Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Rapport 3

Stabilisering av organisk jord med cement- och puzzolanreaktioner – Förstudie

Karin Axelsson
Sven-Erik Johansson
Ronny Andersson

Svensk Djupstabilisering

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

Verksamheten finansieras av medlemmarna samt genom anslag från Byggforskningsrådet, 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

Swedish Deep Stabilization Research Centre

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

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

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

Further information on the Swedish Deep Stabilization Research Centre can be obtained from the Project Manager, Mr G Holm, tel: +46 13 20 18 61,
fax: +46 13 20 19 14 or e-mail: goran.holm@swedgeo.se

Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Rapport 3

Stabilisering av organisk jord med cement- och puzzolanreaktioner

FÖRSTUDIE

Karin Axelsson
Sven-Erik Johansson
Ronny Andersson

Linköping 2000

Rapport	Svensk Djupstabilisering c/o Statens geotekniska institut 581 93 Linköping
Beställning	Tel: 013-20 18 62 Fax: 013-20 19 13 E-post: birgitta.sahlin@swedgeo.se
ISSN ISRN	1402-2036 SD-R--00/3--SE
Upplaga	1000
Tryckeri	Roland Offset AB, Linköping, augusti 2000

Förord

Denna förstudie, ”Stabilisering av organisk jord med cement- och puzzolanreaktioner”, har utförts som ett projekt inom Svensk Djupstabilisering, under sommaren 1996 och redovisar kunskapsläget då. Kunskapen har sedan dess använts aktivt inom Svensk Djupstabilisering samt inom EU-projektet ”Euro-SoilStab”. Arbetet omfattar en undersökning av hållfasthet i stabiliserad gyttja och torv. Rapporten har fungerat som underlag för den fördjupade studien inom Svensk Djupstabilisering om stabiliserad jords egenskaper – inverkande parametrar.

Arbetet i förstudien har indelats i laboratorieförsök, utvärdering och jämförelse med tidigare rapporterade projekt. Försöken har utförts på gyttja och torv från två platser, Arlanda flygplats och motorvägen Örebro-Arboga, vilka då var aktuella för förstärkningsarbeten med djupstabilisering.

Författarna till denna rapport vill tacka Helen Åhnberg, Statens geotekniska institut och Elina Parkkinen, Lohja Rudus Oy AB, för deras medverkan i arbetet.

Rapporten har redigerats av Jan Lindgren, SGI.

Stockholm Danderyd 2000-08-11

Björn Paulsson K*arin Axelsson* *Sven-Erik Johansson* *Ronny Andersson*
Ordf. SD

Innehåll

Förord

Summary 7

Sammanfattning 9

1. Inledning 11
1.1 Syfte 11
1.2 Bakgrund 11

2. Masstabilisering 12

3. Stabiliseringsförsök i gyttja och torv - Utförande 14
3.1 Klassificering och egenskaper hos gyttjan och torven 14
3.2 Porvattenanalys 15
3.3 Stabiliseringsmedel 16
3.4 Provningsprogram 17
3.5 Provberedning och provning 17

4. Inverkan av olika faktorer på stabiliseringseffekten 20
4.1 Inverkan av stabiliseringsmedel 20
4.1.1 Cement och släckt kalk
4.1.2 Flygaska
4.1.3 Granulerad masugnsslagg
4.1.4 Tillsatsfiller
4.2 Mängd stabiliseringsmedel 24
4.3 Inverkan av jordart 24
4.4 Inverkan av lagringstemperatur 25
4.5 Inverkan av packningsgrad 26
4.6 Inverkan av jämn kvalitet 27

5. Resultat 28
5.1 Provberedning 28
5.2 Jordarternas densitet och hållfasthet 28
5.2.1 Densitet i stabiliserad gyttja
5.2.2 Hållfasthet i stabiliserad gyttja
5.2.3 Densitet i stabiliserad torv
5.2.4 Hållfasthet i stabiliserad torv
5.3 Jämförelse med tidigare utförda resultat 40
5.3.1 Kyrkslätt
5.3.2 Örebro - Arboga

6. Slutsatser och rekommendationer 44
6.1 Slutsatser 44
6.2 Rekommendationer 45

Referenser 48

Bilagor 51

Summary

The purpose of this report is to point out the possibility of stabilizing mud and peat by determining the shear strength of samples stabilized in the laboratory. The report has also served as a basis for an in depth study at the Swedish Deep Stabilization Research Centre.

Samples of stabilized soil were produced in the laboratory. The soil consisted of mud and peat from two sites and the strength of the stabilized samples was determined with unconfined compression tests. Different binders were used, consisting of cement (four different types), lime and residual material from industry.

The main conclusions are as follows:

- Strength both in mud and peat can be considerably improved by the use of stabilizers.
- Density tends to increase in the stabilized samples. Increased density also tends to give increased strength.
- The storage temperature is of varying importance for different stabilizing agents. To make the best comparison between laboratory stabilization and in situ stabilization, the laboratory samples must be stored at the same temperature as is expected in the soil in situ.

The results from the stabilization tests show that different types of cement and different mixes with cement and other stabilization agents vary with respect to effect. Swedish rapid cement gave the best result in mud, but in some samples Swedish standard cement gave equivalent results after 26 days. After cement alone, cement and finely granulated ground blast furnace slag gave the next best results.

Cement and finely ground blast furnace slag gave the best result in peat. Stabilization with cement alone also gave a good result. Lime has a poor effect in peat.

In almost every case, mixes with fly ash gave the worst results of all residual materials.

The results correspond well with those that can be expected from the theoretical evaluation in Chapter 4.

Based on the theoretical valuation and the results in the report, Chapter 6.2 recommends that the binding effect of the stabilizing agent should based on cement and puzzolanic reactions. With respect to technical demands, a preliminary investigation is always made. Today, it is proposed that Portland cement, lime and blast furnace slag be approved. Suitable amounts of binder are suggested.

The characteristics and composition of the residual material vary partly with the type of raw material and the fact that various industrial processes are not designed to produce the best residual material. Other materials, including new types, should therefore always be reviewed for each project in accordance with environmental regulations.

A number of projects for further research are presented below:

- Establish and clarify performance and methodology when samples with stabilized soil are being prepared and tested.
- Examine the importance of rugged stabilizing agents (Chapter 4.6).
- Develop methods and criteria for evaluating the environmental effects of new stabilizing agents.
- Study the chemical and physical parameters affecting reactions that increase strength.

Sammanfattning

I denna förstudie tillverkades provkroppar av stabiliserad jord på laboratorium. Jorden utgjordes av gyttja och torv från vardera två platser. Hållfastheten hos de stabiliserade proverna bestämdes med hjälp av enaxliga tryckförsök. De stabiliseringsmedel som användes var cement (4 olika sorter), osläckt kalk, finsand, finmald granulerad masugnsslagg samt olika restmaterial från industrin. Dessutom pressades den ostabiliserade jordens porvatten ut och analyserades. Vid efterföljande analys bestämdes jonkoncentrationerna i jordens vattenfas.

Vid provberedningen och provningen av stabiliserad torv användes ett speciellt förfarande (kap 3.5). Metoden är tänkt att efterlikna de förhållanden som råder vid masstabilisering i fält och var relativt smidig att utföra.

Utöver stabiliseringsförsöken gjordes även en genomgång av teoretisk klassificering samt erhållna reaktioner som funktion av jordart, stabiliseringsmedel m.m.

Några av de viktigaste slutsatserna är:

- Hållfasthetsegenskaperna hos både torv och gyttja kan förbättras betydligt genom stabilisering

- Densiteten tenderar att öka i proverna efter stabilisering. Detta tyder på ett samband mellan ökningen av densiteten och ökad hållfasthet i proven.

- Lagringstemperaturen har olika betydelse för olika stabiliseringsmedel. För att få bäst jämförelse med fältförhållanden bör proven lagras vid motsvarande temperatur som kan förväntas råda i fält.

Resultaten från stabiliseringsförsöken visar att olika cementsorter och olika blandningar av cement och andra medel skiljer sig åt avseende effekt. I gyttja gav svenskt snabbcement bäst och säkrast effekt, men i något fall var dock även

svensk standardcement likvärdigt efter 26 dygn. Näst efter enbart cement gav blandningar av cement och finmald granulerad masugnsslagg samt cement och bypassaska bra resultat.

Bäst stabiliseringseffekt i torv erhölls med en blandning av cement och finmald granulerad masugnsslagg. Även stabilisering med enbart cement (standard- och snabbcement) gav bra resultat. I torv har osläckt kalk dålig stabiliseringeffekt.

Blandningar med flygaska ger i nästan alla fall sämst resultat av alla restmaterial.

Resultaten stämmer väl överens med de resultat som kan förväntas utifrån den teoretiska värderingen/genomgången i kapitel 4.

Utifrån avrapporterad genomgång samt de erhållna resultaten i förstudien rekommenderas i kapitel 6.2 att stabiliseringens bindemedelseffekt ska basera sig på cement- eller puzzolanreaktioner. Med hänsyn till tekniska krav görs alltid en förundersökning. Idag rekommenderas de kända, produktdeklarerade portlandcement, osläckt kalk, inert filler samt granulerad masugnsslagg, som redan använts. Förslag till bindemedel ges.

Restmaterialens egenskaper och sammansättning varierar bl.a beroende av olika råmaterial och att industriella processer inte styrs av krav på restmaterialens sammansättning. Övriga material och nya material bör därför alltid granskas enligt miljölagen i varje enskilt projekt.

Nedan föreslås flera möjliga projekt att gå vidare med:

- Fastställa och förtydliga utförande och metodik vid provberedning och provning av stabiliserad torv.

- Undersöka betydelsen av ett stabiliseringsmedels ”robusthet” (kap 4.6).

- Utveckla metoder och kriterier för värdering av miljöeffekter hos nya stabiliseringsmedel.

- Detaljstudera de kemiska och fysikaliska parametrar som påverkar de hållfasthetsuppbyggande reaktionerna.

1. Inledning

1.1 SYFTE

Syftet med denna förstudie har varit att, genom att bestämma skjuvhållfastheterna hos laboratorieinblandade provkroppar, visa på möjligheterna att stabilisera gyttja och torv. Dessutom ska förstudien tjäna som underlag, avseende bl.a. metodik och försöksplanering, för vidare utveckling av masstabilisering och för en fördjupad studie som planeras inom Svensk Djupstabilisering.

1.2 BAKGRUND

Under slutet av 1995 avrapporterade Statens geotekniska institut (SGI) ett större projekt angående effekter av cement och kalk för olika jordar vid djupstabilisering /ref 5/. Projektet gav bl.a. kunskaper som torde möjliggöra stabilisering av organiska jordar som gyttja och torv. Samtidigt har masstabilisering introducerats i Sverige.

Masstabilisering är en ny teknik att stabilisera lösa jordlager, som t.ex. torv och gyttja. Vid masstabilisering blandas bindemedel in i hela jordlagret vilket gör att man får ett stabiliserat ”block” till skillnad mot pelarstabilisering.

Metoden att utföra masstabilisering har utvecklats under de senaste fem åren och har med goda erfarenheter tillämpats i ett antal projekt i Sverige och Finland / ref 10, 15/. Vid de projekt där masstabilisering tillämpats i Finland har skjuvhållfastheten ökats upp till 40 gånger i gyttja och upp till 20 gånger i torv.

Inom projektet Svensk Djupstabilisering bedrivs FoU med syftet att vidareutveckla djupstabiliseringstekniken med kalkcementpelare. På grund av att intresset för den nya masstabiliseringstekniken ökar och att utvecklingspotentialen för metoden är hög bestämdes att en FoU-plan även skulle utarbetas för denna teknik. I FoU-planen /ref 12/ nämns bl.a. behovet av att påvisa och närmare undersöka stabiliseringseffekten vid stabilisering av organisk jord som gyttja och torv.

Arbetet, som redovisas i denna rapport, utfördes 1996 och redovisar kunskapsläget då. Kunskapen har sedan dess använts aktivt inom Svensk Djipstabilisering samt inom EU-projektet ”EuroSoilStab”.

2. Masstabilisering

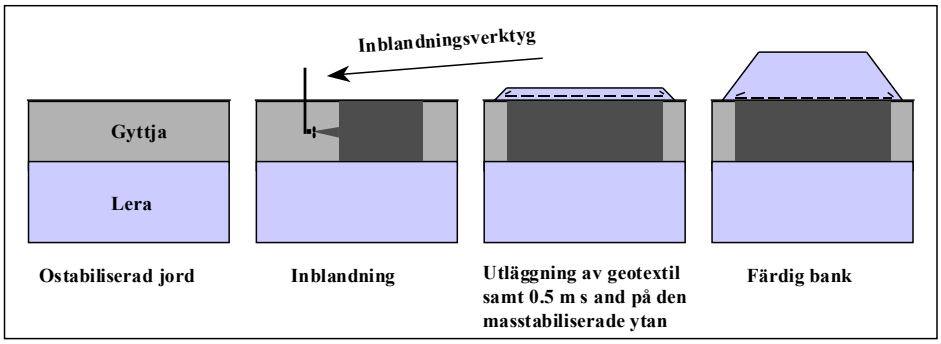
När en väg eller järnvägsbank ska byggas på lermark krävs oftast någon form av förstärkning för att undvika problem med sättning och stabilitet. Traditionellt tillämpas då djupstabilisering av leran. Ofta förekommer dock lösa jordlager med torv och gyttja över leran. I dessa jordlager är det svårt att uppnå tillräcklig bärighet med pelarstabilisering. Konventionellt har då istället exempelvis massutskiftningsmetoden använts, då lösa jordlager grävs ut och ersätts av friktionsmaterial med högre bärighet.

Massutskiftning är en dyr metod. Den medför dessutom ofta problem eftersom utskiftningsmassor ska deponeras och nya utfyllnadsmassor transporteras till platsen. Därför har det funnits behov av att utveckla en funktionell, ekonomisk och mera miljövänlig metod för stabilisering av gyttja och torv. Den nyligen utvecklade masstabiliseringstekniken kan uppfylla dessa önskemål.

Masstabilisering är en jordförstärkningsteknik där stabiliseringsmedel blandas in i hela jordlagret. Detta gör att man får ett stabiliserat ”block”, till skillnad från pelarstabilisering. I och med stabiliseringen minskas sättningen och stabiliteten i jorden ökar. Genom masstabilisering kan lösa jordlager utnyttjas istället för att deponeras. Dessutom minskar uttaget och transporten av naturgrus och andra utfyllnadsmassor.

Inblandningen har hittills gjorts med hjälp av ett inblandningsverktyg som är monterat på en grävmaskin. Efter inblandningen läggs en geotextil ut över den stabiliserade ytan och därefter ett 0,5 m tjockt gruslager, *figur 1*. Grusbädden gör att den stabiliserade volymen packas och används även i kombination med stockmattor som arbetsbädd för grävmaskinen.

1997 hade metoden använts vid mer än 10 projekt i Sverige och Finland och framförallt under väg- och järnvägsbankar. Vid dessa projekt har bindemedlet bestått av cement och blandningar av cement och olika restmaterial från industrin. Även inerta jordmaterial som t.ex. sand kan blandas med cement och olika typer av salter kan tillsättas för att påverka stabiliseringsreaktionerna.



Figur 1. Principfigur över den masstabiliserade ytan.

Andra möjliga tillämpningar för masstabiliseringstekniken är stabilisering av ohanterliga massor så att de kan användas som fyllnadsmassor, eller för att åstadkomma en konstgjord ”torrskorpa”.

3. Stabiliseringsförsök i gyttja och torv – utförande

I april 1996 påbörjades denna förstudie med inblandningsförsök vid SGI:s laboratorium i Linköping. Till stabiliseringsförsöken valdes jordprover bestående av gyttja och torv från 2 olika platser samt ett antal stabiliseringsmedel för masstabilisering.

Inblandningen och lagringen av provkropparna gjordes på två olika sätt i gyttjan och torven. Gyttjan blandades och lagrades på konventionellt sätt i provhylsor, med innerdiametern 50 mm, medan torvproverna lagrades i hylsor med en innerdiameter av 68 mm och dessutom med en vertikal last. Inblandnings- och lagringsförfarandet i torvproverna följde rutiner utarbetade i Finland, vilka demonstrerades av Elina Parkkinen från Lohja Rudus Oy Ab. Den nya försöksutrustningen togs fram av SGI:s verkstad efter samma principer som den finska utrustningen.

Efter lagring i 14 respektive 26 dygn för gyttjan och 28 dygn för torven utförde SGI bestämning av densitet hos provkroppar samt enaxliga tryckförsök, vilka utvärderades av SGI:s laboratorium med avseende på skjuvhållfasthet. Totalt undersöktes 84 provkroppar av gyttja och 68 provkroppar av torv.

3.1 KLASSIFICERING OCH EGENSKAPER HOS GYTTJAN OCH TORVEN

Den ostabiliserade jordens egenskaper redovisas i *tabell 1*. Dels är det gyttja och torv från den tredje banan vid Arlanda flygplats, dels gyttja och torv från motorvägsbygget på sträckan Örebro-Arboga.

Den mest utmärkande skillnaden mellan de olika torvsorterna är vattenkvoten. I Arlanda-torven är den 442 % och i Örebrotorven 1308 samt 1413 %. Eftersom vattenkvoten varierar mycket i torv är det svårt att ange ett ”normalt” värde. Arlandatorvens vattenkvot kan dock anses vara ovanligt låg.

Utöver skillnader i vattenkvoten så märks också skillnader i torvens halt av or-

Tabell 1. Egenskaper hos den ostabiliserade jorden. Vid försöken antogs densiteten till 1,0 ton/m^3 i torven och 1,2 ton/m^3 i gyttjan.

	Benämning enligt 1981 års system*	Org. halt %	Vatten-kvot w %	Konflyt-gräns wL %	Humifie-ringsgrad von Post	Jordartsbe-nämning
Örebro						
G1	Grågrön, lerig gyttja med växtdelar	8,0[1]	151	140		le Gy vx
T1	Brunsvart låghumifierad torv	99[2]	1308		H2-H3	Tl
T2	Brunsvart torv	97[2]	1413		H2-H6	T_L / T_M
Arlanda						
G2	Grågrön, lerig gyttja med växtdelar	17[1]	205			le Gy vx
T3	Svart höghumifierad torv med växtdelar och vedrester	73[2]	442	259	H8	Th

1) Bestämd med kolorimetermetoden
2) Bestämd med glödgningsmetoden

* Baserad på okulär jordartsklassificering. Hänsyn har tagits till förekommande mätdata.

ganiskt material. Arlandatorven innehåller lägre halt av organiskt material och har högre humifieringsgrad än Örebrotorven.

Utöver de egenskaper som beskrivs i *tabell 1* bestämdes även den kemiska sammansättning av vattenfasen för de ursprungliga jordarna. Detta utfördes med hjälp av porvattenpressning och efterföljande analys.

3.2 PORVATTENANALYS

Innan djupstabilisering tillämpas vid ett projekt görs rutinmässiga laboratorieinblandningar med olika stabiliseringsmedel för att förutse stabiliseringseffekten. Dessutom bestäms den ostabiliserade jordens geotekniska egenskaper, som vattenkvot, densitet, konflytgräns, sensitivitet, skjuvhållfasthet och jordartsbenämning. I vissa fall undersöks även organisk halt och humifieringsgrad.

Studier visar att jord med till synes lika mekaniska egenskaper kan ge helt olika stabiliseringseffekt med samma stabiliseringsmedel. Detta torde bero på inverkan av olika kemiska ämnen i jordmaterialet. Kemiska analyser av den ostabiliserade jorden kan därför vara ett bra komplement.

Ett sätt att kemiskt analysera jorden är genom porvattenpressning. Vid porvattenpressning bestäms jonkoncentrationerna i vattenfasen för stabiliserad eller ostabiliserad jord. I förstudien utfördes porvattenpressning och efterföljande analys av den ostabiliserade jorden. Resultaten redovisas i bilaga 5.

I /ref 5/ beskrivs kemisk laboratorieprovning av stabiliserad och ostabiliserad jord närmare. Rapporten behandlar bl.a. hur jonsammansättningen i vattenfasen förändras vid tillsatts av olika stabiliseringsmedel samt hur de hållfasthetsuppbyggande reaktionerna påverkas.

3.3 STABILISERINGSMEDEL

Stabiliseringsmedlen (*tabell 2*) utgjordes av 4 olika sorters cement, osläckt kalk, finmald granulerad masugnsslagg, finsand samt olika restprodukter från industrin och beskrivs närmare i kapitel 4.1. Utöver dessa stabiliseringsmedel provades en kemisk tillsats (Glorit). Samtliga material är hämtade från Norden men alla är inte kommersiellt tillgängliga.

Valet av stabiliseringsmedel baserades på resultat från tidigare utförda försök i Sverige och Finland. Totalt provades 11 olika stabiliseringsmedel och en kemisk tillsats i 19 kombinationer (se bilaga 1).

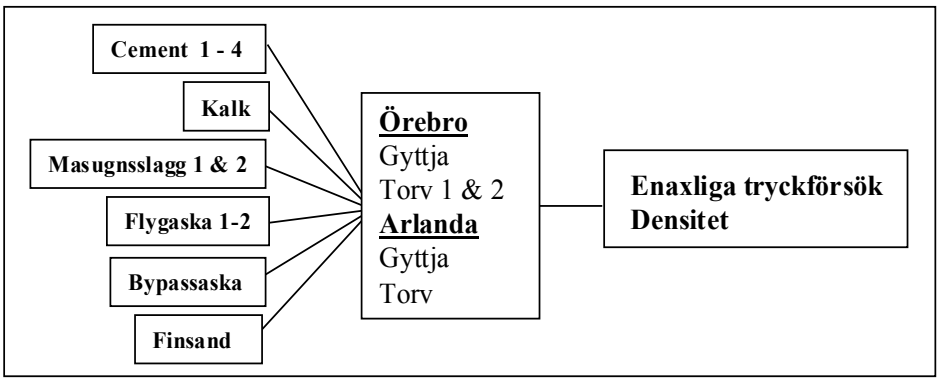
Tabell 2. Använda stabiliseringsmedel.

BINDEMEDEL	TILLSATSMATERIAL			
	Puzzolana material	Latent hydrauliska material	Tillsatsfiller	Kemisk tillsats
CEMENT	Bypassaska (B)	**FINMALD GRANULERAD**	Finsand (FS)	Glorit (G)
Cem SH P (SH)	**ASKA**	**MASUGNSLAGG**		
Cem Std P (Std)	Flygaska 1 (F1)	Granulerad masugnsslagg 1 (M1)		
Pikasementti (FSH)*	Flygaska 2 (F2)	Granulerad masugnsslagg 2 (M2)		
Cement 4 (C4)				
KALK				
Osläckt kalk (CaO)				

* Finsk motsvarighet till svensk snabbcement.

3.4 PROVNINGSPROGRAM

Kombinationerna av de bindemedel och jordar som provades kan principiellt ses i *figur 2*. Provningsprogrammet i sin helhet återfinns i bilaga 2.



Figur 2. Principfigur över provningsprogrammet.

Mängden stabiliseringsmedel var i samtliga gyttjeprov 200 kg/m^3. I torvproverna tillsattes huvudsakligen 250 kg/m^3 stabiliseringsmedel. Mängden varierades dock i några prover, vilket framgår av provningsprogrammet i bilaga 2.1.

Arlandatorven visade sig vara mycket torr vid inblandningen, vilket gjorde den stabiliserade massan smulig och svårblandad. För att underlätta inblandningen och se hur stabiliserings-effekten påverkades, tillsattes därför vatten i några provkroppar (bilaga 2.2).

3.5 PROVBEREDNING OCH PROVNING

För att minska skillnader mellan olika provkroppar då det gäller jordens egenskaper blandades varje jordsort tills dess att massan var relativt homogen. Efter homogeniseringen av jorden, som utfördes av SGI:s laboratorium, kunde inblandningen av stabiliseringsmedel påbörjas.

Inblandning och lagring av gyttjeproverna gjordes på det normala sättet för inblandning och lagring av lerprover. Detta innebar att jord och stabiliseringsmedel blandades till en homogen massa i en hushållsassistent, för att sedan packas och lagras i hylsor med innerdiametern 50 mm. Varje provhylsa fylldes och packades i fem lager. I gyttjan från Örebro packades varje lager för hand, vilket är det packningsförfarande som normalt används i Finland. Arlandagyttjan däremot packades, såsom oftast i Sverige, med konstant tryck i ca 10 sekunder efter varje lager. Försöksresultaten utvärderades enligt samma metod som

används vid enaxialförsök på inblandningsprov i lera. Skjuvhållfastheten beräknas som halva tryckhållfastheten, med korrigering för inträffad deformation enligt Svensk standard.

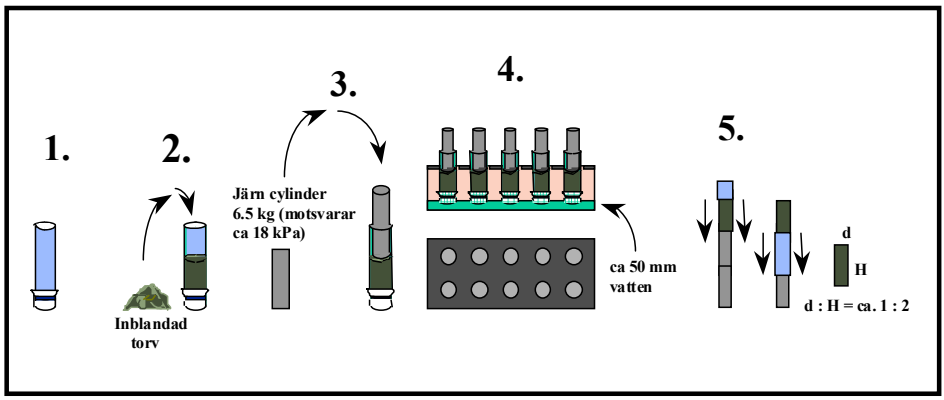
Proven lagrades vid 8 ^{0}C varefter skjuvhållfastheten bestämdes med hjälp av enaxliga tryckförsök. För att få en uppfattning om skjuvhållfasthetens utveckling med tiden gjordes tryckförsöken i gyttjan vid två tillfällen, efter 14 respektive 26 dygn. 14-dygns provningen utfördes med en provkropp och 26-dygns provningen med dubbelprover.

Inblandning och tillverkning av torvproverna gjordes på ett annorlunda sätt än för gyttjeproverna. De hylsor som användes hade en innerdiametern 68 mm. Dessutom belastades provkropparna med en vertikal last under lagringstiden. Förfarandet beskrivs i *figur 3*.

1. För att torvprovet skulle kunna suga upp vatten under lagringstiden tejpas ett nät fast i botten av hylsan.

2. Torven blandades med stabiliseringsmedel till en ”homogen” massa och packades därefter för hand ner i provhylsorna.

3. Torvprovet belastades med en tryck av ca 18 kPa utbredd last. Belastningen utgjordes av en järncylinder.



Figur 3. Beskrivning av inblandnings- och lagringsförfarandet vid provning av torven.

4. De stabiliserade provkropparna ställdes sedan i en speciellt utformad provlåda. Provlådan bestod av en plastback med en ställning så att provkropparna kunde förvaras stående vertikalt. Botten på provlådan fylldes upp till ca 50 mm med vatten.

5. Efter 28 dygn i rumstemperatur trycktes provkropparna ut ur hylsorna varefter de enaxliga tryckförsöken utfördes.

Torvproverna lagrades i 28 dygn och provningen utfördes med dubbelprover. Huvuddelen av proverna lagrades vid rumstemperatur (ca 21^0C), som varit brukligt i Finland, men eftersom temperaturen i marken normalt är ca 8 ^{0}C gjordes även några parallella torvprov vilka lagrades vid 8 ^{0}C.

Denna metod för inblandning och lagring av torv har utvecklats i Finland och är den metod som nu används för provning. Provningsmetoden är tänkt att efterlikna de förhållanden som råder i fält vid masstabilisering. Den större diametern på provkropparna är tänkt att ge ett mer representativt prov i den heterogena torven. Lasten som läggs på efter inblandningen motsvarar en belastning i fält av ca 1 m friktionsmaterial. Den stabiliserade torven har dessutom möjlighet att suga upp vatten genom nätet i botten av provkropparna. Detta efterliknar förhållandena för den stabiliserade torven i fält, som ligger vid randen av masstabiliseringen och som kan suga upp vatten från den omkringliggande ostabiliserade torven.

4. Inverkan av olika faktorer på stabiliseringseffekten

Många olika faktorer påverkar den hållfasthet som erhålls vid stabilisering. Skillnaden i stabiliseringseffekt mellan olika typ och mängd tillsatt stabiliseringsmedel är normalt större vid stabilisering av gyttja och torv än vid stabilisering av lera.

I detta kapitel beskrivs kortfattat hur olika faktorer kan inverkar på stabiliseringseffekten.

4.1 INVERKAN AV STABILISERINGSMEDEL

När stabiliseringsmedel blandas in i ett jordlager sker flera reaktioner som gör att jordvolymen binds ihop och hållfastheten ökar. Hållfastheten byggs upp på olika sätt för olika på stabiliseringsmedel. Vid pelarstabilisering i lera används i Sverige främst osläckt kalk och cement. Precis som för övrig jordstabilisering kan dock även andra medel/utfyllnadsmaterial vara aktuella. De för masstabilisering diskuterade stabiliseringsmedlen indelas enligt nedan.

- Bindemedel - cement och osläckt kalk
- Latent hydrauliska tillsatsmaterial - t.ex. finmald granulerad masugnsslagg
- Puzzolana tillsatsmaterial - t.ex. flygaska
- Tillsatsfiller - t.ex. finsand

Avgörande för vilken grupp ett stabiliseringsmedel tillhör är översiktligt förhållandet i den kemiska sammansättningen, den huvudsakliga mineralologiska sammansättningen samt partiklarnas storlek och form, *tabell 3*.

Tabell 3 Egenskaper som inverkar på stabiliseringsmedlens reaktivitet (från /ref 4/, bearbetad).

Klassificering	Kemisk sammansättning CaO/SiO_2	Mineraologisk strukturform	Partikelfinhet
Bindemedel			
Portlandcement	ca 3	kristallin	ca 300-500 m^2/kg
Osläckt kalk	> 40		0-0,1 mm
Latent hydrauliska tillsatsmaterial			
Finmald granulerad masugnsslagg	ca 1	amorf	ca 400-600 m^2/kg
Puzzolana tillsatsmaterial			
Flygaska från stenkol	ca 0,1 - 0,5	amorf/kristallin	ca.300-500 m^2/kg
Tillsatsfiller			
Fin sand	<< 0,1	kristallin	0,006-0,002 mm

4.1.1 Cement och osläckt kalk

Cement och osläckt kalk är bindemedel. Dessa material binder och ger hållfasthet i jorden utan att någon aktivator måste tillsättas. Här beskrivs kortfattat de hållfasthetsuppbyggande reaktionerna:

• Osläckt kalk tillverkas genom förbränning av kalksten. När osläckt kalk kommer i kontakt med vatten som finns i jorden sker omedelbart en släckning av kalken. Vid denna reaktion bildas kalciumhydroxid *$(Ca(OH)_2)$*. Samtidigt frigörs värme och pH-värdet ökar till ca 12,5. Detta är en förutsättning för att de efterföljande sk puzzolanreaktionerna ska äga rum. Vid puzzolan-reaktionerna reagerar lerpartiklar i jorden med kalciumhydroxiden och bildar hållfasthetsuppbyggande reaktionsprodukter.

• Cement består av en mängd olika mineraler och tillverkas genom sammanslagning av cementklinker (ihopsintrad kalksten och lera) och gips. När cement blandas med vatten bildas bl.a. kalciumsilikathydrat och kalciumhydroxid (*$Ca(OH)_2$*). Kalciumsilikathydrat, som normalt kallas CSH-gel, bildas på cementkornens ytor och genom att gelen har en starkt cementerande effekt binds jorden ihop och hållfastheten ökar. Cementeringsreaktionen sker betydligt snabbare än puzzolanreaktionen. Därför ger cementstabiliserad jord normalt högre hållfasthet, speciellt de första månaderna, än vad kalkstabiliserad jord gör.

Eftersom $Ca(OH)_2$ bildas vid cementstabilisering sker även puzzolanreaktioner, dock i mindre omfattning än vid kalkstabilisering. Detta innebär att det vid cementstabilisering, utöver cementreaktionen, bildas ca 1/5 av samma hållfasthetsuppbyggande reaktionsprodukter som bildas vid kalkstabilisering.

• Vid konventionell djupstabilisering med pelare har bindemedelskombinationen cement och osläckt kalk visat sig ge en bra stabiliseringseffekt. Cement ger en snabb, hög och ”robust” hållfasthetstillväxt. Släckningen av kalken ger dessutom en momentan uttorkning och värmeutveckling som påskyndar cementets reaktion samt på lång sikt även ger ett hållfasthetstillskott genom puzzolanreaktionerna.

Exempel på kemisk sammansättning på cement och osläckt kalk framgår av *tabell 4*.

Tabell 4. Exempel på procentuell kemisk sammansättning för standard portlandcement, osläckt kalk och granulerad masugnsslagg.

	Portland cement (Slite Std)	Osläckt kalk	Granulerad masugnsslagg
SiO_2	21	2	36
Al_2O_3	4	0,8	9
Fe_2O_3	2	–	1
CaO	63	92	40
MgO	3	1,6	11
SO_3	3	–	–
Glödg.förl.	1	1,6	–

4.1.2 Flygaska

Flygaska erhålls som restmaterial från kolpulvereldade kraftverk och värmeverk. Den erhållna askans egenskaper och reaktivitet varierar bl.a. beroende på kolsort och förbränningsprocess.

I Norden är det främst flygaska från förbränning av stenkol som har någon användning och som går att få tag på. Denna flygaska har låg halt av CaO och dess reaktioner när det används som stabiliseringsmedel är puzzolana. Puzzolana stabiliseringsmedel reagerar inte i sig själv vid stabilisering men kan mycket långsamt bilda hållfasthetsuppbyggande material genom tillsats av vatten och någon form av kalciumhydroxid *($Ca(OH)_2$)*. Kalciumhydroxid tillsätts normalt i form av portland cement för att dessutom få snabbare ”normal” hållfasthetstillväxt.

Eftersom flygaska är ett restmaterial som erhålls vid en process vars primära syfte är att producera energi varierar askans egenskaper kraftigt, även för aska från ett och samma kraftverk. Samma kraftverk använder inte heller samma kol, eller ens samma kolfyndighet, som råmaterial vilket naturligt ger stora variationer i restmaterialets tekniska och miljömässiga egenskaper. Detta gör att teknisk och miljömässig kvalitetsgranskning alltid måste göras för ett aktuellt parti.

4.1.3 Granulerad masugnsslagg

Vid framställning av metall ur malm bildas olika sorters slagg som biprodukter. Granulerad masugnsslagg erhålls som en biprodukt vid järnframställning och är den slagg som främst använts vid masstabilisering. Därför är det i första hand granulerad masugnsslagg som tas upp här. Exempel på kemisk sammansättning för granulerad masugnsslagg framgår av *tabell 4*.

Slaggens mineralogiska sammansättning och dess reaktivitet varierar beroende på hur den avkyls efter det att den kommit från masugnen (1500 ^{0}C). Långsam avsvalning ger en kristallin och helt oreaktiv slagg medan snabb avkylning ger en amorf, glasaktig och latent reaktiv slagg. Den granulerade masugnsslaggen härstammar från snabb avkylning och är således en latent reaktiv slagg.

Granulerad masugnsslaggs reaktioner när det används som stabiliseringsmedel är latent hydrauliska. Med detta menas att slaggen i likhet med puzzolana material kan bilda hållfasthetsuppbyggande produkter tillsammans med kalciumhydroxid ($Ca(OH)_2$). Skillnaden är att slaggen innehåller något mer kalk i reaktiv form. Slaggens egen reaktion är dock så långsam att den kan anses som försumbar. För att kunna använda granulerade masugnsslagg som ett bindemedel krävs därför någon form av aktivering. Det vanligaste sättet att aktivera slagg är att tillsätta portlandcement. Även andra aktiveringsmedel går att använda, men dessa ger helt andra reaktioner, reaktionsprodukter med andra egenskaper och beständighet än vid aktivering med cement/kalk. Användning av andra ämnen för aktivering av slagg bör därför diskuteras och klargöras före användning.

De hållfasthetsuppbyggande reaktionerna vid stabilisering med granulerad masugnsslagg är i likhet med övriga puzzolana material mycket temperaturkänsliga. Genom en ökad temperaturen ökar normalt reaktionshastigheten och därmed hållfastheten. På samma sätt minskar normalt hållfasthetstillväxten snabbt om temperatur sjunker.

Tillgången på användbar slagg beror främst på närheten till järnverket. Efter-

som granulerad masugnsslagg endast är en biprodukt får man acceptera den sammansättningen som man får. Normalt är dock variationen i kvalitet liten i slagg som kommer från ett och samma järnverk med konstant råmaterial. Produktdeklaration och jämn kvalitet är dock en väsentlig förutsättning för användandet av granulerad masugnsslagg. I Sverige finns t ex långvarig, god erfarenhet från produkten Merit 5000, som är bindemedel M1 i denna rapport

4.1.4 Tillsatsfiller

För att öka antalet fasta partiklar i jorden kan ett tillsatsfiller, t.ex. i form av fin sand, tillsättas vid jordstabilisering. Tillsatsfillern reagerar inte i sig själv, men ökar hållfastheten i jorden genom att fungera som ett ”förstärkande element”.

Tillsatsfillern torde framförallt ha betydelse vid stabilisering av torv och gyttja, eftersom dessa jordarter ofta kräver stora mängder stabiliseringsmedel (se kap 4.2). Genom att ersätta en del av stabiliseringsmedlet med billigt fillermaterial kan kostnaderna minskas. Dessutom torde fillern fylla ut hålrum som eventuellt uppkommit vid stabilisering.

I praktiken skiljer sig effekten av olika sorters filler åt eftersom inga filler är helt inerta. Det innebär att t.ex kiselrik sand torde ha större effekt än t.ex kalkstensfiller. Effekten av filler, oavsett typ, är dock betydligt mindre än för samma mängd bindemedel.

4.2 MÄNGD STABILISERINGSMEDEL

Stabilisering av gyttja och torv kräver normalt större mängd stabiliseringsmedel än stabilisering av lera. Detta beror dels på att gyttjan och torven innehåller få fasta partiklar att stabilisera. Eftersom det är de fasta partiklarna som ger struktur krävs att en större mängd stabiliseringsmedel inblandas. Dessutom har gyttja och torv betydligt högre vattenkvot än lera. Den stora mängden vatten i jorden innebär större hålrum som kräver mer stabiliseringsmedel.

4.3 INVERKAN AV JORDART

Gyttja och torv innehåller, till skillnad mot lera, höga halter av organiskt material. I det organiska materialet kan retarderande ämnen i form av bl.a. humus och humussyror förekomma. Vid stabiliseringen reagerar humussyrorna med $Ca(OH)_2$ och bildar svårlösliga reaktionsprodukter som faller ut på lerpartiklarna. Syrorna kan också göra att pH sjunker i jorden. Detta har negativ inverkan på bindemedlens reaktionshastighet, vilket medför att hållfasthetsutvecklingen kan bli långsammare i gyttja och torv än i lera.

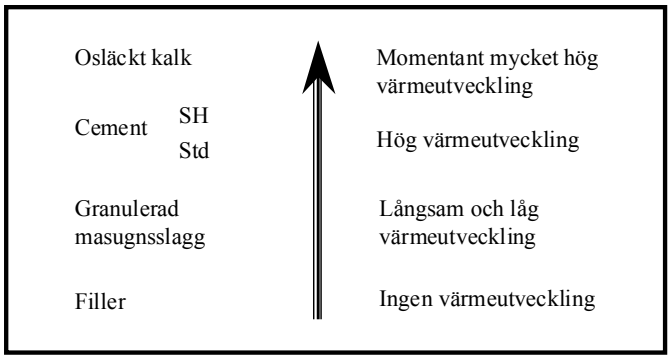
Undersökningar utförda i Finland /ref 16/ indikerar att jord med höga halter av organiskt material som gyttja och torv kräver att bindemedelsmängden överstiger ett ”gränsvärde”. När bindemedelsmängden understiger ”gränsvärdet” så förblir jorden ostabiliserad. En orsak till detta kan vara att humussyrorna ”neutraliseras” när en tillräcklig mängd bindemedel tillsätts.

Vid en nyligen genomförd undersökning vid Uleåborgs universitet i Finland /ref 7/ påvisas humus och humussyrors negativa inverkan på stabiliseringseffekten vid jordstabilisering. Resultaten från undersökningen indikerar dock att jordens humus- och humussyrahalt endast är en av flera faktorer som påverkar stabiliseringseffekten. Därför kan idag stabiliseringsresultatet för ett bindemedel inte entydigt förutsägas genom att bestämma enbart organisk halt och humushalt i jorden.

Cement ger ofta bättre stabiliseringseffekt än kalk i gyttja och torv. Troligen beror detta på kemisk inverkan av humussyrorna enligt ovan, och på att en av kalkens viktigaste hållfasthetsuppbyggande reaktionsmekanism (puzzolanreaktionerna) hämmas. Vid puzzolanreaktioner bildar kalk bindande material tillsammans med lerpartiklar i jorden. Eftersom det organiska materialet upptar en så stor del av jordvolymen i torv och gyttja förhindras stabiliseringsmedlet att komma i kontakt med de fåtal lerpartiklar som finns, vilket gör att puzzolanreaktionerna inte sker. Med cement uppnås en mera ”robust” hållfasthetsutveckling, genom att cementet bildar bindande material tillsammans med vatten, utan inverkan av lerpartiklar i jorden.

4.4 INVERKAN AV LAGRINGSTEMPERATUR

Den värme som utvecklas när en jordmassa stabiliseras är beroende av vilket stabiliseringsmedel som används, *figur 4*. Värme påskyndar reaktionshastigheten vid stabiliseringen.



Figur 4. Värmeutveckling i jorden vid stabilisering med olika stabiliseringsmedel.

Normalt är temperaturen i marken ca 8 ^{0}C. Vid denna temperatur reagerar de flesta stabiliseringsmedel långsamt. De hållfasthetsuppbyggande reaktionerna som påverkas minst av den omgivande temperaturen är cementreaktionerna.

En skillnad mellan olika stabiliseringsmedel är att de som har en hög värmeutveckling (t.ex osläckt kalk och cement) inte är lika beroende av den omgivande jordens temperatur som de stabiliseringsmedel som endast utvecklar långsam och låg värme i sig själva (t.ex granulerad masugnsslagg). Detta innebär att i en jord stabiliserad med ett stabiliseringsmedel som har en låg värmeutveckling sjunker reaktionshastigheten och därmed korttidshållfastheten om omgivningens temperatur sjunker. På samma sätt ökar hållfastheten om omgivningens temperatur ökar. För att få bäst jämförelse med verkliga förhållanden bör således laboratorieprov lagras vid temperaturnivåer motsvarande dem i fält, dvs olika lagringstemperatur för olika typer av stabiliseringsmedel.

4.5 INVERKAN AV PACKNINGSGRAD

Skrymdensiteten är normalt mycket låg i gyttja och torv. Det innebär att andelen hålrum är relativt stor i förhållande till fast material. Hålrummen är till största delen fyllda med vatten. Vid stabilisering tenderar densiteten i gyttja och torv normalt att öka, eftersom viss mängd vatten i jorden ersätts av stabiliseringsmedlet. Därmed minskas även andelen hålrum. Detta gäller framförallt torv som innehåller stor mängd vatten.

Genom att hållfastheten generellt ökar med minskad andel hålrum i ett stabiliserat material (vid i övrigt lika förhållanden) torde stabiliseringseffekten i gyttja och torv bero av hur väl packad massan blir. Inblandningsförsök på laboratorium visar stora skillnader i stabiliseringseffekt mellan torvprover som belastas jämfört med de som inte belastas under lagring. En anledning till detta är att torv ofta blir mycket kladdig vid inblandning och därför är svår att packa. Genom att belasta proven under lagringen trycks eventuellt uppkomna luftfickor ut och en högre hållfasthet uppnås.

För att stabiliseringsmedlet ska kunna reagera fullständigt är det dessutom viktigt att stabiliseringsmedlet blandas in homogent i jorden. Generellt ökar stabiliseringseffekten med homogeniteten i den stabiliserade massan.

4.6 INVERKAN AV JÄMN KVALITET

För att den masstabiliserade volymen ska bli homogen är det viktigt att metoden för stabilisering är relativt okänslig för variationer i t. ex. jordart och arbetsutförande. De olika stabiliseringsmedlens förmåga att ge en produkt med jämn och säker kvalitet varierar.

De idag vanligaste stabiliseringsmedlen, cement och osläckt kalk, har vid ”normala jordar” visat sig ge en produkt med jämn och säker kvalitet, se t.ex. /5/. Med tanke på att masstabilisering ofta utförs i organisk jord samt att vattengenomströmning till en viss del kan tänkas ske, torde ett stabiliseringsmedels jämna kvalitet, reaktionshastighet samt dess miljöpåverkande egenskaper betyda ännu mer än vid konventionell pelarstabilisering i lera.

5. Resultat

I dettakapitel redovisas resultaten från inblandningsförsöken i gyttja och torv. Dessutom jämförs i slutet av kapitlet några tidigare försök med de resultat vi nu fått.

5.1 PROVBEREDNING

För gyttjan gick inblandningen av stabiliseringsmedel och tillverkning av provkroppar relativt lätt. Ingen märkbar skillnad märktes i provberedning mellan Arlanda- och Örebrogyttjan samt mellan de olika stabiliseringsmedlen.

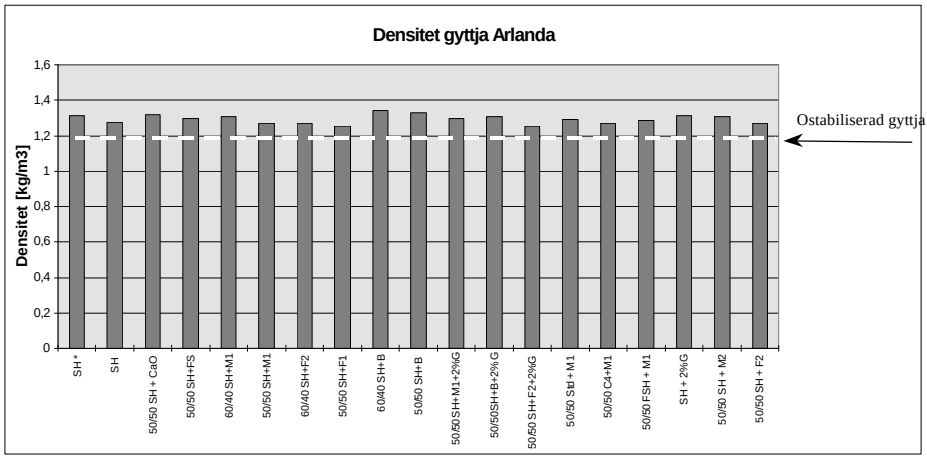
Torven var svårare att blanda till en homogen massa än gyttjan. Örebrotorven med en vattenkvot av över 1300 % gick dock relativt smidigt att inblanda och packa. Arlandatorven däremot var redan i ostabiliserat tillstånd smulig och torr, med en vattenkvot av ca 400 %. Tillsatsen av stabiliseringsmedlet gjorde provet ännu torrare vilket hade stor inverkan på resultatet. I de torvprover från Arlanda där vatten tillsattes gick inblandning och packning betydligt bättre.

5.2 JORDARTERNAS DENSITET OCH HÅLLFASTHET

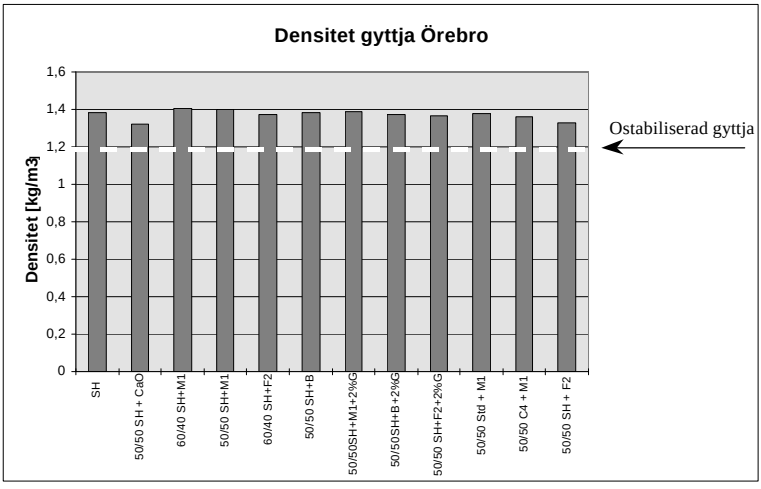
I kapitel 5.2 redovisas densitet och resultat från enaxliga tryckförsök i gyttjan och torven. Resultaten redovisas i sin helhet i bilaga 3 och 4. Hållfasthetsprovningarna gjordes efter lagring i 14 och 26 dygn i gyttjan och efter 28 dygn i torven. Generellt uppnåddes mycket bra stabiliseringseffekt i de stabiliserade proverna.

5.2.1 Densitet i stabiliserad gyttja

Densiteten ökar något efter stabiliseringen både i Arlanda gyttjan och i Örebrogyttjan, *figur 5a & b*. I Örebrogyttjan, som packades för hand, ökade densiteten något mera än i Arlanda-gyttjan, som packades med konstant tryck. Det går inte att se någon märkbar skillnad i ökningen av densitet beroende av vilket stabiliseringsmedel som tillsattes.



a) * Packningen gjordes för hand



b)

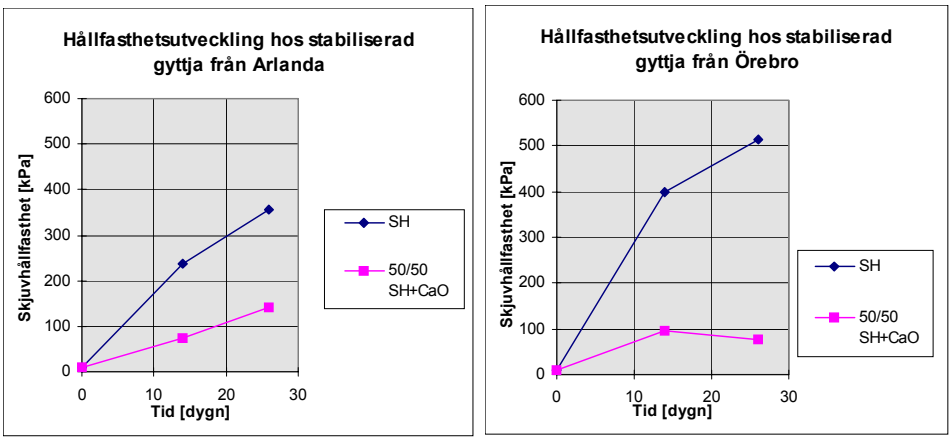
Figur 5. Densitet i stabiliserad gyttja. Resultaten vid 26 dygn avser medelvärdet av två prov. I samtliga prov har 200 kg stabiliseringsmedel per m^3 använts.
a) Arlanda (packades med konstant tryck, om inte annat anges).
b) Örebro (packades för hand).

5.2.2 Hållfasthet i stabiliserad gyttja

Konventionella bindemedel

Enbart snabbcement ger bäst hållfasthet i både gyttjan från Arlanda och Örebro, *figur 6-7*.

Stabiliseringsmedel bestående av snabbcement, blandat med osläckt kalk, ger en relativt låg skjuvhållfasthet efter 14 dygn. Vid 26 dygn har skjuvhållfastheten stigit något i gyttjan från Arlanda, men är fortfarande betydligt lägre än värdena för stabilisering med enbart snabbcement, *figur 6*.



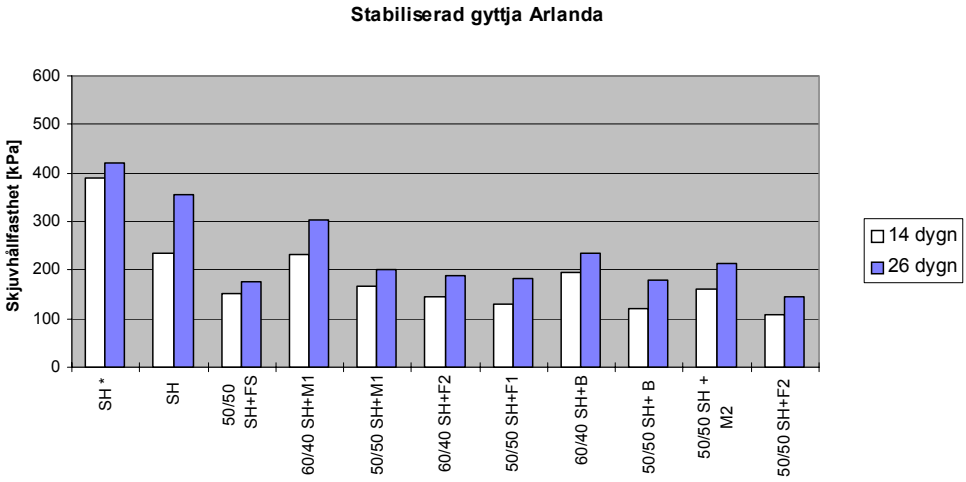
a) b)

Figur 6. Hållfasthetsutveckling vid stabilisering med enbart snabbcement samt snabbcement och osläckt kalk. I samtliga prov har 200 kg stabiliseringsmedel per m^3 använts.
a)Gyttja från Arlanda. b)Gyttja från Örebro.

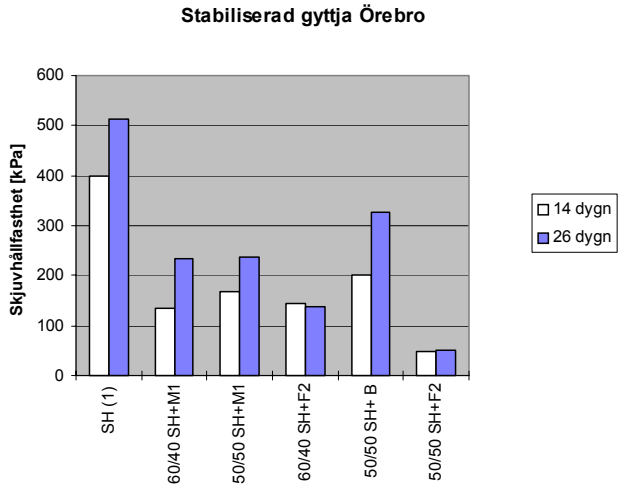
Motsvarande resultat som redovisas ovan har även redovisats i /ref 5/. Vid pelarstabilisering i gyttja rekommenderas dock /ref 13/ en blandning av 50 % cement och 50 % osläckt kalk. Detta beror bl.a. på den stora erfarenhetsbank som finns om detta och den robusthet blandningen har.

Övriga stabiliseringsmedel

Genom att jämföra prover stabiliserade med enbart snabbcement (referensprov) och blandningar med snabbcement med övriga material så kan inverkan av de olika stabiliseringsmedlen i förhållande till varandra fås. I *figur 7* jämförs stabiliseringsmedlen på detta sätt.



a) * Packningen gjordes för hand.



b) (1) Stor spridning mellan proverna.

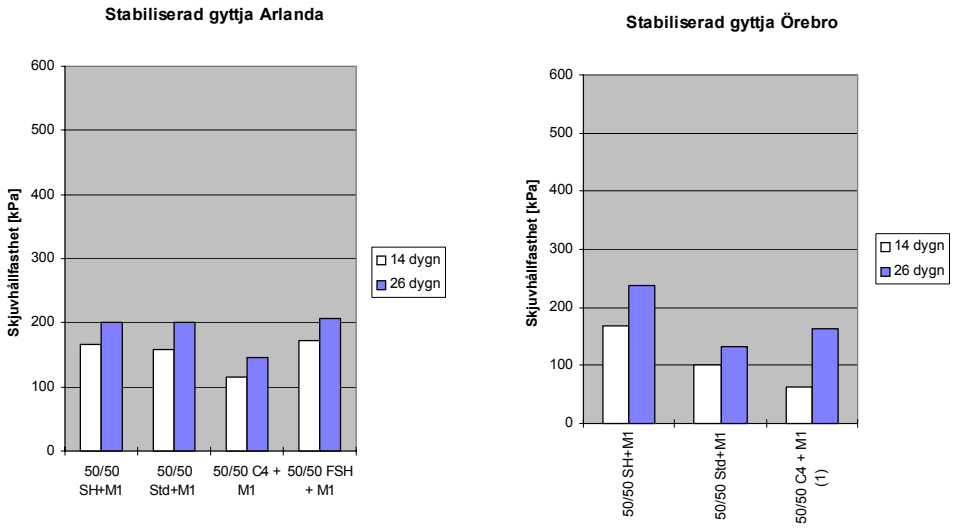
Figur 7. Skjuvhållfasthet i gyttja efter lagring i 14 respektive 26 dygn. Resultat från 26 dygn avser medelvärdet av två prov. I samtliga prov användes 200 kg stabiliseringsmedel per m^3.
a) Arlanda (packning med konstant tryck, om ej annat anges).
b) Örebro (packning för hand).

Bäst stabiliseringseffekt, både i gyttjan från Arlanda och gyttjan från Örebro, erhålls med enbart snabbcement. Resultaten för blandningar ger i alla fall sämre resultat än med enbart snabbcement. Bäst resultat av restmaterialen ger finmald granulerad masugnsslagg samt bypassaska.

Olika cementsorter jämförda

På samma sätt som för restmaterialen kan olika cementsorter jämföras i förhållande till varandra. Genom att titta på stabiliseringsprover där olika cementsorter blandades (1:1) med finmald granulerad masugnsslagg nr 1 erhålls *figur 8*.

Resultatet visar att stabiliseringseffekten varierar beroende på cementsort. Den cementsort som gav bäst och säkrast resultat i både gyttjan från Arlanda och från Örebro var svensk snabbcement. I gyttjan från Arlanda gav svensk snabb- och standardcement samt finsk snabbcement likvärdig stabiliseringseffekt efter 26 dygn, medan cement 4 gav sämre resultat. Örebrogyttjan stabiliseras effektivast med svensk snabbcement, *figur 8*.



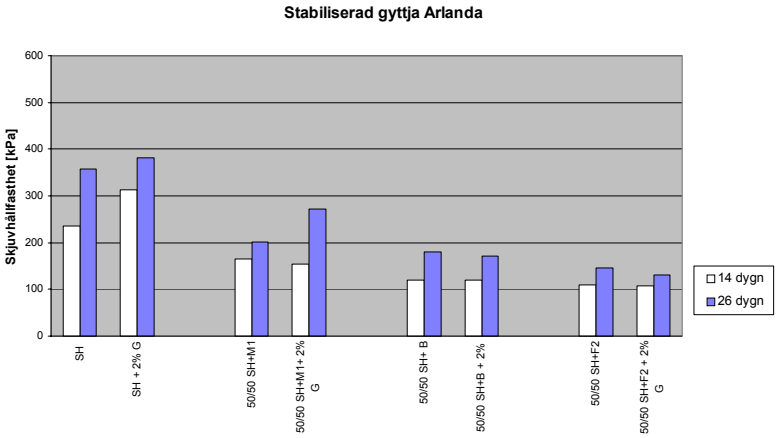
a)

b) (1) Stor spridning mellan stabiliseringsproverna

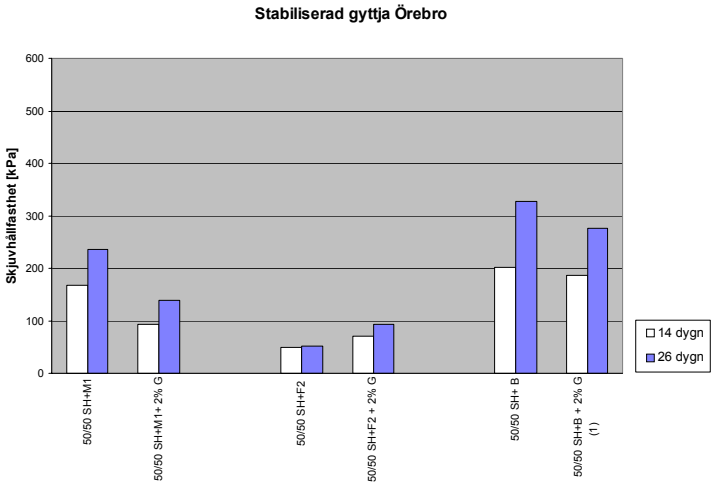
Figur 8. Skjuvhållfasthet efter lagring i 14 respektive 26 dygn i gyttja. Resultat från 26 dygn avser medelvärdet av två prov. I samtliga prov har 200 kg stabiliseringsmedel per m^3 använts.
a) Arlanda (packning med konstant tryck).
b) Örebro (packning för hand).

Kemisk tillsats av Glorit

Ett flertal parallella provkroppar gjordes med kemisk tillsats av 2 % Glorit (produktnamn för ett oorganiskt salt), *figur 9*. Resultatet visar att det i flera fall inte finns någon absolut skillnad med och utan Glorit. I andra fall finns mindre försämringar eller förbättringar. Utifrån resultaten så torde Glorit generellt inte ge någon effekt.



a)



b) (1) Stor spridning mellan stabiliseringsproverna.

Figur 9. **Inverkan av Glorit (G) på stabiliseringseffekten i gyttja. Resultat från 26 dygn avser medelvärdet av två prov. I samtliga prov har 200 kg stabiliseringsmedel per m^3 använts.**
a) Arlanda.
b) Örebro.

5.2.3 Densitet i stabiliserad torv

I torven från Örebro erhölls en likvärdig densitetsökning i de stabiliserade provkropparna, oberoende av vilket stabiliseringsmedel som tillsattes, *figur 10 b*. Densiteten i torvproverna från Arlanda tenderade istället att sjunka eller förbli oförändrad efter stabiliseringen, *figur 10 a*. Undantaget var de Arlandatorvprover där vatten tillsattes. I dessa prover ökade densiteten.

5.2.4 Hållfasthet i stabiliserad torv

Arlandatorven var ”smulig” vid de enaxliga tryckförsöken. Resultatet visade mycket låg skjuvhållfasthet, oberoende av vilket stabiliseringsmedel som tillsattes. Hypotesen var att det fanns för lite vatten, varför inte allt bindemedel reagerade. I de prover där vatten tillsattes uppmättes bra stabiliseringseffekt, *figur 11*, vilket bekräftar att oreagerat bindemedel (cement) fanns i provkropparna. När vatten tillsattes kunde cementreaktioner ske.

Konventionella bindemedel

I torven från Örebro blir skjuvhållfasthetsökningen hög med flertalet stabiliseringsmedel. Snabbcement blandat med osläckt kalk ger dock förhållandevis låg hållfasthet, *figur 12*.

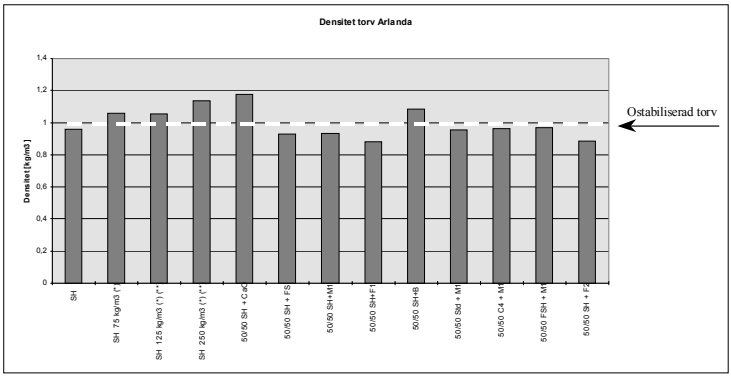
Övriga stabiliseringsmedel

I *figur 13* jämförs inverkan av de olika stabiliseringsmedlen i förhållande till varandra. Stabiliseringsprov med enbart snabbcement (referensprov) jämförs med prover stabiliserade med snabbcement blandat i proportion 50/50 med övriga material.

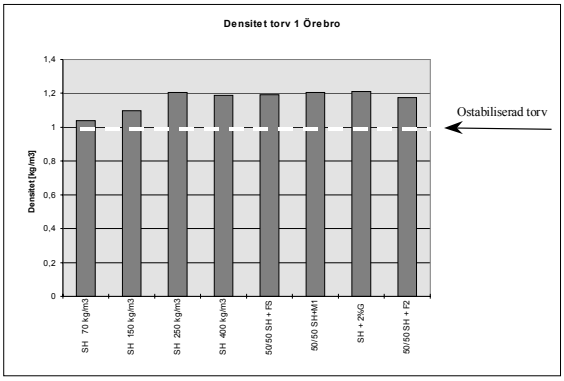
Bäst stabiliseringseffekt i torven från Örebro erhålls med en blandning av snabbcement och granulerad masugnsslagg. Även stabilisering med enbart snabbcement ger mycket bra effekt. Resultaten för övriga blandningar ger sämre resultat.

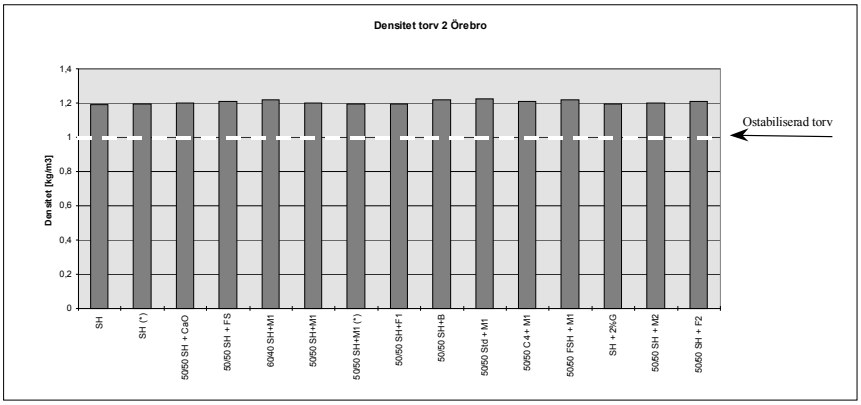
Lagringstemperatur

De prover som lagrades vid 8 ^{0}C istället för vid 21 ^{0}C bekräftar att lagringstemperaturen har större betydelse vid stabilisering med granulerad masugnsslagg än med enbart snabbcement. Vid lagring i 8 ^{0}C uppnås bättre stabiliseringseffekt med enbart snabbcement än med blandningar av snabbcement och granulerad masugnsslagg. Då proven lagrades vid 21 ^{0}C uppnås något bättre stabiliseringeffekt med blandningar av snabbcement och granulerad masugnsslagg, *figur 14*.



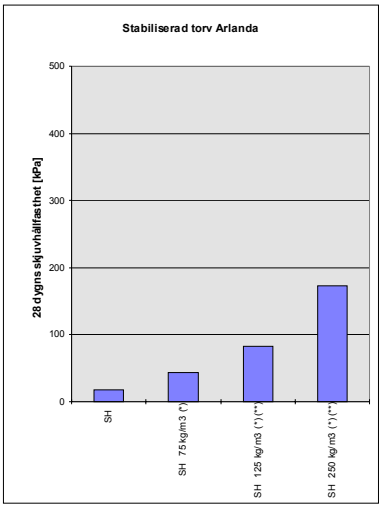
a) (*) Lagring vid 8°C (övriga prover lagrades vid 21^{0}C). (**) Tillsats av vatten.





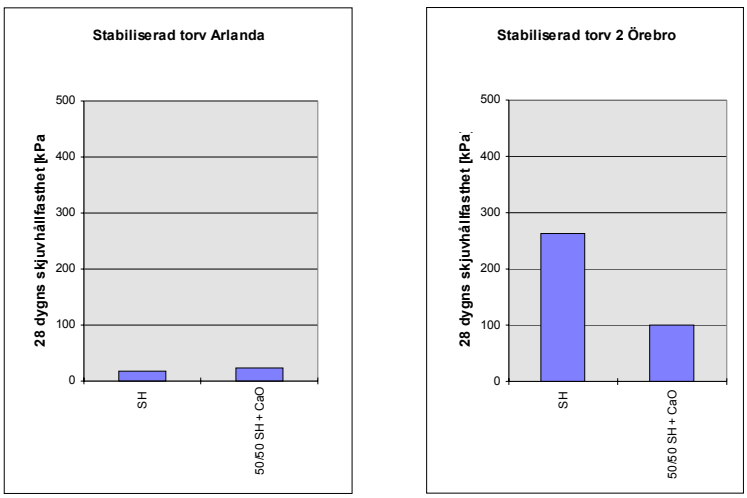
b) (*) Lagring vid 8°C (övriga prover lagrades vid 21°C).

Figur 10. Densitet före och efter stabilisering. 250 kg stabiliseringsmedel per m^3 har använts om ingenting annat anges. Resultatet utgör normalt medelvärdet av två prover.
a) torv från Arlanda. b) torv 1 och 2 från Örebro.



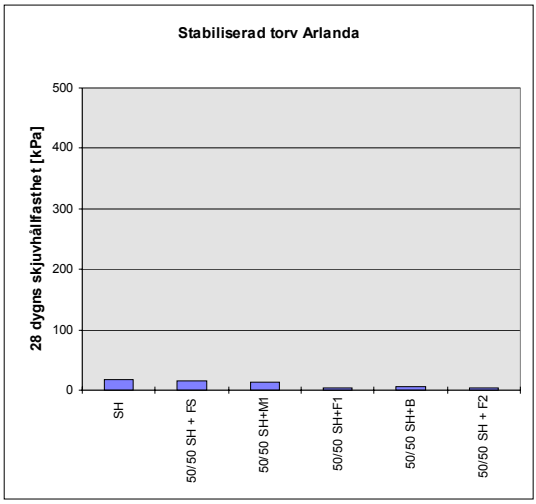
(*) Lagring vid 8^0C (övriga prover lagrades vid 21°C). (**)Tillsats av vatten.

Figur 11. Inverkan av vattentillsats i torven från Arlanda. 250 kg stabiliseringsmedel per m^3 har använts om ingenting annat anges. Resultatet utgör normalt medelvärdet av två prover.

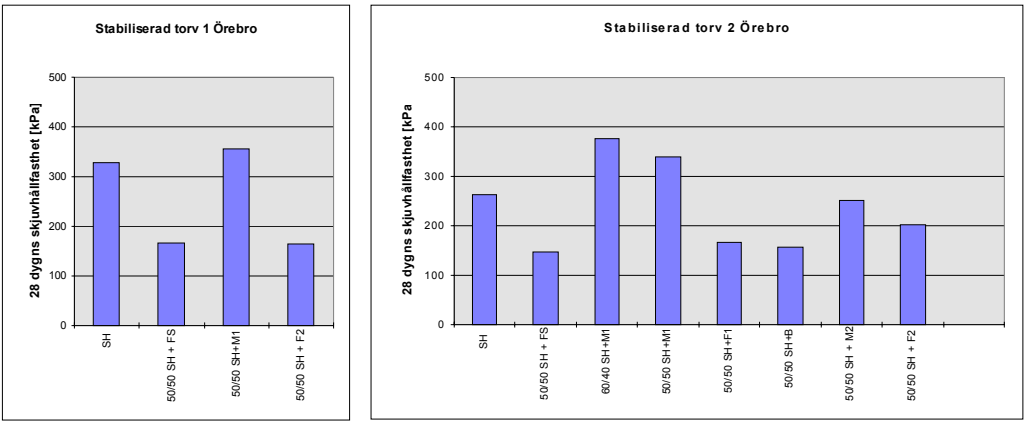


a) b)

Figur 12. Skjuvhållfasthet vid stabilisering med enbart snabbcement respektive snabbcement och osläckt kalk. 250 kg stabiliseringsmedel per m^3 användes. Resultatet utgör normalt medelvärdet av två prover.
a) Torv från Arlanda.
b) Torv 2 från Örebro.

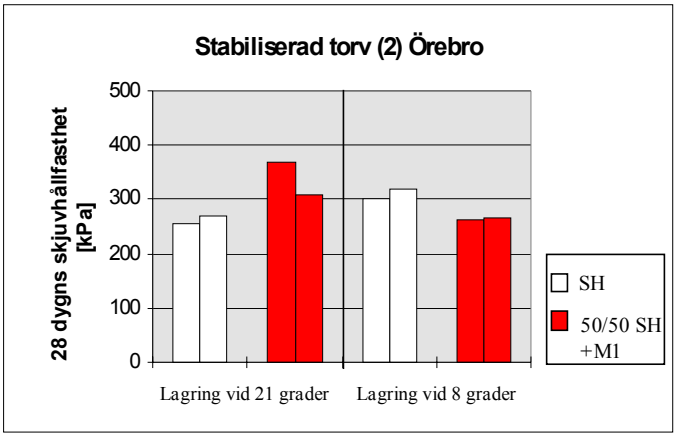


a)



b)

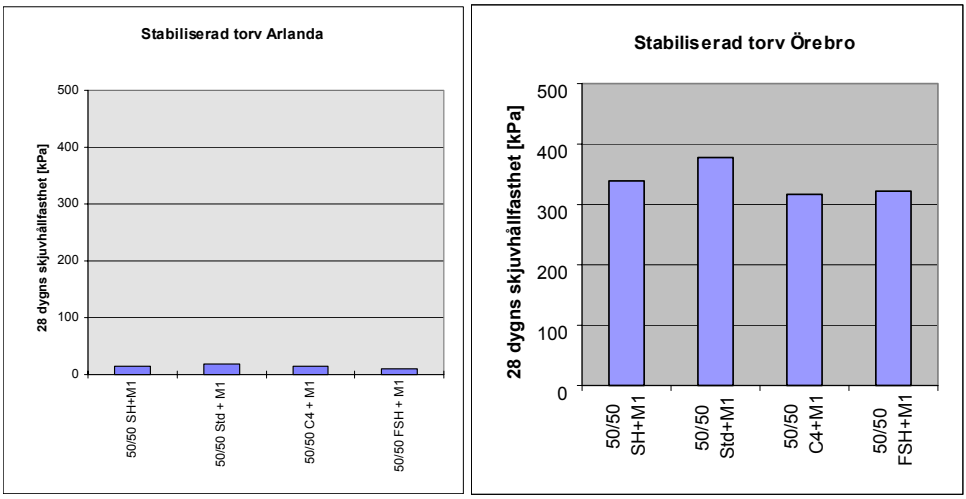
Figur 13. Skjuvhållfasthet efter lagring vid 21ºC i 28 dygn. 250 kg stabiliseringsmedel per m^3 användes. Resultatet utgör normalt medelvärdet av två prover.
a) Torv från Arlanda.
b) Torv 1 och 2 från Örebro.



Figur 14. Jämförelse mellan stabiliserad Örebro torv lagrad vid olika temperatur, 8 ^{0}C respektive 21 ^{0}C. 250 kg stabiliseringsmedel per m^3 användes.

Jämförelse mellan olika lika cementsorter

I *figur 15* jämförs olika cementsorter i förhållande till varandra. Proverna är stabiliserade med en blandning (50/50) av olika cementsorter och granulerad masugnsslagg nr 1.



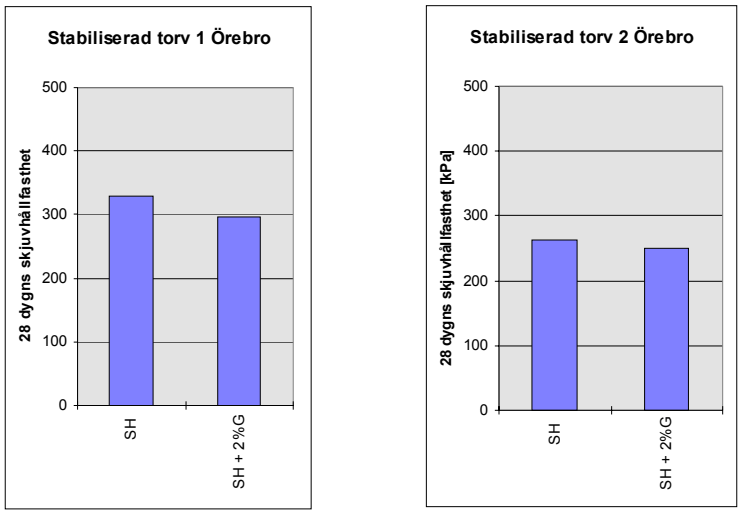
a) b)

Figur 15. Skjuvhållfasthet efter lagring i 28 dygn. 250 kg stabiliseringsmedel per m^3 användes. Resultatet utgör normalt medelvärdet av två prover. a) Torv från Arlanda. b) Torv 2 från Örebro.

Resultatet visar att stabiliseringseffekten varierar beroende på cementsort. I Arlandatorven var snabbcement något effektivare än övrig cement. I torven från Örebro ger standardcement något bättre stabiliseringeffekt än snabbcement. Både svensk standard- och snabbcement ger bättre effekt än finsk snabbcement och cement 4.

Kemisk tillsats av Glorit

För att prova om kemisk tillsats av Glorit inverkar på stabiliseringseffekten i torv gjordes parallella prover med enbart snabbcement och 2 % Glorit. Utifrån resultaten så torde Gloriten inte ha någon positiv effekt, *figur 16*.

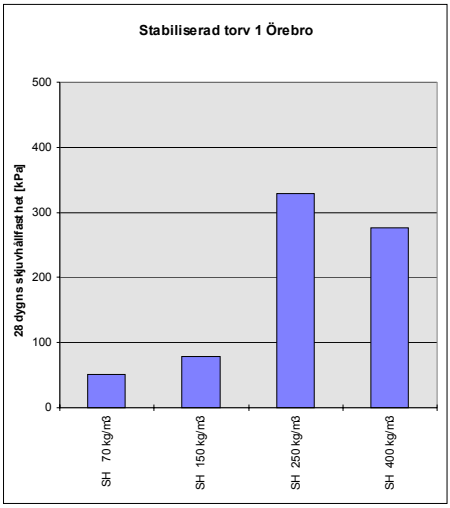


a) b)

Figur 16. Inverkan av glorit på stabiliseringseffekten i torv 250 kg stabiliseringsmedel per m^3 användes. Resultatet utgör normalt medelvärdet av två prover.
a) Torv 1 från Örebro.
b) Torv 2 från Örebro.

Olika mängd stabiliseringsmedel

I torven från Örebro gjordes prover med olika mängd stabiliseringsmedel, bestående av enbart snabbcement, *figur 17*. I dessa prover ökar skjuvhållfastheten (28 dygn) från tillsatt mängd 70 kg/m^3 till 250 kg/m^3. Vid tillsats av 400 kg/m^3 erhölls dock lägre hållfasthet än vid tillsats av 250 kg/m^3. Detta tyder på att förhållandet vatten/bindemedel har betydelse för den skjuvhållfastheten.



Figur 17. Skjuvhållfasthet efter lagring i 28 dygn. Provningen med 250 kg/m^3 utfördes med två parallella prover. Resultatet som visas ovan är ett medelvärde av dessa. Övriga prov utfördes med enkla prov.

5.3 JÄMFÖRELSE MED TIDIGARE RESULTAT

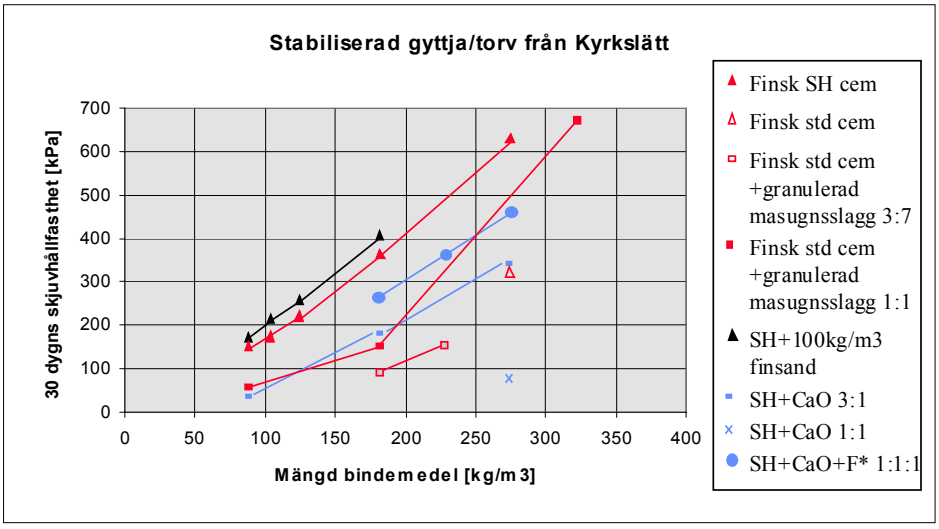
5.3.1 Kyrkslätt

Inför ett vägbygge vid Kyrkslätt väster om Helsingfors har inblandningsförsök utförts i lera, gyttja och torv från projektplatsen. I bilaga 6 samt *figur 18* redovisas en del av resultaten från enaxliga tryckförsök i gyttja och torv.

Bäst stabiliseringseffekt erhålls med snabbcement blandat med 100 kg/m^3 finsand samt enbart snabbcement. Tillförseln av utfyllnadsmaterialet (100 kg/m^3 finsand) till snabbcement ger en ökad skjuvhållfasthet av ca 30 kPa, *figur 18*. Detta bekräftar att antal fasta partiklar i torven har betydelse för den erhållna stabiliseringseffekten, eftersom skjuvhållfastheten ökar när finsanden (d.v.s. fasta partiklar) tillsätts. Bland övriga provade stabiliseringsmedel så ger blandningen 50 % finskt standardcement och 50 % granulerad masugnsslagg också bra stabiliseringseffekt, *figur 18*.

5.3.2 Örebro - Arboga

I förstudien användes gyttja och torv bl.a. från en projektplats mellan Örebro och Arboga, där en ny motorväg ska byggas. Jordförstärkning planeras att göras med djup- och masstabilisering vid ett flertal ler- och torvområden. Därför har

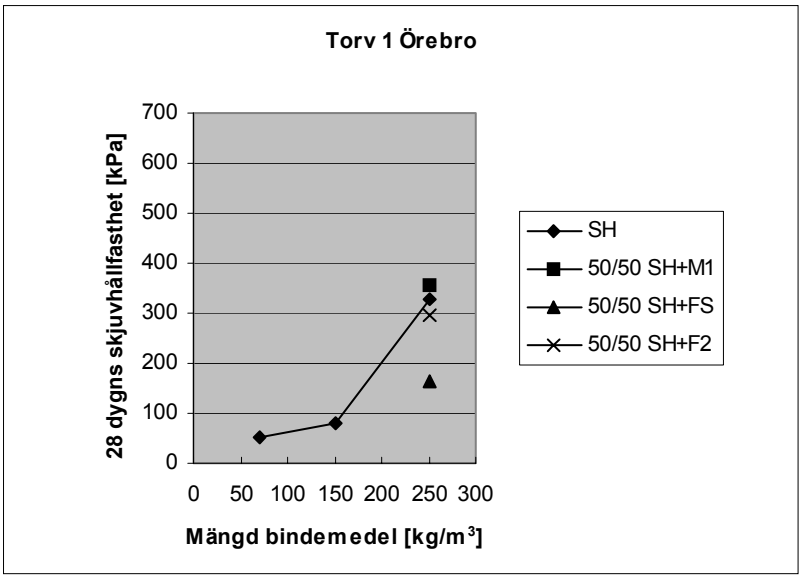


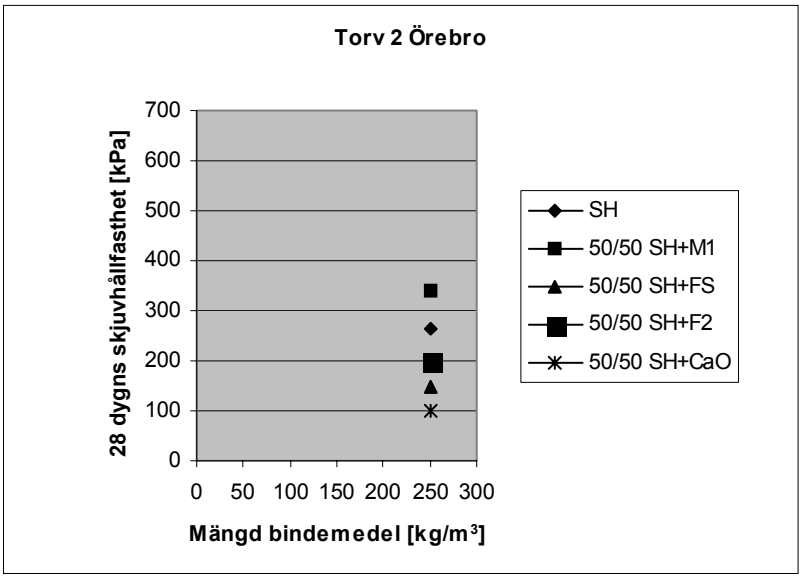
F* = Finnstabi, speciellt bindemedel från Kemira pigments.

Figur 18. Skjuvhållfasthet vid olika mängd inblandat stabiliseringsmedel. Resultat härrör från inblandningsförsök inför ett stabiliseringsprojekt vid Kyrkslätt i Finland. Från Finsementti (Finska Cementa).

inblandningsförsök utförts. I bilaga 6 redovisas en del av resultaten. I *figur 19* jämförs resultaten från förstudien (torv 1 & 2) med resultaten från förundersökningen (torv A & B).

Resultaten skiljer sig åt avseende absolutnivå, vilket säkert förklaras av olika provningsförfarande och troligen också av olika utgångstorv. Resultatet visar dock i båda fallen att en blandning av cement och osläckt kalk ger sämst resultat, medan cement blandat med finmald granulerad masugnsslagg och enbart cement ger bäst resultat.

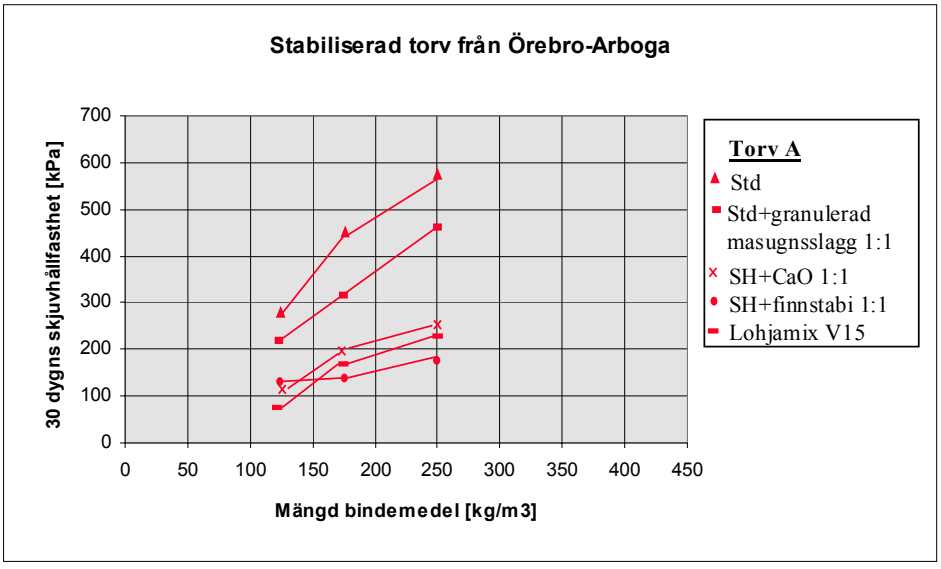


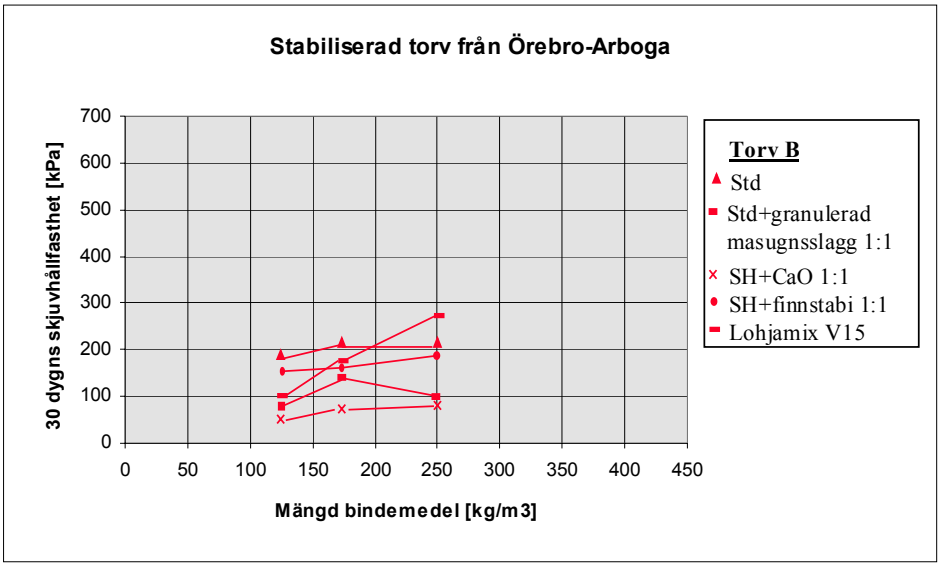


a) Torv från förstudien: Torv 1 = Vattenkvot : 1308 % Organisk halt : 99 %
Torv 2 = Vattenkvot : 1413 % Organisk halt : 97 %

Figur 19. Resultat från tidigare utförda inblandningsförsök vid Örebro, jämförda med resultaten från förstudien. Skjuvhållfastheten är bestämd med enaxliga tryckförsök efter 1 månads lagring.

a) Stabiliserad torv 1 och 2 från förstudien. 250 kg stabiliseringsmedel per m^3 användes. I den andra bilden redovisas skjuvhållfastheten i torv 1 stabiliserad med olika mängd snabbcement.





b) Tidigare provad torv från Örebro-Arboga: Torv A = Densitet: 0,98 t/m^3, Vattenkvot: 1350%, Organisk halt: 99,1%; Torv B = Densitet: 0,98 t/m^3, Vattenkvot: 1290%, Organisk halt: 98,9%

Figur 19. b) Skjuvhållfasthet vid olika mängd inblandat stabiliseringsmedel. Provresultaten härrör från tidigare utförda provningar av Örebro-Arbogatorven.

6. Slutsatser och rekommendationer

6.1 SLUTSATSER

Undersökningarna visar att hållfasthetsegenskaperna hos både torv och gyttja kan förbättras betydligt genom stabilisering. Den uppnåeliga hållfastheten beror av sammansättningen på det tillsatta stabiliseringsmedlet och eventuellt valt utfyllnadsmaterial.

Ny metod för tillverkning och lagring av stabiliserade torvprover

Vid provning av torven användes ett speciellt förfarande (kap 3.6), som utvecklats och för närvarande används i Finland. Den speciella provningsutrustningen som krävdes tillverkades av SGI:s verkstad, efter studier av den finska utrustningen. Både packningen och lagringen gick relativt smidigt. Uttagningen av provkropparna ur hylsorna gick däremot betydligt tyngre än med konventionella hylsor. Detta borde dock kunna förbättras.

Densitet

Med undantag av torven från Arlanda tenderar densiteten att öka efter stabilisering (fig. 6 och 11). Det går att se ett samband mellan ökningen av densiteten och ökad hållfasthet i proven. En möjlig förklaring till detta torde vara att i de prover där densiteten ökar har en bra packning skett, med minskad porvolym som följd och därmed ökad hållfasthet. Det går inte att se någon skillnad när det gäller förändring av densitet beroende på vilket stabiliseringsmedel som använts.

Skjuvhållfasthet

De enaxiala tryckförsöken gav mycket höga värden på skjuvhållfastheten med ett flertal stabiliseringsmedel, både i gyttjan och torven från Örebro samt gyttjan från Arlanda. I torven från Arlanda erhölls dock låga värden på skjuvhållfastheten. En orsak till detta torde vara torvens låga vattenkvot och smuliga konsistens. En hypotes var att det fanns för lite vatten, varför inte allt bindemedel reagerat. I de prover där vatten tillsattes uppmättes bra stabiliseringseffekt,

vilket bekräftar att oreagerat bindemedel (cement) fanns i provkropparna. När vatten tillsattes kunde cementreaktionerna ske.

Stabiliseringsmedel

Resultaten från stabiliseringsförsöken visar att olika cementsorter och olika blandningar skiljer sig åt avseende effekt. I gyttjan var stabilisering med enbart svensk SH-cement effektivast, men i några fall var svensk std-cement lika bra. Alla blandningar gav i gyttjan sämre resultat än enbart cement. I torven gav blandningar med cement och finmald granulerad masugnsslagg bäst resultat. Även stabilisering med enbart cement (standard- och snabb-cement) gav bra resultat.

Blandningar med flygaska gav i nästan alla fall sämst resultat av alla restmaterial. I torv erhålls dålig stabiliseringseffekt med osläckt kalk. Resultaten stämmer bra överens med de resultat som kan förväntas utifrån den teoretiska värderingen/genomgången (kapitel 4).

Lagringstemperatur

Lagringstemperaturen har olika betydelse för olika stabiliseringsmedel. För att få bäst jämförelse med fältförhållanden bör proven lagras vid temperatur motsvarande den som kan förväntas råda i fält.

6.2 REKOMMENDATIONER

Nedanstående baserar sig på idag välkända reaktioner/bindemedel och samma tänkande som idag gäller för traditionell pelarstabilisering.

Stabiliseringsmedel

Utifrån avrapporterad genomgång (kapitel 4) samt resultat i förstudien rekommenderas att stabiliseringens bindemedelseffekt ska basera sig på cement- eller puzzolanreaktioner. Med hänsyn till tekniska krav görs alltid en förundersökning. Idag används produktdeklarerade portlandcement, osläckt kalk, inert filler samt finmald granulerad masugnsslagg, vilka också är kända ur miljösynpunkt. Underlag för detta finns bl. a. i de Byggvarudeklarationer som branschen tagit fram, se t. ex /ref 17/.

Restprodukternas egenskaper och sammansättning varierar, bl.a beroende av olika råmaterial och att industriella processer inte styrs av krav på restprodukternas sammansättning. Övriga material och nya material bör därför alltid gran-

skas enligt miljölagen, och att materialens reaktioner, reaktionsprodukter och deras egenskaper klargörs i varje enskilt projekt.

Mängd stabiliseringsmedel

Baserat på denna utredning och författarnas övriga erfarenheter föreslås följande bindemedel och mängder för gyttja, torv och muddermassa:

Jordart	Bindemedel	Typisk mängd
Gyttja	Cement alternativt blandningar cement och granulerad masugnsslagg	100-200 kg/m^3
Torv		150-250 kg/m^3
Muddermassa		70-200 kg/m^3

Ovanstående är intervall som normalt är vanliga. Slutligt bindemedel och mängd väljs utifrån en teknisk förundersökning och projektets förutsättningar.

Förslag på projekt

Nedan föreslås flera projekt att gå vidare med :

- En ”standardiserad provningsmetod” bör tas fram. I dag används olika provningsmetoder för torv. Detta medför stora skillnader i resultat samt svårigheter att jämföra olika resultat.

- Undersök betydelsen av ett stabiliseringsmedels ”robusthet” (kap 4.6) d.v.s. dess förmåga att bibehålla reaktionshastighet och ge en jämn och säker kvalitet trots variationer i jordart och arbetsutförande. Jordlager med torv och gyttja ställer högre krav på ett stabiliseringsmedels ”robusthet” än stabilisering i lera, bl.a. på grund av närvaro av humus och stora variationer i jordens egenskaper.

- Utveckla metoder och kriterier för värdering av miljöeffekter hos nya stabiliseringsmedel.

- Detaljstudera de kemiska och fysikaliska parametrar som påverkar de hållfasthets-uppbyggande reaktionerna. Önskvärt vore att med en enkel kemisk analys av den ostabiliserade jorden kunna bestämma lämpligt stabiliseringsmedel.

- Undersök vilken inverkan naturliga utfyllnadsmaterial som t.ex finsand har på hållfastheten.

- Vattenhaltens betydelse/inverkan på hållfastheten? Finns det en ”minimum” vattenkvot under vilken stabilisering i torv med torrt stabiliseringsmedel inte är möjlig?

- Inblandning, packning och homogenitet i en torr torvjord torde förbättras om stabiliseringsmedlet tillsätts i slurryform istället för i torr form. Är det möjligt att i torr gyttja/torv tillsätta en slurry? Eftersom vattenmängden i torvmark varierar med årstiderna torde även inblandningssättet (torr form eller slurry) kunna varieras.

Referenser

[1] Andersson, R., Johansson, S-E., Retelius, A. (1992). Rätt valt bindemedel ger bättre produkt, Cementa AB, Danderyd.

[2] Andersson, E. (1995). Kemisk stabilisering av jord- en studie av samband mellan kemiska/fysikaliska indexegenskaper och stabiliserinseffekter, Institutionen för teknisk utbildning, Linköpings tekniska högskola, Linköping.

[3] Angelva, Huttunen, Kujala (1993). Stabilisering av torvmark, Föredragsammanställning, Uleåborgs Universitet, Uleåborg, Finland.

[4] Fagerlund, G. Tidningen Cementa.

[5] Holm, G., Holmqvist, L., Johansson, S-E., Ljungkrantz, C., Retelius, A., Åhnberg, H. (1995). Cement och kalk för djupstabilisering av jord, En kemisk - fysikalisk studie av stabiliseringseffekter, Statens geotekniska institut, SGI Rapport 48, Linköping.

[6] Huttunen, Kujala, Vesa. (1996). Assessment of the quality of stabilized peat and clay, International conference on ground improvement geosystems, 2, IS-Tokyo'96: Grouting and mixing, Tokyo, May, 1996. Proceedinga, vol. 1, s 607-612.

[7] Huttunen, Kujala, Lehto. (1996). Effect of humus on the binding reaction in stabilized soils, International conference on ground improvement geosystems, 2, IS-Tokyo'96: Grouting and mixing, Tokyo, May, 1996. Proceedinga, vol. 1, s 415-420.

[8] Huttunen, Kujala. (1996). On the stabilization of organic soils, International conference on ground improvement geosystems, 2, IS-Tokyo'96: Grouting and mixing, Tokyo, May, 1996. Proceedinga, vol. 1, s 411-414.

[9] Kujala, Ravaska. (1996). Settlement calculation of deep stabilized peat and clay, International conference on ground improvement geosystems, 2, IS-Tokyo'96: Grouting and mixing, Tokyo, May, 1996. Proceedings, vol. 1, s 551-555.

[10] Leppänen, M. Masstabilisering av torv, Viatek, Esbo Finland, 1s.

[11] Rogbeck, Y., Sandin, P. (1995). Masstabilisering, Lägesrapport (arbetsmaterial), Statens geotekniska institut, SGI projekt 1-9411-542, Linköping.

[12] Rogbeck, Y., Berg, K-O., Säfström, L. (1996). Masstabilisering, Underlag till FoU-plan, koncept, Statens geotekniska institut, Linköping.

[13] SGF (1995). Kalk- och kalkcementpelare, Vägledning för projektering, utförande och kontroll, Svenska geotekniska föreningen, SGF Rapport 4:95, Linköping.

[14] TPPT (1995). Ground and surface stucture of road research project. Project 332. Deep stabilization and masstabilization, Binder and material technology 332.20. Report on laboratory investigations, Finska Vägverket (TPPT), Åbo.

[15] Viatek (1994). Blockstabilisering av torv på Veittostesuo, Viatek Geoteknik, 2s.

[16] Personlig kommunikation med Elina Parkkinen Lohja Rudus Oy Ab.

[17] Byggvarudeklaration, yttre miljö – cement. Cementa AB.

De stabiliseringskombinationer som provades

Benämning	Proportion stabiliseringsmedel											
	SH	Std	FSH	C4	CaO	M1	M2	F1	F2	B	G	FS
SH	100											
SH + CaO	50				50							
SH + FS	50											50
SH + M1	60					40						
SH + M1	50					50						
SH + F2	60								40			
SH + F1	50							50				
SH + B	60									40		
SH + B	50									50		
SH + M1 + G	50					50					2	
SH + B + G	50									50	2	
SH + F2 + G	50								50		2	
Std + M1		50				50						
C4 + M1				50		50						
FSH + M1			50			50						
SH + G	100										2	
SH + M2	50						50					
SH + F2	50								50			

Cement

SH = Cem SH P
Std = Cem Std P
FSH = Pikasementti (finsk motsvarighet till svensk snabbcement)
C4 = Cement 4

Kalk

CaO = Osläckt kalk

Tillsatsmaterial

B = Bypassaska
F1 = Flygaska 1
F2 = " 2
FS = Finsand
M1 = Finmald granulerad masugnsslagg 1
M2 = " 2

Kemisk tillsats

G = Glorit

Provningsprogrammet i sin helhet

Stabiliseringsmedel	Gyttja Arlanda		Gyttja Örebro	
	Tillsats-mängd kg/m^3	Enaxliga tryckförsök 14 & 26 dygn	Tillsats-mängd kg/m^3	Enaxliga tryckförsök 14 & 26 dygn
SH	200	x x	200	x
SH + CaO	200	x		x
SH + FS	200	x		
60/40 SH+M1	200	x	200	x
50/50 SH+M1	200	x	200	x
60/40 SH+F2	200	x	200	x
50/50 SH+F1	200	x		
60/40 SH+B	200	x		
50/50 SH+B	200	x	200	x
50/50SH+M1+2% G	200	x	200	x
50/50SH+B+2% G	200	x	200	x
50/50SH+F2+2% G	200	x	200	x
50/50 Std + M1	200	x	200	x
50/50 C4 + M1	200	x	200	x
50/50 FSH + M1	200	x		
SH + 2% G	200	x		
50/50 SH + M2	200	x		
SH + F2	200	x	200	x

Stabiliseringsmedel	Torv Arlanda		Torv 1 Örebro		Torv 2 Örebro	
	Tillsats-mängd kg/m^3	Enaxliga tryck-försök 28 dygn	Tillsats-mängd kg/m^3	Enaxliga tryck-försök 28 dygn	Tillsats-mängd kg/m^3	Enaxliga tryck-försök 28 dygn
SH	250	x	250	x	250	x x(*)
SH	75(*)	x	70	x		
SH	125(**)(*)	x	150	x		
SH	250(**)(*)	x	400	x		
SH + CaO	250	x				x
SH + FS	250	x	250	x	250	x
60/40 SH+M1					250	x
50/50 SH+M1	250	x			250	x x(*)
50/50 SH+F1	250	x			250	x
50/50 SH+B	250	x			250	x
50/50 Std + M1	250	x			250	x
50/50 C4 + M1	250	x			250	x
50/50 FSH + M1	250	x			250	x
SH + 2% G			250	x	250	x
50/50 SH + M2					250	x
SH + F2	250	x	250	x	250	x

(*) Lagring vid 8 °C (resterande torvprover lagrades vid 21°C)
(**) Tillsats av vatten (se tabell nästa sida)

Vattentillsats i torvprover från Arlanda

Bindemedel	Mängd tillsatt stabiliserings medel [kg/m^3]	Enaxliga tryckförsök 28 dygn	Torv [g]	Tillsatt vatten [g]	Vattenkvot "naturlig" w [%]	Vattenkvot efter vattentillsats w_{ny} [%]
Torv Arlanda						
SH	75	x	460	0	434	434
"	125	x	460	50	434	492
"	125	x	450	67	434	502
"	250	x	450	50	434	483
"	250	x	446	50	434	479

Hållfasthetsegenskaper i gyttja

Arlanda gyttja

Ursprunglig densitet antagen till 1.2 ton/m³	Gyttja	Arlanda	(Packning med konstant tryck om ej annat anges)			
	14 d		26 d			
Bindemedelshalt 200 kg/m³ = 167 kg/t	Densitet [t/m³]	Skjuvhållf.(**) [kPa]	Densitet [t/m³]		Skjuvhållf. (**) [kPa]	
SH	1.32	389(*)	1.3	1.33	436(*)	405(*)
	1.28	236	1.29	1.26	365	349
50/50 SH + CaO	1.29	74	1.32	1.32	148	137
50/50 SH + FS	1.28	153	1.29	1.3	175	175
60/40 SH+M1	1.31	233	1.31	1.31	293	311
50/50 SH+M1	1.21	166	1.27	1.27	225	178
60/40 SH+F2	1.25	146	1.28	1.26	184	191
50/50 SH+F1	1.3	129	1.29	1.21	175	189
60/40 SH+B	1.3	194	1.34	1.34	243	228
50/50 SH+B	1.32	120	1.33	1.33	195	165
50/50SH+M1+2%G	1.3	154	1.29	1.3	287	257
50/50SH+B+2%G	1.32	121	1.31	1.3	162	180
50/50 SH+F2+2%G	1.25	107	1.26	1.25	146	117
50/50 Std + M1	1.3	158	1.29	1.29	201	202
50/50 C4 + M1	1.28	116	1.26	1.28	149	144
50/50 FSH + M1	1.3	172	1.29	1.28	205	207
SH + 2%G	1.31	312	1.31	1.32	369	395
50/50 SH + M2	1.31	162	1.31	1.31	211	218
50/50 SH + F2	1.26	109	1.26	1.28	135	158

Örebro gyttja

Ursprunglig densitet antagen till 1.2 ton/m³	Gyttja	Örebro	(Packning "för hand" om ej annat anges)			
	14 d		26 d			
Bindemedelshalt 200 kg/m³ =167 kg/t	Densitet t/m³	Skjuvhållf(**) [kPa]	Densitet t/m³		Skjuvhållf. (**) [kPa]	
SH	1.34	400	1.38	1.39	463	562
50/50 SH + CaO	1.39	95	1.3	1.34	64	90
60/40 SH+M1	1.4	135	1.4	1.41	230	240
50/50 SH+M1	1.39	167	1.4	1.4	234	239
60/40 SH+F2	1.37	143	1.37	1.37	139	139
50/50 SH+B	1.42	202	1.37	1.4	310	344
50/50SH+M1+2%G	1.37	93	1.39	1.39	152	127
50/50SH+B+2%G	1.39	186	1.36	1.39	276	59
50/50 SH+F2+2%G	1.37	70	1.37	1.36	92	93
50/50 Std + M1	1.41	100	1.38	1.38	149	113
50/50 C4 + M1	1.39	62	1.34	1.38	255	74
50/50 SH + F2	1.34	49	1.33	1.33	54	48

(*) Packningen gjordes för hand
(**) enaxliga tryckförsök enligt SS

Hållfasthetsegenskaper i torv

Ursprunglig densitet: 1 ton/m³ Bindemedelshalt 250 kg/m³	Torv Arlanda 28 dygn Densitet t/m³		Skjuvhållf (**) [kPa]	
SH 250 kg/m³	0.92	1	25	11
SH 75 kg/m³ (*)	1.06		44	
SH 125 kg/m³ (*) (***)	1.05	1.06	79	85
SH 250 kg/m³ (*) (***)	1.12	1.15	178	168
50/50 SH + CaO	1.18	1.17	25	21
50/50 SH + FS	0.96	0.9	18	11
50/50 SH+M1	0.95	0.92	19	7.7
50/50 SH+F1	0.93	0.83	5	3.1
50/50 SH+B	1.09	1.08	5	4.7
50/50 Std + M1	0.96	0.95	19	17
50/50 C4 + M1	0.96	0.97	13	16
50/50 FSH + M1	0.95	0.99	7.6	14
50/50 SH + F2	0.87	0.9	3.5	4.3

Ursprunglig densitet: 1 ton/m³ Bindemedelshalt 250 kg/m³	Torv1 Örebro 28 dygn Densitet t/m³		Skjuvhållf (**) [kPa]		Torv2 Örebro 28 dygn Densitet t/m³		Skjuvhållf (**) [kPa]	
SH 250 kg/m³	1.2	1.21	313	344	1.19	1.19	257	270
SH 250 kg/m³ (*)					1.19	1.20	300	319
SH 70 kg/m³	1.04		51					
SH 150 kg/m³	1.1		79					
SH 400 kg/m³	1.19		276					
50/50 SH + CaO					1.2	1.2	104	96
50/50 SH + FS	1.19	1.2	171	160	1.2	1.22	137	156
60/40 SH+M1					1.22	1.22	377	376
50/50 SH+M1	1.21	1.2	369	344	1.23	1.17	370	308
50/50 SH+M1 (*)					1.19	1.20	261	265
50/50 SH+F1					1.22	1.17	192	141
50/50 SH+B					1.23	1.21	157	155
50/50 Std + M1					1.22	1.23	391	366
50/50 C4 + M1					1.21	1.21	317	316
50/50 FSH + M1					1.22	1.22	359	288
SH + 2%G	1.21	1.21	313	281	1.23	1.16	260	239
50/50 SH + M2					1.18	1.22	193	308
50/50 SH + F2	1.17	1.18	163	167	1.21	1.21	212	190

(*) Lagring vid 8 °C (resterande torvprover lagrades vid 21°C)
(**) enaxliga tryckförsök enligt SS
(***) Tillsats av vatten

Porvattenanalysen

Jonkoncentrationer i mM(mmol/l)

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	summa +	summa -	jonbalans	pH
Örebro										
G1 le Gy vx	1.732	0.900	0.441	0.294	3.066	0.66	5.999	6.795	-0.796	5.6
T1 Tl	0.295	0.064	0.144	0.149	0.160	0.49	1.011	0.814	0.198	5.6
T2 T	0.376	0.078	0.199	0.171	1.192	0.54	1.278	0.920	0.358	5.6
T1 ofiltrerad	0.393	0.070	0.167	0.146	0.212	0.49	1.239	0.918	0.321	5.6
T2 ofiltrerad	0.956	0.163	0.233	0.234	0.319	0.54	2.705	1.174	1.531	5.6
Arlanda										
G2 le Gy vx	6.679	3.271	0.838	0.826	11.098	0.78	21.564	22.971	-1.407	5.6
T3 Th	1.342	0.276	0.426	0.300	1.062	0.90	3.962	3.026	0.936	5.9

Tidigare utförda försök vid Kyrkslätt i Finland

Torv

Stabiliseringsmedel	28 dygns skjuvhållfasthet (**) [kPa]	
	172 kg/m^3	199 kg/m^3
SH	159	
Finsk std cem + granulerad masugnsslagg 1:1		112

Gyttja

Stabiliseringsmedel	28 dygns skjuvhållfasthet (**) [kPa]
	200 kg/m^3
SH	290
Finsk std cem + granulerad masugnsslagg 1:1	330

Torv + gyttja 1:1

Stabiliseringsmedel	30 dygns skjuvhållfasthet (**) [kPa]						
	100 kg/m^3	120 kg/m^3	140 kg/m^3	200 kg/m^3	250 kg/m^3	300 kg/m^3	350 kg/m^3
SH	153	187	212	369		626	
Finsk std cem						313	
Finsk std cem + granulerad masugnsslagg 3:7				86	149		
Finsk std cem + granulerad masugnsslagg 1:1	54			150			677
SH + 100 kg/m3 fin sand	158	206	246	396			
SH + CaO 3:1	33			169		321	
SH + CaO 1:1						73	
SH + CaO + F (*) 1:1:1				263	353	450	

Tidigare utförda undersökningar för projektet Örebro/Arboga

Stabiliseringsmedel	30 dygns skjuvhållfasthet (**) [kPa]					
	Torv A (densitet δ = 0.98 t/m^3, vattenkvot w = 1350 %, org. halt 99.1 %)			Torv B (densitet δ = 0.98 t/m^3, vattenkvot w = 1290 %, org. halt 98.9 %)		
	125 kg/m^3	175 kg/m^3	250 kg/m^3	125 kg/m^3	175 kg/m^3	250 kg/m^3
Std	284	455	573	198	210	207
Std + granulerad masugnsslagg 1:1	214	312	469	78	145	98
Std + CaO	110	197	247	59	86	89
Std + Finnstabi (*)	130	131	171	157	160	189
Lohjamix V15	85	172	222	102	175	271

(*) Finnstabi = speciellt bindemedel från Kemira pigments
(**) enaxligt tryckförsök enligt finsk standard

Svensk Djupstabilisering

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