grader. Skjuvboxförsöken visar att residualsjuv-hållfasthe- ten beror av normalspänningen, där den inre skenbara friktionsvinkeln består av en friktionsdel och en råhet hos sprickan. Residualskjuvhållfastheten varierar från 60-96 % av skjuvhållfastheten, beroende av normalspänningen
- Studien av provkroppsorienteringens betydelse för den odränerade skjuvhåll- fastheten enligt skjuvförsök visar att provkroppar tagna liggande (horisontellt) ur pelarna, har en större inre friktionsvinkel än provkroppar tagna stående (vertikalt). De enaxliga tryckförsöken, där provkroppar togs stående respekti- ve diagonalt ur pelarna verifierar resultaten från skjuvförsöken. Orsaken till skillnaden vad gäller den inre friktionsvinkeln beror troligen på det vertikala överlagringstrycket, snarare än en horisontell kalkcementskiktning orsakad av inblandningsredskapet.

*Axelsson, A*

## **Down hole-mätning i kalkcementpelare**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och Bergmekanik.

Examensarbete 96/3, 1996.

Detta examensarbete syftar till att prova en dynamisk kvalitetskontrollmetod (down hole) för bestämning av hållfasthetstillväxten i kalk-cementpelare.

Idag används främst statistiska kontrollmetoder och framförallt kalkpelarsondering. Nackdelen med de statistiska kontrollmetoderna är att de är förstörande. Variationer i provresultaten vid kalkpelarsondering är också stor och blir därmed osäkra. Bristerna i dagens kontrollmetoder ledde till att Banverket ville testa nya metoder. Detta sammanföll med detta examensarbete som syftar till att dynamiskt mäta styvhetens tillväxt i kalk-cementpelare. Metoden går ut på att utföra down hole-mätningar med jämna mellanrum efter det att kalkcementpelarna installerats. Vid mätningarna bestäms skjuvvågshastigheten genom pelaren och ur denna kan sedan den initiella skjuvmodulen ( $G_0$ ) beräknas. Mätningarna är icke förstörande vilket medför att de kan göras kontinuerligt efter installationen och pelarens styvhetstillväxt följas.

I examensarbetet har down hole-mätningar utförts i ett provområde med kalk-cementpelare utmed Ostkustbanan. Provpelalområdet är beläget i Norraladalen, vilken ligger på sträckan Söderhamn - Enånger. Down hole-mätningar i två kalk-cementpelare utfördes vid sex tillfällen efter pelarinstallationen. Mätningar utfördes även i den omgivande leran.

Vid NGI i Oslo har triaxialförsök med benderelementtest även utförts på prov från lera och kalk-cementpelare. Bender element test påminner om down hole-mätning men utförs på laboratorium. Genom bender element test kan down hole-mätningarna utförda i fält vidimeras.

En del av examensarbetet har gått ut på att bestämma tillväxten av  $G_0$  med tiden i kalk-cementpelare. I examensarbetets andra del har uppgiften varit att bestämma omvandlingsfaktorn ( $R$ ), gällande för kalk-cementpelare, mellan  $G_0$  och skjuvmodulen vid 50 procent av broulasten ( $G_{50}$ ).  $G_0$  bestäms med down hole respektive benderelementtest och  $G_{50}$  med statisk tryckning på laboratorium.

Down hole-mätningen utförs genom att en våg alstras vid markytan med en

exiteringsutrustning bestående av en träplatta, fastskruvad i marken, samt en slägga. Släggan slås på plattans ena kortsida och alstrar på detta sätt en skjuv-våg som fortplantar sig ner genom pelaren. Vågens ankomsttid registreras av två lägesgivare, som strax efter installationen tryckts ner på olika djup i pelaren, och gångtiden kan avläsas. Skjuvvågshastigheten mellan lägesgivarna beräknas sedan lätt genom att sträckan mellan givarna är känd.

Avläsningen av mätresultaten har gjorts på två principiellt olika sätt, avläsning genom spegling av två kurvor med olika polaritet samt genom cross correlation.

Om man jämför A-kurvan registrerad av den första givaren och B-kurvan registrerad av den andra givaren kan man se att A-kurvan ibland föregås av en förvåg ("bulle"). En teori är att bullen uppkommer vid exiteringen, genom att personen som slår släggan mot plattan motverkar slaget med kroppen. Avläsningen med spegling gjordes därför både före och efter denna bulle. Eftersom både avläsning vid första ankomsttiden och genom spegling görs för hand är de mycket subjektiva. För att få en mera exakt avläsning användes cross correlation. Denna avläsning utförs med hjälp av ett kalkylprogrammet Excel.

I examensarbetet beskrivs mätningar, utvärdering och slutsatser. Nedan följer de viktigaste slutsatserna:

- Installeringen av givarna, som gjordes för hand, gick relativt smidigt.
- Down hole-mätningen gick smidigt och kan utföras av endast en person. Det behövs dock två personer för att bära utrustningen om mätningen utförs där det är svårt att komma nära med bil.
- Ett problem vid mätningen har varit att kurvornas utseende varierat mycket beroende på exiteringen. Exiteringsutrustningen måste efter detta konstaterande förbättras. En ny exiteringsutrustning anpassad speciellt för kalk-cementpelare har tagits fram. Slagen blir med den nya utrustningen identiska. Härigenom kan kvaliteten på kurvorna förbättras och osäkerheten vid avläsning minskas. Denna utrustning var dock inte klar vid mätningarna i Norrala.
- Avlästa gångtider, och därmed skjuvvågshastighet vid down hole-mätningar i lera, stämmer bra överens oavsett vilken avläsningsmetod som användes.
- Gångtiden, och därmed skjuvvågshastigheten genom kalkcementpelarna, varierade mycket, beroende på vilken avläsningsmetod som användes. Samtliga



avläsningsmetoder visar dock att skjuvvågshastigheten, och därmed  $G_0$ , ökar med tiden, vilket var ett väntat resultat.

- Utvärderingen av mätresultaten vid mätning i lera visar på en mycket lös lera. Detta stämmer bra överens med uppmätta värden på densiteten i leran.
- Lerans homogenitet och kalkcementpelarnas heterogenitet skulle kunna vara en tänkbar orsak till att mätresultat från leran visar liten spridning och mätresultaten från kalkcementpelarna visar stor spridning mellan de olika avläsningsmetoderna. Vidare forskning av kalkcementpelarnas materialegenskaper kan därför rekommenderas.
- Den avläsningsmetod som ger bäst överensstämming med benderelement-test-resultatet är avläsning med cross correlation.
- Omvandlingsfaktorn  $R$  i kalkcementpelarna mellan  $G_0$  och  $G_{50}$  får en stor variation. I kalk-cementpelare 1 beräknas  $R$  till mellan 0,3 och 2,4 och i kalk-cementpelare 2 till mellan 0,2 och 2,4.
- I lera beräknas omvandlingsfaktorn  $R$  till mellan 0,38 och 0,73.
- Det behövs flera mätningar och undersökningar för att down hole-metoden ska kunna användas som kontrollmetod av kalk-cementpelare i produktion.

*Björkman, J Ryding, J*

## **Kalkcementpelares mekaniska egenskaper**

Examensarbete 96/1, Avdelningen för Jord- och bergmekanik,  
Kungliga Tekniska Högskolan, 1996.

Idag har användningen av kalk-cementpelare (KC-pelare) blivit den dominerande metoden för att begränsa sättningar och öka stabiliteten i samband med markförstärkning. Så är även fallet för Ostkustbanan (OKB) genom Norrala.

Den vanligaste provningsmetoden för att bestämma KC-pelares skjuvhållfasthet är det enaxliga tryckförsöket, vilket dock ej beskriver verkligheten på ett tillfredsställande sätt. Mera riktigt är det att ta hänsyn till de olika spänningstillstånd som uppkommer längs den teoretiska glidytan, därför är användandet av skjuv- och treaxliga tryckförsök att föredra.

Vad som även måste beaktas är den icke fullständiga samverkan som råder mellan lera och kalkcementpelarna, dvs de har olika brottdeformationer.

Detta har utmynnat i ett examensarbete vid KTH på avdelningen för jord- och bergmekanik, för att bestämma kalk-cementpelares mekaniska egenskaper. För att möjliggöra detta har vi utfört en mängd olika laboratorieförsök:

- Enaxliga tryckförsök på lera och kalkcementprover
- Skjuvförsök på lera och kalkcementprover
- Odränerade treaxliga tryckförsök på lera och kalkcementprover
- Dränerade treaxliga tryckförsök på kalkcementprover

Utöver detta har en omfattande litteraturstudie genomförts vilken har resulterat i en sammanställning av tidigare genomförda försöksserier på KTH samt på SGI. I examensarbetet beskrivs olika arbetsmoment med resultat och slutsatser. Nedan följer några av de viktigaste slutsatserna.

- Okulärbesiktningen i Norrala, visade att de studerade pelarna var mycket homogena. Kärnorna i de bägge pelarna var av hårdare och sprödare karaktär. Detta beror troligtvis på felaktig rotationshastighet vid tillverkningen av pelarna. Pelare 2/638/14 hade ansamlingar av stabiliseringsmedel och en grövre diameter, på nivån -3 m, än vad det var tänkt.

- Skjuvboxförsök i skjuvapparat typ Mullbert visade att den odränerade skjuvhållfastheten beskrivs lämpligast med en kohesionsdel och en friktionsdel, enligt Mohr-Coulombs brottkriterium. Försöken är genomförda i normalspänningsintervallet 60-170 kPa. Kohesionen varierade mellan 120-190 kPa och friktionsvinkeln mellan 43-49. Residual-skjuvhållfastheten vid ca. fem gånger brottdeformationen var mellan 50-70 % av brotthållfastheten.
- De odränerade treaxliga tryckförsöken konsoliderades isotropt med spänningarna  $\sigma_3 = 60, 120$  och  $180$  kPa vilket kan antas representera 3 olika nivåer i marken. Skjuvhållfastheten är väldigt beroende av vilken typ av brottmod som erhålls vid försöket. Medelvärde av kohesionen var 215 kPa och friktionsvinkeln  $41^\circ$ . Residualskjuvhållfastheten, vid ca 5 gånger brottdeformation, var 80-90 % av toppvärdet. Hållfasthetsparametrarna, bestämda ur effektivspänningarna visade i stort sett samma resultat som de, bestämda ur totalspänningarna.
- Medelvärde av kohesionen vid de dränerade treaxliga tryckförsöken var 240 kPa och den friktionsvinkeln  $40^\circ$ , dvs kohesionen ökar och friktionsvinkeln minskar vid jämförelse med de odränerade treaxliga tryckförsöken. Residualskjuvhållfastheten är, som vid de odränerade försöken mellan 80-90 % av toppvärdet. I övrigt gäller samma förutsättningar, vad gäller konsolidering och celltryck mellan odränerade och dränerade försök.
- De enaxliga tryckförsöken på kalkcementpelarna gav en skjuvhållfasthet på ca 550 kPa, utvärderat som halva tryckhållfastheten, dvs friktionsvinkeln bortses vid utvärdering av det enaxliga tryckförsöket. Kohesionsdelen,  $c$ , utvärderad ur treaxliga tryckförsök motsvarar ca 40 % av skjuvhållfastheten bestämd enligt enaxliga tryckförsök.
- Den maximala skjuvhållfastheten mobiliseras vid olika deformationer i KC-pelare och den omgivande jorden, vid ca 1,5 % resp ca 3 % deformation. Vilket betyder att samverkan är begränsad.
- Kalkcementpelarna från Norrala är relativt styva, E-modulen vid halva brottvärdet utvärderat som sekantmodul är mellan 150-200 MPa, jämfört med rena kalkpelare som ofta har en E-modul på ca 5-15 MPa. Med detta i åtanke bör en fullständig dimensionering, med styva pelare, även beakta pelarnas böjstyvhet.
- Andra genomförda laboratorieundersökningar på KC-pelare visade också att den odränerade skjuvhållfastheten består av en kohesionsdel samt en friktionsdel.

*Carlsten,P, Ouacha,M*

## **Funktionsuppföljning av kalkpelare. Hagedalen i Karlstad**

Statens geotekniska institut. SGI Varia 407, 1993.

I projektet har sättningsuppföljningar i bygg och bruksskede jämförts med beräkningar som utförts i projekteringsskedet i syfte att utvärdera beräkningsmetodernas tillförlitlighet.

Projektet visar på några av fördelarna med kalkpelarförstärkning. Liksom all annan typ av förbelastning förutsätter kalkpelarförstärkning en noggrann uppföljning av aktuella laster och uppkommande sättningar. Uppföljningen ger svar på behovet av komplettering av överlasten och tidpunkten för avlastning.

Projektet visar även på några av de problem som kan uppstå vid kalkpelarförstärkning i tätort. Vid projekteringen antogs det att flera ledningar skulle grävas upp. Då detta ej gjordes innebar det att många pelare inte kunde installeras eller fick flyttas. Detta i sin tur fick till följd att en tryckbank fick läggas ut på norra sidan av banken för att klara stabiliteten. Detta visar att vid grundläggning i tätort måste, i bygghandlingen, särskild vikt läggas vid inmätning av ledningar och kartering av äldre fyllningar mm som kan tänkas störa kalkpelarinstallationen.

Uppföljningen innebär också att en direkt koppling sker mellan teori och praktik. I detta fall finns en bra överensstämmelse mellan de beräknade och de uppmätta deformationerna.

I det första förslaget till förstärkning av aktuell sträcka var bankpålning föreslaget som alternativ. Vid noggrannare kontroll genom fältundersökningar och beräkningar visade det sig att kalkpelare i det här fallet var klart billigare än bankpålning. Kostnaden för kalkpelare var endast ca en tredjedel av kostnaden för bankpålar.

Detta projekt utfördes 1987 och utvecklingen sedan dess har gått framåt, inte minst när det gäller utvecklingen av kalkpelarmaskinerna. De problem med installation i branta slänter och genomträngande av fast ytlager som fanns i detta projekt innebär med dagens maskiner inte längre något hinder.

*Carlsten, P, Ekström, J*

## **Kalk- och kalkcementpelare.**

### **Vägledning för projektering, utförande och kontroll**

Svenska Geotekniska Föreningen. SGF Rapport 4:95, 1995.

Denna handbok sammanfattar dagens kunskap inom projektering - utförande - kontroll. Handboken behandlar mjuka och halvhårda pelare (skjuvhållfasthet högst 150 kPa) som samverkar med omgivande jord. Höghållfasta pelare av typen rena cementpelare behandlas ej.

I handboken beskrivs kort tänkbara användningsområden för kalk- och kalkcementpelare med hänvisning till Vägverkets allmänna tekniska beskrivningar, Banverkets föreskrifter samt Boverkets konstruktionsregler.

Beräkningsförutsättningar för bruks- och brottsgränstillstånd anges och beräkningsmodeller beskrivs med tillhörande begränsningar. Särskilda krav ställs beträffande geotekniska undersökningar vid projektering av kalk- och kalkcementpelarförstärkningar. Sålunda skall klargöras att inga hinder finns för installation av pelare. Vidare skall jordens egenskaper efter inblandning av kalk eller kalk/cement givetvis kunna beskrivas. Förekomst av organisk jord och sulfidinnehåll i jorden påverkar i hög grad stabiliseringseffekten.

Rekommendationer ges för val av karaktäristiska materialvärden i pelare och omgivande jord. Beräkningsmetoder som visat sig tillförlitliga redovisas med idag kända begränsningar. Enligt nuvarande praxis beräknas kalk- och kalkcementpelarförstärkningar oftast enligt totalsäkerhetsfilosofi, dvs utan partialkoefficienter. Broar dimensioneras dock enligt partialkoefficient-filosofin. Beräkningsmodeller som presenteras i skriften förutsätter samverkan mellan pelare och ostabiliserad jord.

Lasten på en kalk- eller kalkcementpelarförstärkt yta uppbärs dels av pelarna, dels av den ostabiliserade leran mellan pelarna. Pelarnas kompressionsmodul är betydligt högre än den ostabiliserade lerans. Därigenom blir sättningarna väsentligt mindre för last på stabiliserad yta jämfört med ostabiliserad lera. Den beräkningsmodell för sättningar som redovisas har sitt ursprung i den modell för kalkpelare som presenterats av Broms (1984). Sättningarna inom den förstärkta jordvolymen påverkas av följande faktorer:

- förhållandet mellan pelarnas och den ostabiliserade lerans kompressionsmoduler
- pelarnas andel av den stabiliserade ytan
- lerans konsolideringsegenskaper
- pelarnas kryplast
- tidpunkten för lastens påförande i förhållande till pelarnas installation
- permeabilitet i ostabiliserad jord respektive i pelare

I handboken anges också rekommenderat förfarande vid inblandningsförsök på laboratorium. Med utgångspunkt från inblandningsförsök på laboratorium ges rekommendationer för val av stabiliseringsmedel i olika typjordar.

Lämplig utformning av bygghandling och förfrågningsunderlag anges liksom rekommendationer för kontroll och uppföljning.

Avslutningsvis finns i Appendix beräkningsexempel för dimensionering av kalk- och kalk-cementpelare.

**Tryckförsök på kemiskt stabiliserad jord**

Statens geotekniska institut. SGI Varia 435, 1995

Stabiliseringsresultat förbättras med tiden. Hållfasthetsutvecklingen varierar dock mellan olika stabiliseringsmedel, varför jämförelser mellan de olika provernas erhållna hållfasthet valts att göras efter ca 90 dygn.

I lera med låg eller rentav försumbar silthalt gav inblandning med kalk det bästa resultatet, men kalk visade sig ha en dålig effekt i organiska jordar och i jordar med stort siltinnehåll, i silt och vissa siltiga leror. Där gav stabilisering med cement ett bättre resultat. Kalk och cement i blandning visade sig sällan ge de bästa resultaten, utan ofta ge resultat som låg under de för enbart kalk eller cement, eller i nivå med det av dem som gav lägst resultat. Spridningen i stabiliseringseffekt var dock något lägre med kalk-cement än med enbart kalk eller cement.

De prover som stabiliserats med kalk-cement i proportioner 25/75 eller 75/25 gick inte att skilja från de med kalk-cement i proportioner 50/50, då faktorerna som påverkade resultatet var många och effekten påverkades mer av den ursprungliga jordens egenskaper än av förhållandet mellan stabiliseringsmedlets beståndsdelar. Vid inblandning av kalk och gips i proportioner 50/50, blev resultatet likvärdigt det vid inblandning av enbart kalk. De prover som stabiliserats med kalk/gips är dock få till antalet.

Då lagringstemperaturen påverkar hållfasthetstillväxten för de allra flesta jordar och stabiliseringsmedel är det av vikt att proverna förvaras i den temperatur som bäst efterliknar den jorden har i fält, dvs förhöjd temperatur för kalkinblandningar, 7-8 °C för cementinblandningar.

Vid inblandning av ett stabiliseringsmedel åtgår vatten för den kemiska reaktionen, varför vattenkvoten sjunker. Det måste finnas tillräckligt mycket vatten för att det tillsatta stabiliseringsmedlet skall lösas fullständigt under den kemiska reaktionen, men inte mer än nödvändigt, eftersom hållfastheten ökar med en lägre vattenkvot och det därmed är önskvärt att vattenkvoten genom reaktionen sjunker så mycket som möjligt. Det finns således ett vattenkvotsintervall vid vilken reaktionen med valt stabiliseringsmedel och inblandningsmängd har störst möjlighet att ge ett bra resultat.

Hållfastheten ökar med tiden. Om cement tillsätts är tillväxten snabb kort tid efter inblandningen, för att så småningom avta. I vissa fall är emellertid tillväxten märkbar i över 200 dygn. Då kalk tillsätts är förloppet närmast rätlinjigt efter det första dygnet och för lång tid framåt. Kalkstabiliserade prover med låga hållfasthetsvärden efter 14-45 dygn kan därför ofta tryckas efter bortåt 90 dygns lagringstid med bättre resultat än cementstabiliserade prover av samma ursprungsjord. För att få en så god uppfattning som möjligt om stabiliseringseffekten, bör man lagra prover för hållfasthetsbestämning i minst tre månader.

Skjuvhållfastheten hos de stabiliserade jordarna bestämdes ur enaxliga tryckförsök och definierades som halva tryckhållfastheten vid brott. Stabiliseringseffekten,  $\tau_{\text{eff}}$ , definierades sedan som erhållen skjuvhållfasthet i förhållande till ursprunglig skjuvhållfasthet. För drygt 40 % av de stabiliserade jordproverna blev stabiliseringseffekten liten, mindre än tio. För 46 % förbättrades skjuvhållfastheten med 10-40 gånger, och 52 prover gav ett mycket högt värde på  $\tau_{\text{eff}}$ , över 40. De senare var i de flesta fall prover på lera, lera med siltskikt och siltig lera, men även ett par prover på gyttjig eller sulfidhaltig lera. I 60 % av fallen hade proverna lagrats kortare tid än 100 dygn.

Av de 52 prover som gav de bästa resultaten, bestod 98 % ursprungligen av låg- eller medelsensitiva jordar. 98 % av proverna hade före inblandningen av stabiliseringsmedlet en naturlig vattenkvot av 40-80 % och samtliga hade en ursprunglig skjuvhållfasthet,  $\tau_{\text{fu}}$ , som låg under 20 kPa. Efter stabiliseringen ökades deras skjuvhållfasthet med mellan 40 och 90 gånger. 9 prover, eller 13 % gav ett  $\tau_{\text{eff}}$  på över 70.

I avsnitt 13 återfinns en tabell över de genomsnittliga värden på stabiliseringseffekt som respektive jordart kunde uppvisa efter 90 dygn.



*Green, M, Smigan, R*

## **Kalkcementpelare.**

### **Materialparametrar och datorsimulering av enskild pelares funktion**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och bergmekanik.

Examensarbete 95/1, 1995.

Examensarbetet omfattar en studie av kalk-cementpelarens materialparametrar och en numerisk simulering av en enskild pelare med datorprogrammet FLAC.

De utförda utvärderingarna av laboratorieresultat har baserats på egna försök och på insamlat material från tidigare utförda laborationer på KTH och SGI. De insamlade materialet var dels av typen direkta skjuvboxförsök och dels av typen treaxligt tryckförsök.

Försökstyperna som vi har utfört själva är direkta skjuvförsök av typ Mullbert samt treaxligt tryckförsök. Leran som vi använde till de egna försöken, inhämtade vi från ett pågående vägprojekt, Bärbyleden i Uppsala. Den använda leran hade en medelskjuvhållfasthet på 12 kPa. Till de egna laborationerna tillverkade vi provkroppar av den insamlade leran. provkroppar gjordes med fyra olika blandningsförhållanden; kalkcementförhållandena 50/50 respektive 80/20 samt koncentrationerna 29 kg/m och 21 kg/m. Syftet med skjuvförsöken i Mullbert var att få en uppfattning om hur stora skjuvdeformationer materialet tål och hur dessa påverkas av normalkraftens storlek. Med de treaxiala tryckförsöken undersöktes materialets brottspänning, kohesion och friktionsvinkel (odränerat).

I den numeriska utvärderingen med programmet FLAC har vi provat 2 olika materialmodeller samt olika kombinationer av laster. Simuleringen utfördes för en enskilt belastad pelare, totalt har 5 olika kombinationer med olika laster och materialförutsättningar utförts.

- Jämförelse mellan olika styvheter i pelaren, modell Mohr.
- Jämförelse mellan modell Mohr och modell softening
- Belastning på platta med radien 0,75 m, modell Mohr.
- Horisontalspänningar utmed pelarkanten.
- Jämförelse mellan styv och flexibel platta.

### **Sammanfattning av resultat:**

- Resultaten från de treaxiella tryckförsöken gav liknande värden på friktionsvinkeln både från våra egna försök och från de vi erhöll från SGI, värdet låg på ca 30-40.
- Försöken i Mullbert visade att ökad vertikalspänning ger mindre horisontal deformation vid brott. Samt att med ökad andel kalk erhålls större deformation och lägre skjuvhållfasthet.
- Kohesionen ökar med mellan 4-10 gånger ursprungsvärdet beroende på inblandningsförhållande.
- Brottskjuvinkeln varierar mellan 3-5 % beroende på inblandningsförhållande och normalspänning.
- Ingen större skillnad på spänningsavtagande nedåt pelaren vid FLAC-simulering, vid olika styvhet i pelaren.
- Små avvikelser i lastavtagandet med djupet vid jämförelse av modell Mohr och modell softening.

Rapporten behandlar kalk-cementpelares spännings/deformationsegenskaper. Den omfattar både provbelastning av pelare in-situ och laboratorieförsök på prover som är kalkcementblandade i laboratorium.

### **Fältförsök**

Kalkcementpelarna som studerats är installerade speciellt för detta projekt i anslutning till ombyggnad av Riksväg 164, delen Pinemossen-Loviseholm. Pelarna är installerade i mycket sensitiv, siltig lera och har diametern 0,6 m och längden 5,5 m.

Metoden för provbelastning är ny och innebär att en wire som löper i centrum längs pelaren är fäst i underkant pelare med hjälp av ett slags pelarankare. Med en hydraulkolv låst i wiren trycks sedan pelaren ihop varvid kraft och deformation mäts.

Pelarna belastades i laststeg om cirka 20 kN med mätning av pelarens deformation vid konstant last (krypning). Ur sambandet mellan sluttöjningen vid varje laststeg och aktuell spänning i pelaren, utvärderades sedan en modul, här kallad tryckmodul. Modulen utvärderades med två olika metoder. För båda metoderna uppvisar modulen vid låga spänningar stor inbördes skillnad mellan olika pelare.

Pelarna uppvisade stor spridning i fråga om var (upptill, nedtill) i pelaren deformationen uppstod. I de flesta fall var dock deformationen störst upptill.

Pelarna behöll en stor del (ca 90 %) av sin lastbärande förmåga efter det att maximal lastkapacitet uppnåtts.

För att vara säker på att pelarankaret vid försökets början låg an mot pelaren förbelastades pelarna med cirka 20 kN. För att undersöka vilken inverkan fördragningen hade på uppmätt tryckmodul utfördes triaxialförsök på pelarmaterialet. Dessa försök visade att töjningarna i pelarmaterialet vid spänningar, motsvarande de vid förspänningen, i huvudsak är plastiska. Detta faktum gjorde det nödvändigt att korrigera (minska) de i fält uppmätta modulerna. för spänningar lägre än de som rådde vid det första laststeget.

## Laboratorieförsök

Kolvprovtagning utfördes för att i laboratorium kunna undersöka lerans egenskaper. Leran visade sig vara siltig med mycket hög sensitivitet, den odränerade skjuvhållfastheten var cirka 20 kPa, vattenkvoten cirka 50 %, konflytgränsen cirka 30 % och skrymdensiteten cirka 1,7 ton/m<sup>3</sup>. Ur CRS-försök utvärderades lerans förkonsolideringstryck till mellan 39-65 kPa.

På leran som i laboratorium stabiliserades med kalk-cement (50 % kal och 50 % cement) i motsvarande mängd som användes vid installation av pelarna i fält, utfördes vid olika ålder 16 st enaxliga tryckförsök, 7 st CRS-försök samt 6 st triaxialförsök.

De enaxliga tryckförsöken visade att ökad hållfasthet gav minskade brottdeformationer. Brottdeformationerna varierade alltså men var cirka 2 %. Hållfasthetstillväxten från 15 till 25 dygn var cirka 20-30 %.

Tryckmodulen ur CRS-försök visade sig vara i princip konstant, alltså oberoende av spänningsnivån.

Triaxialförsöken utfördes i två serier med tre olika celltryck (140, 190 och 290 kPa). Försöken genomfördes som odränerade försök med konstant belastningshastighet och ett back-pressure på 90 kPa under konsolideringen. Det visade sig att 90 kPa under ett dygn var för lite för att proverna skulle bli vattentättade. Detta medförde att portrycket vid försökens start varierade.

För den ena av försöksserierna utvärderades friktionsvinkeln till 36° och kohe-sionsinterceptet till 72 kPa. Brottdeformationen ökade med ökande horisontal-spänning och var högre än vid enaxliga tryckförsök. I likhet med resultaten från fältförsöken var hållfastheten efter brott hög (74-100 %). Från triaxialförsöken utvärderades modulen som en tangentmodul ur  $\epsilon_p$ -kurvan. Jämfört med modulen från fältförsöken var modulen, utvärderad ur laboratorieförsöken, generellt högre vid en given spänning.

## Slutsatser

Metoden som använts vid fältförsöken i detta projekt bedöms ha stor potential. Dess förhållandevis enkla apparat gör att man på ett enkelt sätt kan undersöka hur pelare uppför sig vid belastning in-situ.

Då deformationsfördelningen längs pelaren vid fältförsöken inte är känd är det därmed svårt att veta vilken inverkan omgivande jord har. När man jämför fält- och laborieförsöken skall beaktas att laborieförsöken ger modulen för endast det inblandade materialet medan fältförsöken ger modulen för systemet pelare - omgivande jord.

På basis av utförda fält- och laborieförsök kan man säga att modulen för det material som här undersökts är spänningsberoende (avtagande) och i storleksordningen 20 MPa, för de spänningar pelare vanligen utsätts för i fält.

*Hansson, A.*

**Kalk- och cementstabiliserad lera - Laboratoriestudie av vattvotens inverkan på hållfasthets-utvecklingen.**

Examensarbete X 91: 2, Chalmers Tekniska Högskola, 1991.

Nedan visas resultat och slutsatser som erhöles vid laboratorieförsök på lera stabiliserad med lika delar kalk och cement.

- Lerans naturliga vattenkvot har stor betydelse för den stabiliserade lerans skjuvhållfasthet. Skjuvhållfasthetens ökning med tiden fortskrider i stort på samma sätt men till en lägre nivå för lera med hög vattenkvot vid stabiliseringen. Ökningen i skjuvhållfasthet sker snabbare vid stabilisering med kalk-cement än med enbart kalk.
- Ju högre hållfasthet provkropparna har desto mindre deformation erhålls vid brott.
- Byts en del av stabiliseringsmedlen ut mot sand fås en minskning av skjuvhållfastheten jämfört med om sand ej tillsätts, trots att ett grövre material i allmänhet ger högre skjuvhållfasthet efter stabilisering. Den tillsatta sanden påverkar inte den stabiliserade lerans permeabilitet i nämnvärd omfattning.
- En jämförelse mellan odränerade triaxialförsök och enaxliga tryckförsök visar att de enaxliga försöken ger ett lägsta värde på skjuvhållfastheten. Odränerade skjuvhållfastheten påverkas inte av vilka spänningar som provet konsoliderats under. Vid triaxialförsöket kan också den residualhållfasthet bestämmas som kan anses gälla in-situ vilket ej är möjligt vid enaxliga tryckförsöket.

*Holm, G, Tränk, R, Ekström, A*

**Kalkpelare med gips som tillsatsmedel**

Statens geotekniska institut. SGI Rapport 30, s 5-58, 1987.

Projektet utfördes för att klarlägga om bättre stabiliseringseffekt och kortare härdningstider kan erhållas genom gipstillsats till kalk vid stabilisering av mellan-svensk lös lera.

Undersökningarna omfattade laboratorieförsök och fältförsök vid tre olika försöksplatser under en treårsperiod. Dessutom studerades resultat från provningar med kalk-gipsinblandning i samband med kalkpelarförstärkningar i Huddinge centrum och Fittja. Vid en försöksplats i Vagnhärad utfördes stabilisering med tre olika blandningsförhållanden i laboratorium och två i fält. Dessutom utfördes parallellförsök med enbart kalk. Vid två andra försöksplatser, Stäket och Täby, utfördes stabilisering med endast ett blandningsförhållande (50/50). I pelarna i fält utfördes sondering med kalkpelarsond samt pressometerprovning. I laboratoriet utfördes bestämning av skjuvhållfasthet samt kompressionsegenskaper.

*Holm, G, Åhnberg, H*

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

Statens geotekniska institut. SGI Rapport 30, s 59-91, 1987.

I projektet studerades effekter av att använda flygaska blandat med kalk för djupstabilisering av olika jordar. För att bedöma möjligheten att utöka användningsområdet för djupstabilisering, utfördes inblandningsförsök inte bara i lera utan också i gyttjig lera och silt, dvs sådana jordar där effekten av kalkinblandning oftast var dålig.

På laboratorium utfördes inblandning av kalk och flygaska i olika blandningsförhållande i tre olika typer av jordar (lera, gyttjig lera och silt. I en av blandningarna med lera användes  $\text{CaCl}_2$  som extra tillsatsmedel. Proverna undersöktes vid olika tidpunkter fram till ett års ålder med avseende på geotekniska basparametrar, skjuvhållfasthet och kompressionsegenskaper. Jämförelser gjordes med resultat från ren kalkstabiliserad jord.

Tolv provpelare av kalk-flygaskastabiliserad lera och gyttjig lera tillverkades i fält. Två olika total mängd stabiliseringsmedel användes och blandningsförhållandet var 1:4. Pelarprovning utfördes genom sondering med kalkpelarsond vid tre tillfällen fram till 1 år efter installation.



*Jacklin, A, Larsson, U*

## **Vägbank på kalkcementpelarförstärkt lera. Utredning av kollaps**

Examensarbete 1994:3, Institutionen för geoteknik,  
Chalmers Tekniska Högskola, 1994.

Målsättningen med examensarbetet var att undersöka orsaken till att en 110 meter lång kalk/cementpelarförstärkt sträcka av väg 178 på Orust kollapsade i samband med uppbyggnad av en 5 hög vägbank med en 1m hög överlast.

Arbetet har omfattat sammanställning av uppgifter om lera, förstärkning och vägbank samt att utföra stabilitetsberäkningar under olika antaganden.

Vägbanken var dimensionerad och kalk/cementpelarförstärkt enligt dagens rekommendationer. Kalk/cementpelarna, med en diameter på 0,5 eller 0,6 m, installerades med centrumavstånd som varierade mellan 1,0 och 1,8 m ned till fast botten eller 15 m djup.

Upplastningen av vägbanken skulle utföras i fyra skikt och med ett 0,5 m tjock lager av krossmaterial i botten, som påfördes direkt efter kalk/cementpelarinstallationen. När sista lagret och överlasten av sprängsten byggdes upp sjönk vägbanken som mest 1,0 m. Kollapsen omfattade ca 110 m av den totalt 190 m långa förstärkningen.

Efter brottet utfördes kompletterande undersökningar av pelare och lera, vilka tillsammans med de befintliga undersökningarna från projektering och byggande, ligger till grund för detta examensarbete.

Stabilitetsprogrammen STABRG och PCSLOPE har använts i beräkningarna. Vägbankens stabilitet har kontrollerats dels för helt ostabiliserad lera, dels för stabiliserad lera, då full samverkan mellan kalk/cementpelarna och leran förutsätts. I beräkningarna har skjuvhållfastheten hos leran antagits vara låg i förhållande till de utförda vingborrförsöken. Detta har antagits för att de absolut lägsta tänkbara säkerheterna mot brott skall erhållas. Resultaten redovisas i Tabell 1. Pelarnas skjuvhållfasthet har uppskattats genom pelarsonderingar i provpelare, pelarsonderingar efter installation och enaxliga tryckförsök på kärnborrade och laboratorieblandade prover. De enaxliga tryckförsöken gav skjuvhållfastheter som ligger långt över de som använts vid dimensioneringen.

**Tabell 1. Erhållna lägsta säkerhetsfaktorer då brottet antas utgöras av ett skred där glidyten når till ca 10 m djup. Lerans skjuvhållfasthet har satts till mycket låga värden.**

Bankhöjd (m)	c/c-avst. (m)	Pelardiam. (m)	Pelarnas skjuvhållf.	Säkerhetsfaktor F	Kommentarer
4.0	-	-	-	1.0	Ostabiliserad bank
6.0	1.0	0.6	Enligt urspr. dim.	1.5	Stab. lera ner till botten eller 15 m
5.2	1.4	0.6	Enligt urspr. dim.	1.3	Stab. lera ner till botten eller 15 m
6.0	1.0	0.6	Enligt trad. kc-sond.	1.0	Pelarna antas vara 8 m
5.2	1.4	0.6	Enligt trad. kc-sond.	1.0	Pelarna antas vara 8 m
5.2	1.4	0.6	Enligt enaxl. tryckförsök	1.7	Pelarna antas vara 8 m

För att vägbanken skulle vara stabil krävdes enligt beräkningarna att pelarnas skjuvhållfasthet var minst 60-85 kPa om de antas vara 8 m långa. De verkliga hållfastheterna var avsevärt högre. Enligt de enaxliga tryckförsöken på kärnborrade prover var pelarnas skjuvhållfasthet 400-1200 kPa. Vid dimensioneringen antogs pelarnas skjuvhållfasthet vara 150 kPa de översta fyra metrarna, för att sedan minska linjärt till 60 kPa på tolv meters djup.

Eftersom pelarnas verkliga hållfasthet är långt över lerans är det tänkbart att det inte råder full samverkan mellan pelare och lera, utan att pelarna upptar stora delar av lasten. Därför har även pelarnas mantelbärighet, lastkapacitet och det jordtryck vägbanken ger upphov till undersökts. På mitten av den sträcka vägbanken gick till brott är kalk/cementpelarna avslutade i lera och skulle därför kunna fungera som mantelbärande pålar. Även på vissa ställen där pelarna går ner till fast botten, men friktionslagret mot berget saknas eller är mycket tunt, kan pelarna fungera som mantelbärande pålar. I övriga fall kan man tänka sig att pelarna fungerar som spetsbärande pålar. Tabell 2 visar erhållna säkerheter vid dessa beräkningar.

Om vidhäftningen inom ett område antas till 1,0 visar beräkningarna att banken går till brott i ena ändan av det verkliga brottets utbredningsområde. 20 m längre in mot brottområdets centrum i längsled fungerar endast ett fåtal pelare som

**Tabell 2. Säkerheten då pelarna antas fungera som pålar. Pelarna antas bära hela den yttre lasten där inget annat anges.**

Bankhöjd (m)	c/c-avst. (m)	Pelardiam. (m)	Säkerhetsfaktor F	Kommentarer
6.0	1.0	0.6	2.7	Pelarna antas fungera som mantelbärande pålar. $\alpha = 0.7$ . Lerans skjuvhållfasthet lågt vald.
4.9	1.4	0.6	1.6	Pelarna antas fungera som mantelbärande pålar. I ena ändan av brottet. $\alpha = 0.7$ .
6.0	1.0	0.6	2.1	Pelarnas lastkapacitet har undersökts. Säkerhetsfaktorn är beräknad på 1-2 m djup.
6.0	1.0	0.6	2.2	Säkerhetsfaktorn för pelarnas lastkapacitet är beräknad på 1-2 m djup, då hänsyn tas till att lera bär 4,5 % av lasten.

spetsbärande eftersom friktionslagret närmast berget är mycket tunt. Både pelarlängd och pelarkvalitet måste därför vara tillräcklig i detta område. Det betyder att brottet kan ha utlösts här och sedan spridit sig bort till andra ändan, där pelarna till övervägande del antas fungera som spetsbärande pålar.

Beräkningarna visade att pelarnas mantelbärighet och lastkapacitet delvis var lägre än vad som normalt accepteras vid pålgrundläggning, men de var ej så låga att de kan förklara varför banken gick till brott. Inte heller beräkningarna med de jordtryck som vägbanken gav upphov till resulterade i någon förklaring till varför brottet uppstod.

En sidotipp av överskottsmassor, delvis bestående av stora block, kan ensam eller i kombination med en urgrävning i slutet av förstärkningen ha initierat brottet. Brottet bromsades upp där bankhöjden blev lägre och bankens släntlutningar blev flackare. I mitten av sträckan, där banken var som högst och pelarna hade minst centrumavstånd, visar beräkningarna att säkerheten var som störst. Här kan brottet bero på att pelarna utsattes för sidorörelser, som knäckte pelarna och att belastningen på dem plötsligt blev mycket större, då banken vid sidoupplaget hade gått till brott. Lös lera som trängde upp under pelarinstallationen och lade sig över torrskorpelera kan ha medverkat till brottet.

*Kivelö, M*

### **Odränerade provbelastningar av kalkcementpelare i fält**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och bergmekanik.

TRITA-AMI Report 3002, 1994.

Denna rapport behandlar provbelastningar av enskilda kalk-cementpelare samt av två pelare i grupp. Provbelastningarna genomfördes genom stegvis pålastning där varje belastningsförsök varade i genomsnitt i fem timmar. Avsikten med försöken har varit att studera samverkan mellan kalk-cementpelare och lera, framför allt lastöverföringen från en enskild pelare till omgivande lera. Dessutom har syftet varit att studera pelares hållfasthets- och deformationsegenskaper i fält.

Försöken omfattade fyra olika belastningsfall. Förutom två belastningsförsök av den ostabiliserade leran har fyra enskilda kalk-cementpelare provbelastats med en lastfördelningsplatta som endast täcker pelaren. För att dels erhålla en bild av lastfördelningen mellan pelare och omgivande jord, dels för att studera inverkan av totaltrycket mot pelaren har fyra provbelastningar gjorts med en förstorad belastningsplatta som även belastade jorden omkring pelaren. Till sist har två pelargrupper med samtidig provbelastning av två pelare studerats.

De totalt 12 kalk-cementpelare som undersökts ingår som jordförstärkning i ett planerat bostadsområde bestående av småfamiljshus i Tölö, Kungsbacka kommun. Jordlagerföljden inom försöksområdet består överst av mulljord och siltig lera med inslag av sand. På nivån under finns lös plastisk lera som sträcker sig mellan 1 m ned till 6-7 m vid provyta 2. Under leran finns fast morän.

Kalkcementpelarna var installerade ungefär ett halvt år före försöken. Pelarna tillverkades med 25 kg tillsatsmängd per längdmeter. Blandningsförhållandet kalk/cement var 50/50 respektive 30/70. Pelarnas längd varierade mellan 5,2-10,0 meter och diametern mellan 480-530 mm. Förstärkningen utfördes som svävande pelare i det lösa lerlagret men somliga pelare nådde till den fasta moränen under lerlagret.

Belastningsanordningen bestod av en hydraulisk domkraft med 150 mm slaglängd, utom vid belastning av pelargrupp, då 2 domkrafter med 50 mm slaglängd användes. Den påförda lasten avlästes via en tryckgivare som var kopplad till en dator.

Utrustningen för deformationsmätningarna i pelaren bestod av smala mätstänger vilka placerades i förborrade hål i kalk-cementpelaren. Spetsarna på stängerna skruvades fast i bitar av kamstål vilka i sin tur gjöts fast på bestämda nivåer i pelaren. Rörelserna i stängerna mättes med lägesgivare vars mätsignaler överfördes till en mätdator. Vertikalspänningar registrerades med jordtrycksceller av typ Glötzl.

Resultaten från belastningsförsöken kan sammanfattas enligt nedan:

- Pelarnas brottspänning ligger mellan 410-620 kPa (8-13 ton/pelare) vid en sättning på pelartopparna av ca 10-20 mm.
- Pelarens axiella kompression vid brott är liten under rådande försöksförhållanden, ungefär 10 mm för pelarens översta meter.
- Vid belastning av en enskild pelare observerades en tydlig utvidgning av pelaren inom djupintervallet 0,7-1,2 m, vilket tyder på tryckbrott.
- Kalkcementpelarnas deformationsmodul vid halva brottlasten har ett medelvärde av ca 120-150 MPa. Deformationsmodulen, uttryckt som en sekantmodul, uppvisar ett töjningsberoende.
- Kvoten mellan pelarens och lerans deformationsmodul avtar med ökad töjning, dvs pelarens styvhet minskar starkare än den odränerade lerans styvhet.
- Det finns ej några generella skillnader mellan pelare med blandningsförhållandet kalk/cement 50/50 eller 30/70 med avseende på deras hållfasthet, modul och brottdeformation.
- Belastning av en enskild pelare resulterar i en huvudsaklig lastöverföring från pelare till lera inom ett djupintervall motsvarande ungefär 2-4 pelardiametrar.
- På 5,0 m djup registrerades i pelaren endast mycket små rörelser. Större rörelser på detta djup uppmättes först vid pelarens brottspänning.
- Det finns ej några skillnader i lastöverföringen från pelare till lera mellan pelare med olika blandningsförhållanden kalk och cement eller mellan pelare som slutar i leran och de som slutar i den fasta moränen.

- Vid pålastning av en enskild pelare och omgivande lera registrerades 10-15 gånger större vertikalspänningar på pelartoppen än i lera på samma nivå intill pelaren.
- Vid belastning av pelargruppen registrerades för båda pelarna ungefär lika stora sättningar, vid ökad last erhöles dock sättningsskillnader mellan pelarna.

Larsson, S, Olofsson, C

## **Kalkpelarmetoden -**

### **en undersökning av kalkpelares bärighet i Hörningsnäsområdet.**

Examensarbete, Jord- och Bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan., 1976.

Denna rapport baserar sig på undersökningar av kalkpelare. Avsikten har varit att:

- bestämma den statistiska fördelningen av hållfasthet hos kalkpelare vid skruvplatteundersökningar
- bestämma olika belastningsintervalls inverkan vid skruvplatteförsök
- bestämma den verkliga hållfastheten hos kalkpelarna genom fält- och laboratorieförsök
- bestämma kalibreringsfaktorn för skruvplatta

Olika metoder att bestämma dessa parametrar i fält har utnyttjats. Undersökningarna har utförts i ett provområde beläget ca 25 km söder om Stockholm, där lerlagrets mäktighet varierade mellan 6-12 m. De undersökta pelarna, ett halvt år gamla, hade längder på mellan 6-10 m.

För att komplettera dessa undersökningar utfördes laboratorieförsök.

### **Fältundersökningar**

Ett stort antal skruvplatteförsök har utförts. Ur dessa försök har belastningsintervallets inverkan och kalkpelarnas statistiska hållfasthetsfördelning bestämts. För att bestämma kalkpelarnas hållfasthet har belastnings- vingar- och fickpenetrometerförsök utförts.

### **Laboratorieundersökningar**

De vid fältundersökningarna framtagna provkropparna har undersökts på laboratoriet. Följande försök har utförts:

- triaxialförsök
- ödometerförsök
- skjuvförsök

## Resultat och slutsatser

Vid undersökningar av kalkpelare med skruvplatta har följande framkommit:

- belastningsintervallets längd påverkar krypgränsen så att den minskar med ökad belastningslängd
- kalkpelare undersökta med skruvplatta är normalfördelade med normalfördelningen  $N\left[m; \frac{0.18m}{\sqrt{n}}\right]$  vid sk korttidsförsök
- sambandet mellan pelarnas kryphållfasthet vid belastningsförsök och övriga undersökningsmetoder redovisas nedan:

$\sigma_{\text{kryp}}^{\text{fullskale}} / \sigma_{\text{kryp}}^{\text{ödometer}}$	Utv. met. I 2,92 Utv. met II 2,98
$\sigma_{\text{kryp}}^{\text{fullskale}} / \tau_{\text{fu}}^{\text{direkta skjuvförsök}}$	1,80
$\sigma_{\text{kryp}}^{\text{fullskale}} / \tau_{\text{fu}}^{\text{triax}}$	1,39
$\sigma_{\text{kryp}}^{\text{fullskale}} / \tau_{\text{fu}}^{\text{vingborr}}$	3,47
$\sigma_{\text{kryp}}^{\text{fullskale}} / \sigma_{\text{skruvpl.}}$	0,76
	1,30



*Massarsch, R, Sanaee, F*

### **Vibrationsisolering med hjälp av kalk-cementpelare**

Internrapport, Avdelingen för Jord- och bergmekanik,  
Kungliga Tekniska Högskolan, 1993

På uppdrag av Banverket har en kalkcementpelarvägg för vibrationsisolering installerats mellan stambanan och fastigheten Polisen 1 söder om Stuvsta station. Isoleringsskärmen består av en 3,75 m bred skärm med 2,25 m långa celler. Andelen inblandningsmedel var 12,5 kg cement och 12,5 kg kalk per längdmeter pelare. Pelarna installerades genom den lösa leran mellan järnvägsbanken och fastigheten till fast botten.

Vibrationsmätningar (av den vertikala och den radiala vibrationshastigheten) utfördes vid två mättillfällen, innan installation av isoleringsskärmen samt 10 dagar därefter. Isoleringseffekten bestämdes i en mätsektion vinkelrätt mot järnvägsspåret. För att kunna jämföra resultaten vid olika mättillfällen och för olika tågtyper anordnades två referenspunkter, som var belägna utanför isoleringsområdet.

Mätningarna visar att vibrationerna minskade i fastighetens bottenplatta med i genomsnitt ca 45 %. Isoleringseffekten tycks vara större för den horisontala svängningskomponenten.

Eftersom mätningarna utfördes relativt kort tid (10 dagar) efter installation av isoleringsskärmen vore det önskvärt att mäta vid ett tillfälle då kalkcementpelarskärmen har uppnått full hållfasthet.

*Nygren, M, Welander, AS*

### **Bestämning av egenskaperna hos kalk / cementpelare**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och Bergmekanik.

Examensarbete. Rapport 91/5, 1991.

Vi har i detta examensarbete studerat olika undersökningsmetoder för bestämning av kalk-cementpelares egenskaper. Denna typ av kalkpelare har hittills varit relativt ovanlig i Sverige och det saknas därför erfarenhet om hur dessa ska dimensioneras. Undersökningarna har utförts på kalk-cementpelare med två olika diametrar, 0,5 resp. 1,0 m. Pelarna installerades inom en 15x15 m stor provyta, på Ärvingefältet i Kista norr om Stockholm. Provytan bestod av lös lera ned till 13 m djup. De metoder som studerats är vingsondering, pressometer, presso-permeameter, kalkpelarsondering samt laboratorieförsök.

Resultaten visar dels att den ursprungliga lerans skjuvhållfasthet har ökat markant efter kalkcementinblandningen, till upp emot 400-500 kPa för 1,0 m - pelarna och dels att pelarna har en svaghetszon i centrum.

I examensarbetet har även ingått att göra en jämförelse mellan resultaten för de olika pelardimensionerna. I denna jämförelse visade det sig att 1,0 m - pelarna fick ungefär dubbelt så stor hållfasthet som 0,5 m - pelarna.

Vi har kommit fram till att kalkpelarsondering är den för närvarande mest tillförlitliga metod för bestämning av kalkcementpelarnas skjuvhållfasthet och att vingsondering inte ger rättvisande resultat vid bestämning av denna. För att kunna dra slutsatser från enbart pressometer- och presso-permeametermätningarna hade fler mätningar behövt utföras.

*Pettersson, J, Ulvehed, P*

### **Skjuvhållfasthet hos kalk/cementpelare**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och Bergmekanik.

Examensarbete. Rapport 92/9, 1992.

Syftet med examensarbetet har varit att undersöka hur skjuvhållfasthetstillväxten varierar när man använder olika tillsatsmängder och olika andelar av kalk och cement.

Undersökningar har utförts på en gyttjig lera med en vattenkvot på 135 %. Skjuvhållfastheten har bestämts med enaxliga tryckförsök och med direkta skjuvförsök. I fält har skjuvhållfastheten utvärderats med kalkpelarsondering och enaxliga tryckförsök på kärnborrprover. Vi har jämfört laborationsresultaten med resultaten erhållna ur fältprovningarna. En utvärdering av de använda metoderna har också utförts.

Resultaten visar att med ökad inblandningsmängd och med ökad andel cement så ökar skjuvhållfastheten. Samtliga resultat har visat en med tiden ökande skjuvhållfasthet. Ur de direkta skjuvförsöken har vi erhållit en friktionsvinkel för samtliga testade inblandningar. Vi har för inblandningen 100 % cement och med en inblandningsmängd på 100 kg/m uppnått en tryckhållfasthet på 3500 kPa ur de enaxliga tryckförsöken. Proverna i fält har dock ej uppnått lika höga tryckhållfasthetsvärden, vilket vi anser beror på ett otillräckligt inblandningsarbete.

Vi har kommit fram till att de enaxliga tryckförsöken ger något för höga skjuvhållfasthetsvärden på grund av att metoden inte tar hänsyn till den inre friktion som vi har konstaterat finns genom de direkta skjuvförsöken. En kombination av de olika metoderna kan därför vara lämplig för att erhålla ett mer rättvisande värde.

*Rejment, S*

**Kalkpelarmetoden. Belastningsförsök av kalkpelare i kv Myren, Huddinge kommun**

Kungliga Tekniska Högskolan. Jord- och Bergmekanik. Examensarbete, 1978.

Totalt utfördes ett tjugotal försök på kalkpelare.

Tryckprov på frischaktade pelarelement gav en brotthållfasthet som var ca 100 kPa. Spridningen av försöken var relativt stor, eventuellt delvis beroende på störning vid framschaktning av pelarna. Skjuvhållfastheten var ca 50 kPa vilket motsvarar den ca femfaldiga hållfasthetsökningen som uppmätts vid trycksonderingsförsöken.

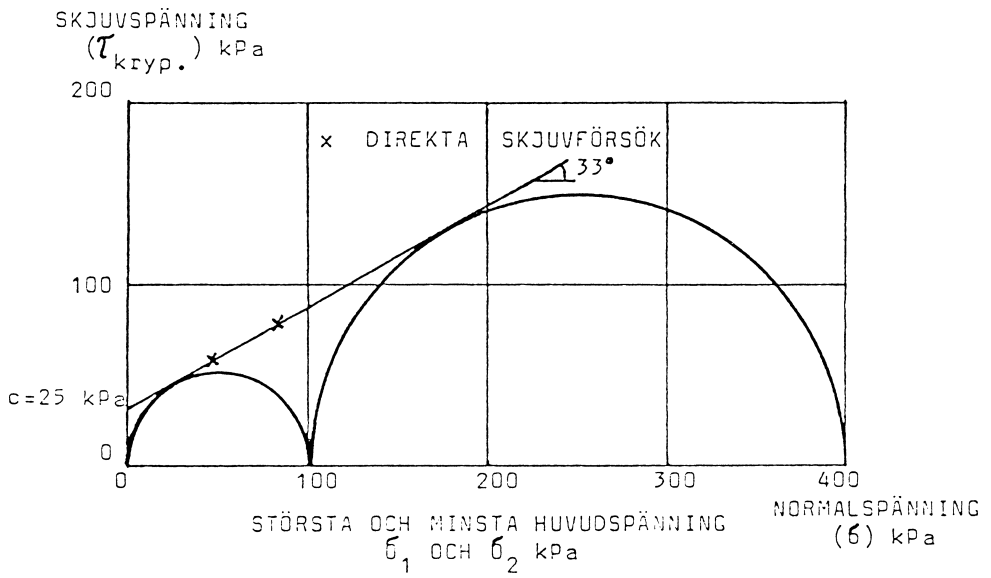
Pelarnas bärförmåga i jord på 1,3 m djup var ca 72 kN vilket motsvarar en belastning av 400 kPa. De uppmätta brottlasterna har definierats som den belastning vid vilken deformationen var 25 mm eller 5 % av plattbredden. Spridningen av försöken var bara 6 %.

Två direkta skjuvförsök in-situ vilka utfördes på framschaktade pelare ca 1,5 m under markyta ger enligt Mohr-diagram en inre friktionsvinkel  $\phi = 33^\circ$  och kohesion  $c = 25$  kPa. Dessa mätningar styrker de resultat som tidigare erhållits vid treaxliga och direkta skjuvförsök med prover som tillverkats på laboratorium.

I Figur 18 visas brottvärdena i ett Mohr-diagram liksom motsvarande spännings-cirklar.

Belastningsförsöken på pelare i en pelarvägg fick utföras med en mindre platta ( $\varnothing 22,8$  cm) eftersom den provbelastade pelaren var omgiven av andra pelare. Brottbelastningen var 2,6 MPa, vilket motsvarar en brottlast av 475 kN. Brottvärdet påverkades av antalet angränsande pelare. Pelarmaterialets elasticitetsmodul kunde beräknas och var ca 24 000 kPa.

Vid belastningsförsöken på pelare som hade frilagts i botten av det 3,3 m djupa schaktet var bärigheten ca 50 kN, varvid deformationen var 25 mm.



**Figur 18. Mohrs spänningsdiagram för kalkpelare på 1,3 m djup i kvarteret Myran vid 6 månaders ålder.**

*Rogbeck, Y, Tränk, R*

**Funktionsuppföljning av kalk- och kalk/cementpelare.**

**E4 delen Lövstad-Norrköping, Östergötlands län**

Statens geotekniska institut. SGI Varia 426, 1995.

I projektet har utförts uppföljning av en kalk- och kalk-cementpelarförstärkt sträcka av väg E4, Lövstad - Norrköping.

Vertikala och horisontella deformationer har mätts dels i kalk-cementpelarförstärkt område dels i intilliggande kalkpelarförstärkta områden. Pelarna var installerade c/c 1,2 m med varannan pelare ned till 15 m djup och varannan till 8 m djup. Egenskaper hos pelarna har analyserats baserat på jämförelser mellan beräknad och uppmätt sättning.

Resultaten från uppföljningarna ger positiva besked att kalkcement ger en starkare pelare än om bara kalk används. Parameterstudien visar stora skillnader mellan beräknade och uppmätta sättningar både för kalk- och KC-pelare. Detta kan bl a förklaras av med att kompressionsmodulen i pelarna troligtvis kan vara betydligt högre än den modul som erhålls från beräkningar med utgångspunkt från den skjuvhållfasthet som kalkpelarsonderingarna visar. Sonderingarna är utförda efter på pelarna sex veckor efter installation och innan lasten är påförd. Hållfasthetstillväxten ökar med tiden och troligtvis även med belastningen. Sonderingsmotståndet i KC-pelarna är högre än i kalkpelarna vilket också stämmer överens med att uppmätta sättningar här blir mindre.

En orsak till skillnaderna i horisontella deformationer kan bero på att KC-pelarna är styvare och därför snabbare tar upp den pålagda lasten än kalkpelare. Underlaget är dock för litet för att kunna dra några generella slutsatser.

**Samverkan mellan kalkcementpelare och lera - en parameterstudie.**  
Examensarbete X 1995:2, Chalmers Tekniska Högskola, 1995.

Rapporten består av två delar där vi i den första, med hjälp av ett FEM program, studerar mekanismer för hur spänningars överföring sker i en kalkcementpelarförstärkt lera. Speciellt intresserar vi oss för hur en varierad råhet mellan pelare och lera inverkar på sättningar och spänningsfördelning mellan lera och pelare. Vi har även analyserat konsolideringens förlopp som funktion av permeabiliteten.

I den andra delen studerar vi hur permeabiliteten i en laboratorieinblandad kalk-cementpelare varierar med blandningsförhållanden, tryck samt hårtid. Vi utför även permeabilitetstest för ett prov av en fältpelare och för prov av ostörd lera för att kunna jämföra med resultaten i testserien med laboratorieinblandade prover.

## **FEM SIMULERINGAR**

### **Beskrivning:**

Med hjälp av FEM programmet PLAXIS har tre simuleringsserier utförts. Alla tre simuleringarna utgår från en jordmodell som skall motsvara en 10 m hög kalk-cementpelare med radien 0,3 m i ett 20 m mäktigt lerlager med radien 0,62 m. I den första simuleringen är kalk-cementpelaren homogen emedan den i simulering två har försetts med en svaghetszon med en tjocklek på 0,6 m i mitten. Jordmodellen i simulering tre är identisk med den i simulering ett men nu studeras en varierad permeabilitetsinverkan på konsolideringsförloppet i kalk-cementpelaren.

### **Resultat - homogen pelare**

Inget tydligt brott kan urskiljas. Dock erhålls ett stort antal plastiska punkter, dvs lokala brott, för belastningar över 57 kPa.

Kalkcementpelarna ger upphov till en sättningsreduktion i jordmodellen i jämförelse med den oförstärkta jorden. Den homogena kalk-cementpelaren är relativt okänslig för variation av råheten. Således erhålls en reduktion av totalsättningen på 32 % då  $R = 1$  respektive 25 % för  $R = 0,2$  vid 100 kPa belastning. Den relativt måttliga sättningsreduktion som erhålls, beror på att det undre oförstärkta lerlagret står för en stor andel av den totala sättningen.

Då råheten minskar ökar lastandelen i toppen och botten av kalk-cementpelaren. I mitten av pelaren minskar däremot lastandelen med minskad råhet.

Skjuvspänningarna i gränzonen mellan pelare och lera är stora i nivå med översta och understa metern av kalk-cementpelaren. Däremellan är skjuvspänningarna för den homogena pelaren i det närmaste försumbara. Då R minskar, minskar skjuvspänningarna i toppen och botten av pelaren kraftigt.

### **Resultat - pelare med svaghetszon**

Inte heller här kan något tydligt brott urskiljas och antalet plastiska punkter ökar kraftigt för laster över 57 kPa. Pelaren med svaghetszon är betydligt mer känslig för förändring av råheten. För  $R = 1$  erhålls en reduktion av totalsättningen på 27 % emedan den bara är 12 % för  $R = 0,2$  och en belastning på 100 kPa.

Liksom för homogen pelare ökar lastandelen i toppen markant för minskad råhet ner till  $R = 0,3$ . Även i botten av pelaren ökar lastandelen ner till  $R = 0,3$  något. För steget  $R = 0,3-0,2$  minskar lastandelen i toppen kraftigt. Även i svaghetszonen samt i botten av pelaren minskar lastandelen. Detta innebär att pelaren totalt bär en mindre last för  $R = 0,2$  jämfört med  $R = 0,3$ .

Skjuvspänningarna blir störst i nivå med kalkpelarens övergång till svaghetszon. Även i nivå med toppen av pelaren är skjuvspänningarna stora emedan skjuvspänningar i botten blir måttliga. Spänningarna minskar kraftigt för minskad råhet.

### **Resultat - konsolideringsanalys**

Konsolideringsförloppet påverkas tydligt av variationen av permeabiliteten i kalk-cementpelaren. Det långsamma konsolideringsförloppet beror på det relativt mäktiga oförstärkta lerlagret samt på att vi valt att karakterisera den fasta grunden som helt tät.

Variationen har störst inverkan på lerlager som ligger nära kalk-cementpelaren vilket leder till att permeabiliteten har stor inverkan på sättningarnas utveckling i början av förloppet emedan permeabiliteten i mindre utsträckning påverkar slutet av förloppet. Detta innebär att en permeabilitetsökning har störst effekt på sättningstiden vid låga konsolideringsgrader. Permeabilitetesökningen från  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s till  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s har mycket liten effekt på förloppets senare hälft emedan den tidigare påverkas i hög grad.



## **Slutsatser - sättningar och spänningar**

Råhetens inverkan på totalsättningar är relativt begränsad för en homogen pelare. För en pelare med svaghetszon spelar råheten däremot en betydande roll.

Den ökade sättning som erhålls för pelare med svaghetszon utvecklas i och omkring svaghetszonen.

En stor andel av den last som förs in i pelaren förs in direkt i toppen. Detta är en effekt av valvverkan och denna förstärks vid låga råheter vilket innebär att pelarens topp blir mer belastad vid låga råheter. Detta gäller även för pelare med svaghetszon ner till  $R = 0,3$ . För  $R = 0,2$  utbildas så många plastiska punkter i pelaren med svaghetszon att omlagring sker varpå lastandelen i toppen minskar. Den totala lasten som pelaren får bära minskar dock något med minskad råhet beroende på minskad överföring via skjuvspänningar. Totalsättningarna ökar då leran tvingas bära större andel av lasten.

Från pelaren överförs lasten till underliggande lera främst genom spetstryck. Denna tendens förstärks då råheten minskar.

## **Slutsatser - konsolideringsförlopp**

Den tid det tar att uppnå en relativt låg konsolideringsgrad påverkas i hög grad av permeabiliteten. Det får till effekt att en konsolideringsgrad på 20 % uppnås 100-500 ggr snabbare då permeabiliteten ökats med en faktor tusen. För höga konsolideringsgrader på 60-100 % påverkas sättningstiden i mindre utsträckning av permeabiliteten emedan mäktigheten i det lerlager som underlagrar det förstärkta skiktet får en stor betydelse. Således innebär ett tusenfaldigande av permeabiliteten att aktuell konsolideringsgrad uppnås endast 5-10 ggr snabbare.

Vidare kan konstateras att det finns en gräns för när en ökning av permeabiliteten i pelaren inte längre ger någon större effekt på tiden det tar att uppnå högre konsolideringsgrader.

## **PERMEABILITETSSTUDIER**

### **Utförande**

För att bestämma lerans sammansättning och egenskaper utfördes en standardundersökning. Prov togs av en kalk-cementpelare i fält från nivån 4 m för bestämning av permeabiliteten vid tre olika spänningstillstånd. I laboratoriet blandades tre olika sammansättningar av kalkcement och lera. Av varje sats tillver-

kades 6 pelare. Dessa fick härda i olika lång tid varpå permeabiliteten mättes för olika celltryck i en triaxialcell.

## Resultat

Ur standardundersökningarna kunde utläsas att leran var mycket lös, mellan sensitiv samt något gyttjig. Vidare är leran något överkonsoliderad och permeabiliteten varierar mellan  $1,7 \cdot 10^{-9}$  m/s och  $2,7 \cdot 10^{-9}$  m/s.

Ur permeabilitetsstudien med laboratorieblandade pelare kunde följande utläsas:

- För ett isotropt celltryck på 25 kPa minskade permeabiliteten kraftigt med tiden för samtliga sammansättningar. För celltryck på 75 kPa påverkades permeabiliteten i betydligt mindre och för 150 kPa var påverkan försumbar.
- Permeabiliteten beror av celltrycket och sjunker kraftigt för en ökning av trycket från 25 till 75 kPa för samtliga sammansättningar. Även för steget 75 till 150 kPa sjunker permeabiliteten, dock ej lika mycket. Således är inte permeabiliteten linjärt beroende av celltryck.

Vid studie av fältpelare kunde konstateras att permeabiliteten i denna var betydligt större än i laboratorieblandade pelare. Permeabiliteten i fältpelaren påverkades ej heller lika mycket av en celltrycksökning som de laboratorieblandade pelarna gjorde. Detta gav till effekt att skillnaden i permeabilitet mellan fältpelare och laboratorieblandade pelare ökar med ökat celltryck.

## Slutsatser

Att permeabiliteten beror av celltrycket var ett väntat resultat. Det icke linjära förhållandet kan förklaras med att makrosprickor står för den största delen av vattentransporten vid låga celltryck. Då celltrycket ökar sluter sig dessa med kraftigt sjunkande permeabilitet som följd. Permeabilitetens variation med tiden kan tänkas bero på att hydratationen av kalk och cement ej är en momentan reaktion. Således tätar reaktionsprodukterna provets sprickor efterhand. Den stora skillnaden mellan laboratorieblandade pelare och fältpelare beror troligen på att fältpelaren till skillnad från labpelarna är mycket inhomogen och har stora sprickor och svaghetszoner.

*Åbjörn, S, Linnér, R.*

## **Kalkcementpelares deformationsegenskaper - provbelastning i fält.**

Examensarbete X 1995:4, Chalmers Tekniska Högskola, 1995.

Rapporten behandlar kalkcementpelares last/deformationssamband. Den innefattar både fältförsök och laboratorieförsök på kalkcementpelare. Kalkcementpelarna som ingått i försöken installerades speciellt för detta projekt i samband med stabiliseringshöjande åtgärder på Bohusbanan, norr om Stenungsund (Bohuslän). 15 stycken pelare installerades med diametern 0,6 m, längden 5,5 m och med inblandningen 30 kg/m (50/50). Provområdets geotekniska egenskaper ställdes samman utifrån en befintlig undersökning som kompletterades med kolvprovtagning och vingsondering.

### **Fältförsök**

Provbelastningen bygger på att pelarna belastas med domkraft fäst på en vajer som löper i centrum på pelaren. Vajern i sin tur är förankrad i ett ankare under pelaren. Vajern och ankaret installerades i samband med att pelarna tillverkades. Installerade kalk-cementpelare belastades för bestämning av pelarnas deformationsegenskaper. För att bättre kunna studera deformationsförloppet längs pelarna installerades peglar på olika nivåer i pelarna.

Provbelastningen utfördes enligt två olika metoder:

1. Fem pelare belastades i laststeg om 10 kN till brott eller till det att deformationshastigheten var så stor att lasten inte kunde hållas konstant och försöket avbröts. För varje laststeg mättes deformationen.
2. Sju pelare belastades med en fjäder som spändes upp med domkraft i laststeg om 10 kN till olika laster vid olika tidpunkter samtidigt som deformationen mättes. Pelarnas krypning p.g.a. fjäderbelastningen studerades till det att deformationen avstannat. Fyra pelarebelastades först med 40 kN under knappt 2 veckor och sedan med 70 kN under 4 veckor. Tre av dessa pelare belastades därefter till brott, fjädern låstes fast och deformationen mättes under knappt 4 veckor. Tre pelare belastades med 60 kN under 7 veckor.

Två pelare sonderades enligt metoden med förinstallerad omvänd pelarsondering. Efter att samtliga pelare belastats drogs fyra upp för okulärbesiktning. Material till provkroppstillverkning för enaxliga tryckförsök togs samtidigt.

## **Laboratorieförsök**

Standardundersökning genomfördes på kolvprover från området. Enaxligt tryckförsök utfördes på både kalkcementinblandad lera från området och på prover tagna ur pelare i fält.

## **Analys**

Resultaten från fältförsöken analyserades med hjälp av FEM-programmet SIGMA, LIMSET (iterativt beräkningsprogram för sättningsberäkning) och med enkla handberäkningar. Resultatet visar på att pelarna har en kompressionsmodul i mitten som är över 100 MPa och en odränerad skjuvhållfasthet på omkring 250 kPa. Genom den kunskap som försöken har givits redovisas ett koncept för kontroll av pelare in-situ.

*Åhnberg, H., Holm, G*

**Kalkpelarmetoden. Resultat av 10 års forskning och praktisk användning samt framtida utveckling**

Statens geotekniska institut. SGI Rapport 31, 1986.

Kalkpelarmetoden har tillämpats i Sverige sedan 1975. Forskning och utveckling har skett parallellt med praktisk tillämpning av metoden. Totalt har drygt en miljon pelare installerats och 25 å 30 FoU-projekt bedrivits i Sverige under perioden 1975-1985. Produktionen av kalkpelare av svenska entreprenörer i Sverige, Norge och Finland har sammanlagt ökat från 25 000 meter pelare/år 1975 till 260 000 meter pelare/år 1985. En fortsatt uppgång framöver kan förutspås med hänsyn till att det idag sker en ökande användning av metoden inom redan beprövade användningsområden samtidigt som intresse finns att pröva metoden i nya tillämpningar och med andra stabiliseringsmedel än osläckt kalk. Ett ökat intresse finns även för användning av metoden utanför Norden.

Föreliggande rapport behandlar kalkpelarmetoden i Sverige med beskrivning av produktionsteknik, tillämpningsområden, egenskaper hos stabiliserad jord samt redovisad forskning och utveckling inom området. Använd teknik och utveckling utomlands för djupstabilisering av jord genom mekanisk inblandning av stabiliseringsmedel berörs kortfattat genom beskrivning av förhållanden i Norge, Finland och Japan.

I Sverige utförs pelare med diametern 0,5 eller 0,6 meter ned till maximalt 15 meters djup. Under perioden 1975-1985 har så gott som samtliga pelare tillverkats med osläckt kalk som stabiliseringsmedel utom i ett fåtal fall där provpelare tillverkats med gips, cement eller flygaska som stabiliseringsmedel (ensamt eller i kombination med kalk). Pelarproduktionen har fördelat sig på olika tillämpningar i princip enligt tabellen.

Utomlands har kalkpelarmetoden använts på ungefär liknande sätt i Finland medan i Norge har pelare till över 80 % använts för förstärkning av grundschakt för byggnad. I Norge och Finland används samma typ av maskinutrustning för installation av pelare (svensktillverkad) som i Sverige. Det land som har haft störst produktion av pelare för djupstabilisering är Japan där ett antal olika typer av utrustningar finns för installation av pelare med upp till ett par meters diameter och ca 35 meters längd. Utrustning finns även för samtidig tillverkning av flera pelare i olika mönster. Både flytande och torra stabiliseringsmedel används

Tillämpningsområde	Andel av total produktion 1975-1985	Andel av total produktion 1984-1985
Grundläggning av VA-ledning/ schakt för dito	14 %	4 %
Grundläggning av byggnad	5 %	3 %
Grundläggning av vägar	45 %	35 %
Förstärkning för tomtmark	28 %	40 %
Stabilisering av skredområde/ förstärkning av slänt	7 %	18 %
Förstärkning av grundschakt för byggnad	1 %	-
Dämpning av vibrationer	0,2 %	-

i Japan, huvudsakligen cement eller kalk men andra tillsatsmedel förekommer.

I samband med ökad användning av kalkpelarmetoden i Sverige, Norge och Finland och ökat intresse för metoden utomlands har behov uppstått av en mer omfattande information om metoden. Behov av informationsinsatser bedöms föreligga i följande ordning:

1. Anvisningar för tillämpning
2. Kortfattad informationsskrift (på svenska och engelska)
- 3 Redovisning av FoU-resultat till olika målgrupper
  - Tidsskriftsartiklar
  - Utbildningsinsatser
  - Dokumentation av referensprojekt

För framtida användning av kalkpelarmetoden finns behov av att ytterligare förbättra metoden. Detta skulle inte bara ge möjlighet till bättre pelarförstärkningar till lägre kostnader än idag utan även kunna utöka användningsområdet och öppna möjlighet för introduktion på nya marknader. Utveckling av kalkpelarmetoden bör ske genom en rad olika insatser inom de olika frågeställningar som metoden omfattar. Frågeställningar med störst behov av FoU-insatser bedöms föreligga i följande prioritetsordning:

1. Studier av samverkan kalkpelare - omgivande jord - överbyggnad syftande till förbättrade, enkelt användbara dimensioneringsmetoder.
2. Fördjupade studier av stabiliserad jords egenskaper vid laboratorie- och fältinblandning (dränerad/odränerad skjuvhållfasthet vid olika belastningsfall, anisotropi, kompressionsegenskaper och permeabilitet, samt inverkan av faktorer i fält).
3. Vidareutveckling av inblandningstekniken för att få bättre homogenitet och hållfasthet samt minska erforderlig mängd stabiliseringsmedel.
4. Vidareutveckling av metoder för kontroll av kalkpelares kontinuitet och hållfasthet. Cement som stabiliseringsmedel i olika jordar.

Den föreslagna forskningen kommer att medföra bättre kunskap om kalkpelarförstärkningars funktionssätt, utökat användningsområde för metoden, besparingar, högre kvalitet och säkrare förstärkningar samt ökade möjligheter till byggexport.

*Åhnberg,H, Holm,G*

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

Statens geotekniska institut. SGI Rapport 30, s 93-146, 1987.

I projektet studerades härdningstemperaturens inverkan på hållfastheten hos kalkstabiliserad lera.

Temperaturmätningar utfördes på olika nivåer i kalkpelare och i mellanliggande jord i områden med några olika c-avstånd mellan pelarna. Mätningarna utfördes under ca 1 års tid. Kontroll av pelarnas skjuvhållfasthet i fält utfördes vid ett antal tidpunkter efter installation.

På laboratoriet utfördes skjuvhållfasthetsbestämningar på kalkinblandade jordprover från försöksplatsen i fält. De kalkstabiliserade proverna lagrades dels under olika konstant temperatur och dels under olika varierande (sjunkande) temperatur.

Ett nytt mognadstal, dvs uttryck för hur temperaturen inverkar på härdningsförloppet, togs fram för stabiliserad jord.



Åhnberg,H, Johansson,SE, Retelius,A, Ljungkrantz,C, Holmqvist,L,  
Holm,G

## Cement och kalk för djupstabilisering av jord. En kemisk - fysikalisk studie av stabiliseringseffekter

Statens geotekniska institut. SGI Rapport 48, 1995

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

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

Tabell 1. Översikt över utförda typer av provningar.

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

\*) Ej provad med kalk

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

Skillnader i stabiliseringseffekt vid användande av cement som stabiliserings-  
medel jämfört med kalk kan kopplas till olika *hållfasthetsuppbyggande reak-*  
*tioner*. Vid inblandning av kalk minskar vattenkvoten, en flockulering sker ge-  
nom jonbyte och en grövre struktur byggs upp hos jorden. En reaktion sker mel-  
lan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  och mineraler i jorden som har puzzolana egenskaper vilket ger en  
med tiden ökande hållfasthet. Dessa reaktioner pågår under lång tid. Cement å  
andra sidan har förmågan att vid reaktion med vattnet i jorden generera hållfast-  
hetshöjande produkter, huvudsakligen sk CSH-gel (kalciumssilikathydrat), som  
kan fylla ut hålrummen mellan partiklarna i jorden. Cement ger också upphov till  
puzzolanreaktioner med jorden men dessa ger mindre mängd hållfasthetsupp-  
byggande ämnen än motsvarande mängd kalk. De puzzolana reaktionerna kan  
pågå under lång tid, medan cementet till större delen kan ha reagerat färdigt  
med vattnet efter 1 à 3 månader. Det använda cementet, SH-cement, ger ett  
något snabbare reaktionsförlopp än Std-cement men de totala reaktionerna på  
lång sikt, och därmed också hållfasthetsökningen, blir av samma storleksord-  
ning.

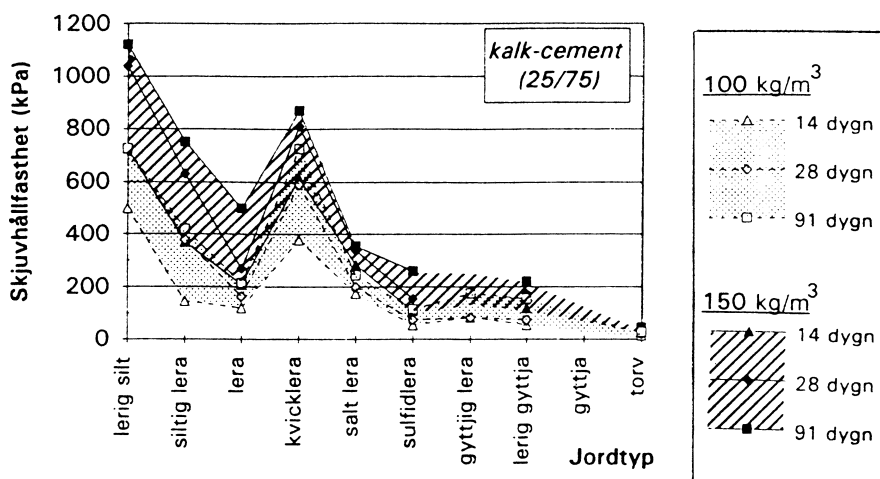
Det finns inget som tyder på att det skulle vara någon skillnad i långtidsstabilitet  
mellan de olika stabiliseringsmedlen. Reaktionsprodukterna anses vara stabila  
vid pH över ca 5 och överskott på kalciumjoner. Om reaktionsprodukterna ut-  
sätts för surt vatten eller strömmande vatten med låg jonhalt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

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

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

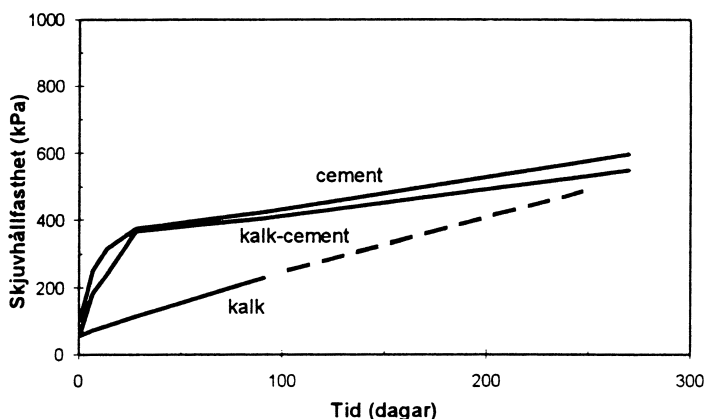
Stabiliseringseffekten varierade högst väsentligt med typen av jord som stabiliserades. Reaktiviteten hos jorden kan vara mer eller mindre utpräglad beroende på innehåll av lermineraler och puzzolanitet hos dessa. Hållfasthetstillväxten kan dessutom hindras vid eventuell förekomst av retarderande ämnen,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

Kalk-cement, och i än högre grad ren cement, gav en kraftig hållfasthetstillväxt med tiden under den första månaden, varefter tillväxttakten som regel avtog. Med kalk som stabiliseringsmedel uppnåddes momentant ett visst hårdnande.



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

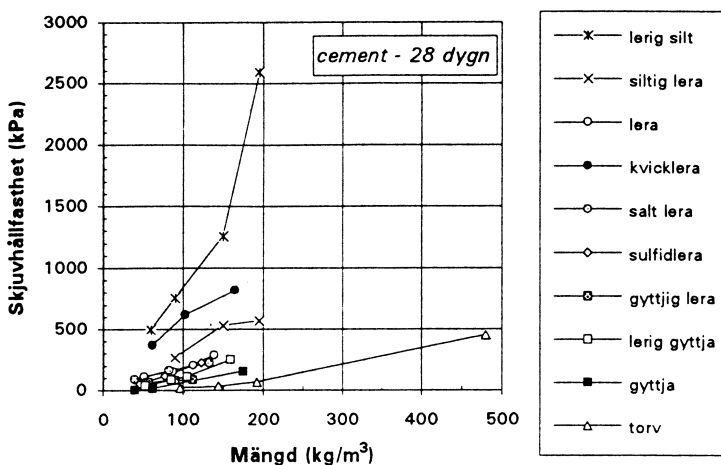
Därefter uppstod som regel inte någon större förändring under den första veckan eller något mer efter inblandning, varefter de puzzolana reaktionerna mer märkbart kom igång och medförde en relativt långsam men långvarig hållfasthetstillväxt. Undantaget var lera med hög salthalt och kvicklera där hållfastheten ökade också under första veckan och redan efter tre månader var lika hög som med cement eller kalk-cement. I Figur 2 visas skillnader i hållfasthetstillväxt med tiden för de olika stabiliseringsmedlen baserat på medelvärden från provningar av samtliga jordar utom gyttja och torv.



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

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

Med cement eller kalk-cement erhöles en ökande effekt med ökande mängd bindemedel, vilket ofta inte var fallet med kalk. I Figur 3 visas exempel på hur hållfastheten varierade med mängden inblandad cement. En faktor som för cementbaserade bindemedel har stor betydelse är vattenkvoten. Avgörande för vilken styrka en blandning av cement och vatten skall uppnå vid hårdnandet är kvoten mellan mängden vatten och mängden cement, det så kallade vattencementtalet (vct). Även vid lika vct visade sig skillnaderna mellan de olika jordarterna vara betydande beroende på olika kemiska och fysikaliska egenskaper, men skillnaderna hade dock krympt något. Ett dylikt vct-beroende erhöles inte med enbart kalk.



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

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

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

Styvheten hos stabiliserad jord ökade ungefär proportionellt med ökande skjuvhållfasthet. Ur de dränerade triaxialförsöken utvärderades elasticitetsmoduler (sekantmoduler) som var i storleksordningen 100-400 gånger den odränerade skjuvhållfastheten vid en belastning motsvarande 50 % av brottlasten. Förhållandet mellan modul och skjuvhållfasthet varierade med använd konsoliderings-spänning och hållfasthetsnivå hos materialen. Resultaten visade inte på någon skillnad mellan de olika stabiliseringsmedlen i detta avseende. De ur ödometerförsöken utvärderade kompressionsmodulerna varierade betydligt med ökande spänningsnivå, men gav initieellt värden i storleksordningen 60-300 gånger den odränerade skjuvhållfastheten. Elasticitetsmoduler har utvärderats också ur de enaxliga tryckförsöken. Eventuell användning av denna typ av moduler bör dock göras under beaktande av att de inte utförs under dränerade förhållanden. Uppmätta dränerade moduler i triaxialförsöken kunde vara både högre och lägre än motsvarande odränerade moduler beroende på använd konsoliderings-spänning.

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

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

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

## 6.12 PÅGÅENDE / EJ PUBLICERADE PROJEKT

Nedanstående projekt pågår, alternativt har inte publicerats i rapportform, i skrivande stund. Projekten är sorterade i kronologisk ordning baserat på det årtal då projektet startade.

\*\*\*\*\*

**Projektname** Jordförstärkning - bättre dim.metoder. Sättningsberäkning för kalkpelarförstärkning  
**Projektledare** Per-Evert Bengtsson, SGI  
**Projektstart** 1986

Projektet hade till syfte att ta fram bättre praktisk beräkningsmetod för dimensionering av kalkpelare under vägbankar.

I projektet utfördes uppföljning av en kalkpelarförstärkning för väg E18 vid Fiskvik kanal. Rörelser, portryck, spänningar och temperaturer mättes i pelarområdet med olika centrumavstånd och olika längd på pelarna. Jämförelser har gjorts mellan resultat av beräknat och uppmätt beteendet hos en kalkpelarförstärkning. Både avancerade och konventionella beräkningsmetoder har använts för analyser .

\*\*\*\*\*

**Projektname** Cementpelare i lera tpl Frösunda AB-län  
**Projektledare** Sven-Gunnar Sjöberg, SGI  
**Projektstart** 1987

I projektet gjordes fullskaleförsök med cementpelare i samband med kalkförstärkning för trafikplats Frösunda.

I en sektion ersattes planerade kalkpelare (9 x 9 st, L=5 m) med cementpelare. Dessa pelare provades med kalkpelarsond vid ett par tillfällen före uppfyllning. Vid samma tillfälle testades intilliggande kalkpelare. En grupp cementpelare installerades utanför släntfot för långtidsuppföljning av pelarhållfasthet. I samband med installation gjordes mätningar av pelarnas temperaturutveckling. Sättningsuppföljning utfördes i cementpelarförstärkt område och i intilliggande kalkpelarförstärkt område.



I laboratoriet utfördes kalk- respektive cementblandning på lerprover från området. Provernas skjuvhållfasthet och kompressionsegenskaper undersöktes vid olika tillfällen under ett års tid.

\*\*\*\*\*

**Projektnamn** Svealandsbanan  
**Projektledare** Yvonne Rogbeck, SGI  
**Projektstart** 1993

Syftet med projektet är att nå erfarenheter om dimensionering med avseende på sättningsberäkningar för kalk-cementpelarförstärkningar och speciellt studera effekten av avtrappning av pelare.

I projektet utförs en uppföljning av en kalk-cementpelarförstärkning av Svealandsbanan vid Grundbro-Härad. Skillnader mellan hållfasthetsegenskaper hos pelaren bestämda i fält respektive i laboratoriet studeras samt hur dessa påverkar beräkningsresultatet. I projektet undersöks också hur jorden påverkas under installations- och upplastningsskedet avseende sättningar temperatur och porttryck.

\*\*\*\*\*

**Projektnamn** Samverkan mellan kalkcementpelare och omgivande jord vid förstärkning av potentiella glidytor.  
**Projektledare** Matti Kiveló, Avd. för Jord- och bergmekanik, KTH.  
**Projektid** 1993-1998 (doktorandprojekt)

Kalk-cementpelare används idag allmänt för att förbättra stabiliteten av allt högre väg- och järnvägsbankar. Syftet med forskningsprojektet är att ta fram underlag för (utveckla) en bättre beräkningsmodell för kalk-cementpelare i brottgränstillstånd vid förstärkning av väg- och järnvägsbankar. Avsikten är att vid beräkning av samverkan kunna beakta olika styvheter och hållfastheter hos pelare, olika belastningsförhållanden samt tänkbara mekanismer som kan uppkomma utmed en potentiell glidyta.

Arbetet omfattar en teoretisk studie av samverkan mellan pelare och omgivande jord vid såväl tryckbelastning som vid tryck- och skjuvbelastning samt teoriutveckling. I projektet ingår även laboratorie- och fältförsök för att undersöka kalkcementpelarnas mekaniska egenskaper och funktion vid olika belastnings-

förhållanden. I projektet kartläggs dessutom tidigare erfarenheter med kalk-cementpelare med inriktning mot stabilitetsproblem.

Projektet finansieras i huvudsak av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond och Statens Råd för Byggforskning.

\*\*\*\*\*

**Projektname** Samverkan mellan kalk-cementpelare och lera  
**Projektledare** Sven Liedberg, Institutionen för Geoteknik, CTH.  
**Projektstart** 1994 (projektet avslutas våren/sommaren 1996)

Idag tillverkas huvudsakligen kalk-cementpelare som har helt andra egenskaper än de tidigare oftast använda kalkpelarna. Generellt kan sägas att kalk-cementpelare är betydligt styvare och har helt andra hållfasthetsegenskaper än kalkpelare. Projektet omfattar en teoretisk studie om hur samverkan sker mellan kalk-cementpelare och kringliggande pelare med hänsyn till bland annat variation av styvhetsförhållanden och dränerad hållfasthet mellan pelare och jord. Parameterstudier är utförda med hjälp av finita elementprogrammet PLAXIS samt med analytiska modeller.

\*\*\*\*\*

**Projektname** Långtidsuppföljning djupstabilisering, del I  
**Projektledare** Yvonne Rogbeck, SGI  
**Projektstart** 1995

Projektet syftar till att undersöka funktionen hos djupstabiliseringar på lång sikt. I detta projekt skall eventuella orsaker ej utredas utan endast om funktionen har bibehållits eller ej.

En inventering görs av tidigare utförda uppföljningar. För tre objekt undersöks om sättningarna avstannat eller ej. En jämförelse görs mellan nya sättningsmätningar och tidigare uppföljningar.

\*\*\*\*\*

**Projektname** E4 vid Ullånger. Sammanställning och utvärdering av mätningar samt framtagning av rapport i serien Vägledning.  
**Projektledare** Leif Viberg, SGI  
**Projektstart** 1995

Projektets syfte har varit att sprida erfarenheter av omfattande mätningar av grundvattennivåer och rörelser före och under kalkpelarinstallation.

I samband med förstärkningsåtgärder för två delsträckor på väg E4 delen Nyland - Ullånger, Västernorrlands län, har omfattande mätningar av grundvattennivåer och rörelser utförts. Kalkpelarmetoden har använts för första gången av Vägverket i Norrland. Undersökningarna och erfarenheterna har bedömts intressanta och kommer därför att sammanställs och spridas genom Vägverkets och SGIs gemensamma skriftserie Vägledning.

\*\*\*\*\*

**Projektname** Provbänk för verifiering av beräkningsmodeller  
**Projektledare** Kjell-Ola Berg, Banverket, samt Per Lennart Svensson, Geoprojektering  
**Projektstart** 1995

Syftet med projektet är att inhämta erfarenhet om dimensionering av höga banor med kalk-cementpelare i gyttjig lera och lerig gyttja, samt att för aktuellt byggprojekt verifiera föreslagna beräkningsmetoder.

I Norralla, norr om Söderhamn, utförs en kalkcementpelarförstärkt provbänk i Ostkustbanans sträckning. Halva sträckan utförs med 600-pelare och dimensioneras på konventionellt sätt med 100 kPa skjuvhållfasthet hos pelarna. Andra halvan utförs med 800-pelare och geonät och dimensioneras på konventionellt sätt, men med 150 kPa skjuvhållfasthet. Uppbyggnaden av provbanken har föregåtts av provpelarinstallation med omfattande laboratorieförsök och kontrollmetoder under sommaren 1995.

Mätning av provbankens beteende utförs bl. a. genom slangställningsmätning, inklinometermätning, porttrycksmätning, mätning med trådtöjningsgivare, samt genom avvägning av mätstänger och dubbar i pelare och omgivande jord. Dessutom har skjuvbelastningsförsök av enskilda pelare utförts.

Analys av provbanken utförs genom att jämföra beräkningar med uppmätta reaktioner, samt för att kontrollera använda beräkningsmetoder för stabilitets- och sättningsberäkning.

\*\*\*\*\*

**Projektname** Funktionsuppföljning av kalkcementpelarförstärkning på Väst-kustbanan (delen Sätinge-Lekarekulle)  
**Projektledare** Marius Tremblay, SGI  
**Projektstart** 1995

Syftet med projektet är att inhämta erfarenheter om dimensionering, främst avseende lastfördelning längs och under kalk-cementpelare. Erfarenheter skall också inhämtas avseende ändringar i grundvattennivån kring en avschaktning i en kalkcementstabiliserad jord.

Kalkcementpelarna utgör förstärkning för en vägport av typen slutna ram med tillfartsbankar. Överlast på 80 kPa har verkat på kalkcementpelarna under 6 månader. Därefter har nedschaktning utförts till ca 6 m i den förstärkta jorden för grundläggning av bron.

Rörelsernas utveckling med tiden registreras med slangställningsmätning, bälgslangar och inklinometerrör. Porttryckens utveckling med tiden mäts med såväl slutna som öppna porttrycksmätare. Under nedschaktningen dokumenteras kalkcementpelarna.

\*\*\*\*\*

**Projektname** Kalk-cementpelares sättningsreducerande funktion  
**Projektledare** Sadek Baker, Institutionen för Geoteknik, CTH  
**Projektid** 1996-1999 (doktorandprojekt)

Många av de grundläggande problemställningarna kring förstärkning av lera med kalk-cementpelare är i behov av fortsatt forskning, t. ex. pelarnas spännings-töjningssamband, lastfördelning mellan pelarna och omgivande ostabiliserad lera, samt deformationsbilden i och kring den förstärkta jordvolymen. Av största vikt är även att klargöra hur dessa problem påverkas av tiden.

Syftet med projektet är möjliggöra en mer effektiv användning av kalkcementpelarna genom att utveckla bättre dimensioneringsmetoder avseende såväl slut-

sättningar som sättningarnas förändring med tiden. I projektet ingår därför omfattande försök i såväl fält som i laboratorium, samt mätningar i anslutning till verkliga förstärkningsarbeten. Dessutom kommer delvis ny teoriutveckling att ske för att skapa en grund för nya dimensioneringsmetoder.

\*\*\*\*\*

**Projektname** Sättningsprognostisering - erfaring med utbygging og drift av jernbaneanlegg på blöt grunn  
**Projektledare** Banverket, Chalmers tekniska högskola, NSB, SINTEF  
**Projektid** 1996-2000

I projektet skall två nybyggda järnvägssträckor i Norge och två sträckor i Sverige studeras vad beträffar projekterade och utförda sättningsreducerande förstärkningar, bl. a. med kalk-cementpelare. Under en fyraårsperiod skall uppkomna sättningar registreras och vilken påverkan detta har på spåret och trafiken. projektet skall bl. a. utreda följande:

- vilka geotekniska undersökningar krävs för att tillfredsställande sättningsprognoser skall kunna ges för en ny järnvägsanläggning?
- hur väljs mest kostnadseffektiva åtgärder för sättningsreduktion vid järnvägsbyggnader på lös lera?
- vilket är sambandet mellan sättningsutveckling och tillståndsutveckling för nya järnvägssträckningar på lös lera?
- vilket är behovet av speciell uppföljning och ökad resursinsats på bansträckningar där sättningar pågår?

## 7. Uppdatering och utökning av databasen

En hel del information om kalk-cementpelare har samlats in under detta projekt. Denna information ger emellertid endast en bild av hur och med vilken framgång kalk-cementpelare använts fram till idag (årsskiftet 1995/96). Genom fortsatt informationsinsamling kan databasen uppdateras så att den behåller sitt värde även i framtiden. I detta kapitel redogörs för omfattningen på den information som bör samlas in för att den skall vara värdefull för databasen.

### **7.1 DATAFORMULÄR LÄMPLIGT ATT ANVÄNDA FÖR S.K. ÖVERSIKTLIG INFORMATIONSINSAMLING**

På de följande två sidorna finns ett dataformulär som kan kopieras och användas vid framtida insamling av s.k. översiktlig information till databasen.

## ÖVERSIKTLIG SAMMANSTÄLLNING AV KC-PELARPROJEKT I SVERIGE, SIDA 1(2)

### På vilket sätt används informationen du bidrar med?

Genom att besvara nedanstående frågor och därefter sända formuläret till nedanstående adress bidrar du till att utöka den erfarenhetsbank rörande kalk-cementpelare som skapats i regi av Svensk Djupstabilisering. Tanken med formuläret är att få klarhet om när, var, hur och varför kalk-cementpelare använts.

Om förhållandena i ditt projekt varierar kraftigt är det bra om du inte använder endast ett formulär för att beskriva hela projektet. Dela istället upp projektet i mindre delområden så att förhållandena inom respektive delområde är någorlunda lika, och använd ett formulär till varje del. På detta sätt blir ditt bidrag än mer värdefullt.

---

### Data av allmän karaktär

Uppgiftslämnare (namn, företag, o tel.nr.): .....

.....  
.....

Vilket år och av vilket företag tillverkades pelarna? .....

Projektnamn (ange helst även län, närbelägen ort samt ev. sektionsnummer): ...

.....  
.....

Huvudsakligt syfte med KC-pelarna (ange flera alternativ om så är fallet):

Sättningsreducerande    Stabilitetshöjande    Vibrationsdämpande  
 Annat .....

Konstruktion som förstärkts med KC-pelarna (t. ex. hus och antal våningar; bro och anslutande bankars höjd [m]; vägbank eller järnvägsbank och dess höjd [m]; skärning eller schakt och dess djup [m] och lutning [1:n] ; slänt och dess höjd [m] och lutning [1:n]): .....

.....

Eventuell förbelastning innan konstruktionen uppfördes/slutjusterades:

Tjocklek på överlast vid förbelastning [m]? .....

Tid då förbelastning var påförd [dygn]? .....

---

**Data om pelarna:**

Huvudsakligen förekommande pelardiameter [mm]: ...  500  600  800  
 Annan .....

Bindemedelsfördelning kalk/cement [%]:  100/0  0/100  50/50

Annan ..... Mängd bindemedel [kg/m]: .....

Huvudsakligt pelarmönster:

Kvadratisk rutnät  Skivor  Gitter  Block

Annat (bifoga gärna en skiss) .....

Ungefärligt c/c-avstånd [m]: .....

Ungefärlig pelarlängd [m/pelare]: .....

Pelarna installerades huvudsakligen:

ner till lerans underkant  svävande i leran

Antagen dimensionerande pelarhållfasthet [kPa]: .....

Ungefärlig total mängd pelare i projektet [m]: .....

---

**Data om den förstärkta jordens ursprungliga egenskaper:**

Ungefärligt lerdjup [m]: .....

Lerans egenskaper:

Oreducerad skjuvhållfasthet i överkant lera [kPa] .....

Hållfasthetstillväxt med djupet [kPa/m] .....

Ungefärlig naturlig vattenkvot [%] .....

Ungefärlig konflytgräns [%] .....



---

**Data om uppföljningar och kontroller:**

Fungerade KC-pelarna som avsett?  Ja, i stort sett  Nej, inte alls

Utförda mätningar och kontroller:

Slangsättningsmätning  Bälgslangsmätning  Inklinometermätning

Avvägning m.h.a. peglar

Provsonderingar av pelare med varierande inblandningsmängd, ålder, etc.

Kontrollsonderingar

Annat .....

---

**Övriga upplysningar:**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

---

**Slut. Tack för hjälpen!**

Sänd det ifyllda formuläret till:

Svensk Djupstabilisering  
att. Göran Holm  
Statens geotekniska institut  
581 93 Linköping

(fax 013-20 19 14)

(tfn. 013-20 18 00)

## **7.2 MATERIAL SOM BÖR INGÅ VID S.K. DETALJERAD INFORMATIONSSINSAMLING**

Den information som inkommit genom den översiktliga insamlingen är användbar vid mer generella studier som visar var, när, hur och varför kalk-cementpelare använts. För att kunna dra mer långtgående slutsatser om hur kalkcementpelarna fungerat i olika projekt krävs dock att betydligt mer information samlas in. För att i möjligaste mån erhålla ”objektiv” information är det nödvändigt att samla in dokumenterad information i form av t. ex. ritningar, mätprotokoll, diagram, m.m.

Det ideala situationen är en väldokumenterad och begränsad geografisk lokal, t.ex. en tvärsnitt eller ett område på ca 100 x 100 m, där både jorden och pelarna förefaller ha likartade egenskaper.

Nedanstående punkter kan användas som en ”check-lista” som kan användas vid framtida insamling av s.k. detaljerad information till databasen. I praktiken finns väldigt få ställen där all uppräknad information är tillgänglig, men även om bara delar av informationen kan erhållas är den ofta värdefull.

### **Dokumenterad information som visar jordprofilen och den oförstärkta jordens egenskaper**

Komplett information klagör:

- jordprofilens utseende
- porttryckssituationen
- resultat från rutinundersökningar på leran
- lerans deformations- och hållfasthetsegenskaper
- organisk halt

### **Dokumenterad information från inblandningsförsök**

Komplett information klagör:

- jordprovets egenskaper före inblandningen
- mängden inblandat material (totala mängden och fördelningen mellan kalk och cement, etc...)
- inblandningsmetod (namnet på det laboratorium som utfört försöket är tillräckligt)
- lagringstemperatur för det inblandade provet
- hur lång tid som provet lagrats innan det testas
- hur provet testats (t. ex. enaxligt tryckförsök, CRS-försök, etc...)
- erhållna resultat från försöket

## **Dokumenterad information om konstruktionen som skall bäras upp av kalkcementpelarna**

Komplett information klargör:

- typ av konstruktion (t. ex. väg eller järnvägsbank, schakt, bro, etc...)
- funktion (t.ex. sättningsreducerande och/eller stabilitetshöjande)
- konstruktionens geometri (höjd, bred, etc...)
- hur den placerats i förhållande till kalkcementpelarna
- när konstruktionen började belasta pelarna.
- eventuell temporär överlast, förbelastning etc

## **Dokumenterad information om provpelare och kontrollpelare**

Skillnaden mellan provpelare och kontrollpelare är att provning utförs innan den storskaliga produktionen inletts, medan kontroll omfattar pelare som tillverkats under den storskaliga produktionen.

Komplett information klargör:

- mängden inblandat material (framgår av utmatningsdiagram från pelartillverkningen)
- pelarnas diameter
- tillverkningsmetodik (typ av inblandningsverktyg, rotationshastighet, utblåsningstryck och stigning)
- pelarens ålder vid provningen
- sonderingsmetod (KPS, OKPS, FOPS)
- sondens tvärsnittsarea
- registrerat sonderingsmotstånd (sonderingsdiagram)

## **Dokumenterad information om hur produktionspelarna installerats**

Komplett information klargör:

- mängden inblandat material (framgår av utmatningsdiagram från pelartillverkningen)
- pelarnas diameter
- tillverkningsmetodik (typ av inblandningsverktyg, rotationshastighet och stigning)
- pelarmönster
- c/c-avstånd
- pelarnas längd

## **Dokumenterad information som visar jordens respons vid pelartillverkning och/eller vid belastning**

Komplett information klargör:

- typ av respons som uppmätts (sättning, horisontalrörelser, porttryck etc)
- vilken mätutrustning som använts
- var mätutrustningen placerats i förhållande till pelarna
- när mätningarna utfördes i förhållande till när belastningen påfördes/pelartillverkningen genomfördes
- resultatet av mätningarna

## **Dokumenterad information som visar förväntade rörelser, m.m.**

Komplett information klargör:

- vilka beräkningsmetoder som använts
- vilka materialegenskaper som antagits
- vilka belastningar som antagits
- vilken respons som förväntats

# Publikationer utgivna av Svensk Djupstabilisering

## Rapport

- 1 Erfarenhetsbank för kalk-cementpelare 1997  
Torbjörn Edstam

### **DISTRIBUTION:**

Svensk Djupstabilisering

c/o SGI, 581 93 Linköping

Tel: 013- 20 18 62, Fax: 013-20-19 13, E-mail: [sussyl@geotek.se](mailto:sussyl@geotek.se)



**Svensk Djupstabilisering**

**c/o SGI, 581 93 Linköping  
Tel: 013-20 18 61, Fax: 013- 20 19 13**