



Svensk Djupstabilisering  
Swedish Deep Stabilization Research Centre

**Arbetsrapport 38**  
2006–12

# Kemiska reaktioner vid stabilisering av jord

Sven-Erik Johansson  
Helen Åhnberg  
Håkan Pihl

## **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 – 2004. Medlemmar är myndigheter, kalk- och cementleverantörer, entreprenörer, konsulter, forskningsinstitut och högskolor.

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

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

Ytterligare upplysningar om verksamheten lämnas av SD:s projektledare Göran Holm, tel: 013–20 18 61, 070–521 09 39, fax: 013–20 19 14, e-post: [goran.holm@swedgeo.se](mailto:goran.holm@swedgeo.se), internet: [www.swedgeo.se/sd](http://www.swedgeo.se/sd).

## **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 – 2004. Members of the Centre include authorities, lime and cement manufacturers, 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, +46 70 521 09 39, fax: +46 13 20 19 14 or e-mail: [goran.holm@swedgeo.se](mailto:goran.holm@swedgeo.se), internet: [www.swedgeo.se/sd](http://www.swedgeo.se/sd).



**Svensk Djupstabilisering**  
Swedish Deep Stabilization Research Centre

**Arbetsrapport 38**  
2006–12

# Kemiska reaktioner vid stabilisering av jord

Sven-Erik Johansson  
Helen Åhnberg  
Håkan Pihl

## Förord

Svensk Djupstabilisering (SD) baserar verksamheten på sin FoU-plan som bl a innehåller ett antal stora FoU-projekt. För att öka underlaget för dessa forskningsprojekt satsar SD på kompletterande mätningar/analyser i lämpliga förstärkningsprojekt. Redovisningen av dessa mätningar/analyser granskas ej av SD utan redovisade resultat och framförda åsikter är författarens. Redovisningarna är arbetsrapporter inom SD. Även redovisningar av mindre FoU-projekt samt delredovisningar av större FoU-projekt inom SD sker i SD:s arbetsrapportserie. Rapporter i SD:s arbetsrapportserie har tidigare använts endast internt inom SD. Fr o m 2005 är de dock offentliga och läggs ut på SD:s hemsida.

I föreliggande arbetsrapport redovisas ett forskningsprojekt rörande kemiska reaktioner vid stabilisering av jord. Detta forskningsprojekt ingår i SD:s forskningsområde Stabiliserad jords egenskaper.

Linköping i december 2006

Göran Holm  
Projektledare för SD

**Arbetsrapport**

Beställning

Svensk Djupstabilisering  
c/o Statens geotekniska institut  
581 93 Linköping

Tel: 013 – 20 18 42  
Fax: 013 – 20 19 14  
E-post: birgitta.sahlin@swedgeo.se

# Innehåll

<b>Sammanfattning</b> .....	4
<b>Inledning</b> .....	5
Bakgrund .....	5
Hypotes och syfte .....	5
<b>Kemisk sammansättning av fast material och vattenfas hos jord</b> .....	6
<b>Bindemedel</b> .....	7
Kalk .....	7
Cement .....	7
Slagg .....	8
Gips .....	8
Filterkalk .....	8
Silikastoft .....	9
Aska .....	9
Avsvavlingsrest .....	9
Blandningar av bindemedel .....	9
Tillsatsmedel med speciella effekter .....	10
<b>Kontrollmetoder för bindemedel</b> .....	11
<b>Jordar – kemiska egenskaper</b> .....	12
Leror .....	12
Gyttja .....	12
Torv .....	12
<b>Jordens porvatten – inverkan på kemiska reaktioner</b> .....	13
Allmänt .....	13
Joner, löslighet och jämvikt .....	13
Sammansättning .....	13
Organiska ämnen .....	14
<b>Laboratorieförsök</b> .....	15
Material .....	15
Metoder .....	15
Resultat .....	16
Jordar .....	16
Stabiliseringsmedel .....	17
Stabiliserat material .....	18
<b>Diskussion och slutsatser</b> .....	23
<b>Referenser</b> .....	24
<b>Bilaga 1</b> .....	25
<b>Bilaga 2</b> .....	27
<b>Bilaga 3</b> .....	28

## Sammanfattning

Inom Svensk Djupstabiliserings (SD) projektområde ”Stabiliserad jords egenskaper” har en studie utförts av kemiska reaktioner vid stabilisering med bindemedel och inverkan av jordens kemiska sammansättning på dessa reaktioner.

Vid stabilisering av jord med torra bindemedel reagerar dessa med vatten som finns i jorden. Jordvattnets sammansättning bestäms av jordmineralerna- och jordens ursprung. Vattnets innehåll av lösta ämnen inverkar på bindemedlets reaktionshastighet och de produkter som bildas.

I denna undersökning har tre jordar och fyra bindemedel ingått. Porvatten från jordar, bindemedel och stabiliserat material har analyserats och variationer i kalcium-, hydroxid-, natrium-, kalium- och sulfatjonkoncentrationer har diskuterats. Undersökningarna har gjorts på ursprungliga material, efter 1,2, 7 samt 28 dygn samt i ett fall även vid 800 dygn.

Ingen av jordarna visade extrema halter av något jonslag. Som förväntat visade sötvattenleran låga halter av lösta ämnen och saltvattenleran innehöll högre halter av ämnen som ingår i havsvatten. Sammansättningen av den stabiliserade jordens porvatten kunde förklaras med utgångspunkt från bindemedlets kemi och vattnets joninnehåll.

För att koppla resultaten till hållfastheter krävs större variation både i hållfasthet och i kemisk sammansättning än vad som är fallet i denna undersökning. För att kunna ta fram kritiska bindemedelshalter krävs resultat från fler blandningar. Kalcium- och hydroxidhalterna var i de aktuella blandningarna tillräckligt höga för att pozzolanreaktionen skall fortgå även efter två år. Inverkan av olika svavelföreningar har inte kunnat studeras i detalj på grund av begränsningar i den valda metoden.

Porvattenanalys kan vara till hjälp att hitta extrema avvikelser i jordvattnets sammansättning och därmed begränsa urvalet av bindemedel för sådana ”problemjordar”. Det är inte en metod som kan klassas normala jordvatten och jordar med tanke på förväntad hållfasthet för stabiliserat material.

# Inledning

## Bakgrund

Stabilisering med bindemedel är en metod som ofta används för att förstärka lösa jordar och öka deras hållfasthet. För de flesta jordar är det möjligt att förutsäga ungefär hur mycket bindemedel som behövs för att uppnå en önskad hållfasthet. Avvikelse förekommer dock där man inte kan förklara stabiliseringsresultatet utifrån jordens fysikaliska egenskaper. För att hitta parametrar som påverkar hållfasthetsutvecklingen vid stabilisering behövs en kartläggning av jordens och speciellt porvattnets kemi utföras.

När bindemedel blandas in i jord så startar kemiska och fysikaliska förlopp, som påverkas av ett stort antal faktorer (t.ex. Janz och Johansson, 2001). Bindemedlet reagerar med jordens vattenfas, som kan ha varierande sammansättning och därmed påverka resultatet. Jordens kornstorleksfördelning, densitet, vattenhalt, jonbytesförmåga och blandbarhet med bindemedlet är andra faktorer, som påverkar den slutliga strukturen. Även lermineralernas kemiska sammansättning kan ha betydelse för slutresultatet. Mängden mineral har dessutom en avgörande betydelse för hur mycket hållfasthetsuppbyggande produkter som kan bildas. Jordens organiska innehåll kan påverka de tidiga bindemedelsreaktionerna så att hållfasthetsutvecklingen försenas eller uteblir helt.

Stabiliseringsmedlen cement, kalk och slagg reagerar med vatten och ger reaktionsprodukter som direkt eller via pozzolanreaktionen ger en bindande struktur. Porvattnets sammansättning och temperaturen i det stabiliserade materialet inverkar på reaktionernas hastighet. Även om ett visst stabiliseringsmedel har störst löslighet så kan vissa ämnen i jorden ha stor inverkan på jonbalansen i vattenfasen och därmed störa reaktionerna..

Den skillnad som idag finns i hållfasthet hos bindemedelsstabiliserade pelare i fält jämfört hos laboratorieinblandade prover på laboratorium hanteras genom att den slutligt dimensionerande hållfastheten bestäms genom provning av pelare i fält.

## Hypotes och syfte

På basis av undersökningar av jordens och porvattnets kemiska sammansättning bör vissa kombinationer av jordar och bindemedel kunna bedömas som mindre lämpliga redan i ett tidigt stadium av projekteringen.

Syftet har varit att med några huvudgrupper av bindemedel och ett antal välbestämda jordar undersöka om man via analys av porvattnet kan förutsäga stabiliseringseffekten vid olika kombinationer av jordar och bindemedel. Vidare har syftet varit att klargöra behov av eventuella kompletterande provningsmetoder för jordar och stabiliserat material.

## Kemisk sammansättning av fast material och vattenfas hos jord

När ett fast material (bergart, mineral, salter etc) befinner sig i kontakt med vatten, så uppstår en balans mellan materialets kemiska sammansättning och vattenfasens innehåll av joner. Om den fasta fasen är svårslöslig, så blir motsvarande jonhalter i vattnet låga och om den är löslig så blir halterna höga. Den jämvikt som ställer in sig är specifik för varje ämne och inträffar när vattenfasen är mättad med avseende på ämnet. Genom att analysera porvattnet kan vissa slutsatser dras om det fasta materialets kemiska egenskaper.

Jordens porvatten reagerar med bindemedlet och skillnader i kemisk sammansättning mellan olika jordar kan ha inverkan på resultatet av stabiliseringen. I det stabiliserade materialet är bindemedlets joner dominerande. Om förhållandet mellan jonkoncentrationerna blir annorlunda än i porvattnet från bindemedel och rent vatten tyder detta på att reaktioner med jorden pågår eller att jorden innehåller ämnen som stör balansen. Detta indikerar att en noggrannare undersökning bör göras på denna jord/bindemedelskombination.



## Bindemedel

Metoden att djupstabilisera jordar genom inblandning av bindemedel kallades från början för kalkpelarmetoden baserat på att bindemedlet som användes var ren bränd kalk. Metoden innebar förstärkning av jorden baserat på kemiska reaktioner mellan kalk och lermineral i jorden. När dessa material reagerar erhålls en stabiliserad jord med förbättrade geotekniska egenskaper. Förstärkning av mer eller mindre ren lerjord fungerar oftast utmärkt enligt denna princip men då behov av förstärkning utökades till fler typer av lösa jordar med varierande sammansättning har det skapats behov för användning av även andra bindemedel. Under de senaste åren har det vanligaste bindemedlet utgjorts av blandningar av bränd kalk och cement samtidigt som slagg fått en ökad användning.

Valet av bindemedel styrs av teknisk funktion och ekonomiska aspekter. Bindemedlet skall förmå åstadkomma de egenskaper (hållfasthet, deformationsegenskaper och beständighet) i den aktuella jorden som krävs för den avsedda geotekniska konstruktionen. Utgående från dessa aspekter kan den optimala lösningen ofta utgöras av en bindemedelsblandning bestående av olika delmaterial.

Bindemedelsfunktion i djupstabilisering av jord har tidigare beskrivits i t.ex. Janz och Johansson (2001) och EuroSoilStab, Design Guide (2000).

### Kalk

Genom bränning av kalksten produceras bränd kalk. Kalksten utgörs i huvudsak av kalciumkarbonat,  $\text{CaCO}_3$ , som vid bränningen avger koldioxid så att kalciumoxid,  $\text{CaO}$ , dvs bränd kalk bildas. Den brända kalken är mycket reaktiv. Reaktiviteten anges bl.a. som ”aktiv kalk”, vilket är ett mått på hur mycket av den brända kalken som kan reagera under förhållanden som specificeras av metoden.

Kalk reagerar i och med jorden genom flera delsteg:

- Den brända kalken binder vatten ur marken i en släckningsreaktion där kalciumoxiden omvandlas till kalciumhydroxid enligt  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$ . Reaktionen är exotermisk och frigör värme motsvarande 1163 kJ/kg (Boynton, 1980).
- Släckningen torkar upp jorden genom att binda vatten. Reaktionsvärmens bidrar till att accelerera påföljande kemiska reaktioner.
- Jonbyte sker så att  $\text{Ca}^{++}$  från kalken ersätter  $\text{Na}^+$  och  $\text{K}^+$  i lermineralen. Det medför att leran får en grövre agglomererad struktur.
- Jordens pH höjs kraftigt vid inblandningen av kalk till 12,5 och detta är en förutsättning för att kisel och aluminium från lermineralen skall bli tillgängligt för de puzzolanreaktioner som bildar kalciumsilikathydrat- och kalciumaluminiumsilikathydratföreningar, CSH och CASH.

Sammanfattningsvis kan man säga att bränd kalks stabiliserande reaktioner i jord baserar sig på en reaktion mellan kalk och lermineral som resulterar i en ny och hållfast struktur hos jorden.

Reaktionsprodukterna är initialt  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  som med tiden reagerar till CSH och CASH.

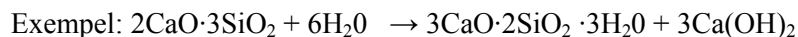
### Cement

Cement är vad man kallar ett hydrauliskt bindemedel, dvs det härdar i sig själv i kontakt med vatten. Det finns många olika sorters cement men i denna rapport behandlar vi det helt dominerande cementet, det s.k. portlandscementet.

Kalksten utgör den viktigaste råvaran för framställning av cement. Därutöver används kisel och järnrikt material, ofta i form av annat stenmaterial. Blandningen mals till ett s.k. råmjöl som bränns så att kalkstenens koldioxid avdrivs medan de övriga komponenterna sintrar samman till vad som kallas klinker. Denna klinker finmåls sedan för att producera det reaktiva cementet. I regel gäller att ju högre finmalningsgrad desto reaktivare är produkten. För att styra egenskaperna hos cement kan olika tillsatsmaterial tillsättas vid klinkermalningen såsom kalkstensmjöl, gips, masugnsslagg eller dylikt.

Eftersom cement är hydrauliskt kan det i princip binda ihop eller innesluta i sig all typer av material. Detta är en fördel vid jordar som torv.

Cementen består i huvudsak av kalciumsilikater som vid reaktion med vatten, hydratation, bildar kalciumsilikathydrater och kalciumhydroxid.



Reaktionsprodukterna är främst CSH som är en finkornig gel, som bildar ett nätverk och ger hållfasthet och dels  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  som i sin tur, på samma sätt som för kalk, med tiden deltar i pozzolanreaktioner med lermineraler i jorden som ger mer CSH.

Andra cement, som aluminatcement, kan ge fördelar i vissa sammanhang (snabbhet), men ger också delvis andra reaktionsprodukter och är ofta inget ekonomiskt alternativ.

### Slagg

I en masugn förädlas järnmalm till råjärn. Malmens silikatandel binds genom tillsats av kalksten i masugnen och reaktionsprodukten av dessa material kallas slagg. Om masugnsslaggen snabbkyls med vatten vid s k granulering erhåller den en amorf struktur och blir efter finmalning en reaktiv produkt (Ground Granulated Blastfurnace Slag). För masugnsslaggen gäller samma sak som för cement att ju finare den mals desto reaktivare blir den. Masugnsslaggen påminner till sitt kemiska innehåll om cement med låg kalciumhalt. Reaktionsbenägenheten är därför lägre hos masugnsslagg än hos cement. Genom tillsats av cement, kalk eller gips kan slaggens reaktivitet öka. Reaktionsprodukterna blir kalciumsilikathydrater, CSH.

Alternativa befintliga slaggprodukter från metallurgiska industrin är LD-slagg eller stålslagg från ljusbågsugn, s k järnsand eller slagg från kopparframställning, ferrokromslag och konverterslagg. Erfarenheter saknas från användning av dessa produkter i djupstabilisering. LD-slagg har använts för stabilisering av jord i laboratorieskala och resultat finns i rapport från LTU (Andersson & Norrman, 2004). Slaggerna innehåller ofta ämnen som kräver speciell provning och bedömning ur miljösynpunkt.

### Gips

Kalciumsulfat,  $\text{CaSO}_4$ , förekommer både som naturligt mineral och som kemisk reaktionsprodukt från olika industriella processer. Ren kalciumsulfat kallas anhydrit. Det förekommer även material med varierande mängd kristallvatten bundet i strukturen. Kalciumsulfat med ett halvt kristallvatten,  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$  kallas hemihydrat och den form som har två enheter kristallvatten,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ , kallas dihydrat. Kristallvattnet avges vid upphettning av hydratformerna. Temperaturangivelserna för dessa processer varierar men dihydrat omvandlas till hemihydrat vid drygt  $100^\circ\text{C}$  temperatur och vid upphettning till över  $180^\circ\text{C}$  avgår resten av vattnet och anhydrit bildas.

Byggstenarna kalcium, sulfat och aluminat kan bilda mineralet ettringit ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) som har en nållik struktur och därmed är hållfasthetsbidragande. Erfarenheter från användning av gips i samband med djupstabilisering finns rapporterat i bl.a. Holm, m.fl. (1987).

Reaktionsprodukten är ettringit, vilken är stabil endast vid höga pH-värden hos den stabiliserade jorden.

### Filterkalk

Filterkalk är en produkt som i internationella sammanhang kallas LKD, Lime kiln dust eller CKD cement kiln dust. Detta är ett finkornigt kalkmaterial som i huvudsak består av kalkstensmjöl eller kalciumkarbonat, en viss andel bränd kalk och aska från ugnbränslet, vanligen stenkol. Den brända kalkandelen fungerar precis som bränd kalk i övrigt (se tidigare avsnitt Kalk) medan återstoden kan anses utgöra ett fyllmedel. Askmaterialet besitter i någon mån puzzolana egenskaper. I

stabiliseringsstillämpningar kan fyllmedlets roll vara att hjälpa till med att fördela de aktiva bindemedelspartiklarna under blandningsprocessen i jorden. Ofta doseras mera bindemedel än teoretiskt är nödvändigt för stabiliseringsreaktionerna. Det kan då vara ekonomiskt fördelaktigt att med hjälp av fyllmedlet kunna få de aktiva partiklarna jämt fördelade i jorden och på detta sätt åstadkomma erforderlig stabiliseringseffekt.

### **Silikastoft**

Genom att avskilja rökpartiklar från smältugnar för tillverkning av kisel och ferrokisel, får man ett extremt finkornigt pulver, som i huvudsak består av amorft kiseldioxid. Denna reagerar lätt med kalciumhydroxid och bildar CSH. Inblandning vid stabilisering ger ett tätare material, men mängden tillgänglig kalciumhydroxid för pozzolanreaktionen minskar.

### **Aska**

Askor från olika förbränningsprocesser kan utgöra potentiella delkomponenter i bindemedelsblandningar. Närmast kan flygaskor vara intressanta. Flygaska är ett finkornigt, sfäriskt silikatstoff som urskiljs från förbränningsgaserna med någon form av filter. Flygaska besitter varierande grad av pozzolan effekt som kan aktiveras med kalk eller cement. Teoretiskt kan flygaska tänkas kompensera för avsaknad av reaktiv finfraktion i något grövre jordar eller organiska jordar. Flygaskornas reaktivitet varierar stort beroende av förbränningsprocess och bränsle. Reaktiviteten kan mätas med s.k. pozzolanitetstester, som ger ett mått på hur mycket Si och Al som är lösligt. Ett exempel på en sådan test ges i Buchwald m fl (2003).

Exempel på intressanta askor är flygaskor från förbränning av enbart stenkol och torv. Andra flygaskor från förbränning av biobränslen, som bark, pappersfibrer och annan biomassa från trä och massaindustrin har också bindande effekt vid stabilisering men bör speciellt analyseras beroende av kemiskt innehåll. Få energiverk producerar dock en homogen aska eftersom flera leverantörer och bränslen blandas beroende av tillgång och ekonomiska faktorer. I sådana fall varierar flygaskans sammansättning mer eller mindre över tiden. Flygaskor kan även ses som ett fyllmedel som kan vara ett intressant alternativ ur ekonomisk synvinkel.

Tillgång till många andra typer av askor finns också. Bottenaskor är grövre än flygaska och därför av mindre intresse. Söföförbränning ökar kraftigt och genererar stora mängder askor. Användbarheten av askor från sådana processer styrs i hög grad av miljömässiga bedömningar och långtidsbeständigheten beroende på askans kemiska innehåll.

PFBC-aska från trycksatt fluidbäddförbränning har visat sig ha intressanta egenskaper, men dessa askors långtidsstabilitet diskuteras.

### **Avsvavlingsrest**

Förbränningsprocesser är numera alltid utrustade med svavelrening som också genererar en fast rest. Sammansättningen på denna varierar beroende på reningsteknik. Halvtorra tekniker producerar en rest som kan vara blandad med aska medan svavlet till största delen har bundits till kalciumsulfit. Denna förening,  $\text{CaSO}_3$ , är mer eller mindre inert.

Våt rökgasrening genererar förutom flygaska även en relativt ren gipsprodukt, se tidigare avsnitt Gips. Produkten måste dock torkas.

### **Blandningar av bindemedel**

För jordförstärkning används ofta blandningar av olika bindemedel. Helt dominerande är blandningar kalk/cement eller cement/slagg, men även kalk/cement/gips och kalk/slagg har använts. Normalt används kalk i form av bränd kalk. Normalt används CEM II/A-LL. Jordens egenskaper, men även ekonomiska aspekter påverkar valet mellan dessa bindemedel. I kalk/cementblandningar ger kalken en upptorkning och temperaturhöjning, som förbättrar tidiga egenskaper och snabbar upp reaktionerna. I cement/slaggblandningar aktiveras slaggen av cementets  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  och ger hållfasthet.

Användning av blandningar ger ofta bättre möjlighet att anpassa bindemedlet till jordens egenskaper.

### **Tillsatsmedel med speciella effekter**

Tillsatsmedel i mindre mängder kan påverka reaktionshastigheten eller ge speciella egenskaper. Funktionsätten för några av de vanligaste tillsatsmedlen som provats i projektet stabiliserad jords egenskaper inom SD och i andra sammanhang belyses kortfattat nedan. Samtliga tillsatsmedel används i betongsammanhang där man har mer koncentrerade lösningar och därmed större effekt än i stabiliserad jord.

**Alkalisalter:** Na och K har flera lösliga salter. Vid tillsats av Na och K till bindemedlet ändras jonbalansen i porvattnet, vilket kan medföra att vissa reaktioner påverkas. Den viktigaste effekten är att pH höjs genom att hydroxidjonkoncentrationen höjs, vilket medför högre hastighet för pozzolanreaktionerna.

**Vattenglas:** Pulverformigt vattenglas kan tillsättas för att öka reaktionshastigheten i början. Vattenglas är vattenlöslig natriumsilke, som reagerar med kalciumjoner omedelbart och bildar en hård massa av kalciumnatriumsilkehydrater. Den används mest för att snabbt erhålla ett tätare material, och fungerar bäst vid låg vattenhalt. Vattenglas kan också användas för att göra leror lättflytande (Hoffstedt & Johansson, 2002).

**Kalciumklorid:** Silkereaktionerna accelereras av kalciumklorid. Effekten uppnås genom att kloridjonerna möjliggör högre kalciumhalt i porvattnet. Det innebär att stabiliseringsmedlen löses upp snabbare och bildar mer kalciumsilkehydrater.

## Kontrollmetoder för bindemedel

Speciellt för inblandningsprov i laboratorium där små materialmängder hanteras är det viktigt att försäkra sig om att det bindemedel som används i provningarna är färskt och reaktivt. Alla aktiva bindemedel utsätts av luftens och luftfuktighetens inverkan för processer som försämrar deras bindningsegenskaper. Bindningar sker helt enkelt i för tid. Det som i första hand kan hända är karbonatisering vilket innebär att materialet reagerar med luftens koldioxid och bildar en karbonatförening som inte längre är reaktiv. Det andra som kan ske är att fukt i luften upptas av materialet så att hydratationen sätter igång. Detta gäller främst hydrauliska bindemedel som cement. Kalkbaserade material hydratiseras i kontakt med fukt och är i den formen ännu reaktiva. Däremot utgör hydratiseringen ett mellansteg för karbonatiseringen och undanlättar den processen. Dessa fenomen är ytreaktioner vilket betyder att det är ett tunt yttre skikt som utsätts för reaktionerna och kvalitetsförsämringen.

Det är viktigt att säkerställa hög reaktivitet hos bindemedlet, som skall användas för stabilisering i laboratorium och i fält. Därför gäller att

1. Förvara material torrt i välfyllda och tättslutande kärl.
2. Skrapa av översta lagret om några veckor förflutet mellan inblandningarna.
3. Med någon månads mellanrum införskaffa nya färska material för provningarna

Materialegenskaperna kan testas genom att analysera släckningsreaktivitet och glödförlust. Relativa förändringar jämfört med ursprungligt prov skall studeras.

## Jordar – kemiska egenskaper

### Leror

Finkorniga aluminiumsilikater är huvudmineralet i flertalet svenska leror. Det innehåller alltså Al och Si, som kan delta i pozzolanreaktionen. De kan aktiveras med högt pH, men reaktiviteten är låg och bildningen av CASH blir långsam. Efter några månader kan man se spår av att reaktionsprodukter bildats. I leran finns joner adsorberade eller bundna och de är i jämvikt med jonerna i vattenfasen. Tillsätter man t ex kalciumjoner till vattenfasen kommer lerans natriumjoner att bytas ut mot kalciumjoner och lerans struktur att ändras. Lerans jonbyteskapacitet medför att natriumhalten ökar i vattenfasen.

### Gyttja

Ren gyttja är en organisk jord som består av sönderdelade växt- och djurrester. I denna studie användes en lerig gyttja med 10 % organiskt material. Det organiska materialets densitet är låg vilket innebär att det upptar en förhållandevis stor volym i jorden. Lerpartiklarna är alltså omgivna av organiskt material som fäster på bindemedelskornen eller hindrar bindemedlet från att komma i kontakt med lerytorna för att skapa en struktur med hållfasthet. Detta har störst betydelse när man använder osläckt kalk, som är beroende av bindning till lerpartiklarnas ytor. Det organiska materialet kan fällas ut vid högt pH och ändra fysikaliska egenskaper. Efter utfällningen kan reaktionerna starta, men det medför att man redan förbrukat en del av bindemedlet till icke-bindande reaktioner. Gyttjans vattenfas innehåller små mängder organiska alkaliföreningar.

### Torv

Torv består av växtrester som lagrats under vatten. Vid luftkontakt förmultnar växtdelarna och torven bryts ner. Torven innehåller fiber som kan bidra till hållfastheten genom armering. Däremot så finns det inget fast oorganiskt material, vilket innebär att bindemedlet måste kunna bygga upp strukturen utan hjälp från lerpartiklar. Porvattnets innehåller alkali (Na, K), men annars är jonhalterna låga. I torv förekommer humussyror, en typ av organiska vattenlösliga föreningar, som stör bindemedelsreaktionerna. Det visar sig i försenad hållfasthetsutveckling och behov av höga bindemedelshalter.

# Jordens porvatten – inverkan på kemiska reaktioner

## Allmänt

Den vetenskapliga litteraturen inom området jordvatten och kemisk markstabilisering är förhållandevis liten i omfattning (Nordbäck, 2003). Det finns inga rapporter som visar på vad i den naturliga variationen i jordvattnets sammansättning som skulle ha någon betydande inverkan på resultatet vid kemisk markstabilisering med avseende på hållfasthet. Två faktorer är dock viktiga att beakta, surhetsgrad och organiskt innehåll i jorden. Vid stabilisering av sura jordar är det viktigt att tillräckligt med bindemedel används så att pH-nivån tillåts stiga till  $> 10$  för att cementreaktionerna skall starta. Organiskt material i jorden kan ha en fördröjande effekt på cementreaktionerna utan att den slutliga hållfastheten påverkas i nämnvärd omfattning.

## Joner, löslighet och jämvikt

Ett ämnes löslighet uttrycks ofta som mg/l. I kemiska sammanhang är det vanligare att använda enheten Molar eller mol/l. En mol motsvarar vikten i gram av ämnets atomvikt. En mol Ca, som har atomvikten 40, är alltså 40 gram. En lösning som är 1 Molar (M) med avseende på  $\text{Ca}^{2+}$  innehåller alltså 40 gram Ca/l.

Ett ämne som löses i vatten förekommer som joner i lösningen. Jonerna har elektrisk laddning (ex.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  och  $\text{OH}^-$ ) och summan av positiva och negativa laddningar är 0 i lösningen. Denna summa, jonbalansen, kan användas som kontroll på om analysresultatet är rimligt i de fall man kan analysera alla jonslag i en lösning.

Löslighetsprodukten används ofta för att kvantifiera jonkoncentrationer och beskriva jämvikter mellan den fasta fasen och jonkoncentrationerna i lösningen. Löslighetsprodukten definieras som produkten av jonkoncentrationerna och betecknas  $k_s$ . För NaCl är  $k_s = [\text{Na}^+][\text{Cl}^-]$  och för  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  är  $k_s = [\text{Ca}^{2+}][\text{OH}^-]^2$ . I en lösning med många jonslag blir jämviktsberäkningarna komplexa.

För utvärderingen av porvattenanalyserna kan man för huvudkomponenterna förenkla resonemanget till att

- Na- och K- föreningar är lösliga
- Ämnen med  $\text{Cl}^-$  är lösliga
- Kalciumföreningar med  $\text{OH}^-$  och  $\text{SO}_4^{2-}$  är relativt svårlösliga.

## Sammansättning

Porvattnet kan förutom låga halter av joner, som kommer från lermineralet, innehålla andra ämnen som kan spåras till jordens ursprung.

**Klorider:** Leror från Västkusten har ofta högre halter av Cl-joner eftersom de innehåller rester av eller är i kontakt med havsvatten. Klorider har accelererande effekt på de kemiska reaktionerna för aktuella bindemedel (se tidigare avsnitt).

**Svavel:** I jordar utan lufttillträde förekommer svavel som sulfid. Vanligast är järnsulfider, men även andra former av oorganiska och organiska sulfider förekommer. Järnsulfid står i jämvikt med sulfidjoner i porvattnet. Sulfidjonerna ingår i en syrajämvikt i porvattnet och har inverkan på vattnets pH. Sulfidjoner förekommer också i höga halter i masugnsslagg och har ingen större effekt på hydratationen, men sulfidjordar har ändå visat sig vara problematiska att stabilisera. Det har då ofta varit sulfidjordar med organiskt innehåll vilket kan antas påverka förhållandena på samma sätt som för andra organiska jordar. En systematisk klassificering av sulfidjordar har påbörjats (Macsik, 2004).

**pH:** Vatten är till en viss grad sönderdelat i ”vätejoner”,  $H^+$  (egentligen hydroxyljoner,  $H_3O^+$ ) och hydroxidjoner  $OH^-$ , dessa står i jämvikt med varandra och vätejonkoncentrationen blir grunden för pH-värdet. För att kalciumbaserade bindemedel skall fungera, så krävs högt pH. Vid inblandning av bindemedlet stiger pH snabbt ( $>10$ ) och blir kvar på hög nivå under lång tid. Porvattnets ursprungliga pH har liten inverkan eftersom överskottet av hydroxidjoner från bindemedlet blir stort. Ett lågt pH i jordens eget porvatten kan istället vara en indikation på att jorden innehåller ämnen som ändrar egenskaper när pH höjs och därmed påverkar hydratationen.

### **Organiska ämnen**

Humussyror är organiska syror som bildas när växtrester bryts ner. Vissa av dessa är vattenlösliga. När man tillsätter bindemedel så faller Ca – salterna av dessa ut (Kujala, 1996). Det innebär att en del av bindemedlet förbrukas och att det utfällda materialet, humaterna, blockerar kornens ytor. Bindemedelshalten måste höjas och man får en långsammare hållfasthetsutveckling.



# Laboratorieförsök

## Material

I SD-projekten inom Stabiliserad jords egenskaper ingår tre jordar i de flesta provningarna: En sötvattenlera från Linköping, en saltvattenlera från Löftabro på västkusten och en gyttja från Holma Mosse, Vikbolandet på ostkusten. Jordarna är beskrivna av Johansson,(2000) och av Åhnberg m.fl.(2003).

Tabell 1. Jordarnas egenskaper. Från Åhnberg m fl 2003.

	Linköping clay 1	Löftabro clay 2	Holma Mosse gyttja 1
Depth: m	3–6	2–5	3–5
Density: t/m <sup>3</sup>	1.55	1.52	1.23
Specific gravity: t/m <sup>3</sup>	2.72	2.73	2.36
Plastic limit: %	24	23	64
Water content: %	78	89	220
Liquid limit: %	70	66	170
Undrained shear strength <sup>†</sup> : kPa	15	8	5
Sensitivity	20	25	10
Organic content: %	1.0	1.0	10.3
Chloride content: %	0.01	0.38	<0.01
Carbonate content: %	1.1/1.0 (CaCO <sub>3</sub> /MgCO <sub>3</sub> )	8.4/<0.5	0.6
Sulphide content: %	0.05	0.18	0.2
pH	7.6	8.7	8.5
Clay content: %	63	72	80

<sup>†</sup> Determined by fall-cone tests.

Bindemedlen som valdes för försöken var cement, bränd kalk, 50/50 blandningar av cement/granulerad masugnsslagg och cement/bränd kalk samt enbart granulerad masugnsslagg. Cementen var en CEM II/A-LL 42,5 (Byggcement), kalken var en finmald bränd kalk från Köping och slaggen var en granulerad mald masugnsslagg från Oxelösund (Merit 5000).

Bindemedelshalterna för denna undersökning valdes till 100 kg/m<sup>3</sup>. Provblandningarna tillverkades enligt standardiserad metod för hållfasthetsprovning (Carlsten, 2000) och packades i cylindrar med 5 cm diameter och höjden 5 cm och förseglades med plastfolie. Provkropparna lagrades vid 20°C i fuktrum.

## Metoder

**Jordar:** Fukthalten bestämdes genom torkning vid 105°C. Huvudkomponenterna analyserades på glödgat prov (950°C) med röntgenfluorescense. Vattenlösliga klorider bestämdes med titrering. BET-ytan, som är ett mått på verklig tillgänglig yta, bestämdes genom kväveadsorption. Kompaktdensiteten bestämdes i luftpyknometer. Dessutom gjordes röntgendiffraktogram på jordarna. Porvatten från centrifugerade prover analyserades med flamspektrometer, ICP.

**Bindemedel:** Kemiska och fysikaliska analyser på bindemedlen utfördes vilka har redovisats av Åhnberg mfl (2003). Provkroppar av bindemedel och vatten tillverkades och porvattnet pressades ut och analyserades.

**Stabiliserat material:** För utpressning av porvattnet användes ett pressverktyg, som bestod av en stålcylander med innerdiametern 47 mm och höjden 100 mm och en tillhörande kolv. Provmaterialet placerades i pressverktyget som placerades i en tryckpress. Cyindern var försedd med ett hål i botten och utpressat porvatten samlades upp i ett provrör. Utpressad mängd var 2-10 ml beroende på material och ålder. Vätskan titrerades omedelbart med syra för att bestämma OH<sup>-</sup> - koncentrationen. Grundämnesanalysen gjordes med ICP.

## Resultat

### Jordar

Resultat av kemisk analys samt densitet och specifik yta hos jordarna redovisas i Tabell 2.

Tabell 2. Resultat av kemisk analys av försöksjordar. Från Åhnberg m fl 2003.

Jordar	CaO %	SiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %	K <sub>2</sub> O %	Na <sub>2</sub> O %	SO <sub>3</sub> %	Glöf 950°C %	Summa %	Cl %	Fukt 105°C %	Densitet kg/m <sup>3</sup>	BET- yta m <sup>2</sup> / kg
Linköping clay 1	1,75	66,5	16,1	7,23	2,48	4,34	1,82	0,23	6,15	106,58	0,0030	40,4	2670	16200
Holma Mosse gyttja 1	1,47	56,9	14,1	6,56	2,59	3,68	1,64	1,80	14,8	103,57	0,1260	65,3	2370	23100
Löftabro clay 2	4,62	59,2	16,2	7,27	2,79	4,54	2,17	1,17	4,06	102,02	0,4340	43,4	2690	15600

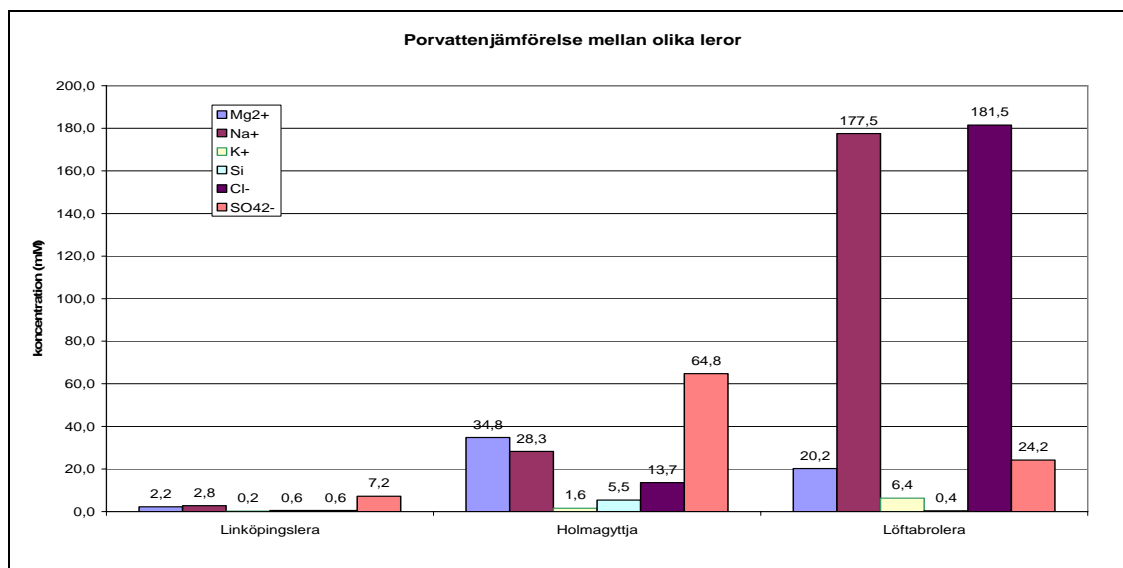
Glödförlusten (Glöf) anger hur mycket organiskt material, karbonat och vatten som finns i jorden. Provet torkats vid 105°C och glöddgas därefter i ugn vid 950°C. Viktförlusten mellan 105°C och 950°C anges som gödförlust.

Svavel är uttryckt som SO<sub>3</sub> och skall multipliceras med 0,4 för att ge värdet som S.

Summorna visar en viss osäkerhet i analysen, men eftersom det är skillnaden mellan jordarna som är intressant, så har värdena inte normaliserats till 100 %. Fukten är uttryckt som procent av ursprungligt prov. Den lägre korndensiteten för Holma gyttja beror på innehållet av organiskt material. BET-ytan är större för Holma gyttjan vilket dels kan bero på att lerpartiklarna är mindre, men mera troligt är det att växtmaterialets yta spelar in.

Röntgendiffraktogrammen, se Bilaga 1, Figur B1–B3 visar att det dominerande lermineralet är illit.

Innehållet av lösta ämnen i jordarnas porvatten visas i Figur 1.

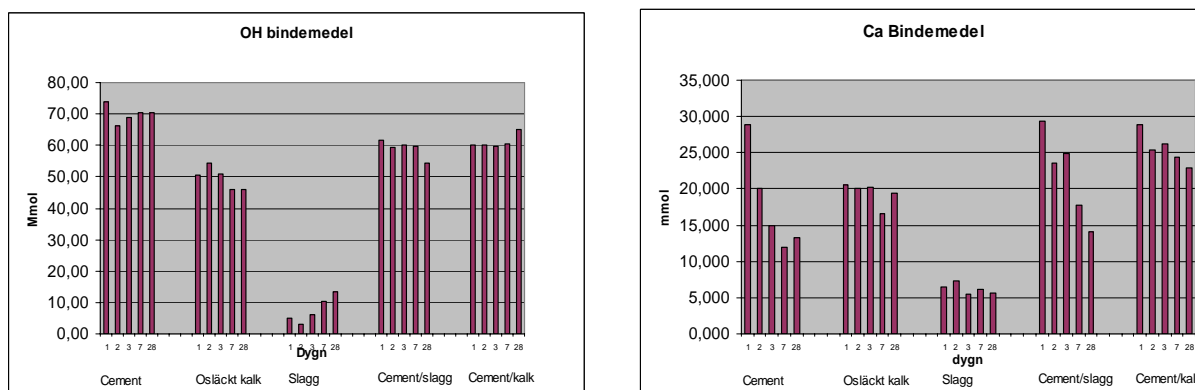


Figur 1. Jonhalter i jordarnas porvatten.

Linköpingsleran innehåller mycket låga halter av lösta ämnen, vilket är typiskt för en sötvattenlera. Löftabrolerans vattenfas innehåller NaCl och MgSO<sub>4</sub> vilket också är dominerande salter i havsvatten. Holmgyttja ger intryck av att innehålla rester av havsvatten. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-halten är dock förhållandevis hög och kan bero på att sulfider oxiderats och bildat lösliga sulfater.

### Stabiliseringsmedel

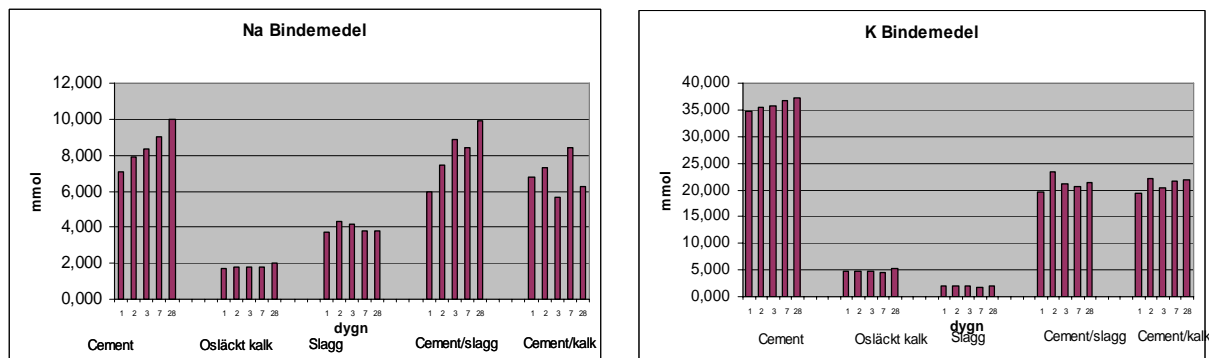
Analys av porvatten för de rena bindemedlen ger en uppfattning om vad som är normala jonkoncentrationer vid hydratationen. Om halterna och förhållandet mellan olika joner förändras när bindemedlet blandas med jord, kan det vara ett tecken på att reaktionerna störs av jordens porvatten. Bindemedel och vatten blandades i förhållandet vatten/bindemedel = 6. Detta vbt motsvarar förhållandena i typiska leror om allt vatten är tillgängligt för reaktion. Porvattenanalyser efter olika tider redovisas i Figur 2–4 och samtliga värden finns i Bilaga 2.



Figur 2. OH- resp Ca-koncentration i bindemedlens porvatten.

Cement visar högre OH-koncentration än osläckt kalk. Det beror på att cement innehåller högre halter Na och K, vilket ger högre OH på grund av högre löslighet. OH-koncentrationen för slagg ökar med tiden vilket tyder på att hydratationen startat. Man kan för bindemedlen också se att OH-koncentrationen är fortsatt höga över tid, vilket är en förutsättning för bildning av CSH och CASH.

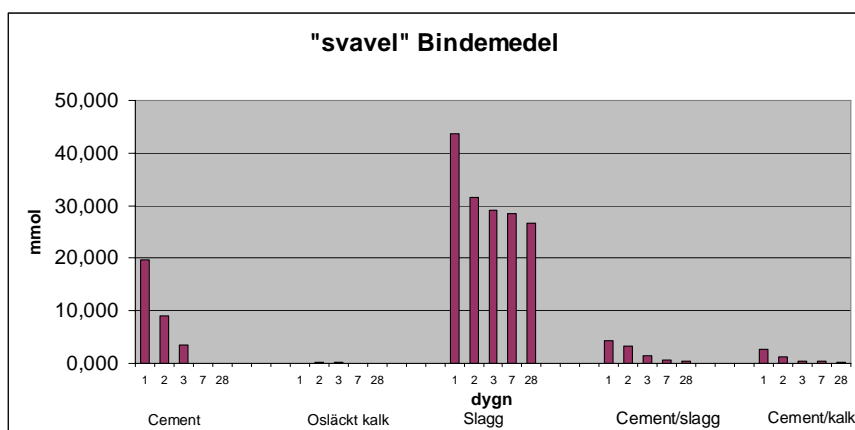
För osläckt kalk bestämmer jämvikten för  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  koncentrationerna för Ca och OH. Inga förändringar bör ske över tid. Cementens Na och K höjer OH koncentrationen vilket också påverkar löslighetsjämvikten för Ca, som förskjuts mot lägre Ca-konc. Efterhand som cementen reagerar, så binds Ca i svårslösliga mineral och koncentrationen minskar. Koncentrationen för kombinationen cement/slagg ger ungefär samma nivåer, som för rent cement, medan cement/kalk-blandningen får högre värden eftersom det finns stort överskott på Ca.



Figur 3. Na- och K koncentrationer i bindemedlens porvatten.

Na och K ingår i föreningar, som som är helt lösliga vid  $\text{pH} = 6$ . Koncentrationerna kommer då att ändras i proportion till mängden av olika delkomponenter i bindemedlet. Detta återspeglas i figurerna ovan. Na och K kommer till största del att vara löst i porvattnet under hela hydratationsförloppet.

Svavel finns som sulfid och sulfat i porlösningen. I osläckt kalk och byggcement förekommer svavel som sulfater och i slagg som sulfider. Analysmetoden ger summan av sulfater och sulfider i porvattnet. Vid ändring av pH till nivåer som finns i blandningar med kalk och cement minskar lösligheten för sulfiderna och koncentrationen bestäms i huvudsak av sulfathalten i cementet. Effekten av pH kan ses för ren slagg där svavelhalten i lösningen minskar då pH stiger. Minskningen av sulfathalten i porlösningen med cement orsakas i huvudsak av att gips,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , faller ut som kristaller och därmed förbrukar sulfaten.

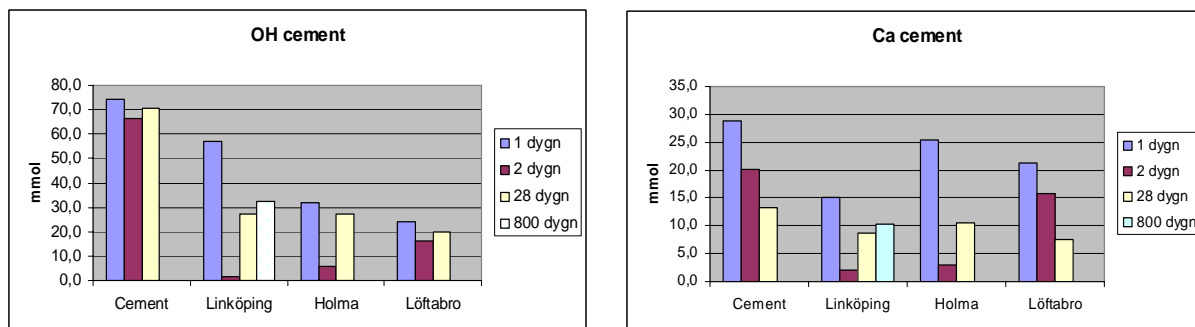


Figur 4. Total svavel, som sulfat, i bindemedlens porvatten.

### Stabiliserat material

Resultaten från undersökningarna av utpressat porvatten ur stabiliserat material finns i Figur 5–17 och kommentarerna koncentreras till huvudkomponenterna OH, Ca, Na, K och "sulfat". Övriga joners inverkan behandlas i texten och samtliga analysvärden finns i bilaga 3. Utvärderingen koncentreras till 1 och 28 dygnresultaten.

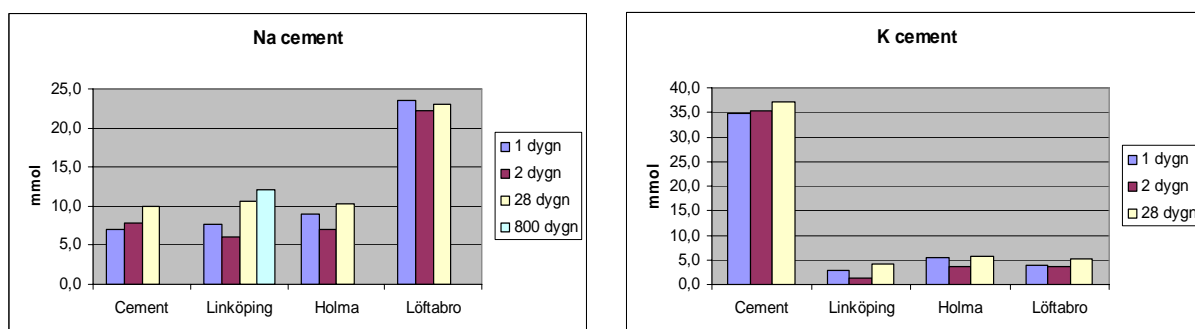
## Cement



Figur 5. OH- och Ca-koncentrationer i porvatten hos jordar stabiliserade med cement.

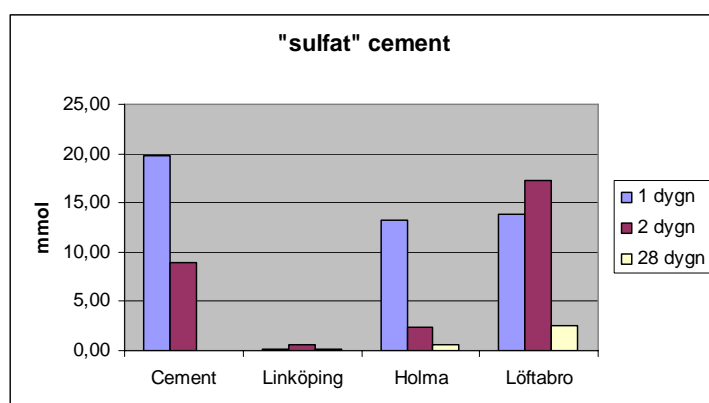
Porvattnet i ursprunglig Linköpingslera innehåller mycket låga koncentrationer av alla joner. Den höga koncentrationen av OH efter 1 dygn kan bero på att andra negativa joner saknas. Efter 28 dygn, så har OH-halterna för jordarna stabiliserats kring 20 mmol/l, vilket motsvarar pH ca 12,3. Det innebär rätt miljö för fortsatta pozzolanreaktioner.

Ca-halterna efter 28 dygn är i samma storleksordning som för cement, vilket innebär att det finns tillräckligt med Ca för att reaktionerna skall fortsätta och en indikation på att systemet är stabilt. Något lägre Ca-halt i porvattnet hos Löftabrolera kan förklaras av Mg som är konkurrerande positiv jon.



Figur 6. Na- och K-koncentrationer i porvatten hos jordar stabiliserade med cement.

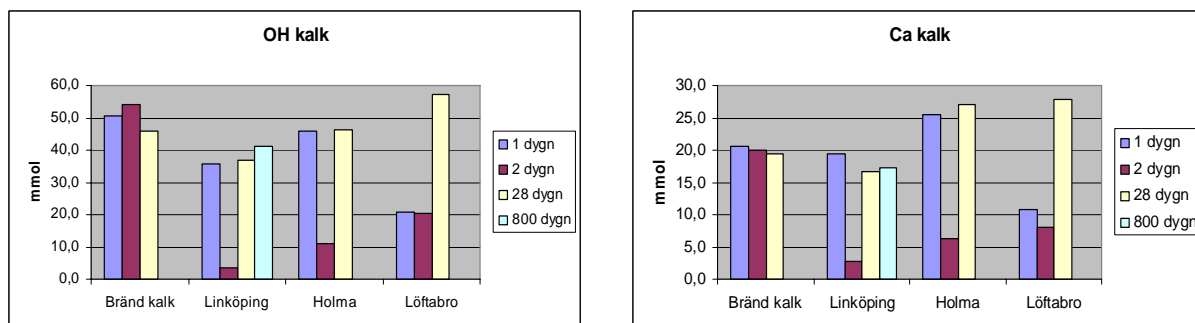
Na kommer från cementet, ev. havsvattnet och jonbyte i leran och K kommer från cementet. Eftersom Na och K föreningar är lättlösliga, så innebär det att K diagrammet visar förhållandet mellan koncentrationen i stabiliserade jorden och det vbt, som valts som referens. Det innebär att förväntad Na konc. skulle vara ca 1 mmol/l. Na-diagrammet visar för Linköping- och Holma- jordarna att ett jonbyte skett. Den höga koncentrationen för Löftabromaterialet beror på Na i lerans havsvatten.



Figur 7. Total svavel, som sulfat, i porvatten hos jordar stabiliserade med cement.

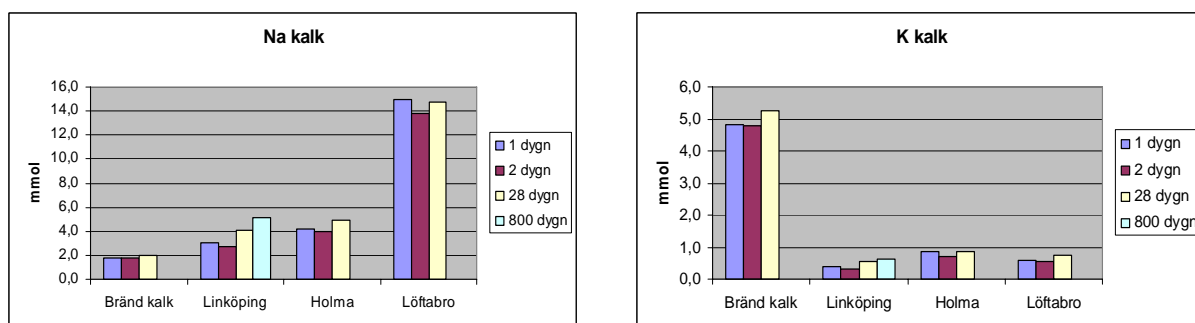
Holma och Löftabrojordarna innehåller ”sulfater” i porvattnet. Efterhand som Ca går ut i lösning, så fälls gips ut och halten minskar därmed.

### Bränd kalk



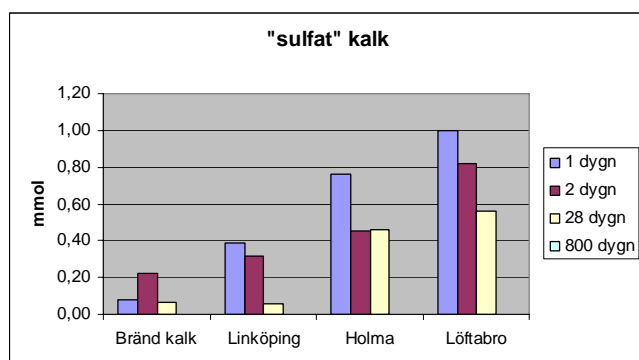
Figur 8. OH- och Ca-koncentrationer i porvatten hos jordar stabiliserade med bränd kalk.

Den brända kalken tillför Ca och OH joner till porvattnet och staplarna för bränd kalk i diagram 8 visar i princip halterna för en mättad lösning. Koncentrationerna efter 28 dygn visar att porvattnet fortfarande är mättat med avseende på kalciumhydroxid. Analys efter 800 dygn på Linköpingsleran visar oförändrade halter. Högre halter för Holma och Löftabro beror på att det finns andra joner som höjer Ca:s löslighet, som exempelvis Cl-joner.



Figur 9. Na- och K-koncentrationer i porvatten hos jordar stabiliserade med bränd kalk.

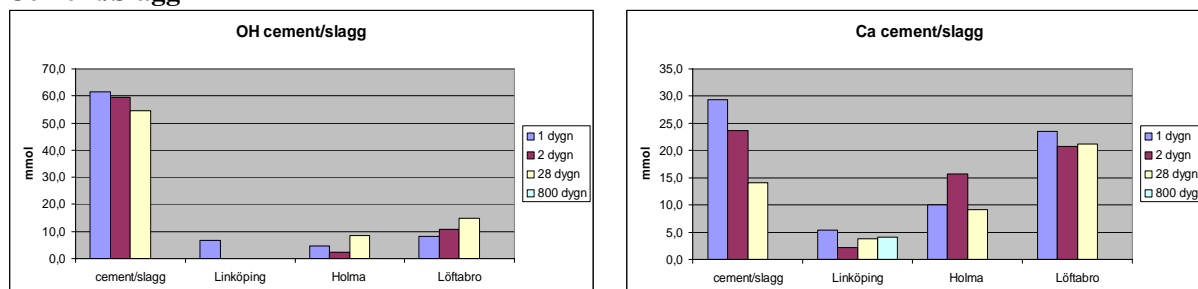
Linköpingsleran och Holma gyttnar visar förhöjda värden jämfört med ren kalk. Det innebär att jonbyte skett. Löftabrovärdet bestäms av Na i lerans havsvatten. K-halterna är låga och i stort sett lika i jordarna och på oförändrad nivå över tid.



Figur 10. Total svavel, som ”sulfat”, i porvatten hos jordar stabiliserade med bränd kalk.

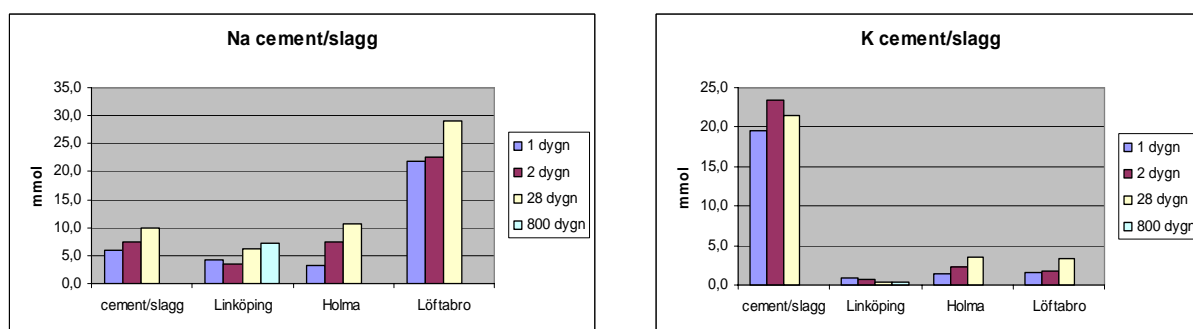
Halterna av löslig ”sulfat” är mycket låga jämfört med halterna för cementstabiliserat material. Diagrammet visar att koncentrationen sjunker med tiden eftersom löslig sulfat fälls med kalk.

## Cement/Slagg



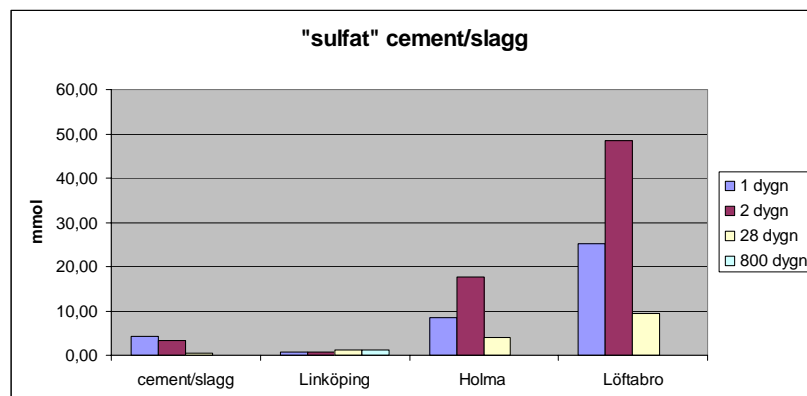
Figur 11. OH- och Ca-koncentrationer i porvatten hos jordar stabiliserade med cement/ slagg blandning.

En blandning av cement och slagg ger generellt en lägre OH koncentration än cement eller kalk. Det kan bero på att OH förbrukas av slaggen. Halterna (10 mmol) motsvarar ett pH på ca 12 vilket möjliggör fortsatt pozzolanreaktion. Ca halten är jämn över tid.



Figur 12. Na- och K-koncentrationer i porvatten hos jordar stabiliserade med cement/ slagg blandning.

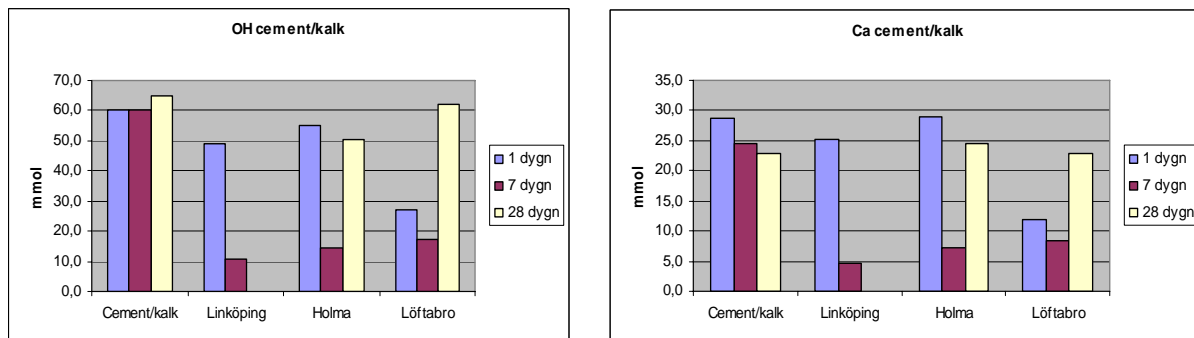
Na- och K-koncentrationerna följer samma mönster som tidigare. Något tydligt tecken på jonbyte finns däremot inte för Löftabro och Holma materialen.



Figur 13. Total svavel, som "sulfat", i porvatten hos jordar stabiliserade med cement/ slagg blandning.

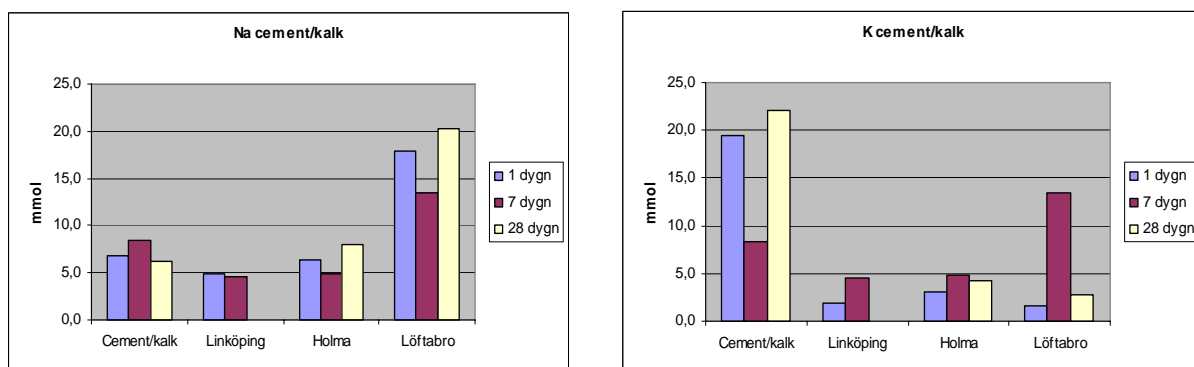
Slagg och vatten ger höga svavelhalter i form av sulfider i porlösningen (se Figur 4), men när slaggen blandas med cement, så stiger pH och sulfidens löslighet sjunker kraftigt. Cementens sulfater reagerar samtidigt med slaggen. Om man utgår från jordarnas "sulfat"-analyser, så verkar det vara innehållet av "sulfater" i jorden, som bestämmer nivån på lång tid. Någon förklaring till detta har inte hittats.

## Cement/kalk



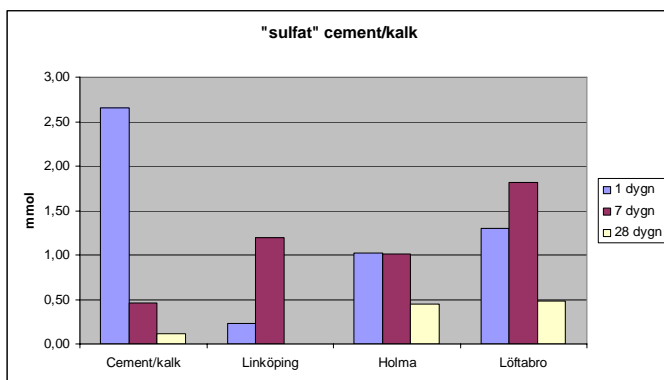
Figur 14. OH- och Ca-koncentrationer i porvatten hos jordar stabiliserade med cement/ kalk blandning.

En blandning av cement och bränd kalk ger höga OH-halter och höga Ca-halter. OH-halten förhöjs av alkali från cementet och kalken ger ett överskott på Ca. Förändringen över tid är liten.



Figur 15. Na- och K-koncentrationer i porvatten hos jordar stabiliserade med cement/ kalk blandning.

Ingen tendens till jonbyte för Linköping och Holma, vilket kan bero på att Na-halten är för hög i porvattnet.



Figur 16. Total svavel, som "sulfat", i porvatten hos jordar stabiliserade med cement/ kalk blandning.

Mängden löst svavel minskar med tiden och det beror på att den förbrukas i reaktioner och utfällningar.



## Diskussion och slutsatser

Syftet med denna undersökning var att ta reda på om porvattenanalys var en möjlig kompletterande metod för att bestämma lämpliga kombinationer av jord och bindemedel. I denna studie har 3 jordar undersökts. En av jordarna var en gyttja från Holma Mosse med vattenkvoten 220 % och de andra var leror med 78 och 89 % vattenkvot, en från Linköping på ostkusten (sötvattenlera) och en från Löftabro på västkusten (saltvattenlera). Det är känt att vattenkvoten har stor betydelse för hållfastheten vid samma bindemedelshalt (Åhnberg m.fl. 1995), vilket stämmer väl överens med betong där samma typ av bindemedel används.

Av Tabell 3 framgår att den stabiliserade gyttjan från Holma Mosse överlag ger den högsta hållfastheten för samtliga provade bindemedel. Gyttjan innehåller dessutom 10,3 % organiskt material vilket också borde ha en negativ inverkan.

Tabell 3. Ungefärlig tryckhållfasthet i kPa efter 28 dygn vid 100 kg bindemedel/m<sup>3</sup> [Åhnberg m.f., 2003].

Bindemedel	Linköping lera	Holma Mosse gyttja	Löftabro lera
Cement	500	500	500
Bränd kalk	50	–	120
Cement/slagg	610	800	400
Cement/bränd kalk	250	380	280

Om man jämför Ca och OH koncentrationer i porvattnet, se bilaga 3, så är värdena för Linköpingleran generellt något lägre. Det kan dock inte utläsas i tabell 3 att det skulle ha någon betydelse efter 28 dygn. Troligen är pozzolanreaktionen av liten betydelse eftersom tiden är kort. De låga hållfastheterna för kalk tyder också på detta.

Cement/slagg-blandningen ger ett porvatten med låg OH- och hög Ca- koncentration. Denna bindemedelskombination innebär att slaggen reagerar med kalciumhydroxiden som bildas när cementen reagerar och att det totalt bildas en stor volym av hydratationsprodukter, som ger hållfastheten.

Eftersom det inte går att skilja olika svavelmodifikationer i denna undersökning blir utvärderingen av ”sulfaternas” inverkan osäker. Vid höga pH kan man utgå ifrån att svavel i porlösningen förekommer som sulfater i dessa system. Störst inverkan har detta för saltvattenleran från Löftabro eftersom havsvatten har hög sulfathalt.

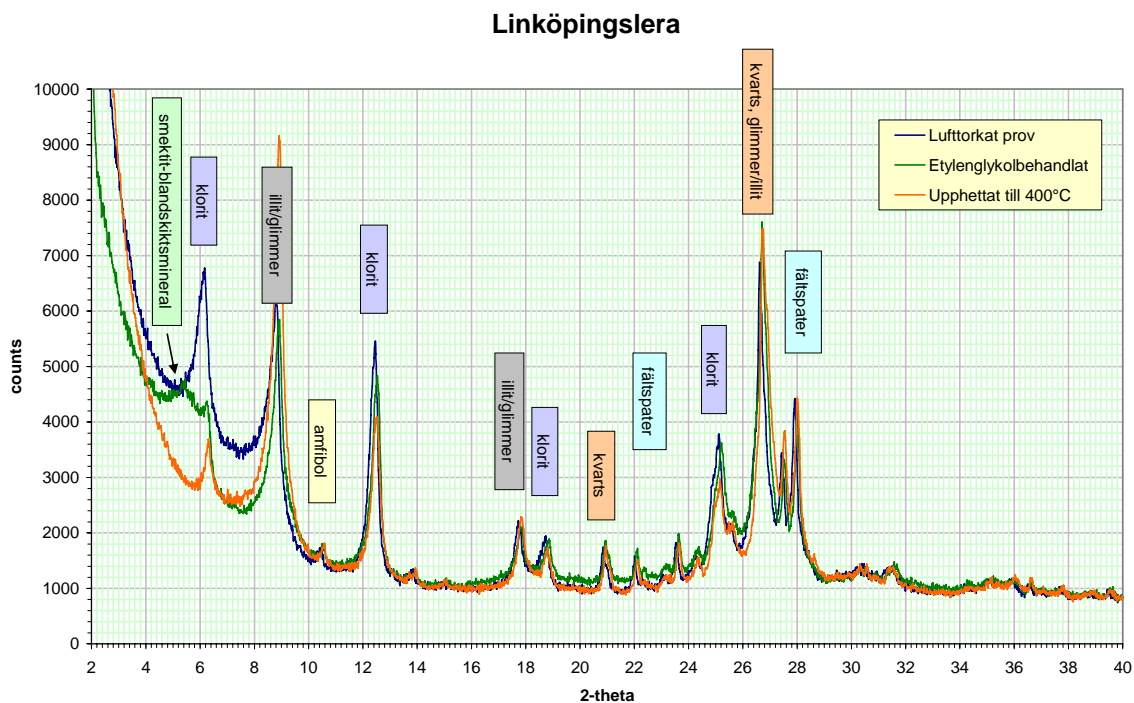
Undersökningen har visat att porvattnets sammansättning har betydelse för jonkoncentrationerna i det stabiliserade materialets porvatten. Bindemedlets sammansättning påverkar dock mest.

Det är inte möjligt att från detta begränsade urval av jordar att skapa bedömningskriterier för lämpligheten för olika kombinationer jord-bindemedel. Skillnaden i porvattnets sammansättning kan förklaras med komponenternas kemiska egenskaper. Slutsatserna från denna undersökning begränsas av att hållfasthetsnivåerna är för lika och att provningsunderlaget är alltför begränsat.

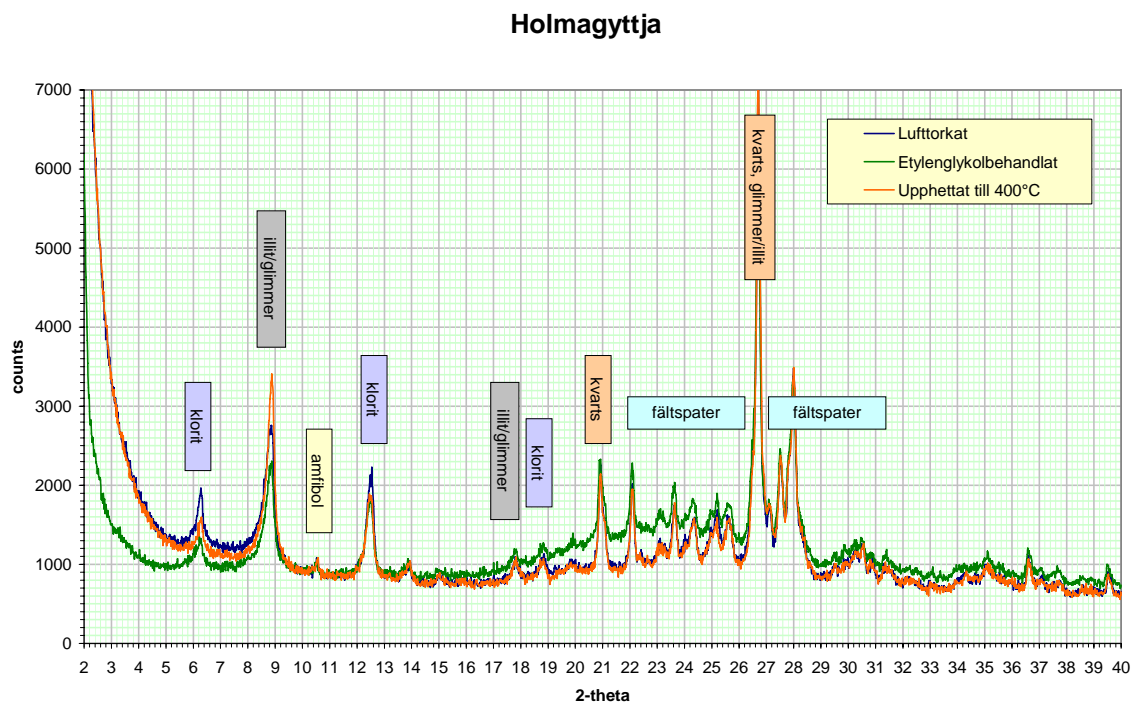
För att kunna bedöma användbarheten av porvattenanalys för identifiering av lämpliga bindemedel i aktuella jordar, måste fler jordar med sinsemellan avvikande beteende studeras.

## Referenser

- Andersson, M. & Norrman, T. (2004).** Stabilisering av sulfidjord. Examensarbete, 2004:126 CIV, Luleå tekniska universitet.
- Boynton, R.S. (1980).** Chemistry and Technology of Lime and Limestone. John Wiley & sons.
- Buchwald, A., Kaps, Ch. & Hohmann, M. (2003).** Alkali-activated binders and pozzolan cement binders – Compete binder reaction or two side of the same story? Preceedings of the 11<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, pp. 1238-1247.
- Carlsten, P. (2000).** Kalk- och kalkcementpelare. Rapport 2:2000, Svenska Geotekniska Föreningen, Linköping.
- EuroSoilStab, Design Guide. (2000).** Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils. Design Guide Soft Soil Stabilisation. CT97-0351, Project No: BE 96-3177.
- Hoffstedt, M. & Johansson, S-E. (2002).** Peptisering vid djupstabilisering. Arbetsrapport 24, Svensk Djupstabilisering, Linköping.
- Holm, G., Tränk, R. & Ekström, A. (1987).** Kalkpelare med gips som tillsatsmedel. Rapport No 30, Statens geotekniska institut, Linköping.
- Huttunen, E & Kujala, K. (1996).** On the stabilization of organic soils. Grouting and deep mixing. Proceedings of The second international conference on ground impovement geosystems, Tokyo 1996, pp. 411-414.
- Janz, M. & Johansson, S-E. (2001).** Olika bindemedels funktion vid djupstabilisering. Rapport 9, Svensk Djupstabilisering, Linköping.
- Johansson, L.O. (2000).** Djupstabilisering med kalk-cementpelare – Provfält. Arbetsrapport 15, Svensk Djupstabilisering, Linköping.
- Macsik, J. (2003).** Bedömning av sulfidjord – Stabiliseringseffekt vs typ av sulfidjord,. Internrapport, Scandiakonsult, Sundsvall.
- Nordbäck, J. (2003).** Jordvattnets sammansättning och dess inverkan på kemisk markstabilisering – Litteraturöversikt. Statens geotekniska institut, diariennr 2-0211-0670, projektnr:11398.
- Åhnberg, H., Johansson, S-E., Pihl, H. & Carlsson, T. (2003).** Stabilising effects of different binders in some swedish soils. Ground Improvement, 7, No. 1, 9-23.
- Åhnberg, H., Johansson, S-E., Retelius, A., Ljungkrantz, C., Holmqvist, L. & Holm, G. (1995).** Cement och kalk för djupstabilisering av jord . Rapport No 48, Statens geotekniska institut, Linköping.

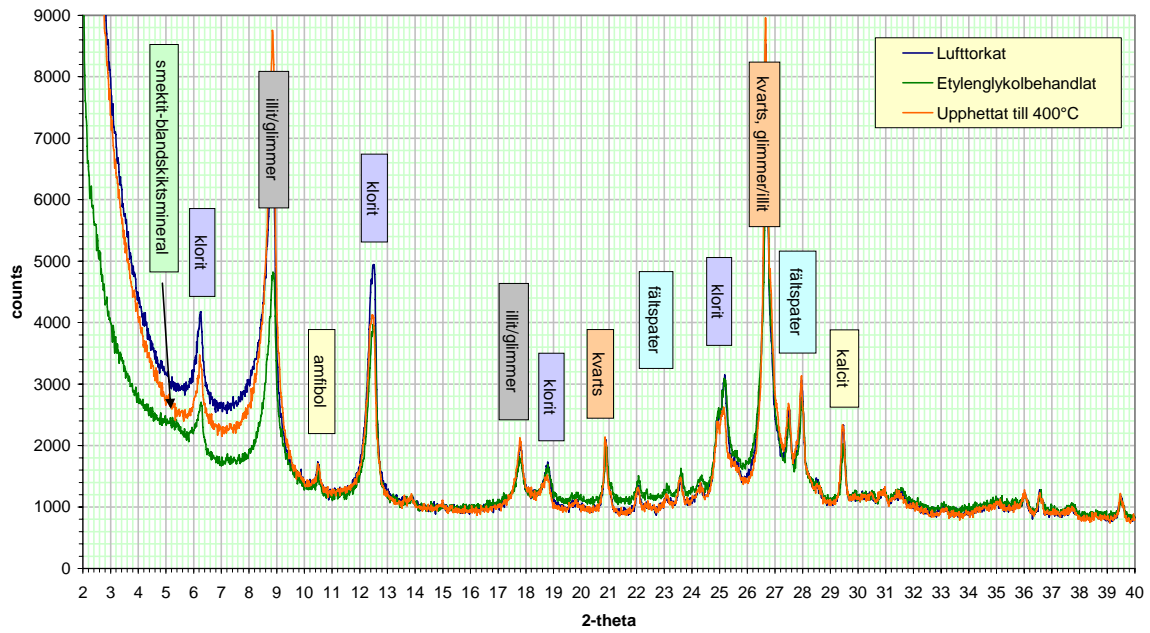


Figur B1 Bilaga 1.



Figur B2 Bilaga 1.

## Löftabrolera



Figur B3 Bilaga 1.

**Bilaga 2**

Porvattenanalys för bindemedel, koncentration (mM).

**CEMENT**

tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>
1 dygn	74,0	28,8	7,1	34,8	19,74
2	66,2	20,1	7,9	35,4	8,92
3	68,8	15,0	8,3	35,6	3,46
7	70,4	11,9	9,0	36,8	0,06
28	70,6	13,3	10,0	37,2	0,06

**BRÄND KALK**

tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>
1 dygn	50,4	20,6	1,7	4,8	0,08
2	54,2	20,1	1,8	4,8	0,22
3	51,0	20,2	1,8	4,9	0,17
7	45,8	16,5	1,8	4,5	0,06
28	45,8	19,4	2,0	5,2	0,06

**SLAGG**

tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>
1 dygn	5,0	6,5	3,8	1,9	43,7
2	3,0	7,2	4,3	2,1	31,5
3	6,2	5,5	4,2	2,0	29,2
7	10,2	6,2	3,8	1,9	28,4
28	13,3	5,6	3,8	2,0	26,6

**CEMENT/SLAGG**

tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>
1 dygn	61,6	29,4	6,0	19,5	4,23
2	59,4	23,6	7,5	23,4	3,23
3	60,2	24,8	8,9	21,2	1,35
7	59,6	17,8	8,4	20,6	0,56
28	54,5	14,1	9,9	21,4	0,37

**BRÄND KALK/CEMENT**

tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>
1 dygn	60,0	28,8	6,8	19,4	2,65
2	60,2	25,3	7,3	22,1	1,29
3	59,8	26,2	5,7	20,3	0,45
7	60,4	24,4	8,4	21,6	0,46
28	64,9	22,9	6,3	22,0	0,12

## Porvattenanalys för stabiliserat material, koncentrationer (mM).

Material	Tid dygn	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
<b>Linköpingslera</b>	0	0							
Linköping+slagg 1d	1	0	8,52	3,35	4,46	0,61	0,24	1,69	11,81
2d	2	0	8,90	3,76	5,02	0,45	0,24	2,58	13,91
7d	7	0	8,81	2,41	4,96	0,40	0,39	2,37	12,13
28d	28	0	16,16	0,82	11,22	0,68	0,86	8,50	8,98
<b>800d</b>	<b>800</b>	<b>0,52</b>	<b>21,30</b>	<b>0,53</b>	<b>13,21</b>	<b>0,63</b>	<b>0,91</b>	<b>9,30</b>	<b>7,50</b>
(0,53kg+33g slagg invägt)									
	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Linköping+cem/slagg 1d	1	6,63	5,41	0,00	4,21	0,92	0,20	2,34	0,62
2d	2	0	2,19	0,38	3,53	0,65	0,16	3,17	0,79
7d	7	0	0,64	0,10	1,15	0,20	0,08	3,06	0,60
28d	28	0	3,82	0,72	6,11	0,38	0,65	6,47	1,11
<b>800d</b>	<b>800</b>	<b>0,13</b>	<b>4,12</b>	<b>0,86</b>	<b>7,20</b>	<b>0,31</b>	<b>0,51</b>	<b>7,12</b>	<b>1,23</b>
(0,53kg+16,5gslagg16,5g cem)									
	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Linköping+cem/kalk 1d	1	48,96	25,22	0,00	4,89	1,92	0,04	0,99	0,24
2d	2								
7d	7	10,7	4,71	0,06	4,55	1,35	0,11	1,47	1,19
28d	28								
(0,53kg+16,5gcem16,5g kalk)									
	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Linköping+Kalk1d	1	35,7	19,41	0,00	3,06	0,41	0,04	0,41	0,39
2d	2	3,53	2,70	0,13	2,74	0,33	0,10	1,31	0,32
7d	7	8,16	4,79	0,03	2,63	0,35	0,10	1,18	1,49
28d	28	36,89	16,72	0,00	4,05	0,53	0,18	0,97	0,06
<b>800d</b>	<b>800</b>	<b>41,32</b>	<b>17,25</b>	<b>0,15</b>	<b>5,08</b>	<b>0,62</b>	<b>0,12</b>	<b>1,12</b>	<b>0,13</b>
0,53kg+33,0g kalk									
	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Linköping+cem 1d	1	57,1	15,16	0,01	7,70	2,89	0,11	1,41	0,11
2d	2	1,76	2,04	0,34	6,00	1,35	0,12	3,40	0,55
7d	7	42,8	4,25	0,01	2,60	1,37	0,03	0,54	0,44
28d	28	27,37	8,75	0,10	10,60	4,22	0,28	0,69	0,14
<b>800d</b>	<b>800</b>	<b>32,57</b>	<b>10,23</b>	<b>0,21</b>	<b>12,14</b>	<b>5,03</b>	<b>0,18</b>	<b>0,54</b>	<b>0,13</b>
(0,53kg+33g cem invägt)									
	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
<b>Holmagyttja</b>	0	0							
Holma+slagg 1d	1	0	23,47	23,18	8,95	1,63	0,31	2,90	51,02
2d	2	0	21,81	28,18	9,79	1,42	0,29	2,55	56,88
7d	7	0	20,53	23,47	8,01	1,18	0,30	2,21	48,16
28d	28	0	20,50	28,85	10,55	1,45	0,47	2,74	17,08
(0,46kg+33g slagg invägt)									
	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Holma+cem/slagg 1d	1	4,59	10,03	0,01	3,27	1,35	0,11	1,77	8,58
2d	2	2,36	15,63	0,30	7,43	2,31	0,24	2,83	17,60
7d	7	2,55	8,55	0,24	6,56	1,86	0,36	3,31	10,36
28d	28	8,33	9,08	0,08	10,66	3,56	0,48	4,74	4,00

(0,46kg+16,5g slagg 16,5gcem invägt)

	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Holma+cem/Kalk 1d	1	55,10	28,94	0,00	6,34	3,06	0,03	1,77	1,02
2d	2	8,95	4,17	0,11	5,64	2,37	0,08	2,83	0,62
7d	7	14,30	7,14	0,05	4,82	2,16	0,09	2,47	1,01
28d	28	50,58	24,53	0,06	7,99	4,24	0,05	1,70	0,45

(0,46kg+16,5g kalk16,5g cem invägt)

	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Holma+Kalk1d	1	45,90	25,53	0,00	4,15	0,87	0,02	1,30	0,76
2d	2	10,80	6,21	0,04	3,95	0,71	0,05	2,21	0,46
7d	7	10,70	6,55	0,10	3,20	0,66	0,06	2,14	1,00
28d	28	46,41	27,03	0,00	4,95	0,88	0,09	1,61	0,46

(0,46kg+33g Kalk invägt)

	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Holma+cem 1d	1	32,10	25,38	0,00	8,96	5,48	0,05	2,11	13,18
2d	2	5,89	2,93	0,27	7,05	3,60	0,10	3,43	2,43
7d	7	10,20	1,03	0,05	1,54	0,81	0,04	3,62	0,53
28d	28	27,37	10,56	0,05	10,34	5,70	0,17	2,36	0,57

	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
<b>Löftabrolera</b>	0	0							
Löftabro+slagg 1d	1	0,00	22,78	42,76	33,15	1,63	0,30	16,50	77,30
2d	2	0,00	18,59	49,64	32,83	1,56	0,30	16,88	81,45
7d	7	0,00	19,13	42,86	30,05	1,35	0,33	17,77	65,66
28d	28	0,00	20,03	52,11	37,17	1,54	0,48	17,40	26,11

(0,41 kg+33gslagg invägt)

	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Löftabro+cem/slagg 1d	1	8,16	23,47	0,26	21,73	1,56	0,22	16,30	25,20
2d	2	10,80	20,75	0,28	22,68	1,68	0,24	18,69	48,48
7d	7	7,65	17,75	0,41	22,03	2,37	0,39	19,20	22,03
28d	28	14,88	21,22	0,53	29,13	3,26	0,75	21,37	9,30

	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Löftabro+cem/Kalk 1d	1	27,00	11,83	0,01	17,97	1,66	0,07	16,50	1,30
2d	2	23,10	6,28	0,02	17,09	1,61	0,05	15,85	0,63
7d	7	17,30	8,30	0,06	13,50	1,33	0,08	16,45	1,82
28d	28	61,88	22,91	0,00	20,32	2,73	0,06	14,54	0,48

	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Löftabro+Kalk 1d	1	20,90	10,87	0,05	15,00	0,60	0,14	15,10	1,00
2d	2	20,50	8,02	0,05	13,83	0,57	0,06	16,42	0,82
7d	7	13,30	8,37	0,22	11,38	0,45	0,10	17,35	1,68
28d	28	57,12	27,94	0,00	14,71	0,76	0,11	14,91	0,56

Material	tid	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Löftabro+cem 1d	1	24,00	21,28	0,01	23,47	3,92	0,09	17,91	13,82
2d	2	16,30	15,78	0,30	22,30	3,54	0,08	17,83	17,29
7d	7	13,30	4,66	0,37	21,20	3,23	0,24	18,41	1,93
28d	28	19,64	7,51	0,00	23,11	5,09	0,66	17,19	2,55

# Publikationer utgivna av Svensk Djupstabilisering

## Arbetsrapport

- 1. Arlandabanan, Norra Böjen. Sättningar hos järnvägsbank på kc-pelare (1998)**  
Ulf Stjerngren
- 2. KC-förstärkning för schakt inom spont, Filipstad Brygge, Oslo (1998)**  
Phung Doc Long & Håkan Bredenberg
- 3. Inblandningsmekanismer vid djupstabilisering med kalk-, kalk/cementpelare och cementpelare (1998)**  
Stefan Larsson
- 4. Undersökning av KC-pelare med avseende på dess "homogenitet" (1998)**  
Roland Tränk
- 5. Bestämning av egenskaper i cellstabiliserad torv (1998)**  
Nenad Jelusic, Torbjörn Edstam & Yvonne Rogbeck
- 6. Rörelser och portryck vid kalkpelarinstallation Redovisning av mätresultat (1998)**  
Åke Johansson
- 7. Masstabilisering av väg 590, Askersund (1998)**  
Yvonne Rogbeck
- 8. KC-pelarförstärkning av instabil slänt. E4, delen Nyland – Ullånger, Västernorrlands län. Åtgärder och mätningar (1998)**  
Leiv Viberg, Bertil Eriksson & Stefan Johansson
- 9. Grunnförstärkning med kalkcementpelar (1999)**  
Stein Christensen, Arnstein Watn, Steinar Nordal, Arnfinn Emdal, Torbjörn Lund & Thomas Kristiansen
- 10. Dimensioneringsvägledning för djupstabilisering (1999)**  
Översättning av Finska Vägverkets klarlägganden 18/1997
- 11. Historik och svenska erfarenheter av kalkstabilisering av vägterrasser (1999)**  
Stefan Gustafsson
- 12. Undersökning i fält av stabiliseringseffekt i organisk jord och lera (2000)**  
Tobias Hansson, Yvonne Rogbeck & Leif Säfström
- 13. Utvärdering av verksamheten inom Svensk Djupstabilisering. Vetenskaplig uppläggning. Måluppfyllelse av FoU-plan (2000)**
- 14. Stabilisering av torv i laboratoriemiljö – utveckling av referensmetod (2000)**  
Fredrik Larsson & Stefan Mårtensson
- 15. Djupstabilisering med kalk-cementpelare – Provfält (2000)**  
Lars O Johansson
- 16. Laboratorieinblandning för stabilisering av lera – Referensmetod (2000)**  
Torbjörn Edstam
- 17. Kalkcementpelarförstärkning för bro – Funktionsuppföljning. Västkustbanan, delen Sätinge – Lekarekulle. Bro över väg N359U (km 35/603) (2000)**  
Marius Tremblay
- 18. Kalk- och kalkcementpelare – Jämförelse mellan laboriestabilisering och pelarinstallation (2001)**  
Erika Haglund & Evelina Nilsson
- 19. Kalkcementpelare i skivor – Modelförsök (2001)**  
Jan Honkanen & Johan Olofsson
- 20. Stabilisering av torv. Referensmetod för laboratorieinblandning. Steg 1 – Insamling av erfarenheter (2001)**  
Ronny Andersson, Arvid Jacobsson & Karin Axelsson
- 21. Erfarenhetsbank – Etapp 2: Erfarenhetsåterföring (2002)**  
Magnus Karlsson, Göran Holm & Leif Säfström
- 22. International Workshop on Deep Mixing Technology for Infrastructure Development – Current Practice & Research Needs (2002)**  
Göran Holm
- 23. Studie av inverkan av faktorer i blandningsprocessen vid djupstabilisering med kalkcementpelare – Fältförsök i Håby (2002)**  
Stefan Larsson, Marcus Dahlström & Bengt Nilsson
- 24. Peptisering vid djupstabilisering (2002)**  
Matilda Hoffstedt & Sven-Erik Johansson
- 25. Stabilisering/solidifiering av förorenad jord – en förstudie (2003)**  
Göran Holm
- 26. Gränsson (2003)**  
Sven-Erik Johansson
- 27. A complementary field study on the uniformity of lime-cement columns – Field tests at Strängnäs (2003)**  
Stefan Larsson, Marcus Dahlström & Bengt Nilsson
- 28. Stabilisering av torv – ringtest av referensmetod för tillverkning av laboratorieprov (2003)**  
Kerstin Pousette
- 29. Hållfasthetsfördelning i kalkcementpelare – Fältförsök i Strängnäs (2003)**  
Per Hedman & Mari Kuokkanen
- 30. Stabiliserad jords egenskaper. Delprojekt 5. Påverkan på miljö (2003)**  
Karsten Håkansson
- 31. A laboratory study of the boundary layer around lime/cement-, and cement columns in kaolin clay (2003)**  
Mirja Kosche
- 32. Kalkcementpelare som jordförstärkning – hur kan vi åstadkomma rätt funktion? Projektering, utförande och kontroll. Workshop, Göteborg 3 december 2002 och Stockholm 24 april 2003**  
Niklas Dannewitz & Bengt Rydell
- 33. Stabilisering av sulfidjord. En litteratur- och laboratoriestudie (2004)**  
Mattias Andersson & Tomas Norrman
- 34. Långtidsegenskaper hos kalkcementpelare – en studie av 10 år gamla kalkcementpelarförstärkningar (2005)**  
Hjördis Löfroth
- 35. Seismisk kontrollmetod för KC-pelare (2005)**  
Niklas Dannewitz, Håkan Eriksson, Håkan Mattsson, Rolf Larsson & Göran Holm
- 36. Beständighet hos djupstabiliserad jord (2005)**  
Sven-Erik Johansson, Helen Åhnberg & Håkan Pihl
- 37. Vetenskaplig utvärdering av verksamheten inom Svensk Djupstabilisering (2005)**  
Bengt Åkesson & Göran Fagerlund



## Rapport

- 1. Erfarenhetsbank för kalk-cementpelare (1997)**  
Torbjörn Edstam
- 2. Kalktypens inverkan på stabiliseringsresultatet. En förstudie (1997)**  
Helen Åhnberg & Håkan Pihl
- 3. Stabilisering av organisk jord med cement- och puzzolanreaktioner (2000)**  
Karin Axelsson, Sven-Erik Johansson & Ronny Andersson
- 4. Provbank på kalk/cementpelarförstärkt gyttja och sulfidhaltig lera i Norrala (1999)**  
Rolf Larsson
- 5. Masstabilisering (2000)**  
Nenad Jelusic
- 6. Blandningsmekanismer och blandningsprocesser – med tillämpning på pelarstabilisering (2000)**  
Stefan Larsson
- 7. Deformation Behaviour of Lime/Cement Column Stabilized Clay (2000)**  
Sadek Baker
- 8. Djupstabilisering med kalkcementpelare – metoder för produktionsmässig kvalitetskontroll i fält (2001)**  
Morgan Axelsson
- 9. Olika bindemedels funktion vid djupstabilisering (2001)**  
Mårten Janz & Sven-Erik Johansson
- 10. Mitigation of track and ground vibrations by high speed trains at Ledsgård, Sweden (2002)**  
Göran Holm, Bo Andréasson, Per-Evert Bengtsson, Anders Bodare & Håkan Eriksson
- 11. Miljöeffektbedömning (LCA) för markstabilisering (2003)**  
Tomas Rydberg & Ronny Andersson
- 12. Mixing Processes for Ground Improvement by Deep Mixing Doctoral Thesis (2004)**  
Stefan Larsson
- 13. Proceedings of the International Conference on Deep Mixing – Best Practice and Recent Advances, Deep Mixing '05**  
Stockholm, May 23 – 25, 2005
- 14. Stabilisering av torv i laboratorium (2006) – Metodbeskrivning & Underlagsrapport**  
Martin Holmén
- 15. Provbankar Riksväg 45/Nordlänken. (2006) Bankar på kalkcementpelarförstärkt jord – Beräkningsmodell för sättningar**  
Claes Alén, Göran Sällfors, Per-Evert Bengtsson & Sadek Baker
- 16. Strength of stabilised soils– A laboratory study on clays and organic soils stabilised with different types of binder (2006)**  
Doctoral Thesis  
Helen Åhnberg
- 17. Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserade pelare och masstabilisering – En vägledning (2006)**  
Rolf Larsson



**Svensk Djupstabilisering**

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