



Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Arbetsrapport 36
2005-11

Beständighet hos djupstabiliserad 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, internet: 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, internet: www.swedgeo.se/sd.



Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Arbetsrapport 36
2005–11

Beständighet hos djupstabiliserad 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 beständighet hos djupstabiliserad jord. Detta forskningsprojekt ingår i SD:s forskningsområde Stabiliserad jords egenskaper.

Linköping i november 2005

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

Innehållsförteckning

Sammanfattning	4
Inledning	5
Syfte	5
Beständighet – påverkande processer	6
Allmänt	6
Inre nedbrytning	7
Yttre påverkan	7
Kemiskt angrepp	8
Lakning - Allmänt	8
Lakning - reaktioner och mekanismer	9
Resultat från långtidsmätningar i fält	12
Laboratorieförsök	14
Material	14
Metod	14
Resultat	15
Diskussion	18
Slutsatser	19
Referenser	20
Bilaga	21

Sammanfattning

Långtidsstabilitet och beständighet hos djupstabiliserad mark är av stort intresse. Trots att tekniken använts sedan 70-talet finns endast ett fåtal rapporter från systematiska studier inom detta område publicerade. För att förstå vad som påverkar det stabiliserade materialet kan kunskapen från betongområdet vara en rimlig utgångspunkt. Rapporten innehåller en genomgång av tänkbara skademekanismer.

Materialet i pelaren, som består av hydratationsprodukter och delvis reagerad jord, är i sig stabilt. Risken för svällning på grund av eventuella sulfaters reaktion bedöms som liten.

Omgivningen påverkar pelaren genom inträngning av ämnen och angrepp av vatten. Avgörande för angreppshastigheten är det stabiliserade materialets täthet och vattenutbytet i omgivningen. Studier av stabiliserat material i olika vatten visar att förändringarna är små över tid. Även analys av 20 år gamla pelare visar att detta verkar stämma. Vandring av kalciumjoner till omgivande jord har ingen större inverkan på pelarens egenskaper under överskådlig tid.

Pelarna är känsliga för strömmande vatten eller annan form av forcerat vattenutbyte. Om dessutom vattnet är mjukt eller har lågt pH så blir angreppet större. Detta kan exempelvis vara fallet om jorden innehåller genomsläppliga skikt av sand eller om pelaren är inhomogen. Det är alltså av största vikt att veta i vilken omfattning det stabiliserade materialet utsätts för omgivande vatten.

Långtidsegenskaper är alltid svåra att studera och innehåller ofta osäkra extrapoleringar. Rapporten redovisar resultat från några lakningsförsök, som visar att angreppshastigheten är låg vid lågt vattenutbyte. Resultaten har stor osäkerhet men indikerar att efter 100 år är djupet för påverkat material i storleksordningen några cm. Vid en eventuell framtida vidareutveckling av provningsmetoder för bedömning av beständighet bör dessa anpassas till de förhållandena som stabiliserad jord utsätts för.

Slutsatsen som kan dras är att det stabiliserade materialets långtidsegenskaper är goda och att hållfastheten normalt tillväxer under lång tid. Inhomogenitet och/eller rinnande vatten verkar vara de största riskfaktorerna.

Inledning

Uppgifter om beständigheten för stabiliserade jordar med avseende på nedbrytning eller omvandling av struktur efterfrågas ofta i samband med olika typer av djupstabilisering. Det finns ett behov av att kunna identifiera och kvantifiera faktorer som gör det möjligt att bedöma materialets livslängd. Det finns dock inget rapporterat känt fall där en djupstabiliserad konstruktion skulle ha avsevärt försämrats med tiden som ett resultat av att de kemiska bindningarna skulle ha upplösts av en eller annan orsak.

Reaktionsprodukternas stabilitet över tid i den aktuella miljön kan belysas med kunskaper från framför allt beständighetsforskning på betong eller liknande material. Yttre påverkan kan medföra urlakning eller kemisk nedbrytning och det är angeläget att karakterisera det stabiliserade materialet och omgivande jord i detta hänseende. Den ursprungliga och den stabiliserade jordens permeabilitet är ofta känd och detta kan utnyttjas för att beräkna vattenflöden genom och kring materialen. Detta bör tillsammans med lämpligt utformade beständighetstester kunna ge data som kan användas i livslängdsberäkningar i olika miljöer. Den stabiliserade jorden har i grunden egenskaper som en betong av låg kvalitet när det gäller yttre påverkan. Standardiserade provningsmetoder för betong kan användas, men vid tolkningen av resultaten bör man dels ta hänsyn till skillnaden i funktion och krav, och dels göra en bedömning av omgivande förhållande i marken när det gäller vattenutbyte och kemisk sammansättning.

En lakningsstudie på provkroppar av stabiliserat material med olika jordar och bindemedel har utförts som ett delprojekt inom Svensk Djupstabilisering delområde ”Stabiliserad jords egenskaper”.

Syfte

Syftet med denna studie har varit att genom yturlakning bestämma det stabiliserade materialets beständighet mot omgivande vatten.

Beständighet – påverkande processer

Allmänt

Materialegenskaperna för stabiliserad jord kan jämföras med betong eftersom bindemedlen och hydrationsprodukterna, som bygger upp hållfastheten, är mycket likartade. Betong har dock ca 100 ggr högre hållfasthet än stabiliserad jord beroende på högre bindemedelshalt, lägre vattenhalt och grövre ballastmaterial. Tätheten kan variera inom vida gränser för båda materialen. Nedbrytning av materialet kan ske dels genom inre reaktioner, som orsakas av olämpliga materialkombinationer, och dels genom inträngning av förstörande ämnen eller lakning. I de senare fallen bestäms nedbrytningshastigheten av materialets täthet och diffusionsegenskaper.

För betong är kvoten mellan vatten och bindemedel, vattenbindemedelstalet (vbt), den viktigaste parametern för många egenskaper. Vbt bestämmer tätheten för den sammanhållande pastan mellan ballastkornen. För beständig betong är vbt omkring 0,5 eller lägre. Permeabilitetskoefficienten är ca 10^{-14} m/s för en sådan betong. Vattenbindemedeltalets inverkan på permeabiliteten och lakningsdjup för betong ses i **Fig. 1** och **2**. Permeabilitetskoefficienten för leror brukar anges till 10^{-10} – 10^{-8} m/s (Larsson, 1989).

För stabiliserade jordar blir vbt mellan 5 och 20 om man räknar in jordens totala vattenhalt. Även om man inte vet hur mycket av jordens naturliga vatten som finns tillgängligt för reaktionerna och hur mycket av jordmaterialet som reagerar, så kommer vbt att bli mycket högre än i betong. Det innebär att de bildade hydrationsprodukterna blir mer åtkomliga för yttre påverkan av exempelvis fritt vatten än vad som gäller i betong. Den stabiliserade jordens täthet kommer att vara bestämmande för nedbrytningshastigheten. Inhomogeniteter i ursprungsjorden eller varierande täthet orsakade av brister i inblandningen kan alltså ha avgörande betydelse.

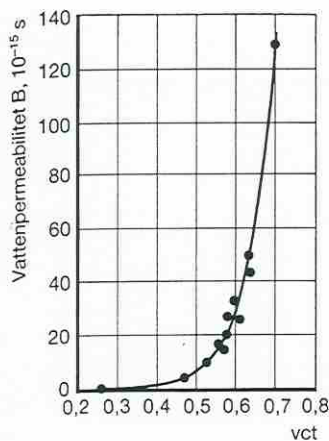


Fig 1. Permeabilitet hos cementpasta somfunktion av vct. (Nilsson, 1994).

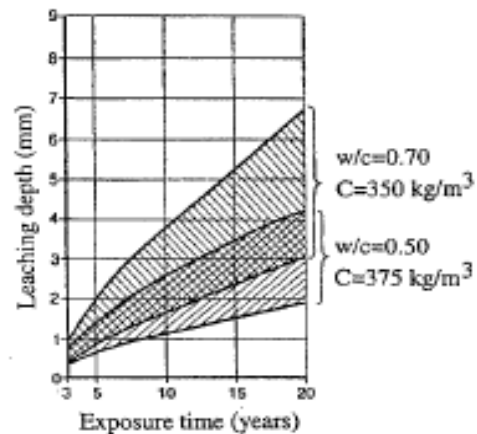


Fig 2. Lakningsdjupets beroende av vct (Fagerlund, 1992).

För att stabiliserad jord skall vara långtidsbeständig måste vattenutbytet i och kring materialet vara begränsat. Ett stabiliserat område har vanligen god beständighet genom att den omgivande jorden oftast är relativt tät och har en begränsad hydraulisk gradient. Den största risken som i allmänhet nämns för ett eventuellt nedbrytande av stabiliserad jord är det fall där ett lager av jord med avsevärt grövre struktur, t.ex. ett sandlager, utgör en del av den stabiliserade jordprofilen. Ett sådant lager

skulle ha en högre permeabilitet och därmed tillåta vattenströmningar som kunde laka ut bindande material ur den stabiliserade jorden. Efter utförd stabilisering är det inte rent bindemedel som finns i marken utan en cementartad reaktionsprodukt. Ett sådant grovkornigt lager skulle redan från början kunna ställa till med problem i form av utebliven stabiliseringseffekt beroende på vald typ och mängd bindemedel. Kalkbaserade material kräver lerfraktion att samreagera med medan cement dock normalt binder även grova material förutsatt att tillräckligt med vatten finns tillgängligt i marken.

Lakningstester med provkroppar av stabiliserat material kan ge ett mått på beständigheten vid stort vattenutbyte. En uppskattning av vattenflöden kring och genom exempelvis kalk-cementpelare bör ingå som en viktig del i en bedömning av långtidseffekter.

Inre nedbrytning

Stabiliseringseffekten uppstår av reaktioner som inträffar när bindemedel såsom osläckt kalk*, cement, slagg och i vissa fall gips reagerar med vatten. Viktiga hållfasthetsuppbyggande reaktionsprodukter är kalciumsilikathydrat (CSH) och kalciumaluminiumsilikathydrat (CASH) (t.ex. Janz & Johansson, 2001; Åhnberg & Johansson, 2005). CSH bildas vid cement och slaggreaktioner. I huvudsak CASH bildas när kalciumhydroxid reagerar med lerpartiklarna genom puzzolanreaktioner. Kalciumhydroxiden uppstår när cement och osläckt kalk reagerar med vatten. CSH och CASH är stabila produkter som inte omvandlas över tid. Det är känt från antika byggnadsverk.

Höga sulfathalter kan ge svällning i betong. Därför är sulfathalten i cement begränsad genom olika standarder. Förutsättningen är dock att det finns tillräckligt med reaktiva aluminiumföreningar för att sulfaten skall bilda ettringit, som är den vanligaste orsaken till denna typ av intern expansion. Lerpartiklarnas aluminater är måttligt reaktiva och bildar i första hand CASH. Högre porositet i stabiliserad jord jämfört med betong gör att bildad ettringit i högre omfattning får plats i porerna vilket innebär mindre expansion av materialet. Svällning bedöms normalt inte innebära något problem i fallet med djupstabilisering. Lös lera medger alltid kompression i någon riktning och en sådan kompression kan oftast anses befrämja förstärkningseffekten. Detta har också utnyttjats i vissa fall i Japan, bl.a. i en metod kallad Super Lime Pile, SLP, där man blandat lågreaktiv bränd kalk med slagg och gips (Mitsunari et al. 1995). Kalken ger vid släckning upphov till volymexpansion och pressar därmed samman jorden mellan pelarna.

Problemet med svällning är helt annat i samband med betongkonstruktioner eller stabilisering av ytnära horisontella lager. Okontrollerad svällning av stabiliserad terrass kan ge upphov till ojämnheter i ovanliggande beläggning och vägyta. Risken för svällning bör också beaktas vid djupstabilisering av slänter med låg stabilitet eller i övriga fall där horisontell jordförskjutning bör undvikas.

I vissa fall har expansion på grund av sulfatsvällning rapporterats. Ofta beror detta på att sulfidinnehållet är högt i jorden och att luft kommit in i materialet. Sulfiderna oxideras till sulfat som ger expansion antingen genom ettringitbildning eller genom gips som bildas med kalciumhydroxiden. Om materialet har uppnått hög hållfasthet och är tätt kan tydliga skador noteras. Omvandlingen av sulfid till sulfat sker dock inte vid högt pH, vilket innebär att den luft som blåses in vid stabilisering inte oxiderar sulfiderna om man använder basiska bindemedel. Gipsbaserade stabiliseringsmedel med höga sulfathalter bygger på att sulfatreaktionerna, som ger hållfasthet, sker snabbt medan materialet fortfarande är formbart.

Yttre påverkan

Yttre angrepp på det stabiliserade materialet i naturliga jordar kan delas in i 2 huvudkategorier. Den ena är att skadliga ämnen tränger in och orsakar svällning eller nedbrytning av hydrationsprodukter och den andra är att vatten lakar ut bindemedlet. För båda mekanismerna är materialets täthet av avgörande betydelse.

* Osläckt kalk och bränd kalk är benämningen på samma produkt och används båda i denna rapport.

Transporthastigheter i porösa material kan beräknas med Darcy's lag

$$v = K \cdot i$$

där K är permeabiliteten eller konduktiviteten och i är $\Delta h / \Delta x$

Δh är tryckskillnaden

Δx är strömningsavståndet

Exempel

Sand: $K = 10^{-4}$ m/s, $i = 1:20$

$$v = K \cdot i = 10^{-4} \cdot 0.05 = 0.000005 \text{ m/s} = 43 \text{ cm / dygn}$$

Lera: $K = 10^{-9}$

$$v = 10^{-9} \cdot 0.05 = 0.0043 \text{ mm / dygn} = 1,6 \text{ mm/år}$$

Multiplikering med den yta som granskas ger en grov uppskattning a mängden volym / tidsenhet i pelare.

$$\text{eller } q = K A (\Delta h / \Delta x) (\text{m}^3/\text{s})$$

där A är tvärsnittet

Kemiskt angrepp

Sulfat i vatten reagerar med kalciumhydroxiden och bildar gips. Denna reaktion orsakar svällning. Innehåller dessutom jorden lösliga aluminater så bildas ettringit, som också kan ge svällning. Ettringit och gips faller ut i porerna, vilket innebär att materialets porstruktur och mängden reaktionsbenägna komponenter avgör om en skada kommer att uppstå. I en stabiliserad jord finns oftast utrymme för kristallisation utan att expansion sker.

Ammonium i vatten påskyndar upplösningen av reaktionsprodukterna genom att det bildar lättlösliga salter.

Syror angriper kalciumhydroxiden och bryter ner de sammanhållande hydratationsprodukterna.

Lakning – Allmänt

De flesta mineral och oorganiska ämnen är mer eller mindre lösliga i vatten. Upplösningshastigheten bestäms av materialets sammansättning och dess täthet. Jordmaterial som är stabiliserat med bränd kalk, cement och slagg innehåller kalciumhydroxid, som är löslig i vatten. Om det stabiliserade materialet utsätts för vattenflöden, så urlakas kalciumhydroxiden och materialets egenskaper förändras.

Lågt pH påskyndar urlakningen eftersom kalciumhydroxiden löses snabbare. Vid stillastående vatten är detta normalt inget problem eftersom bindemedlet höjer vattnets pH.

I betong bestäms angreppsgraden av förhållandet mellan vatten och bindemedel, vbt. Lågt vbt ger en tät betong. Stabiliserad jord har högre vbt vilket innebär att bindemedelsfasen är "lättlöslig".

Lakningshastigheten blir dock långsam eftersom materialet har låg permeabilitet.

Inverkan av olika vatten på stabiliserad marin lera har undersökts i en japansk laboratoriestudie (Kitazume,2003). Lerans vattenkvot var 160 % och inblandningen av cement var 30 % räknat på lerans torrsvikt. Provkropparna härdades 20 dygn och förvarades sedan i färskt vatten, havsvatten och även i omgivande lera. Hållfastheten hos de vattenlagrade proverna påverkades till ett djup av ca 10 mm efter ett år, **Fig. 3**, men ingen ändring av hållfastheten kunde registreras för prov förvarat i omgivande lera. Ca-halterna på olika djup bestämdes och de följde mönstret för hållfastheten.

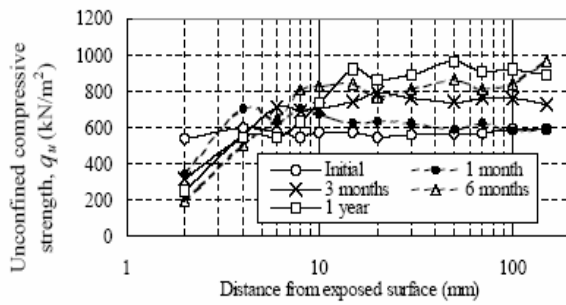


Fig 3. Hållfasthetsutveckling över tid i prover lagrad i vatten (Kitazume, 2003).

Lakning – reaktioner och mekanismer

Lakning av stabiliserad jord innebär transport av joner från det inre av materialet till omgivningen. Delar av det fasta materialet löses upp av inträngande vatten och transporteras iväg genom konvektion orsakad av vattenflödet eller genom diffusion på grund av koncentrationsgradienter. För stillastående vatten och täta material är diffusionen dominerande. För mycket höga vattenflöden blir också upplösningshastigheten diffusionsberoende. Detta illustreras i Fig. 4. Materialets diffusionsegenskaper är starkt beroende av täthet vilket illustreras i Fig. 5 där porositeten använts som variabel.

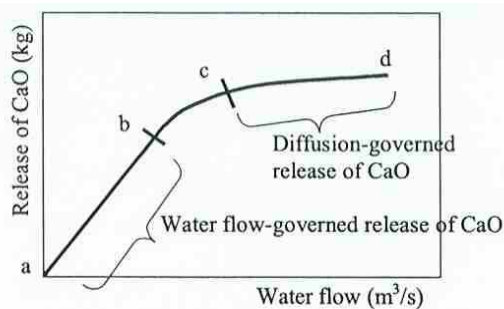


Fig 4. Lakningens beroende av vattenflödet, principskiss (Ekström, 2003).

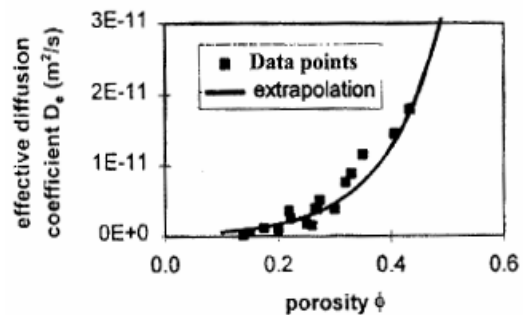


Fig 5. Relation mellan diffusionskoefficienten och porositet (Ekström, 2003).

Urlakningen kan ske från materialets yta, från sprickor eller inhomogeniteter och via genomströmmande vatten. Av dessa anses genomströmmande vatten allvarligast eftersom det försvagar materialet generellt.

Det sammanhållande bindemedlet består i huvudsak av kalciumföreningar. Porvattnet är mättat med avseende på kalciumhydroxid och står i jämvikt med kristaller av ämnet. Lösligheten för $\text{Ca}(\text{OH})_2$ är ungefär 1,5 g/l. Vid urlakning löses först kalciumhydroxiden, som är den mest lösliga komponenten, och transporteras bort. (Pozzolanreaktionen bidrar till ökad lakningsbeständighet för det stabiliserade materialet genom att den vid hydratationen förbrukar $\text{Ca}(\text{OH})_2$, och binder den i svårslösliga reaktionsprodukter.) När porlösningens kalciumkoncentration understiger mättnadsvärdet, så börjar även CSH och CASH att långsamt gå i lösning. På ytan ger lakresterna efter hand ett skikt av kiselinnehållande gel, som fungerar som ett fördröjande diffusionsskikt mot fortsatt angrepp. Det medför att upplösningshastigheten avtar med tiden, Fig. 6.

Vattnets sammansättning har stor inverkan på upplösningshastigheten. Ett surt vatten löser upp kalciumhydroxiden eftersom den är basisk. Lakningstester görs ofta vid pH 4. Det är en accelererad test för snabb jämförelse mellan olika material och är svår att översätta till verkliga förhållanden.

Vattnets innehåll av aggressiv kolsyra inverkar på lakningshastigheten. Luftens koldioxid löser sig i vatten och bildar kolsyra, som löser upp kalciumhydroxid. Slutprodukten blir $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, kalciumvätekarbonat, som är löslig. En principskiss finns i **Fig 6** och förloppet beskrivs i formler nedan.

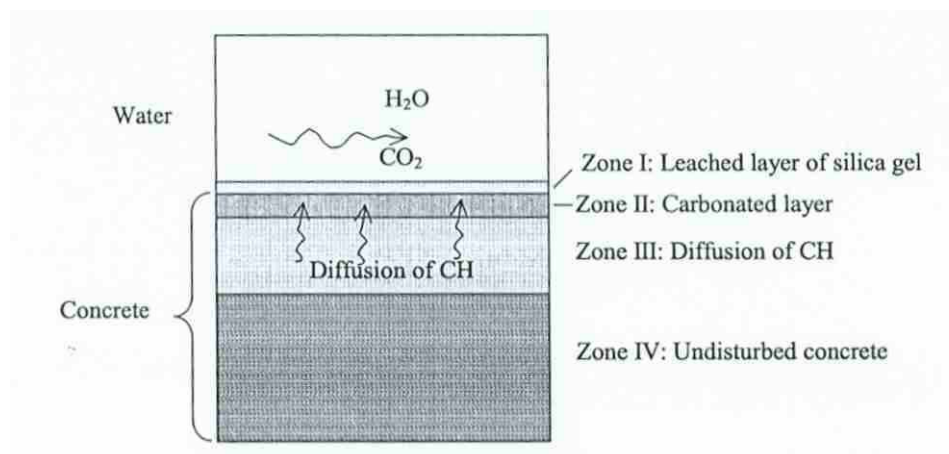
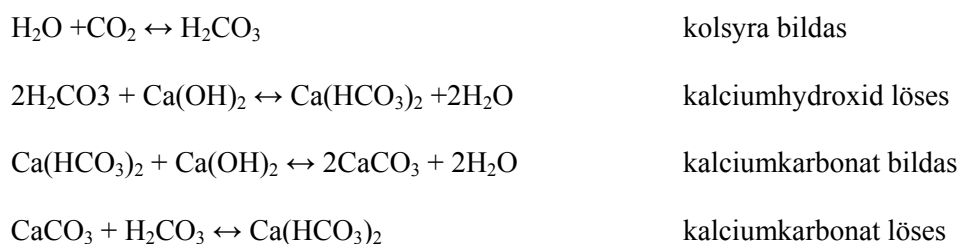


Fig 6. Modell för angreppszoner på betongyta (Ekström, 2003).

Mängden löst aggressiv kolsyra ökar med lägre pH och lägre hårdhet på vattnet. Vattnets hårdhet mäts i tyska hårdhetsgrader och skrivs °dH. Vattnet säges vara hårt vid 10°dH eller över, medelhårt vid 5,0 – 9,8 °dH, mjukt vid 2,2 – 4,9°dH och mycket mjukt om det är 0 – 2,1°dH. Naturliga mjuka vatten kan innehålla höga halter aggressiv kolsyra. Angreppsförmågan för olika vatten finns sammanställd i **Tabell 1**, som gäller för betong, men klassificeringen gäller även för andra kalciumbundna material.

Tabell 1. Vattens aggressivitet enligt VAV (VAV, 1975).

Vatten- typ	Karbonat- Hårdhet tyska grader°dH	Aggressiv kolsyra mg/l	Vattnets angreppsförmåga
I	> 2,0	< 15	Praktiskt taget ingen
II	> 2,0 2,0–0,2	15–40 < 15	Obetydlig
III	> 2,0 2,0–0,2 < 0,2	40–90 15–40 < 15	Påtaglig
IV	> 2,0 2,0–0,2 < 0,2	> 90 > 40 > 15	Stor

Ammoniumjoner, NH_4^+ , angriper kalciumhydroxiden och bildar NH_4OH . Ammoniumhalter över ca 50 mg/l inverkar på upplösningshastigheten. Angreppet kan liknas vid ett syraangrepp och sker skiktvis från ytan.

Sulfater i vatten kan tränga in i betong och bilda gips, som sedan kan lösas upp. Detta ger en kombination av inre förstörelse och urlakning. Sulfathalter över 600 mg/l påverkar hydratationsprodukternas beständighet (Betonghandboken, 1994).

Betongs motståndskraft mot olika ämnen är väl undersökt (Betonghandboken, 1994). För naturliga vatten och stabiliserad jord, så är framförallt ämnena ovan av störst intresse när det gäller stabilisering med kalciumbaserade bindemedel.

Resultat från långtidsmätningar i fält

Stabiliserad jords långtidsegenskaper i fungerande förstärkningar i fält har endast undersökts och rapporterats i ett fåtal fall. Det kan bero på att de fungerat väl eller att åtkomligheten är begränsad.

En japansk undersökning av gamla cementpelare (Nishida,2003) visar att hållfastheten ökat från en dimensionerande hållfasthet på 265 kPa till intervallet 2000-8000 kPa efter 17 år **Fig 7**. Jorden var lera med vattenkvoten 50 % och diffusionskoefficienten $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$, Bindemedlet var cement med slagg och inblandningsmängden $130 - 290 \text{ kg/m}^3$. Uppmätt Ca-halten var något lägre i pelarens yttersta 10 mm. Någon inverkan på hållfastheten kunde dock inte konstateras. Omgivande jord var påverkad av högre Ca-halt upptill ca 15 cm från pelaren, **Fig 8**. Beräkningar, från samma undersökning, som bygger på jordens täthet och diffusionshastigheten för Ca visade på små effekter. Om exempelvis diffusionskoefficienten är $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ så minskar Ca-halten intill 10 cm djup efter 500 år, men överskottet av Ca är fortfarande stort.

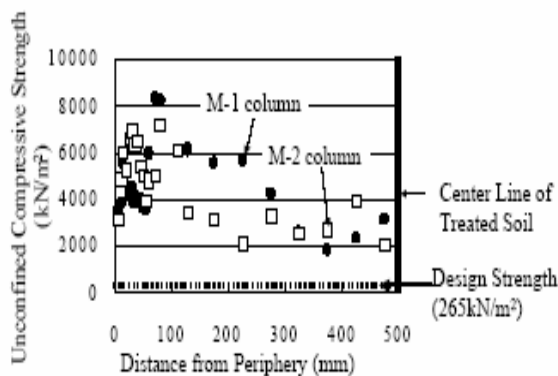


Fig 7. Hållfasthet i pelare på olika djup från pelarens yta(Nishida,2003).

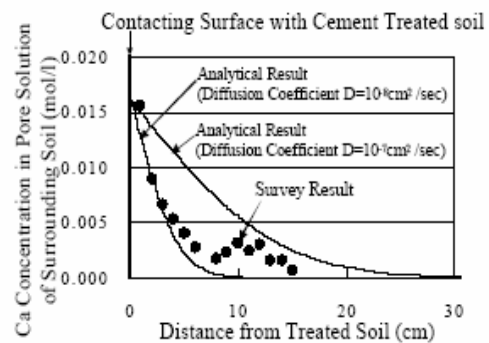


Fig 8. Ca-halt i omgivande jord (Nishida,2003).

Från samma utförda förstärkningar har också uppgrävda pelare undersökts (Hayashi, 2003). Undersökningen visade att hållfastheten fortfarande ökar linjärt med logaritmen för tiden, att variationen i hållfastheten i pelaren följer Ca-halten och att pelarnas periferi har något lägre hållfasthet. Enligt denna uppföljande undersökning finns inga tecken på nedbrytning av pelarna men en migration av Ca till omgivningen är den mekanism som angavs på mycket lång sikt möjligen kunna påverka hållfastheten. Eftersom hållfastheten fortfarande ökar, så bedömdes det dock inte troligt att pelarna inom överskådlig tid, inte ens i periferin, kommer ner till designhållfastheten.

Fältundersökningar har utförts på ca 10 år gamla kalk-cementpelare i Munkedal och Kungsbacka på västkusten (Löfroth, 2005). Jordarna var lera och gyttjig lera med vattenkvoten ca 100 % och bindemedlet var 50 % osläckt kalk och 50 % cement med doseringen ca 90 kg/m^3 . Ursprunglig hållfasthet var uppmätt till 200 kPa efter 51 dygn i ena fallet och 150 kPa efter 1 år i andra fallet. Resultat visar att hållfastheten efter 10 år är dubbelt

så hög eller samma som den vid första mättillfället. Ca halten i omgivande lera hade ökat i ett område upptill 50 mm från pelarna.

I en finsk undersökning har framgrävning utförts av 7 år gamla pelare där bindemedlet bestod av en blandning av bränd kalk och gips (Nordkalk, 2003). Bindemedelsmängden var 138 kg/m^3 och jorden bestod av skikten torv – gyttja – lera – sand. Hållfastheten hade ökat 2 till 3 gånger från den uppmätt under de första månaderna och inga tecken på nedbrytning noterades.

Laboratorieförsök

Material

I SD-projekten inom ”Stabiliserad jords egenskaper” ingår 3 jordar i de flesta delundersökningarna, en sötvattenlera från Linköping, en saltvattenlera från Löftabro och en gyttja från Holma. Jordarna är beskrivna i SD:s arbetsrapport 15 (Johansson, 2000). Bindemedlen som valdes för lakförsöken var byggcement, osläckt kalk samt 50/50 blandningar av byggcement/granulerad masugnsslagg och byggcement/osläckt kalk.

Bindemedelshalterna för denna undersökning valdes till 100 kg/m³ för lerorna och 200 kg/m³ för gyttnan. Provblandningarna tillverkades enligt normal metod för hållfasthetsprovning (Carlsten, 2000) och packades i cylindrar med 5 cm diameter och höjden 5 cm och förseglades med plastfolie. Provkropparna lagrades därefter i 28 dygn vid 20 °C i fuktrum innan lakningstestet.

Metod

Principen för använd metod är att angreppet sker längs en definierad front. Utanför fronten är bindemedlet helt urlakat och innanför fronten så är provet intakt. Dessutom görs antagandet att bindemedlet är homogent inblandat så att varje volymentelement innehåller samma mängd kalcium.

Metoden har använts för att mäta angrepp av syra på betong (Rombén, 1979). Vanligen utförs provningen vid konstant pH, som uppnås genom att reglera syratillsatsen med en pH-stat. Syraförbrukningen över tid kan räknas om till angreppsdjup. I den valda varianten av metoden görs lakningen enligt principen att vatten byts enligt ett fastlagt schema, i enlighet med prEN 14944-3. Angreppet blir svagare i början jämfört med metod med konstant pH eftersom pH i de första lakvätskorna stiger ganska snabbt. Det gör att provet inte utsätts för pH 4 under hela perioden, vilket mer motsvarar en låg vattenomsättning kring den stabiliserade jorden.

Provkropparna befriades från plastfolien och placerades omedelbart därefter i 2 liters plastbägare med en provkropp i varje bägare. Vatten med pH 4 fylldes på till en nivå över provet i bägaren, som täcktes med plastfolie. Vattnets volym var 1 liter och pH var justerat med koncentrerad salpetersyra. Efter 1, 4 och 8 timmar samt 1, 2, 7, 14, 21, 28, 35 dygn byttes vattnet. Vattenprov togs ut och nytt vatten med pH 4 fylldes på. I det uttagna vattnet bestämdes Ca halten. Analysen gjordes med ICP.

Från den ackumulerade mängden utlöst kalcium beräknas angreppsdjupet eftersom bindemedelshalten och jordens kalciuminnehåll, som antagits vara kalciumkarbonat och därmed lösligt vid pH 4, är känt.

Angreppsdjupet avsätts mot tiden i ett log/log-diagram. Förloppet kan anpassas till en rät linje från vilken extrapolering görs för att bestämma angreppsdjup efter lång tid. Mängden utlakad Ca för de provade materialen kan uttryckas enligt:

$$y = a \cdot t^b$$

y har enheten g/m²

a är en faktor beroende av exponerad yta och bindemedel

t är tid i år

b har värdet 0,16 – 0,19

Onoggrannheten kan bli stor i accelererade tester då extrapolering görs över lång tid. I detta sammanhang är det dock inte intressant att veta om det blir 15 eller 20 m efter 100 år utan om storleksordningen är 10 cm eller 1 m vilket bör kunna bedömas med denna metod. Kan det dessutom konstateras att förloppet avstannar så är detta en indikation på att mekanismen är likartad den för syraangrepp på betong.

Resultat

Resultat från utlakning av provkropparna med olika jordar och bindemedel visas i **Fig 9a-c**. Diagrammet visar ackumulerad mängd utlakad Ca. Utlakningen sker snabbt de första timmarna eftersom det finns bindemedel i ytskiktet. Sedan bildas ett diffusionsskikt av restprodukter, som bromsar syrans angrepp på olakat material.

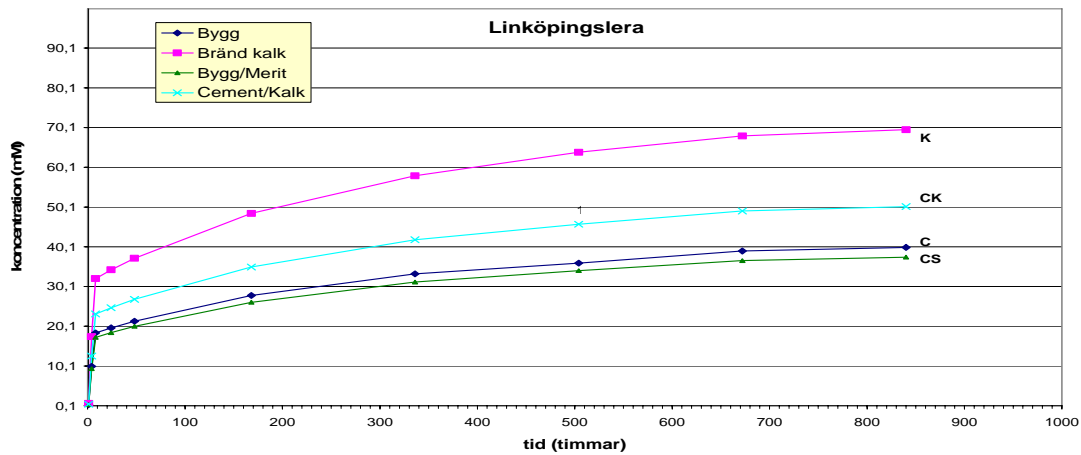


Fig 9a. Mängd urlakad Ca över tid för stabiliserad Linköpingslera.

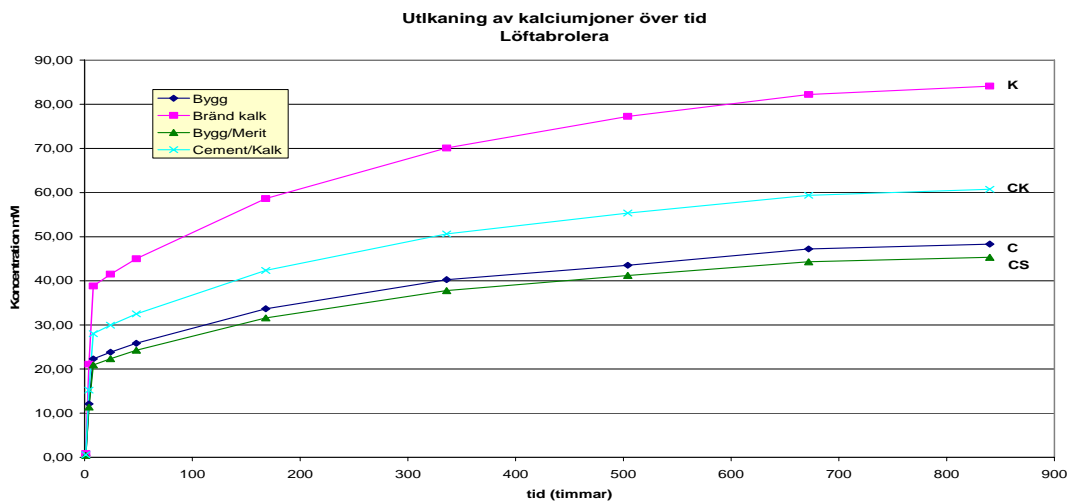


Fig 9b. Mängd urlakad Ca över tid för stabiliserad Löftabrolera.

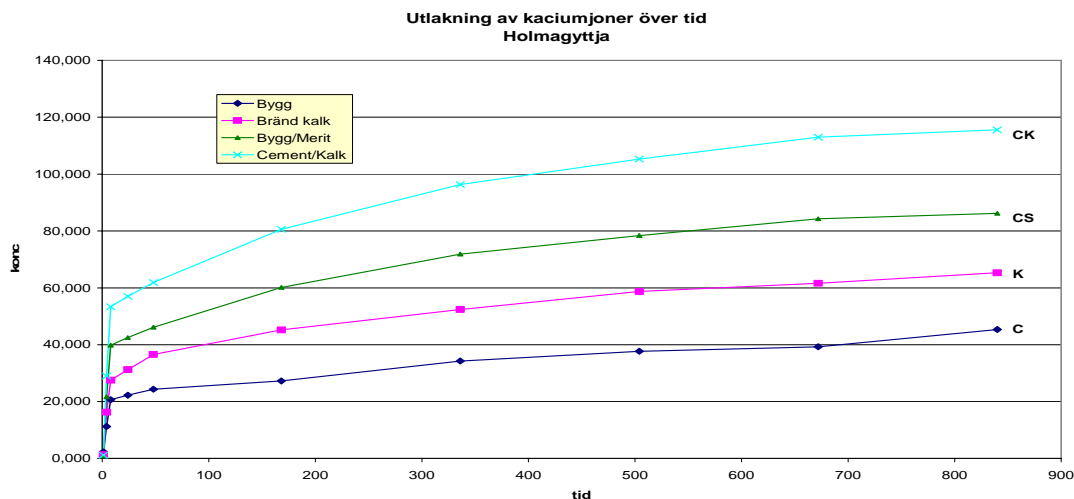


Fig 9c. Mängd urlakad Ca över tid för stabiliserad Holmagyttja.

Bindemedlen som innehåller osläckt kalk ger mest utlakad Ca. En orsak är att de innehåller mer Ca och ger därför högre värden. En annan orsak är att provkropparna bara är 28 dygn vid provningsstart, vilket innebär att kalciumhydroxiden inte hunnit reagera med lerpartiklarna och gett täta provkroppar eftersom pozzolanreaktionerna är långsamma. De båda lerorna visar ungefär samma resultat.

För gyttjan blir ordningen mellan bindemedlen annorlunda. Ren cement ger även här låg utlakning, medan osläckt kalk ger lägre utlakning än cementblandningarna. Skillnaden mellan bindemedlen kan bero på att gyttjans organiska material faller ut Ca och delvis ger ett annat utlakningsförlopp än för rena leror.

Mängden utlakad Ca räknas om till mm angreppsdjup och avsätts i ett log/log diagram. Resultat från Linköpingslera och cement visas i **Fig. 10**.

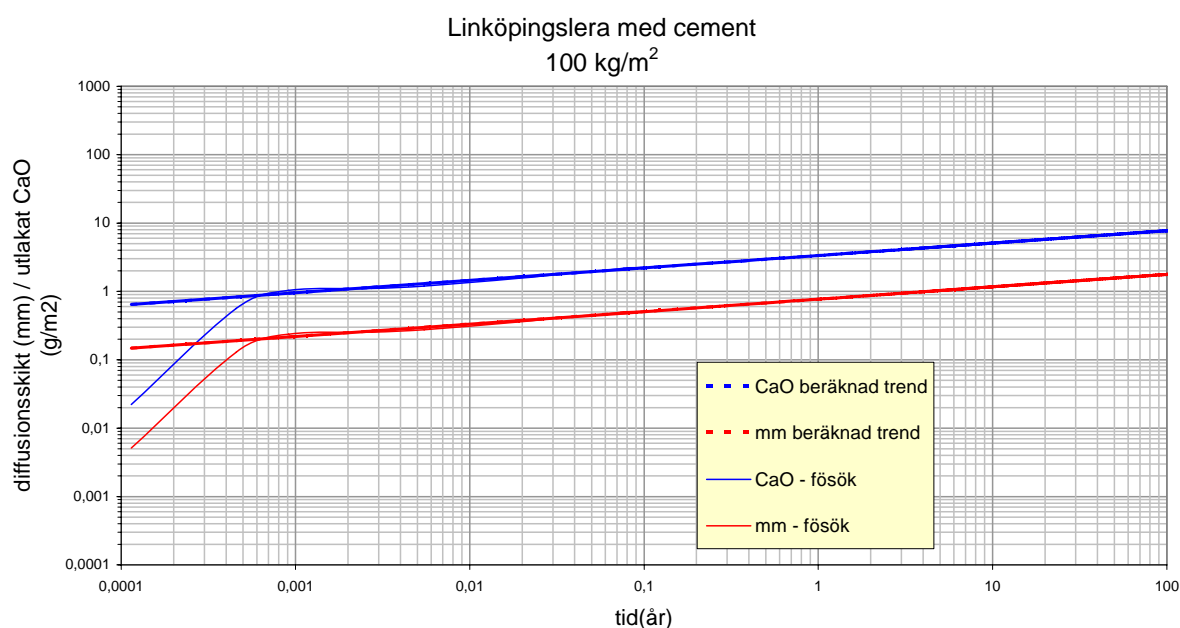


Fig 10. Mängd utlakad Ca och angreppsdjup över tid.

När förloppet stabiliserat sig kan kurvan anpassas till en rät linje, som går att extrapolera. **Fig. 10** visar på att angreppet blir i storleksordningen 2 mm efter 100 år. Övriga kombinationer finns redovisade i bilaga. Beräknade angreppsdjup efter 50 och 100 år finns sammanställda i **Tabell 2**.

Tabell 2. Angreppsdjup vid lakningstest. Extrapolering till lång tid.

Bindemedel	Angreppsdjup i mm							
	Cement		Osläckt kalk		Cement/Slagg		Cement/Osl kalk	
	50	100	50	100	50	100	50	100
år								
Linköpingslera	1,6	1,8	1,9	2,2	1,8	2,1	1,6	1,8
Löftabrolera	1,5	1,7	1,9	2,2	1,6	1,8	1,6	1,8
Holmagyttja	1,7	1,9	2,1	2,3	5,0	5,7	4,2	4,8

Värdena visar att det med denna typ av provning där det stabiliserade materialet utsätts för ett begränsat vattenutbyte med ett lågt pH, blir ett obetydligt angrepp. Skillnaden mellan olika jordar och bindemedel är liten. Metoden kan utvecklas vidare genom bättre kontroll av pH och genom att t.ex. utgå från att provkropparna skall ha uppnått en viss definierad relativ hållfasthet före provningen. Kurvanpassningar med olika matematiska samband gav stor spridning på uppskattade angreppsdjup. Maximalt rörde det sig dock om högst ca 10 cm efter 100 år.

Diskussion

Beständighet och långtidsegenskaper för stabiliserad jord är endast undersökt och rapporterat i några få fall. För att undersöka och bedöma materialets egenskaper kan man dock använda kunskapen inom betongforskningen då stabiliserad jord i princip kan betraktas som en betong av låg kvalitet.

Bindemedlen kan variera, men de hållfasthetsuppbyggande reaktionsprodukterna är i de flesta fall av samma typ som i betong. Det innebär att nedbrytningsmekanismerna för bindemedlet är kända, men att svårigheten snarare ligger i att definiera materialets fysikaliska egenskaper och samverkan med omgivningen.

Inre nedbrytning

Med inre nedbrytning menas att materialet minskar i hållfasthet utan yttre påverkan.

Hydratationsprodukterna (CSH, CASH) är dokumenterat stabila över tid. Detta understöds också av fältundersökningar där hållfastheten fortfarande stiger efter 10-20 år. För andra bindemedelstyper, t.ex. gipsbaserade, bildas produkter, som normalt är stabila i naturen.

Kemiskt angrepp

Kontakt med luft och vatten innebär risk för påverkan av olika kemiska ämnen. Luftens koldioxid kan karbonatisera kalciumhydroxiden, så att pozzolanreaktionerna avstannar eller orsaka omvandling av ettringit genom sänkning av pH. Vattnets innehåll av speciellt syror och sulfater ökar upplösningshastigheten av hydratationsprodukterna. För att bedöma risken för angrepp måste man veta tillgången på skadliga ämnen genom undersökning av vattenflöden och koncentrationer. Normalt sett är den stabiliserade jorden omgiven av täta jordar med små vattenrörelser och låga koncentrationer vilket gör att risken för kemiskt angrepp är mycket liten.

Lakning

Kontakt med vattnet i den omgivande jorden innebär att joner transporteras från det stabiliserade materialet till kringliggande jord. Detta sker mycket långsamt och man har konstaterat att efter 10 – 20 år, så har kalciumhalten ökat i omgivande jord någon dm från pelarens yta. Man kan dock inte se någon markant skillnad i kalciumhalt i pelaren eftersom bindemedel finns i överskott. Stabiliserad jord är känslig för rinnande vatten och kan lakas ur snabbt och erodera bort. Detta måste framförallt beaktas vid behandling av förorenade jordar där stabiliseringstekniken används för att fixera oönskade ämnen.

De viktigaste parametrarna för att kunna bedöma beständighet och långtidsegenskaper för stabiliserad jord är vattenflöden och kemiskt innehåll i omgivande material. Om det finns förutsättningar för högt vattenutbyte i omgivningen bör en noggrannare undersökning och riskbedömning göras. Definition av högt vattenutbyte återstår att ta fram.

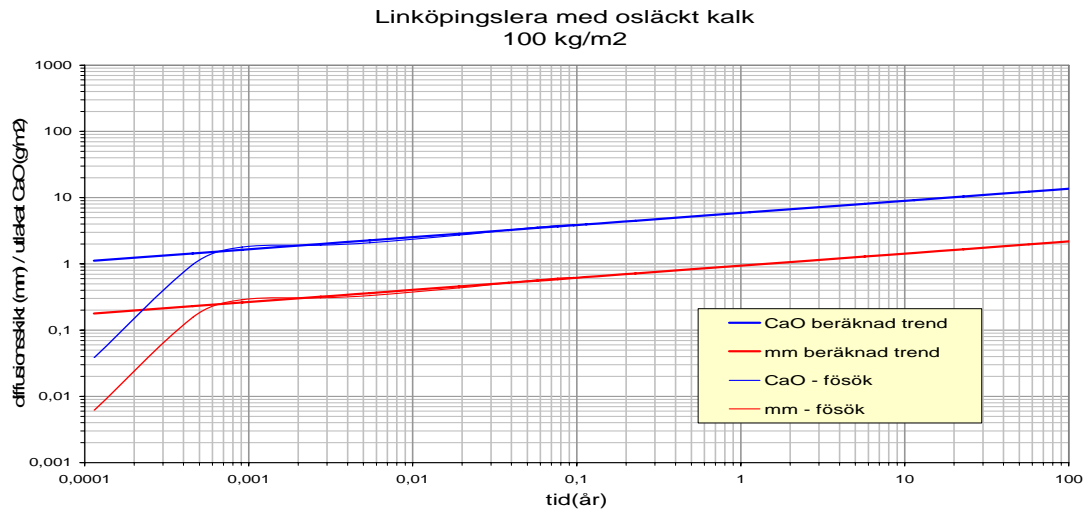
Slutsatser

- Kunskapen om långtidsegenskaper för stabiliserad jord är begränsad. Resultat visar emellertid att hållfastheten kan växa till fortfarande efter 20 år.
- De hållfasthetsuppbyggande produkterna är i sig stabila.
- Stabiliserad jord kan lakas ut av vatten och hastigheten ökar om vattnet innehåller syror och sulfater.
- Vattenflödet kring stabiliserad jord är avgörande för beständigheten. Normalt är vattenflödet lågt och materialet beständigt.
- Lakningstest kan möjligen användas för att undersöka angreppshastighet. En första studie visar att skillnaden mellan olika jordar med olika bindemedel är liten.

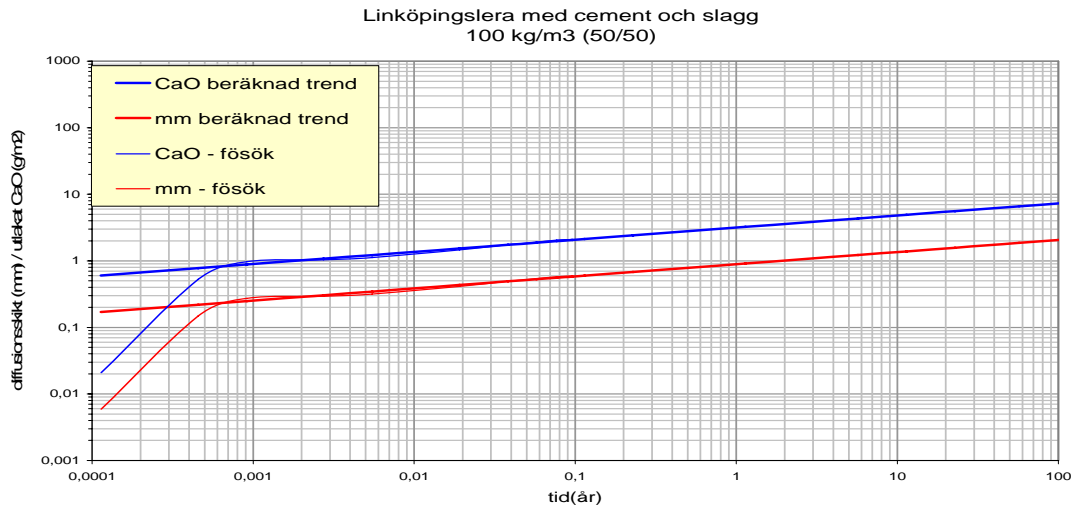
Referenser

- Betonghandboken (1994).** Svensk Byggtjänst.
- Carlsten, P. (2000).** Kalk- och kalkcementpelare. SGF Rapport 2:2000.
- Ekström, T. (2003).** Leaching of concrete, Doctoral Thesis. Lund Institute of Technology, Report TVBM-1020.
- Fagerlund, G.(1992).** Betongkonstruktioners beständighet. En översikt. Cementa.
- Hayashi, H., Nishikawa, J., Ohishi, K. och Terashi, M. (2003).** Field observation of long-term strength of cement treated soil. Proc. Grouting and Ground Treatment , New Orleans 2003.
- Johansson, L. (2000).** Djupstabilisering med kalk-cementpelare- Provfält. SD Arbetsrapport 15.
- Janz M., Johansson S-E. (2001).** Olika bindemedels funktion vid djupstabilisering.
SD Arbetsrapport 9.
- Kitazume, M., Nakamura, T., Terashi, M. Och Ohishi K (2003).** Laboratory tests on long-term strength of cement treated soil..
- Larsson, R.(1989).** Jords egenskaper SGI information 1.
- Löfroth H. (2005).** Properties of 10-year-old lime-cement columns. Deep mixing '05.
- Mitsunari T., Isemoto N., Handa M., Itou H., Shimoda M., Bessho M. (1995).** A New Liqefaction Remediation Measure Using Hard Burnt Lime. Inorganic Materials, Vol 2, No 256, 153-165.
- Nordkalk (2003)** Stamväg 51:s provkonstruktion i Kyrkslätt, Informationsblad.
- Nilsson, L-O. (1994).** Betonghandboken kap 14, fukt och betong.
- Nishida, T., Terashi, T., Nobuaki, O. och Ohishi , K. (2003).** Prediction method for Ca leaching and related property change of cement treated soil.
- Larsson, R.(1989).** Jords egenskaper SGI information 1.
- prEN 14944-3 (2004).** CEN
- Rombén, L. (1979).** Aspects on testing methods for acid attacks on concrete-further experiments. CBI Research Fo 9:79
- VAV (1975).** Svenska vatten och avloppsverksföreningen. Normalbestämmelser för rör och rördelar av betong till avloppsledning, trummor och brunnar. VAV P11.
- Åhnberg, H & Johansson, S-E. (2005)** Increase in strength with time in soils stabilised with different types of binder in relation to the type and amount of reaction products. Deep Mixing 05, vol 1.1, 195-202.

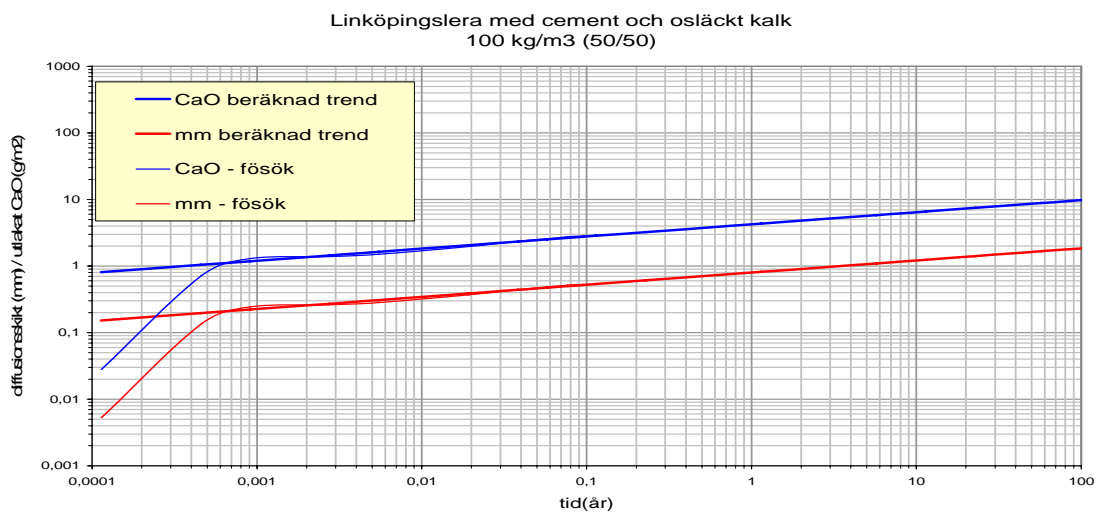
Bilaga



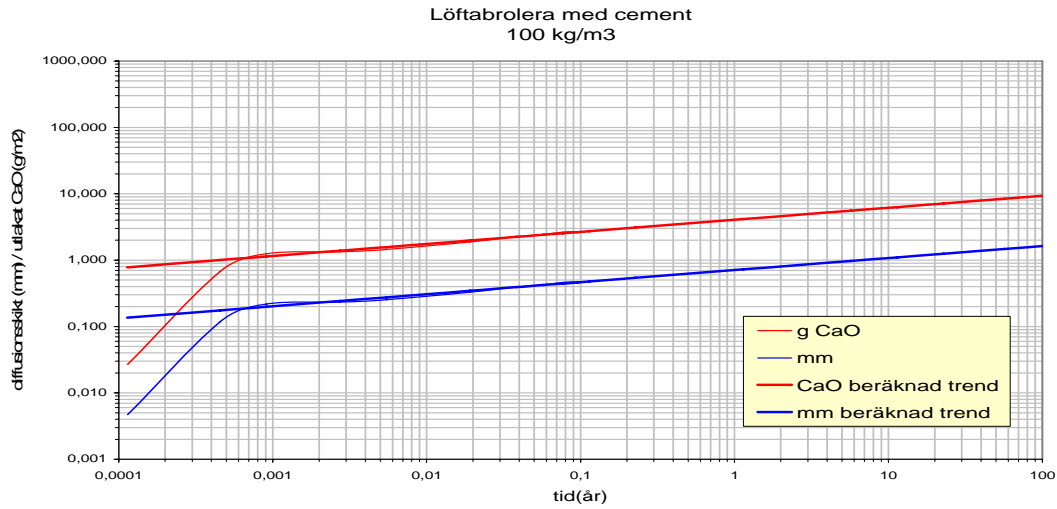
Bilaga Fig 1. Angreppsdjup över tid, osläckt kalk – Linköpingslera.



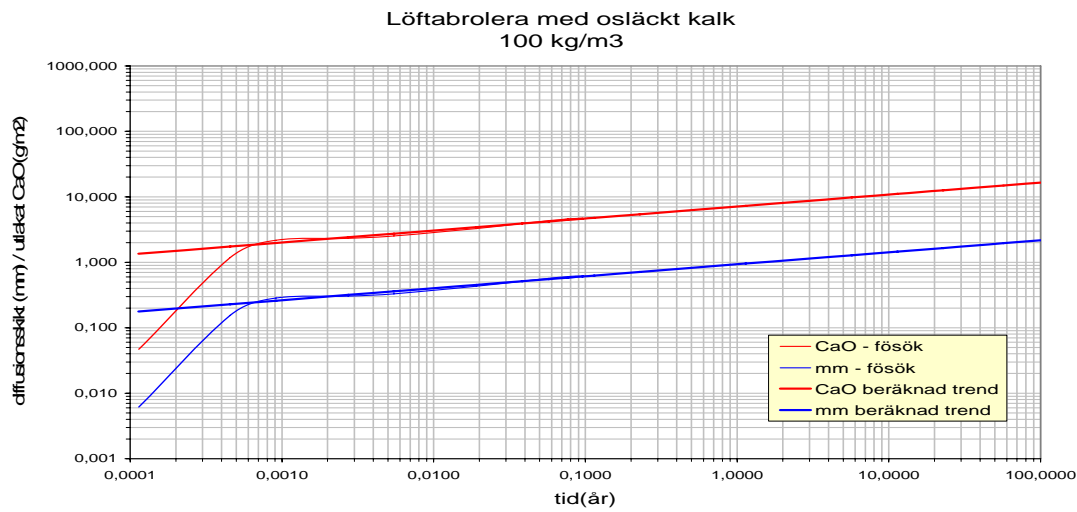
Bilaga Fig 2. Angreppsdjup över tid, cement/slagg – Linköpingslera.



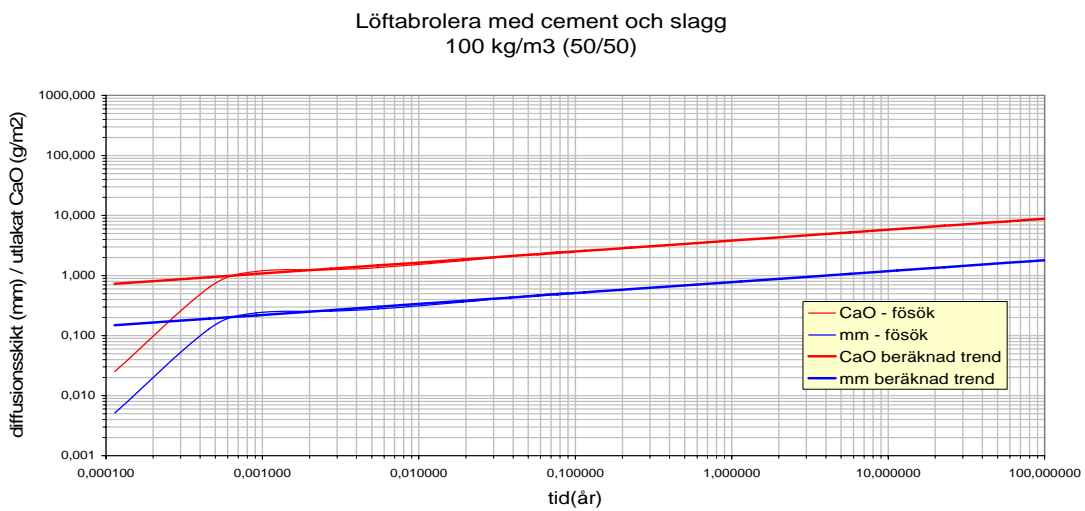
Bilaga Fig 3. Angreppsdjup över tid, cement/osläckt kalk – Linköpingslera.



Bilaga Fig 4. Angreppsdjup över tid, cement – Löftabrolera.

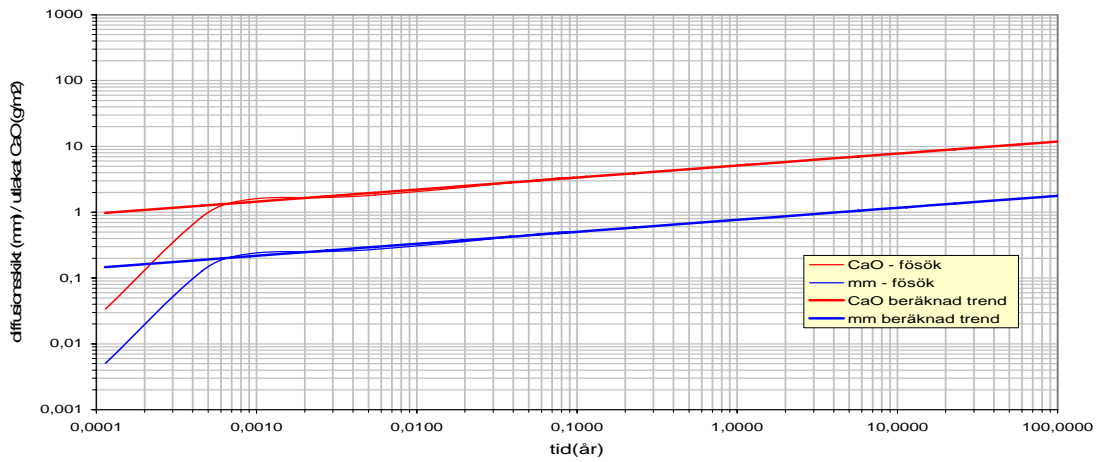


Bilaga Fig 5. Angreppsdjup över tid, osläckt kalk – Löftabrolera.



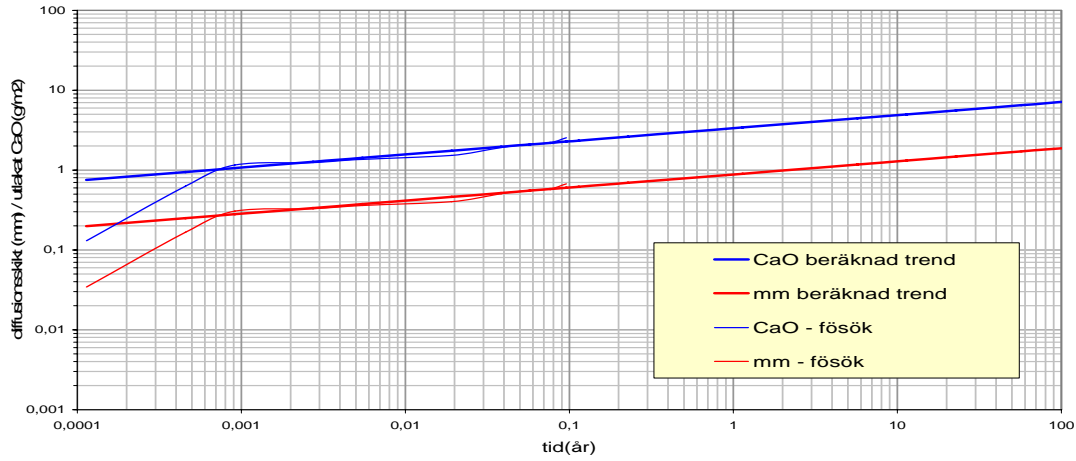
Bilaga Fig 6. Angreppsdjup över tid, cement/slagg – Löftabrolera.

Löftabrolera med cement och osläckt kalk
100 kg/m³ (50/50)



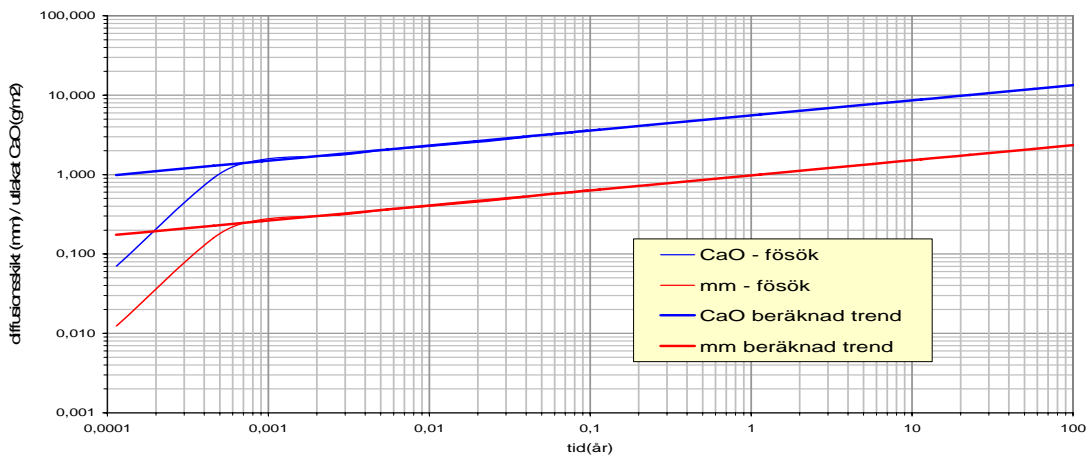
Bilaga Fig 7. Angreppsdjup över tid, cement/osläckt – Löftabrolera.

Holmagyttja med cement
200 kg/m³

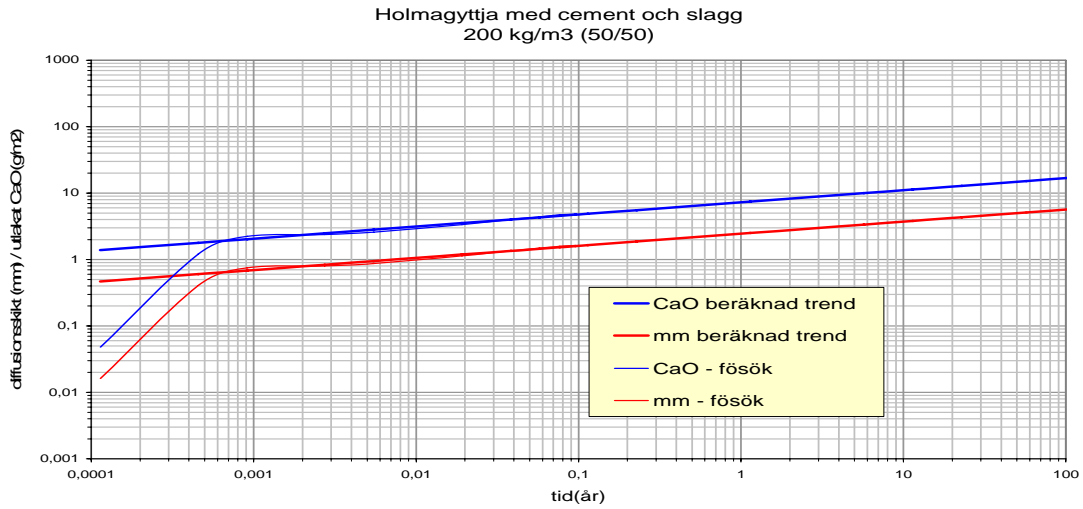


Bilaga Fig 8. Angreppsdjup över tid, cement – Holmagyttja.

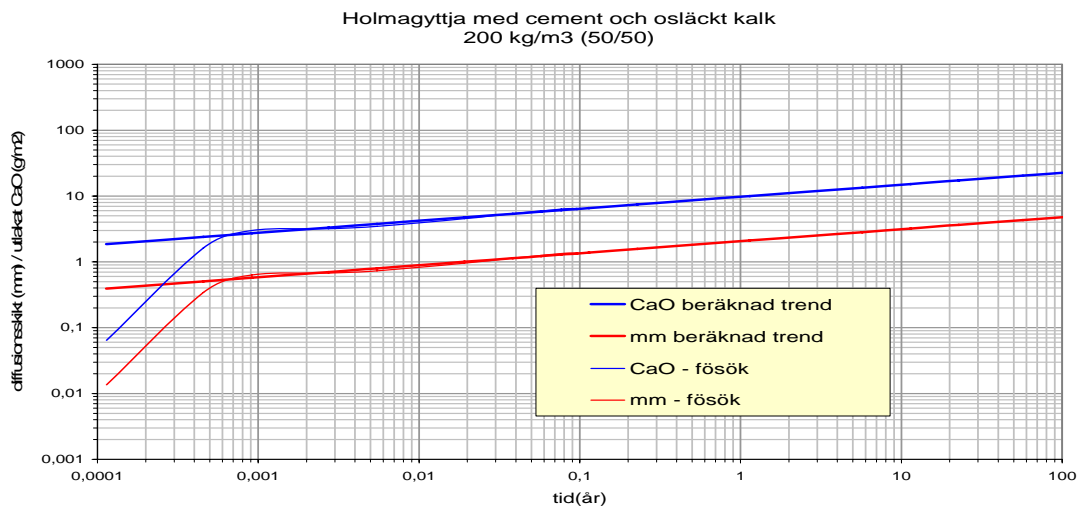
Holmagyttja med osläckt kalk
200 kg/m³



Bilaga Fig 9. Angreppsdjup över tid, osläckt kalk – Holmagyttja.



Bilaga Fig 10. Angreppsdjup över tid, cement/slagg – Holmagyttja.



Bilaga Fig 11. Angreppsdjup över tid, cement/osläckt kalk – Holmagyttja.

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. **Grunnforsterkning 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 Sättinge – 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 – Modellförsök (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

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 gytta 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
(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



Svensk Djupstabilisering

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