

Geokonstruktioner av stabiliserade/solidifierade förorenade muddermassor

I många svenska hamnar och farleder finns det förorenade sediment. Behovet av muddring i Sverige och i våra nordiska grannländer kommer under de närmaste åren att omfatta miljontals kubikmeter muddermassor. Muddring behöver utföras dels som underhållsmuddring, periodiskt till följd av naturlig avsättning av sediment, dels på grund av fartyg med större djupgående och ökat krav på "clearance" (fritt avstånd mellan fartygsbotten och havsbottnen) och naturligtvis även i samband med utbyggnad av hamnar och breddning av farleder.

De konventionella metoderna att hantera förorenade muddermassor är att tippa massorna ute till havs eller placera dem på deponier på land. Miljömyndigheternas och allmänhetens acceptans för alternativet tippning till havs är liten bland annat på grund av oron för våra kuster och hav. Att deponera muddermassorna på land är mycket kostsamt. Genom utvecklingen av metoden att stabilisera/solidifiera de förorenade muddermassorna har ett miljövänligt och kostnadseffektivt sätt att på plats behandla och sedan använda de behandlade massorna kommit fram *Svedberg & Holm* (2007). Detta möjliggör ett nyttiggörande av de förorenade muddermassorna till exempel för att skapa nya hamnområden.

Stabilisering/solidifieringsmetoden (S/S) innebär i korthet att mobiliteten hos kemiska ämnen och substanser reduceras markant och/eller att dessa inneslängs fysikaliskt samt att de geotekniska egenskaperna förbättras väsentligt. I praktiken innebär detta en "miljösäkring" och en möjlighet att använda muddermassorna i geokonstruktioner. Inom projektet Stab-

con pågår ett utvecklingsarbete för S/S-metoden som bland annat syftar till att ta fram underlag för nyttiggörande av behandlade förorenade sediment i geokonstruktioner i till exempel hamnar.

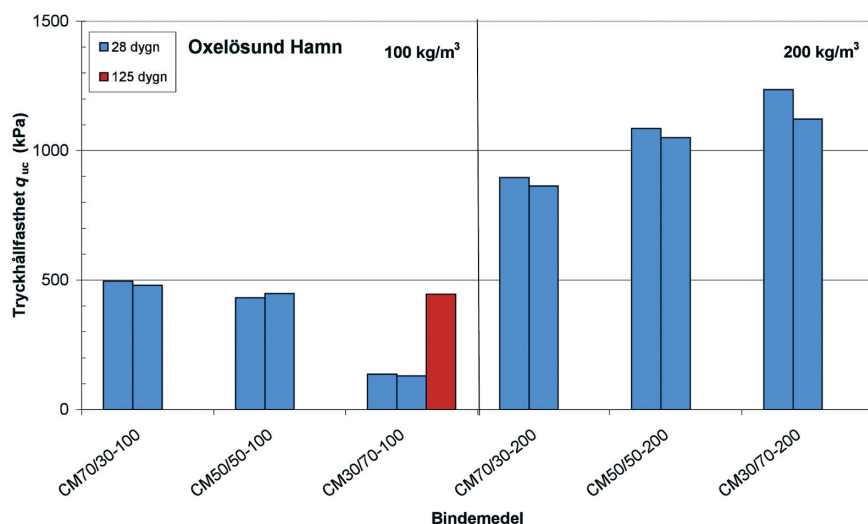
Stabilisering/solidifiering ger material användbart i geokonstruktioner

Situationen i svenska hamnar skiljer sig åt i relativt stor utsträckning avseende dels behov och omfattning av muddring och dels förekomst av förorenade sediment, såväl typ av sediment som typ av föroreningar inklusive halter av olika föroreningar. De föroreningar som förekommer är dels metaller, dels organiska föroreningar såsom PCB, PAH och TBT.

Inom det pågående Stabcon-projektet studeras hur olika sediment med olika föroreningsmatriser lämpligen ska stabiliseras/solidifieras för att de behandlade sedimenten ska erhålla erforderliga egenskaper avseende utlakning av föroreningar samt hållfasthet och permeabilitet. Hittills utförda försök visar att ett bindemedel be-

stående av cement och Merit 5000 kan ge önskad effekt på både miljöegenskaper och geotekniska egenskaper. I *figur 1* och *figur 2* visas exempel på resultat hos laborietillverkade prover. I *figur 1* i form av tryckhållfasthet hos prover där ett bindemedel bestående av cement och Merit 5000 blandats in i en totalmängd av 100 respektive 200 kg/m³ och i proportionerna 70/30, 50/50 och 30/70. Av figuren framgår att tryckhållfastheter i storleksordningen 500 till 1 200 kPa har erhållits redan 28 dygn efter inblandning. Provet CM30/70 100 visar på en kraftig ökning av hållfastheten från en till fyra månader. Hållfasthetsutvecklingen under längre tid studeras inom Stabcon-projektet.

I *figur 2* visas resultat från Stegeludden (kommande ny hamn i Oxelösund) av lakförsök dels på det förorenade sedimentet självt och dels på det stabiliserade/solidifierade sedimentet med 150 kg/m³ bindemedel CM50/50. Härav framgår den markant minskade utlakningen av PAH och PCB efter stabilisering. Lakförsöken (skakförsök) utfördes på krossade prover som lagrats i ett dygn efter inblandning av

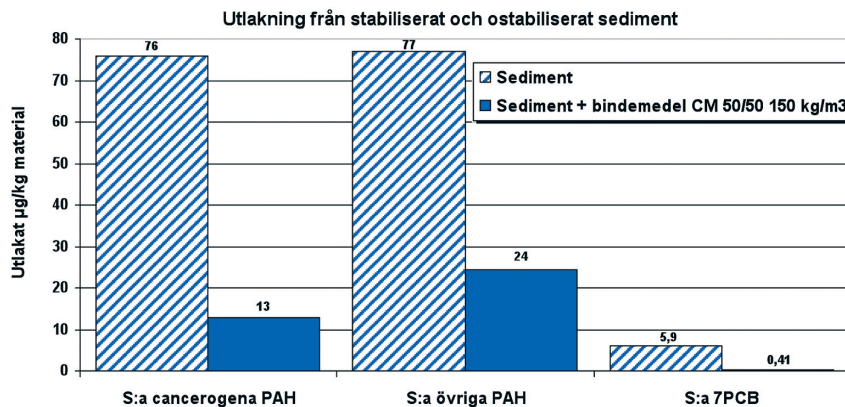


Figur 1. Tryckhållfasthet hos stabiliserade förorenade sediment från Oxelösund hamn (CM är lika med CementMerit).

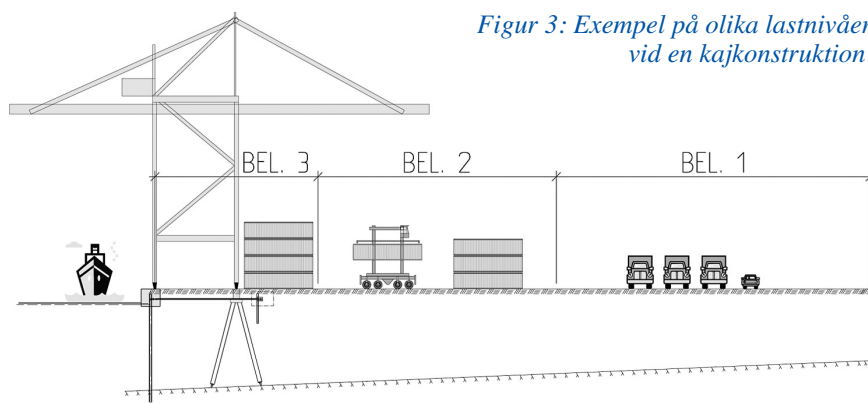
Artikelförfattare är **Göran Holm**, Statens geotekniska institut, Linköping, **Stefan Larsson** och **Fredrik Beyer**, Skanska Sverige AB, Region Grundläggning, Solna, samt **Matthew Batman** och **Christian Genberg**, Ramböll, Göteborg.

STABCON

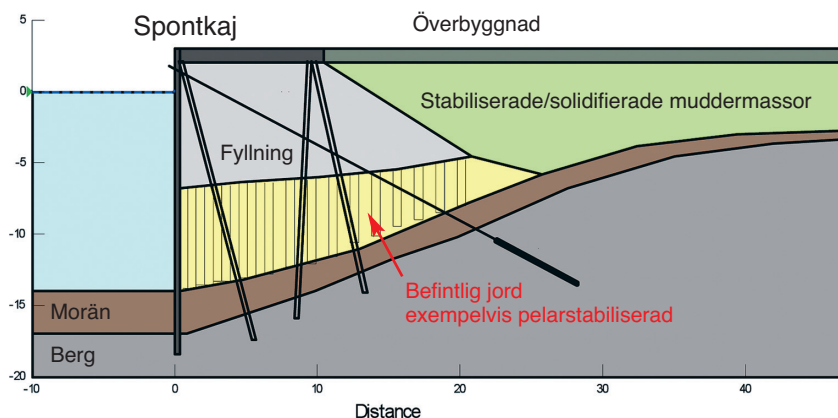




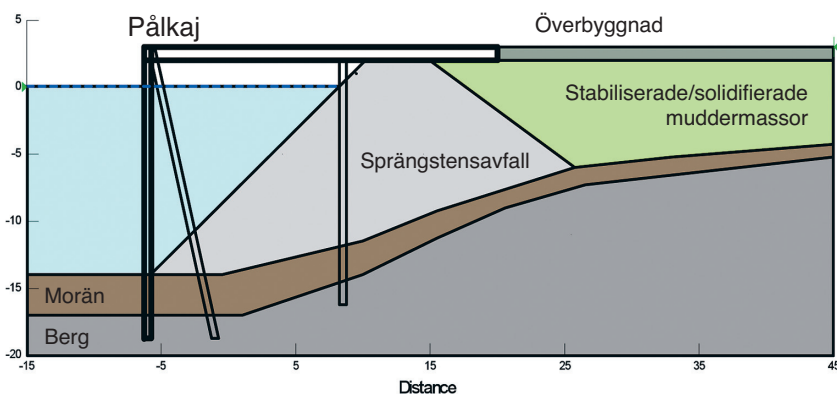
Figur 2: Resultat av lakförsök (skakförsök) för Stegeludden på sedimentet och det stabiliserade sedimentet (CM är lika med CementMerit).



Figur 3: Exempel på olika lastnivåer vid en kajkonstruktion.



Figur 4: Exempel på geokonstruktion med stabiliserade/solidifierade muddermassor bakom en spontkaj.



Figur 5: Exempel på geokonstruktion med stabiliserade/solidifierade muddermassor bakom en pålkaj med sprängstensvall.

bindemedel. Under detta dygn var provet belastat med 18 kPa simulerande en överbyggnadskonstruktion för en hamnuta.

Laboratorieförsök på andra sediment med andra föroreningar från andra hamnar har visat goda resultat avseende såväl lakegenskaper och geotekniska egenskaper hos de stabiliserade sedimenten.

Geokonstruktioner av stabiliserade/solidifierade massor

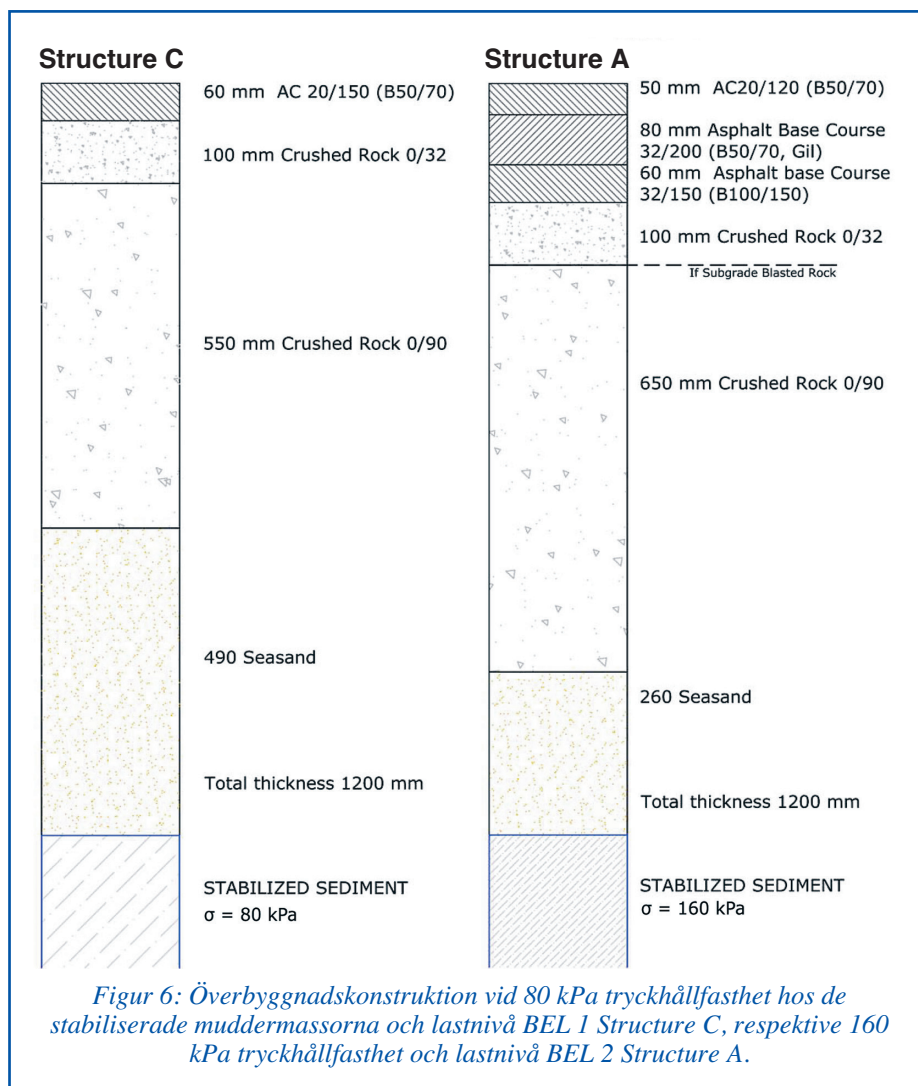
Geokonstruktioner som används i hamnområden är i viss mån unika och är anpassade efter platsspecifika förutsättningar och krav. Oftast används geokonstruktioner i kajer, pিরer och vid förstärkning av terminaltor.

Trots att många olika geokonstruktioner har använts i hamnområden genom åren, till exempel gravitationsmurar, pågrundläggningar, förstärkningslager under terminaltor etcetera, så är det oftast endast några få som väljs i dagens läge. De vanligaste geokonstruktionerna som används idag är spont-, pål- och stödmurskonstruktioner i kajer. Eftersom utfyllning vanligtvis utförs i samband med expansionen av hamnområden blir masstabilisering (beskrivs nedan) en allt vanligare metod vid utformning av geokonstruktioner för terminaltor.

Inom hamnområden bedrivs många olika verksamheter och dagligen belastas dessa områden med stora laster. Dessa laster uppkommer både från verksamheten i vattnet och på land. Lasterna på land kommer från till exempel kranar, grensluckor, containrar, transportfordon och byggnader. Ett typexempel på ett hamnområde med olika belastningsnivåer illustreras i figur 3. För att grovt förenkla kan dessa olika belastningsnivåer indelas i tre nivåer, det vill säga normal/tung vägtrafik (BEL 1), lätt/tung hamnverksamhet (BEL 2) och extremt tung hamnverksamhet (BEL 3). De största lasterna (BEL 3) finns oftast på och nära kajen, till exempel kranar, medan de mindre lasterna till exempel personbilar och byggnader brukar finnas längre bort från kajen. Vanliga lastnivåer inom BEL 1 är mindre eller lika med 2 ton/m² medan lasterna intill kajen brukar vara i storleksordning 4 till 7 ton/m². Det ska uppmärksammas att lasterna kan vara mycket större.

Stabiliserade/solidifierade förorenade muddermassor kan användas i olika geokonstruktioner på olika sätt och i olika omfattning. Det finns en flexibilitet i användningen som gör att metoden kan vara lämplig i många fall. I figur 4 och figur 5 visas som principskisser två exempel på hur de behandlade muddermassorna kan användas i geokonstruktioner. I det ena fallet, figur 4, har vid en spontkaj de stabiliserade/solidifierade muddermassorna placerats innanför en fyllning grundlagd på stabiliserad befintlig jord.

I det andra fallet, figur 5 på, har vid en spontkaj de stabiliserade/solidifierade mud-



Figur 6: Överbyggnadskonstruktion vid 80 kPa tryckhållfasthet hos de stabiliserade muddermassorna och lastnivå BEL 1 Structure C, respektive 160 kPa tryckhållfasthet och lastnivå BEL 2 Structure A.

dermassorna placerats innanför en sprängstensvall.

Dimensioneringen av geokonstruktioner av stabiliserade/solidifierade förorenade muddermassor ska förutom sedvanlig dimensionering av geokonstruktioner omfatta recept för bindemedel för att uppnå erforderliga egenskaper hos de stabiliserade muddermassorna avseende både geotekniska egenskaper och lakegenskaper så att miljökraven uppfylls avseende utlakning av föroreningar. Angående överbyggnad/förstärkningslager kan exemplifieras följande:

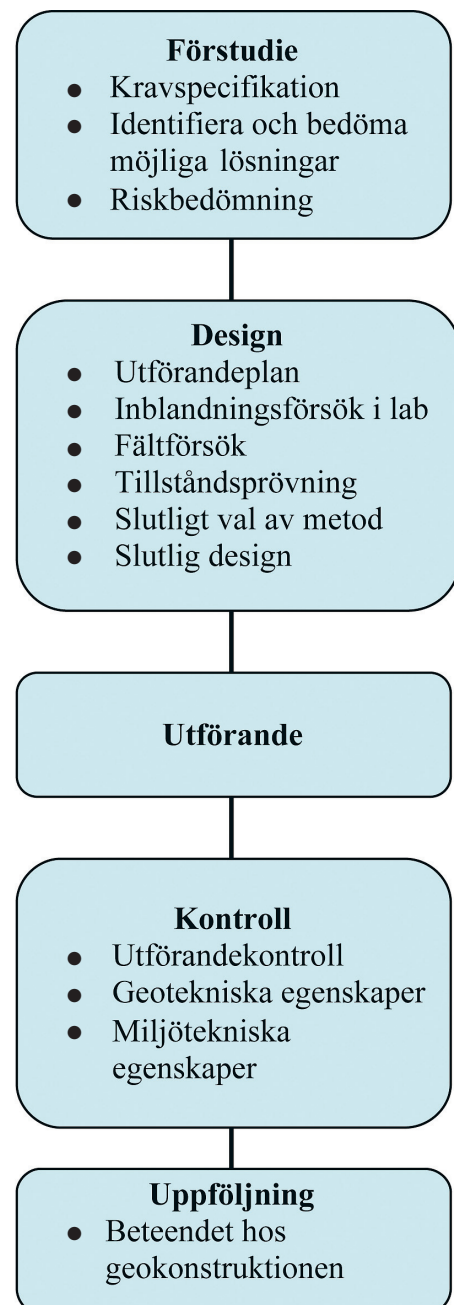
- Är kravet att uppnå en tryckhållfasthet hos det behandlade sedimentet av 80 kPa i område med BEL 1 kan en överbyggnad vara uppbyggd som Structure C i figur 6.
- Är kravet en tryckhållfasthet hos det behandlade sedimentet av 160 kPa i område med BEL 2 kan överbyggnaden se ut som Structure A i figur 6.

Projektering

Projekteringsgången omfattande stegen förstudie, design, kontroll och uppföljning visas i figur 7.

Förstudie. Syftet med en förstudie är att snabbt kunna avgöra huruvida stabilisering/solidifiering är en lämplig metod med avseende på geotekniska, ekonomiska och miljötekniska frågeställningar i

förhållande till platsspecifika krav. Förstudien utförs med stöd av redan tillgänglig information men kompletteras med geotekniska och miljögeotekniska undersökningar om så erfordras för att klarlägga typ av sediment och föroreningsammansättning/-grad. Det är också viktigt att man i förstudien samlar och värderar tillräckligt med data relaterat till potentiellt utförande av stabilisering/solidifiering så att det går att avgöra om metoden är kostnadseffektiv. Det kan exempelvis vara aktuellt att utvärdera en kombination av metoder såsom masstabilisering i kombination med kalkcementpelare. Bedömning av möjliga metoder och lämpliga bindemedel kan göras med stöd av litteratur, databaser och resultat från tidigare utförda projekt. Oftast behöver det dock göras laboratorieförsök innan en större erfarenhetsbas har byggts upp. I bedömningen av olika lösningar bör det ingå en riskbedömning av alternativa hanteringar av de förorenade sedimenten (tippning till havs, stabilisering/solidifiering och användning i geokonstruktioner, deponi på land). Kostnadsnivån för de olika alternativen är av storleksordningen 25 till 50 kr/m³ för tippning till havs, 200 till 400 kr/m³ för stabilisering/solidifiering och användning i geokonstruktioner och 1500 kr/m³ för deponi på land, se figur 8 på sidan 50.

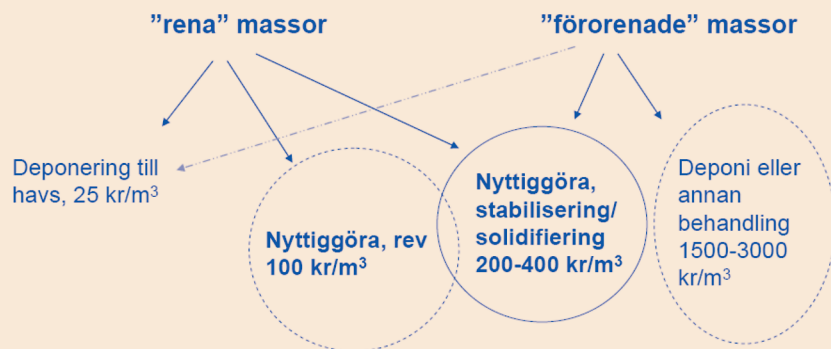


Figur 7: Projekteringsgång.

Det bör observeras att kostnader är mycket platsspecifika.

Rapporteringen av förstudien bör innehålla en introduktion och syfte med de bedömda valmöjligheterna; beskrivning av platsen, karaktärisering av jordens egenskaper och föroreningsgraderna, konceptuell beskrivning av stabilisering/solidifieringen, tekniska krav och kriterier, resultatet av förstudien med tydlig grund för beslut samt förslag på lämplig metod eller kombination av metoder.

Design. Första steget i designprocessen är att granska förstudien och identifiera eventuella kunskapsluckor. En utförandeplan utformas som specificerar och tydliggör mål, roller och ansvarsområden, tids- och arbetsplan, metoder för utförande, övervakning och kontroll både under utförandet och under bruksstadiet samt planer för eventuellt underhåll. Det huvudsakliga syftet med utförandeplanen är att bereda arbetet så att man gör rätt



Figur 8: Hanteringskostnader för rena respektive förorenade sediment, Svedberg (2008).

från början. Det är ofta lämpligt att olika kompetenser samverkar i detta arbete.

Aktuella bottensediment och föroreningstyper/-grader har identifierats och utvärderats under förstudien. Innan designprocessen kan fortskrida måste dock alla resultat från förstudien granskas och det måste i ett så tidigt skede som möjligt avgöras vilka typer av kompletterande undersökningar som måste utföras. Kompletterande undersökningar kan vara ytterligare klarläggande av variationerna av föroreningssituationen, fördjupade analyser av sedimentens egenskaper (miljö och geoteknik), batymetrisk och topografisk undersökning av sjö- eller havsbotten.

Lämpligt bindemedel och erforderlig mängd bestäms utifrån tidigare erfarenheter och utifrån inblandningsförsök som kan utföras både i lab och i fält. Syftet med inblandningsförsök är att bestämma lämplig typ/sammansättning och mängd av bindemedel i relation till de egenskaper som eftersträvas. Eftersom sedimentens egenskaper och föroreningsinnehåll kan variera väsentligt är det viktigt att inblandningsförsök utförs för representativa förhållanden och att bindemedlet har hög robusthet. Hållfasthets- och deformationsegenskaper samt permeabilitet studeras och hur de varierar med tiden. Dessutom testas lakegenskaperna för att studera hur stabiliseringen lyckats med att reducera utlakning av exempelvis PAH:er, PCB:er, metaller, tennorganiska föreningar (TBT). Labförsöken ger också en indikation hur bearbetbar jorden är. I laboratoriet testas normalt ett antal bindemedelsblandningar varav en eller ett par sedan kan testas/verifieras i fältförsök.

Det går idag inte att i laboratoriet helt efterlikna fältförhållanden. Om man inte har erfarenhet av ett mycket liknande projekt kan det vara viktigt att utföra fältförsök, helst på en representativ plats inom det tänkta stabiliseringsprojektet. Det främsta syftet med fältförsök är att verifiera/optimera de utifrån labförsöksresultaten valda dimensionerande egenskaperna och bindemedlen, testa utrustning och optimera själva utförandeprocessen. Det är väsentligt att de tester som utförs i sam-

band med fältförsöket är av hög kvalitet och tillräckligt omfattande. Dessa tester bildar också grund för utformning av kontrollprogrammet för efterkommande arbeten.

Resultaten från laborieförsöken och fältförsöket sammanfattas och tillvaratas i den slutliga dimensioneringen för stabiliseringen/solidifieringen. Om resultaten från fältförsöket visar att de egenskaper som eftersöks inte uppnås, krävs det en nogsam analys över vilka åtgärder som behöver tas till för att uppnå de egenskaperna som erfordras. Den slutliga designen ska innefatta specifikationer avseende typ och mängd bindemedel, toleranser, kriterier avseende utlaknings-, hållfasthets- och deformationsegenskaper samt kontrollprogram för verifiering av de parametrar som ingår i designen. Dessutom bör designen innehålla en åtgärdsplan vid avvikelse mot konstruktionsförutsättningarna.

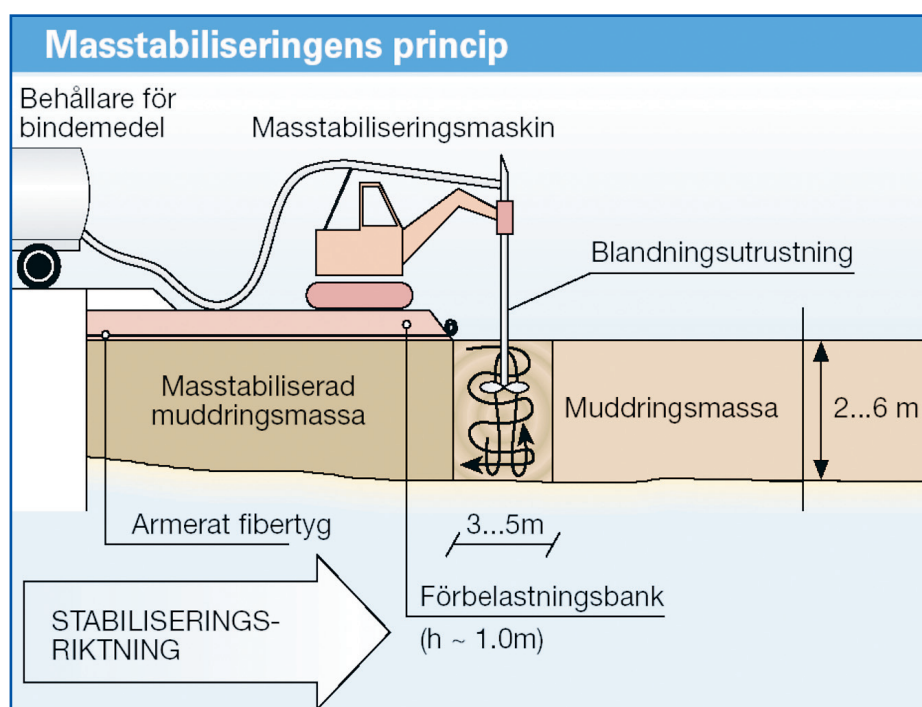
Det krävs enligt Miljöbalken en tillståndsansökan innan stabilisering/solidifieringsprojekt kan genomföras. Tillståndsansökan består av en miljökonse-

kvensbeskrivning (MKB) samt en teknisk beskrivning (TB). Miljökonsekvensbeskrivningen syftar till att beskriva den miljöpåverkan en stabilisering/solidifiering innebär på kringliggande miljö. I korthet ska en MKB innehålla en beskrivning över verksamheten och dess påverkan på människors hälsa och miljö. Det ska beskrivas vilka åtgärder som krävs för att undvika eller reducera påverkan av aktiviteterna i projektet. Det ska även finnas med ett nollalternativ, det vill säga vad konsekvenserna blir om projektet inte blir av. Den tekniska beskrivningen ska beskriva hur projektet ska utföras med avseende på byggande, miljö och säkerhet. Den ska beskriva de olika åtagandena i detalj och specificera tillvägagångssättet.

Kontroll. En viktig funktion vid utförandet av en stabilisering/solidifiering är ledningen och kontroll av kvalitén. Detta för att säkerställa att kvalitén upprätthålls genom hela utförandet och för att säkerställa att konstruktionen får de egenskaper som eftersträvas. En noggrann kontroll ska göras av utförandet av själva stabiliseringsarbetet.

De fysikaliska (hållfasthet, hydraulisk konduktivitet, deformationsegenskaper) och kemiska egenskaperna kontrolleras normalt med olika typer av laborieförsök på upptagna prover och med olika typer av sonderingsmetoder. Miljöegenskaper kontrolleras normalt genom laborieförsök på upptagna prover samt vattenprovtagning med efterföljande analys av innehåll och kemi. Dessutom kontrolleras stabiliseringen med avseende på sättningars storlek och utveckling med tiden, både på ytan och i djupled.

Alla kontroller bör utföras och handläggas av kvalificerad och erfaren personal. Avvikelser från kontrollplanen ska



Figur 9: Masstabiliseringsprincip för utförande (Ramböll Finland Oy).



Figur 10: Masstabiliseringsverktyg som användes i Hammerfest till vänster och väg 32 till höger.

dokumenteras och godkännas. Alla resultat från utförda kontroller sammanfattas i rapporter som kontinuerligt stäms av mot de kriterier som ställts upp i designen.

Uppföljning. En uppföljning och dokumentation av beteendet hos geokonstruktionen inklusive de stabiliserade/solidifierade muddermassorna bör göras. Härigenom kan även en successivt större erfarenhetsbas för metoden skapas.

Utförande

Masstabilisering, se figur 9, utförs med ett speciellt blandningsverktyg som är monterat på en modifierad grävmaskin. Inblandningsverktyget består av en utmatningsenhet och en hydraulisk blandare med vilken bindemedel blandas in i muddermassorna. Olika blandningsverktyg, se figur 10, kan väljas beroende främst på jordens/sedimentens egenskaper. Stabiliseringen utförs i horisontell och vertikal riktning så att en jämn och god inblandningskvalitet uppnås. Idag är maximalt stabilisering djup cirka 6,0 m för en masstabiliseringsutrustning.

Masstabiliseringstekniken är en metod ursprungligen framtagen för att stabilisera organiska problemjordar, som torv och dy som ligger inom ett begränsat djup under markytan. Metoden har använts flitigt och successivt utvecklats under senare år. Masstabiliseringsmetoden har idag många intressanta användningsområden som exempelvis hamnytor, grundläggning av lätta byggnader och ledningsgravar, förstärkning av järnvägsbankar, stabilisering av tomtmarker, plattform/arbetsbädd för tunga maskiner, stabilisering av urgrävda "rena" schakt- och muddringsmassor, fysisk och kemisk stabilisering av förorenade jordmassor och sediment samt tätskikt under och över förorenade jordmassor eller deponerat avfall.

Masstabiliseringstekniken har använts för att fysikaliskt och kemiskt stabilisera förorenade jordmassor och sediment sedan slutet av 1990-talet. De flesta projekten är hittills utförda utanför Sverige, främst i Finland, men även i Norge. I figur 11 visas ett exempel hämtat från Trondheim på utförande av stabilisering/so-

lidifiering av förorenade sediment. Utförandet av stabilisering/solidifiering samt typ och mängd av bindemedel styrs av den ostabiliserade jordens eller sedimentets fysikaliska egenskaper, typ föroreningar, föroreningsgrad samt vilka egenskaper och vilken funktion som önskas av den stabiliserade jorden/sedimentet. Laboratorieförsök utförda inom Stabcon visar att ett bindemedel bestående av cement och Merit kan ge bra lakegenskaper och bra geotekniska egenskaper. Erforderlig bindemedelmängd varierar och ligger normalt mellan 100 till 250 kg/m³ ostabiliserad jord/sediment.

Slutord

Behovet av muddring av förorenade sediment i nordiska hamnar kommer under de närmaste åren att omfatta miljontals kubikmeter. Genom att stabilisera/solidifiera de förorenade muddermassorna kan ett nyttiggörande av dessa förorenade muddermassor ske på ett miljövänligt och kostnadseffektivt sätt.

Stabcon-projektet kommer att utveckla stabiliserings/solidifieringsmetoden så att ansvariga för hamnar och andra områden med förorenade sediment och muddermassor kan analysera och tillämpa metoden som ett alternativ till de konventionella metoderna tippning till havs eller deponi på land. Nyttiggörandet i form av användning av de stabiliserade massorna i geokonstruktioner möjliggörs genom att föroreningarna immobiliseras och hållfastheten ökar hos de stabiliserade massorna. Dessutom minskar behovet av transporter (till exempel av fyllningsmaterial), vilket ger kostnadsbesparingar och miljövinster.

En kurs planeras vid årsskiftet 2009/2010 och senare även en internationell konferens. Deltagare i Stabcon-projektet är Statens geotekniska institut (SGI), Merox, Cementa, Ramböll Sverige, Ecoloop, Skanska Sverige Region Grundläggning, Oxelösund hamn och Norcem. Projektet är ett Eureka-projekt och Vinnova är delfinansier.

Referenser

Stabcon. *Stabilisation/solidification of contaminated sediments and other dredged material*. Eureka project 4078. www.stabcon.com

Svedberg B, & Holm G. (2007). *Stabilisering och solidifiering – en kompletterande metod för efterbehandling av förorenad jord och muddermassor*. Bygg & teknik 1/07.

Svedberg B. (2008). Personlig kommunikation.



Figur 11: Exempel på stabilisering av förorenade muddermassor, Trondheim.