

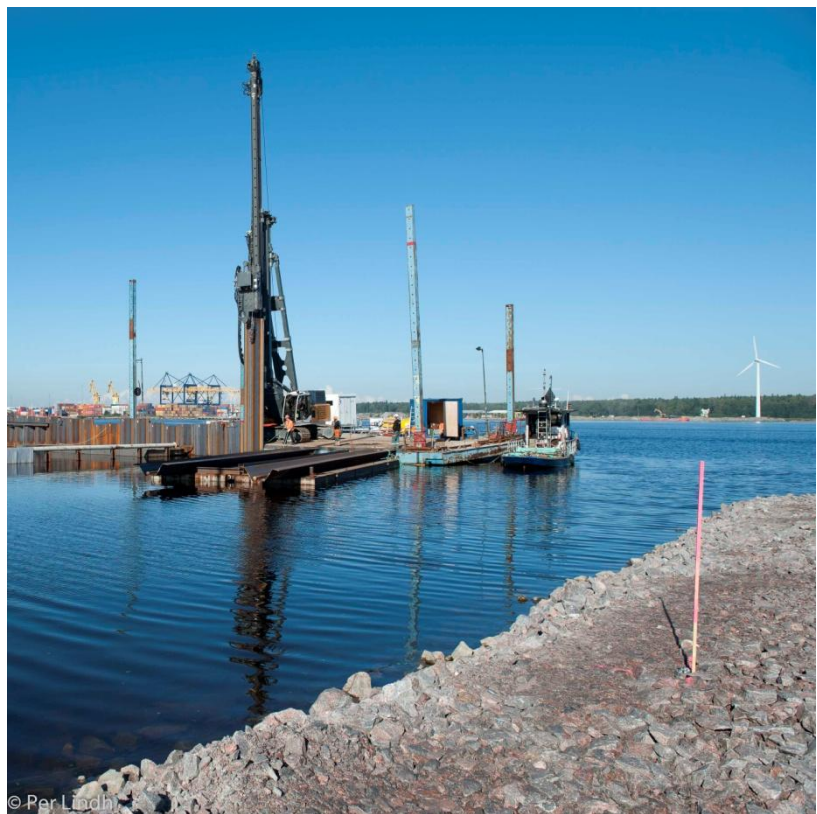
**SBUF Rapport 12424**

**Författare**  
Per Lindh

**Datum**  
1/5-2012

**Telefon**  
042-158113

# Fältförsök med stabiliserade muddermassor, Gävle Hamn



© Per Lindh



## Förord

Resultaten från SBUF-projekt 12424 visar på möjligheter att stabilisera/solidifiera förorenade muddermassor för användning som fyllnadsmaterial i en hamnkonstruktion.

Författaren vill tacka följande personer som varit behjälpliga under projektets gång;

Pär Almer, Erik Bergström, Kalle Mattsson, Peab Sverige AB.

Juha Helin, Helena Eriksson, Peter Nilsson, Peab Industri.

Jonas Rahm, Linda Astner, Gävle Hamn.

Göran Holm, Per-Evert Bengtsson, SGI.

Sinan Akbar, LTH.

Johan Lagerlund, Vattenfall.

Projektet genomfördes med stöd från SBUF, Gävle Hamn och Peab.

Lund den 1 maj 2012

Författaren



## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	3
1. Inledning.....	5
1.1 Bakgrund.....	5
1.2 Syfte .....	8
1.3 Upplägg .....	8
2. Förarbete.....	10
2.1 Laboratorieförsök .....	10
2.2 Fält.....	16
3. Spontkonstruktioner .....	19
3.1 Konstruktionssteg ett.....	20
3.2 Konstruktionssteg två.....	20
3.3 Konstruktionssteg tre.....	22
3.4 Konstruktionssteg fyra .....	23
3.5 Instrumentering .....	24
4. Muddring .....	26
5. Stabilisering av muddermassorna.....	28
5.1 Masstabilisering .....	28
5.2 Djupstabilisering .....	29
5.3 Processtabilisering.....	29
5.4. ProSol utrustningen .....	30
6. Utförande och provning .....	33
6.1 Utförande.....	33
6.2 Fält- och labprovning .....	37
7. Modellering .....	47
7.1 Geometrisk modell .....	47
7.2 Materialparametrar .....	48
7.3 FE-Modell med genererat nät.....	49
8. FE-beräkningar.....	51
8.1 Resultat från beräkningar enligt byggskede ett .....	51
8.2 Resultat från beräkningar enligt byggskede två .....	51
8.3 Resultat från beräkningar enligt byggskede tre.....	52
9 Parameterstudie .....	53
9.1 Muddermassans skjuvhållfasthet.....	53
9.2 Muddermassans tunghet.....	53
10 Slutsatser .....	55
11. Referenser.....	56



## Sammanfattning

Metoden att behandla och använda förorenade muddermassor är inte ny men i detta projekt har en ny metodik utvecklats. De behandlade muddermassorna fungerar väl i kombination med en spontad konstruktion. Hållfasthet och hållfasthetstillväxt hos de stabiliserade massorna är beroende på bindemedelstyp, bindemedelsmängd i förhållande till de inkommande muddermassornas vattenkvot och massornas temperatur. Ytterligare en viktig faktor är överlasten som placeras på de behandlade muddermassorna för att erhålla en tillräcklig densitet i de behandlade muddermassorna. Överlasten i kombination med tillräcklig bindemedelsmängd är kritiska för att erhålla tillräcklig stark och varaktig bindning av muddermassorna.

1. Resultaten tyder på mycket goda resultat under förutsättningar att bindemedelsmängder hålls på korrekt nivå.
2. Processtabiliseringen har visat sig fungera mycket bra och ge en jämn inblandning i de behandlade muddermassorna.





## 1. Inledning

Stabilisering/solidifiering även kallad s/s eller STSO är en teknik för att behandla förorenad jord. I detta arbete har tekniken applicerats på förorenade muddermassor. Till skillnad från en vanlig jord beror de geotekniska egenskaperna inte bara på jordens kornfördelning, vattenkvot och organisk halt utan även på mängden bindemedel. Bindemedelsreaktionerna bestäms i sin tur av typ av bindemedel, bindemedelsmängd, kombination av bindemedel, organisk halt och vattenkvot hos de stabiliserade/solidifierade massorna. Tanken med stabilisering/solidifiering är att erhålla en produkt som är optimerad med avseende på miljömässiga, ekonomiska och tekniska aspekter. Beräknade kostnader för olika typer av behandling av muddermassor finns redovisade i Tabell 1.

**Tabell 1. Beräknade kostnader för olika hanteringsalternativ av muddermassor.**

	<i>Rena muddermassor</i>	<i>Förorenade muddermassor</i>
Deponering till havs	25 kr/m <sup>3</sup>	–
Nyttiggöra, ex rev	100 kr/m <sup>3</sup>	–
Nyttiggöra, stabilisering/solidifiering	200–300 kr/m <sup>3</sup>	200–400 kr/m <sup>3</sup>
Deponi på land eller annan behandling	1 000–2 000 kr/m <sup>3</sup>	1 500–3 000 kr/m <sup>3</sup>

Aktuell metod för behandlingen av muddermassorna i Gävle Hamn är STSO-metoden. Denna metod kan delas upp i tre undergrupper.

- Djupstabilisering
- Masstabilisering
- Processtabilisering

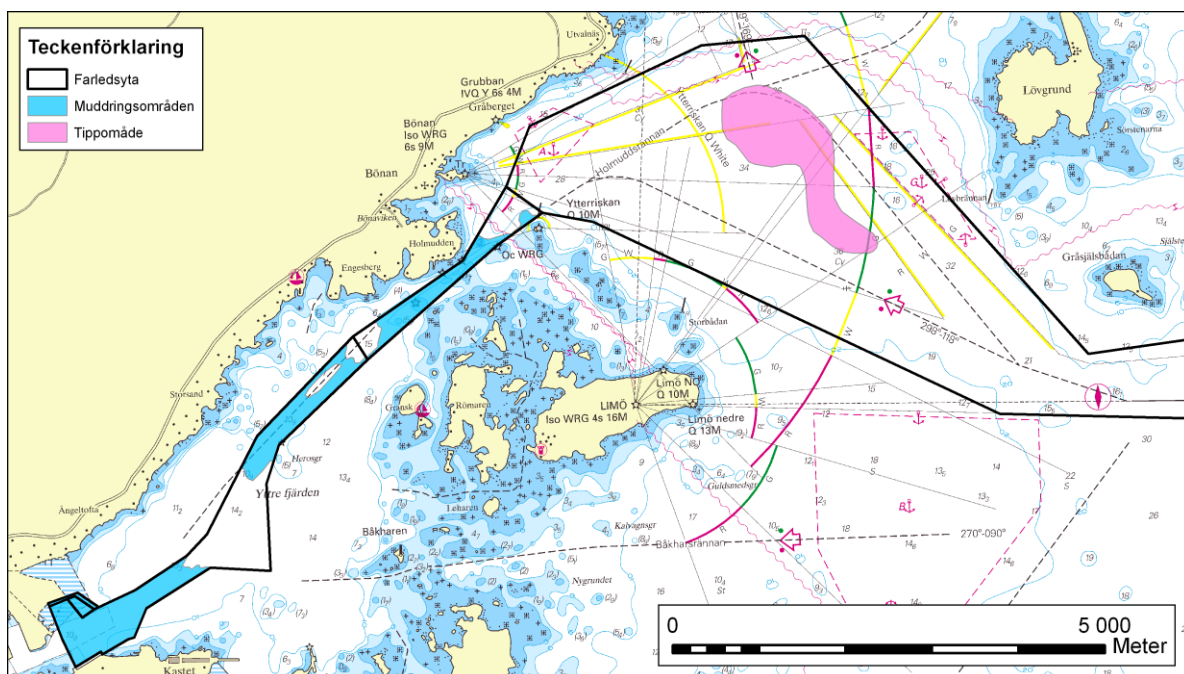
### 1.1 Bakgrund

Likt många svenska hamnar har Gävle Hamn haft stora ökningar av hanterad godsvolym. Gävle Hamn har ett bra strategiskt läge för södra Norrland, Värmland, Mälardalen och Dalarna. Volymökningen i Gävle Hamn beror på en ökad containervolym men också en ökning av bulkvolymen med bl.a. lera och skrot. Containerhanteringen svarar dock för den största volymen, se Figur 1. För att möjliggöra en kapacitetsökning behövs därför nya kajer och nya hamnytor. Målet med utbyggnaden är att öka kapaciteten med 40 % fram till 2014. Kapacitetsutbyggnaden skall ske med stark miljöhänsyn (Anon, 2007).



Figur 1. Foto visande containerhanteringen i Gävle Hamn, foto Per Lindh.

För att säkerställa kapacitetsökningen i hamnen och öka säkerheten till sjös utförs muddringsarbeten i farleden, se Figur 2.



Figur 2. Sjökort visande farled och planerad muddring inför utbyggnad av Gävle Hamn (Anon, 2007)

Muddringen ger en djupare och bredare inseglngränna. Det övre skiktet av muddermassorna är förorenade och kan därför inte tippas i det planerade tippområdet, se figur 2. De förorenade

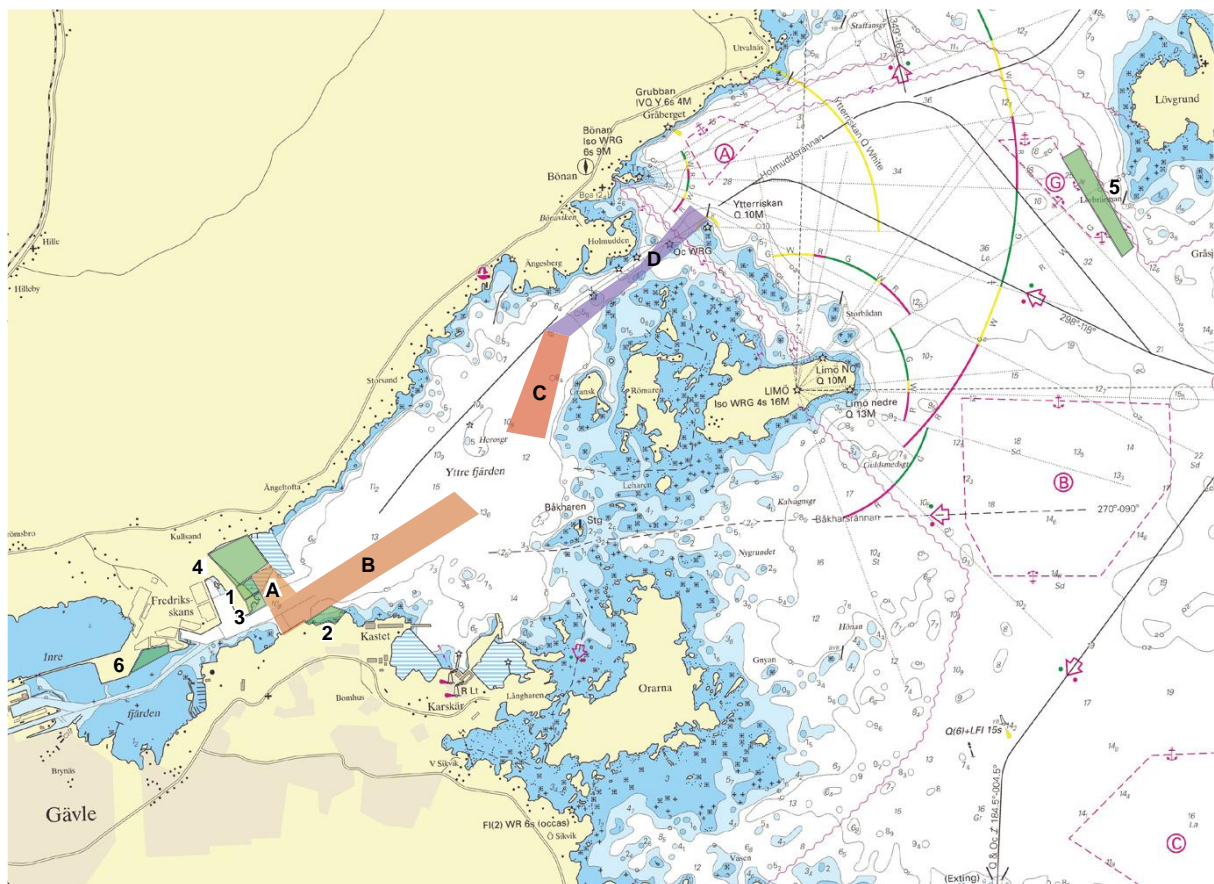
muddermassorna behandlas genom stabilisering/solidifiering och placeras inom invallningar respektive spontkonstruktion i hamnen, se Figur 3. Sjökort visande de olika muddringsområdena och utfyllnadsområdena samt tippområdet tillhavs (Anon, 2007). De planerade muddringsområdena redovisas i Tabell 2 och de planerade utfyllnadsområdena redovisas i Tabell 3. Figur 2 och Figur 3 uppvisar lite olika deponiområden vid lövgrund.

**Tabell 2. Muddringsområde.**

Beteckning	Muddringsområden
A	Fredriksskans
B	Yttre fjärden SV
C	Yttre fjärden NO
D	Holmuddsrännan

**Tabell 3. Utfyllnadsområden.**

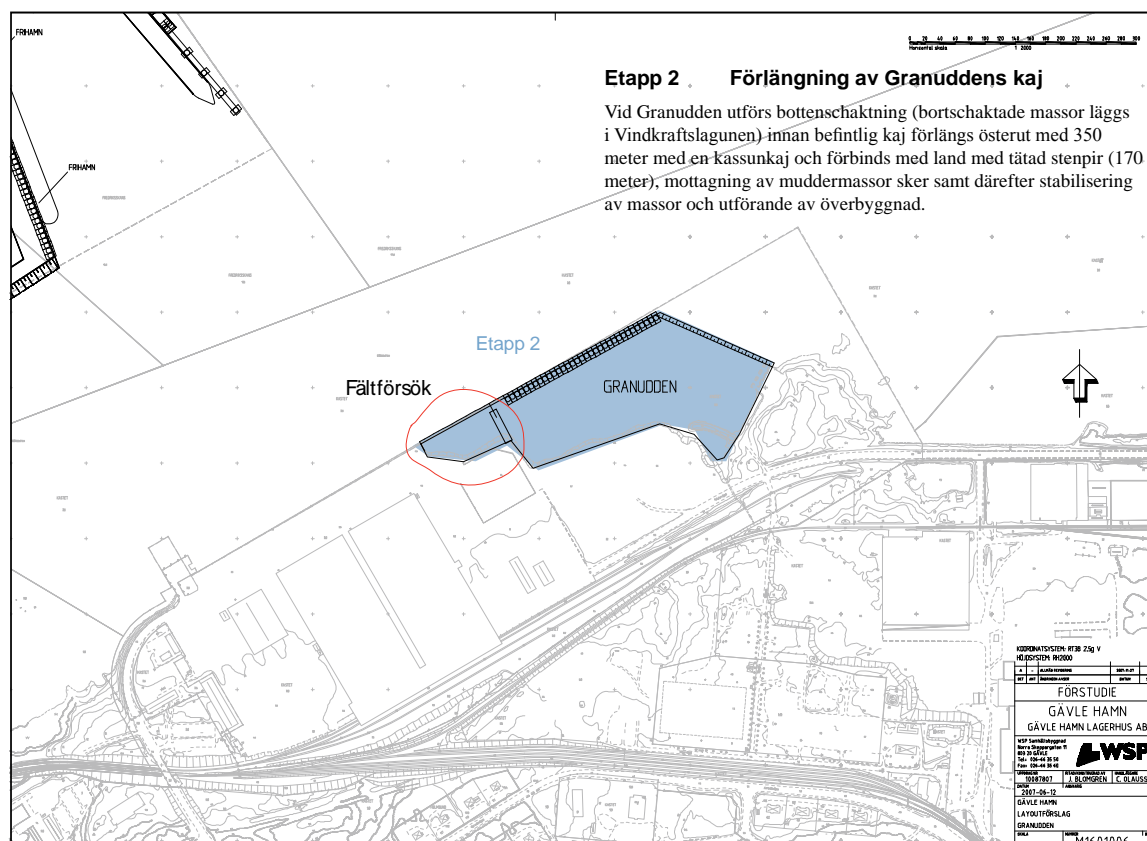
Beteckning	Utfyllnadsområde
1	Fredriksskans RoRo
2	Granudden
3	Fredriksskans Frihamn
4	Vindkraftlagunen
5	Lövgrund havsdeponi
6	Miljökajen



**Figur 3. Sjökort visande de olika muddringsområdena och utfyllnadsområdena samt tippområdet tillhavs (Anon, 2007).**

## 1.2 Syfte

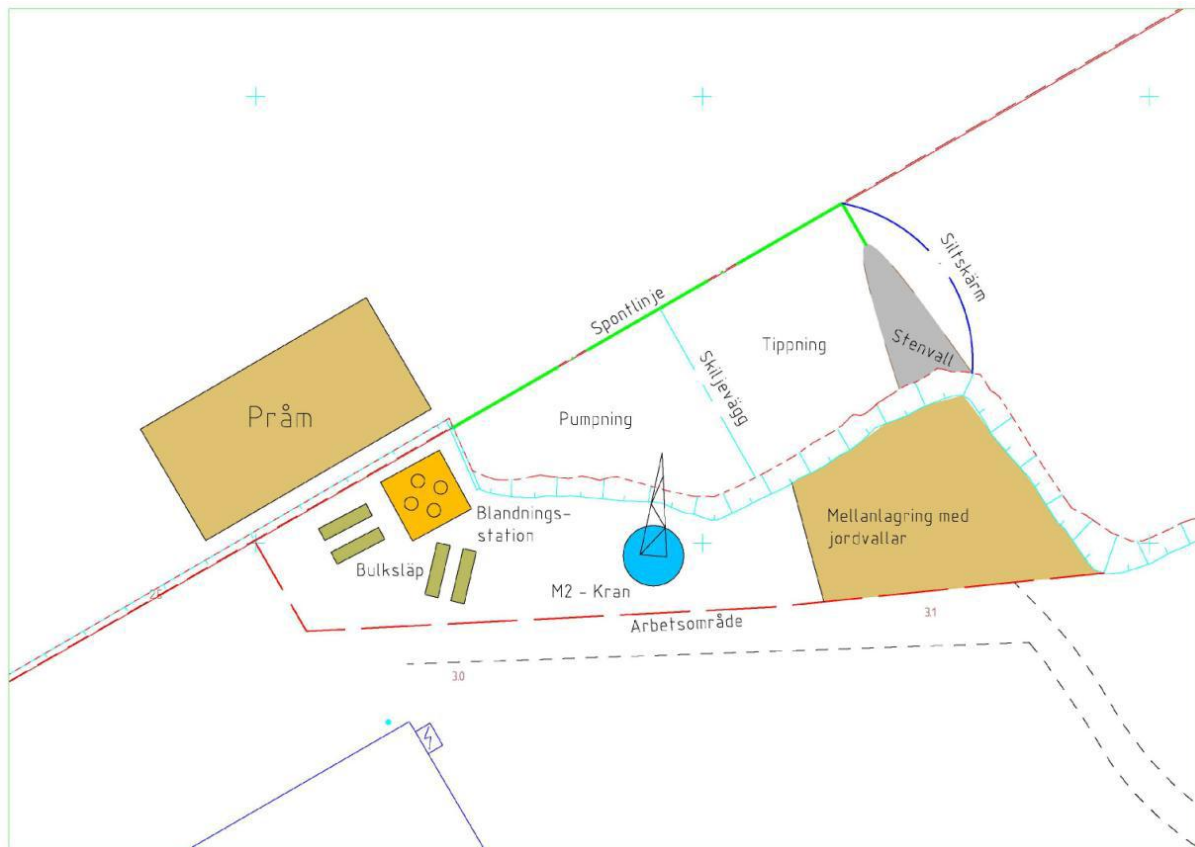
Syftet har varit att via ett pilotförsök studera hur det stabiliserade/solidifierade materialet fungerar tillsammans med konstruktionsdelar som en spont samt att studera olika egenskaperna hos det stabiliserade materialet. Vidare var syftet att studera hur processtabilisering fungerar i fullskala. För att studera dessa aspekter genomfördes under 2010 och 2011 en pilotstudie på Granudden. Pilotstudien var en del av etapp 2 i utbyggnaden av Gävle Hamn, se Figur 4. Figur visande fältförsökets planerade omfattning på Granudden (efter Anon, 2007). Figur 4.



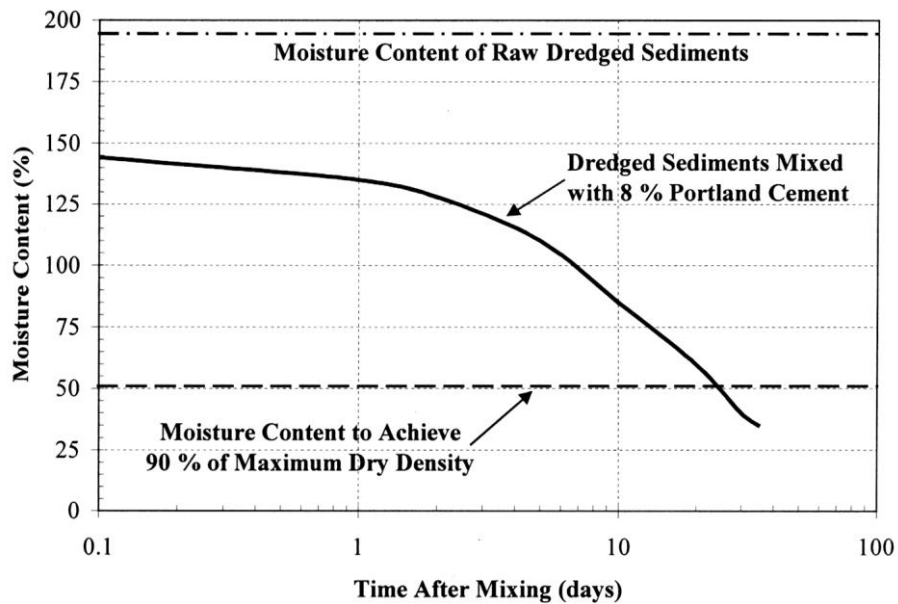
Figur 4. Figur visande fältförsökets planerade omfattning på Granudden (efter Anon, 2007).

## 1.3 Upplägg

Genom att studera spontens rörelser vid olika belastningsnivåer samt hållfastheten hos det stabiliserade materialet vid olika tidpunkter kunde materialets egenskaper skattas. Initialt valdes två olika metoder för att placera massorna i konstruktionen, pumpning respektive blandning/tippning, se Figur 5. Anledningen till att låta muddermassorna ”härda” innan placering i vatten är baserad på erfarenheter från USA, se Bennert *et al* (2000). Figur 6 visar förändringen av vattenkvot hos stabiliserade muddermassor med tid. På grund av felräkning av bassängernas verkliga volym i förhållande till den teoretiska uppstod ett underskott i mängden muddermassor baserat på aktuell muddringstillstånd. Endast metoden med pumpning och ”undervattensgjutning” utfördes inom ramen för pilotprojektet.



Figur 5. Figuren visar den principiella arbetsplatsdispositionen (Eriksson, 2010).



Figur 6. Solidifiering av cementstabiliserade muddermassor (Bennert *et al*, 2000)

## 2. Förarbete

Projektet föregicks av förundersökningar i fält med tyngdpunkt på miljöundersökningar. Dessa undersökningar redovisas inte här utan resultaten av dessa undersökningar finns hos Gävle Hamn. Gävle Hamn svarade för all miljöprovtagning samt bestämning av bindemedelskombinationer och bindemedelshalter, se nedan.

### 2.1 Laboratorieförsök

Projektet föregicks av omfattande laboratorieförsök utförda av Vattenfall. Tre studier genomfördes.

- Stabilisering och solidifiering av muddermassor i Gävle hamn, 2009:168 CIV, Fossenstrand
- S/S AV MUDDERMASSA FRÅN GÄVLE HAMN, STEG 1 U 09:109, Lagerlund
- S/S AV MUDDERMASSA FRÅN GÄVLE HAMN, STEG 2 U 10:162, Lagerlund

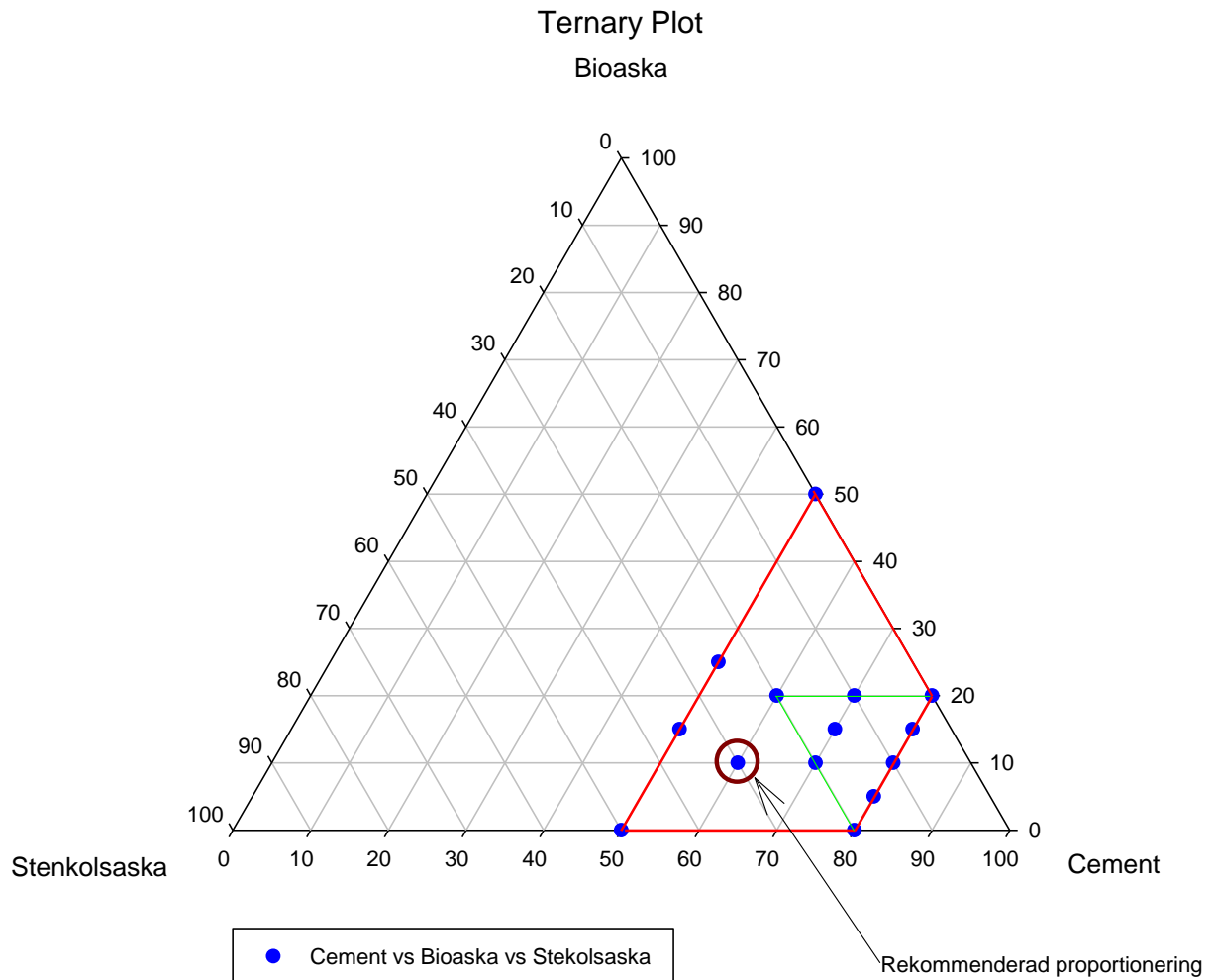
Nedan följer en sammanfattning och en egen tolkning av rapporterna. Den första delen av förundersökningen utfördes som ett examensarbete på Luleå Tekniska Universitet i samarbete med Vattenfall R&D (Fossenstrand, 2009). I examensarbetet byggdes försöksprogrammet upp av olika oberoende variabler, dessa var:

- Härdningstid (dygn)
- Mängd bioaska (%)
- Mängd stenkolsaska (%)
- Mängd cement (%)
- Total bindemedelsmängd ( $\text{kg/m}^3$ )

Mängd bioaska och mängd stenkolsaska är kopplat till mängd cement och därför kopplade. (Fossenstrand, 2009). Inbördes bindemedelsmängder och härdningstid spänner upp försöksrummet. Till detta sattes tre bivilkor baserade på tillgången på aska;

1.  $\leq 30\ 000$  ton + 10 % (=33 000 ton) bioflygaska
2.  $\leq 20\ 000$  ton + 10 % (=22 000 ton) lagrad stenkolsflygaska
3.  $\geq 30\ 000$  ton stenkolsflygaska

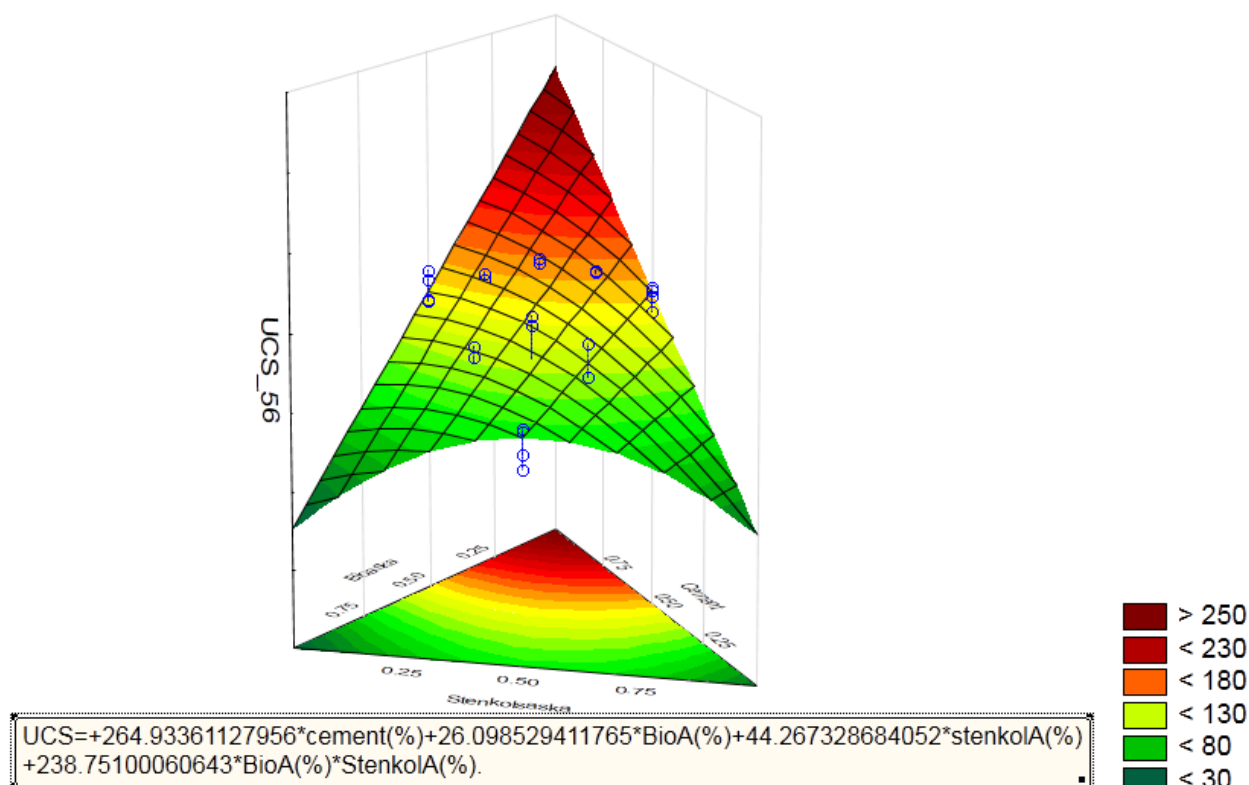
Baserat på data i rapport LTU-EX-09168-SE (Fossenstrand, 2009) har försöksrummet analyserats i denna rapport. Designen är asymmetrisk och därför svår att utvärdera, se Figur 7. En mindre del av försöken kan dock ingå i en simplexdesign med randvilkor, jmf den gröna triangeln i Figur 7.



**Figur 7. Graf som beskriver försöksrummet i rapport LTU-EX-09168-SE, bilaga A.**

Körs en analys på datapunkter i den gröna triangeln erhålls en responsyta enligt Figur 8. Analysen visar att ju mer cement desto högre tryckhållfasthet vid 56 dygn. Här måste dock tilläggas att försöksrummet är väldigt snävt och inget referensvärde med enbart cement är utfört. Vidare användes ingen överlast under härdningstiden.

Fitted Surface; Variable: UCS\_56  
 DV: UCS\_56; R-sqr=.8202; Adj.:.7977  
 Model: Quadratic (some terms were removed from full model)



Figur 8. Responstyta för punkter i den gröna triangeln enligt Figur 7.

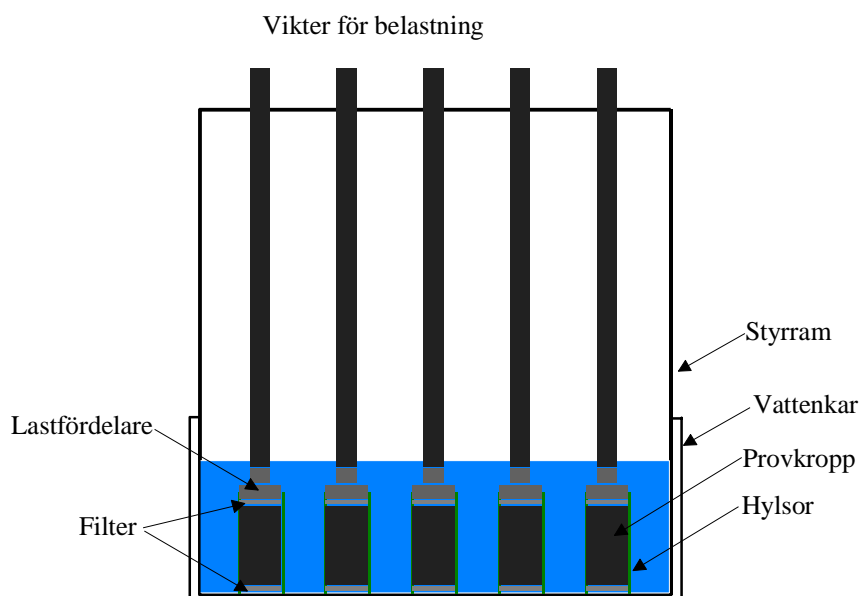
I studien provades tre olika bindemedelsmängder;  $120 \text{ kg/m}^3$ ,  $150 \text{ kg/m}^3$  och  $180 \text{ kg/m}^3$ . Härdningstiderna sattes till 7, 28 och 56 dygn beroende på tidsbegränsningar inom ramen för examensarbetet. Utifrån dessa förutsättningar designades ett reducerat försöksrum. Rekommendationerna från detta försök blev ett recept på 60/10/30 (cement/bioflygaska/stenkolA) med en total inblandningsmängd på  $180 \text{ kg/m}^3$ . Här skall dock påpekas att provkropparna lagrades obelastade vilket medförde en lägre bindemedelstäthet, d.v.s lägre hållfasthet jämfört med provkroppar som lagras med belastning.

Den andra studien, Lagerlund (2010a), hade som mål att finna ett stabiliseringsrecept som efter 91 dygns härdningstid uppfyllde kriterierna:

- Tryckhållfasthet  $> 140 \text{ kPa}$
- Permeabilitet  $1\text{E-}9 \text{ m/s}$

Till skillnad från den första studien av Fossenstrand blev provkropparna belastade med en belastning motsvarande  $18 \text{ kPa}$ , se Figur 9.





**Figur 9. Schematisk ritning över belastningsutrustningen (efter Lagerlund 2009).**

I studien studerades 14 serier om 18 provkroppar i vardera, totalt 252 provkroppar. Två olika sediment provades vilket innebar 9 provkroppar i varje serie. Den nio provkropparna delades upp enligt:

- 2st för hållfasthetsbestämning 28 dygn
- 2st för hållfasthetsbestämning 91 dygn
- 1st för permeabilitetsförsök
- 3st för miljöförsök
- 1st reserv

I Tabell 4 redovisas de olika provserierna.

**Tabell 4. Redovisning av de olika provserierna.**

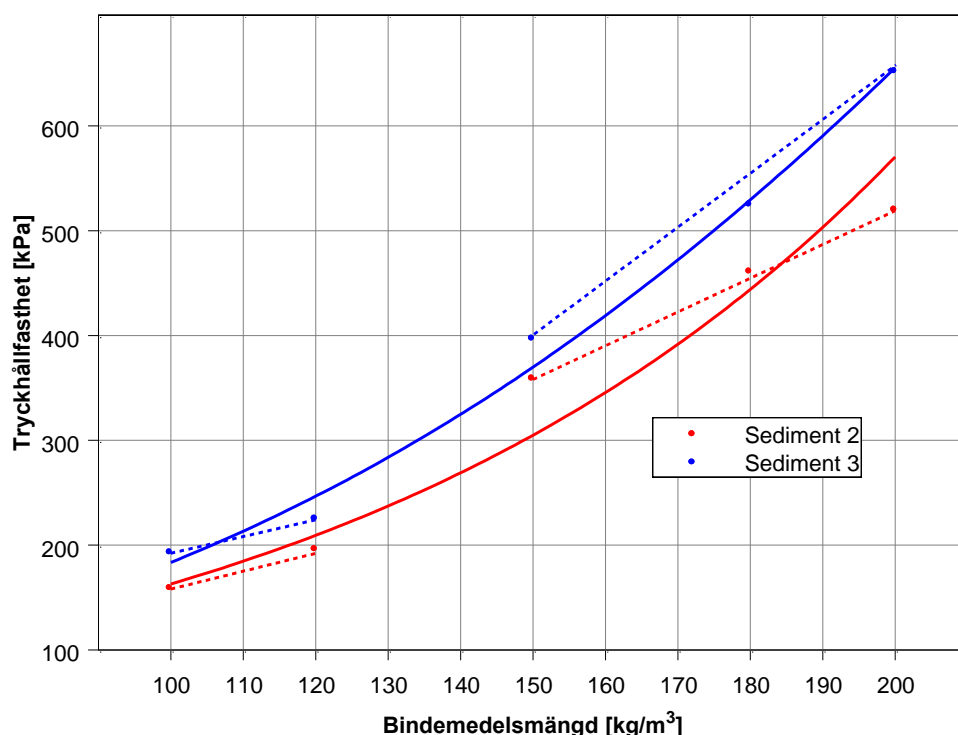
Serie	Bindemedel	Proportioner	Bindemedelsmängd kg/m <sup>3</sup>
1	C/M/A1	50/20/30	120
2	C/M/A1	50/20/30	180
3	C/M/A1	50/20/30	200
4	C/M/A1	35/35/30	150
5	C/M/A1	20/50/30	150
6	C/M/A1	40/20/40	150
7	C/M/A7	50/20/30	150
8	C/M/A6	50/20/30	150
9	C/A1	70/30	150
10	C/M	80/20	150
11	C/M/A1	50/20/30	150
1B	C/M/A1	50/20/30	100
6B	C/M/A1	40/20/40	120
8B	C/M/A6	50/20/30	120

Där C = cement, M = Merit 5000, A1 = Uppsalaaska, A6 = lagrad Uppsalaaska, A7=kolflygaska.

Följande klustring kan göras ur Tabell 4, serie 1 till 3, 11 och 1B har samma bindemedelsproportioner och samma bindemedel men olika bindemedelsmängd. Serie 4 till 6

har samma bindemedelsmängd och samma bindemedel men olika inbördes proportioner. Serie 7 och 8 har samma bindemedelsmängd och proportioner men olika askor. Serie 6 och 6B är lika förutom bindemedelsmängd. Samma gäller för serie 8 och 8B. Serie 9 och 10 innehåller endast två bindemedel.

När det gäller de serier som har samma bindemedelsproportioner, d.v.s. serie 1B, 1-3 och 11, kan data redovisas som i Figur 10. Exponentiell regressionsmodell är vald och har en förklaringsgrad på 96 resp 98 % för sediment 2 och 3. Eftersom den oberoende variabeln (tryckhållfasthet) inte är ekvidistant kan data tolkas lite olika. Figur 10 visar även en linjär kurvanpassning där data är uppdelad i två grupper 100 och 120 kg bindemedel resp. 150, 180 och 200 kg bindemedel. Det går att tolka in ett tröskelvärde som då befinner sig mellan 120 och 150 kg/m<sup>3</sup>.



**Figur 10. Graf visande mätdata för 28 dygns tryckhållfasthet för recept 1B, 1-3 och 11 (C/M/A1 50/20/30), jmf. Tabell 4. Proverna belastades med 18 kPa under härdningstiden.**

Den tredje studien (Lagerlund, 2010b) tillverkades fyra provserier. För resultaten hänvisas till Vattenfalls rapport. Den första provserien bestod av 6 serier med 12 provkroppar i varje, totalt 72 provkroppar. De oberoende variabelna var vattenkvoter (300 %, 450 % och 600 %) och belastning under härdning (belastad – obelastad), bindemedelsmängd (120 resp. 150 kg/m<sup>3</sup>), inbördes proportioner (35/35/30 resp. 40/20/40) och två olika askor (lagrad resp. färsk aska). Detta innebär en faktor på tre nivåer (vattenkvot) och fyra faktorer på två nivåer. Om ett sådant försök utföres som ett ¾ fraktion erhålles 36 provkroppar och med dubbelförsök ger detta 72 provkroppar. En kontroll av data från rapport U 10:162 visar att bindemedelsproportionen 35/35/30 endast är med på 24 av de 72 provkropparna vilket medför att försöket inte är ett faktorförsök, se Figur 11. För respektive vattenkvot fördelades provkropparna enligt följande:

- 2 st för hållfasthetsbestämning 28 dygn (obelastade under härdning)
- 2st för hållfasthetsbestämning 28 dygn (belastade under härdning, 18kPa)

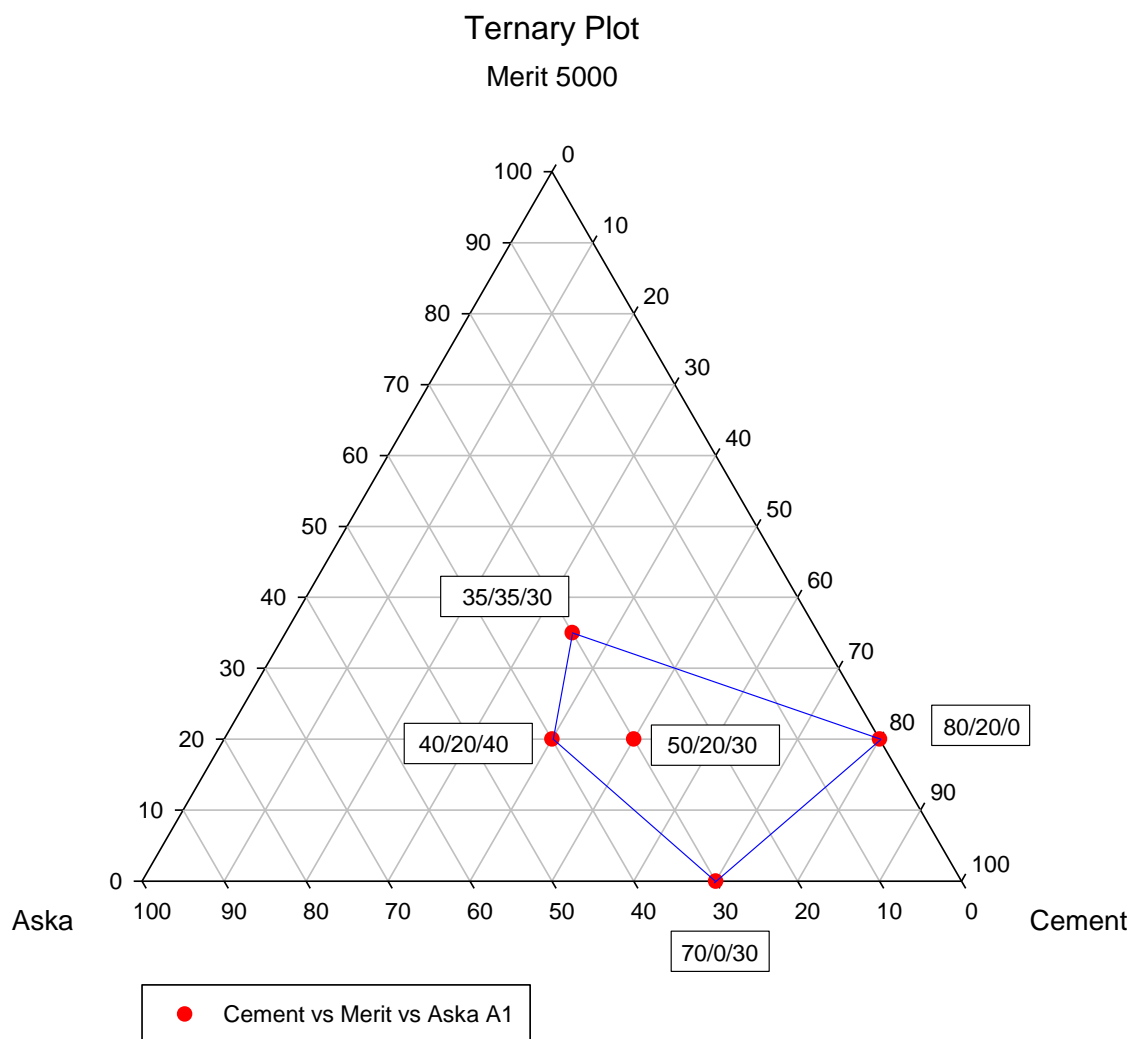
**Tabell 5. Redovisning av provserier studie tre, serie ett.**

<b>Serie</b>	<b>Bindemedel</b>	<b>Proportioner</b>	<b>Bindemedelsmängd kg/m<sup>3</sup></b>
1	C/M/A1	35/35/30	150
2	C/M/A6	35/35/30	150
3	C/M/A1	40/20/40	120
4	C/M/A1	40/20/40	150
5	C/M/A6	40/20/40	120
6	C/M/A6	40/20/40	150

Där C = cement, M = Merit 5000, A1 = Uppsalaaska, A6 = lagrad Uppsalaaska

Proverna kan klustras enligt följande; serie 1 och 2, 3 och 5 resp. 4 och 6 skiljer i asktyp, serie 3 och 4 resp. 5 och 6 skiljer i bindemedelsmängd.

Endast hållfastheten var en beroende (mätt) variabel i serie ett.



**Figur 11. Graf som beskriver försöksrummet i provserie 1 med Cement, Merit och aska A1 (ur Lagerlund, 2010b).**

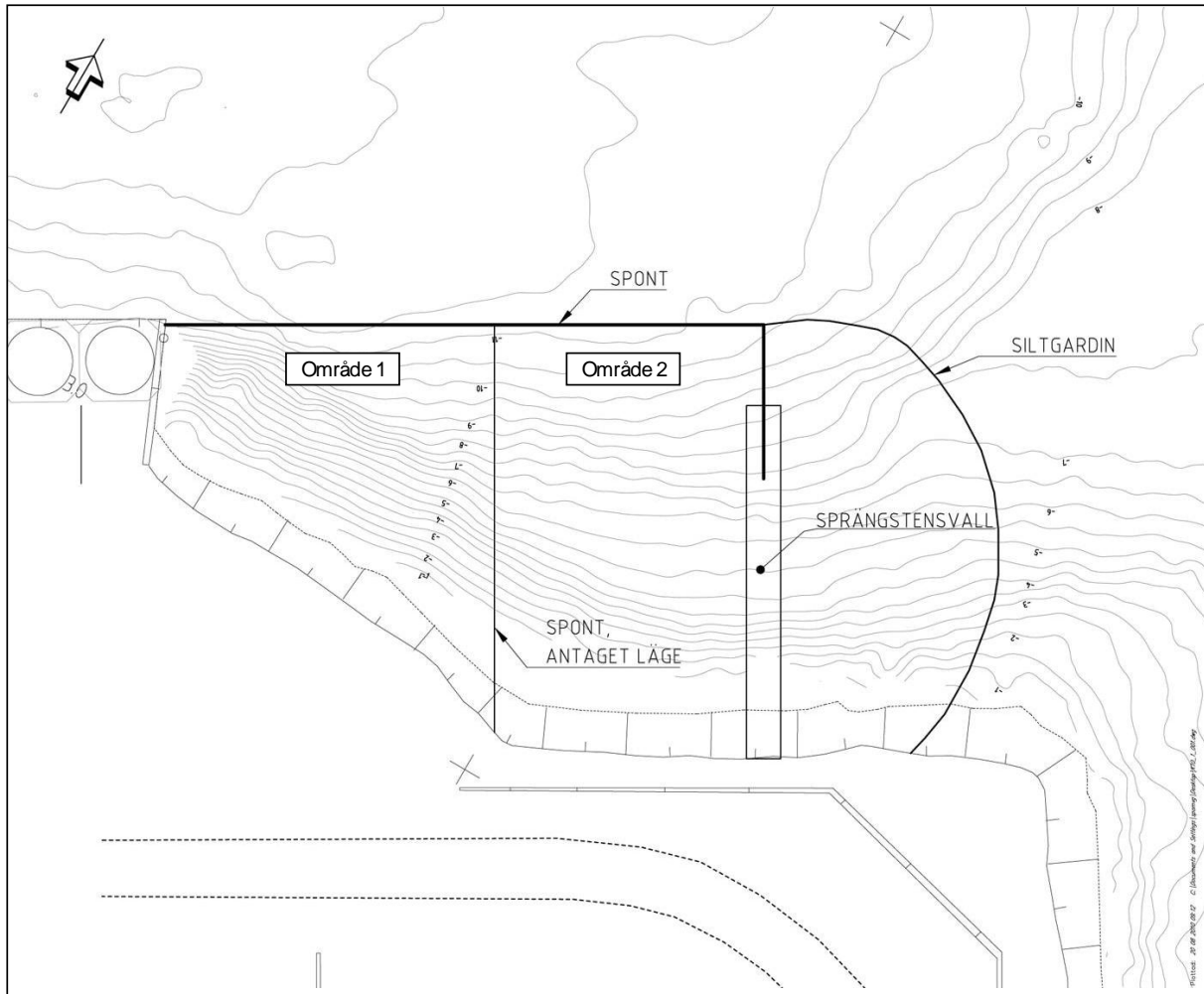
I provserie 2 tillverkades provkroppar för att studera inverkan av olika konsolideringstryck, 6, 9 och 18 kPa. De andra oberoende variablerna var asktyp och inblandningsmängd. De beroende variablerna var hållfasthet 28 och 91 dygn, yturlakning samt permeabilitetsförsök. För resultat av permeabilitetsförsöken hänvisas till Vattenfalls rapport.

Provserie 3 tillverkades för att simulera en belastningsökning av sediment beroende på fyllning bak en spontkonstruktion. Belastningsökningen var 3 kPa per dygn.

Den fjärde provserien utformades så att provkropparnas porvatten från konsolideringen fångades upp för att ge en indikativ information om de stabiliserade muddermassornas lakbarhet.

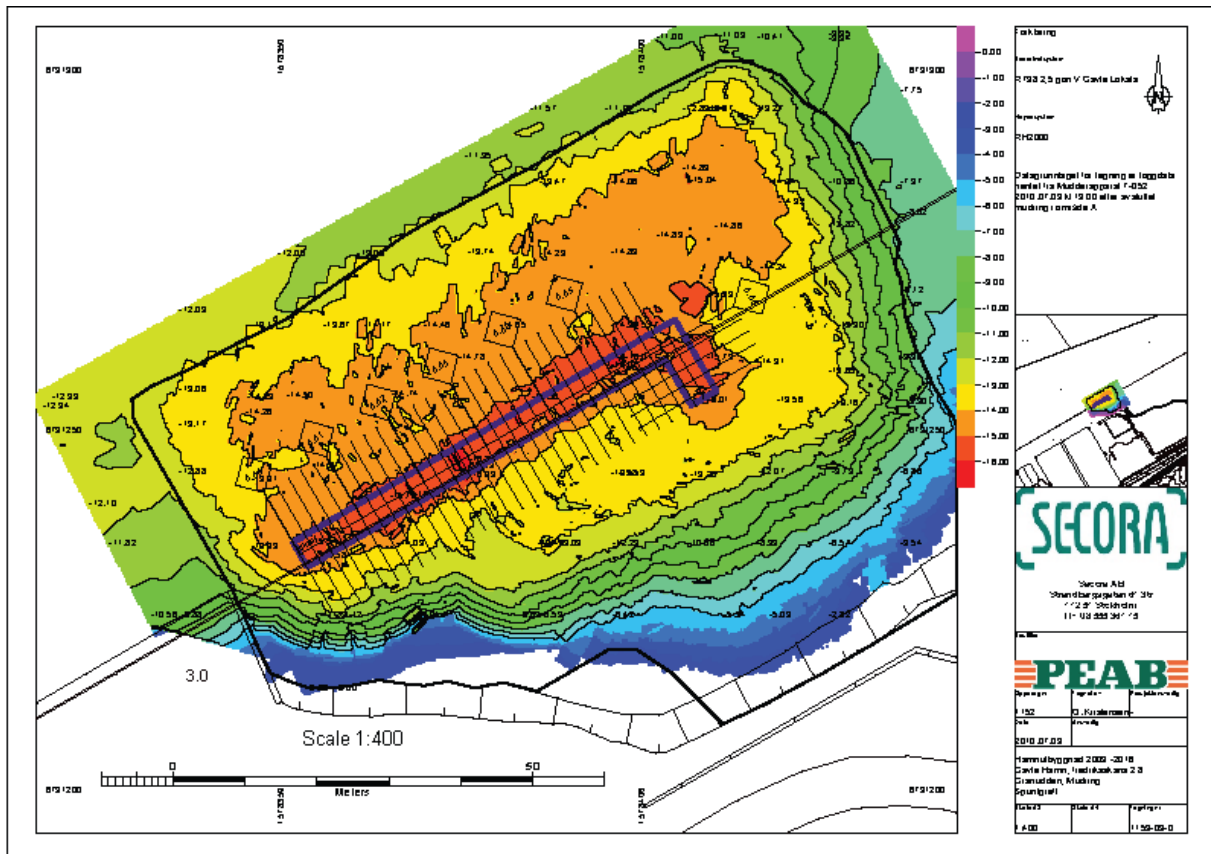
## 2.2 Fält

De förberedande fältarbetena bestod i att förbereda den befintliga kajen för utbyggnad samt att muddra området för den kommande spontslagningen och uppfyllningen. Figur 12 visar en principskiss över området efter färdigställande av spont och sprängstensvall. Siltgardinen är till för att fånga upp eventuell grumling som kan passera sprängstensvallen.



Figur 12. Principskiss för utfyllnadsområdet (efter Eriksson, 2010).

Förarbetet för spontningen innebar att den blivande spontlinjen muddrades till berg. Den muddrade rännan kontrollmättes med sonar, se Figur 13.

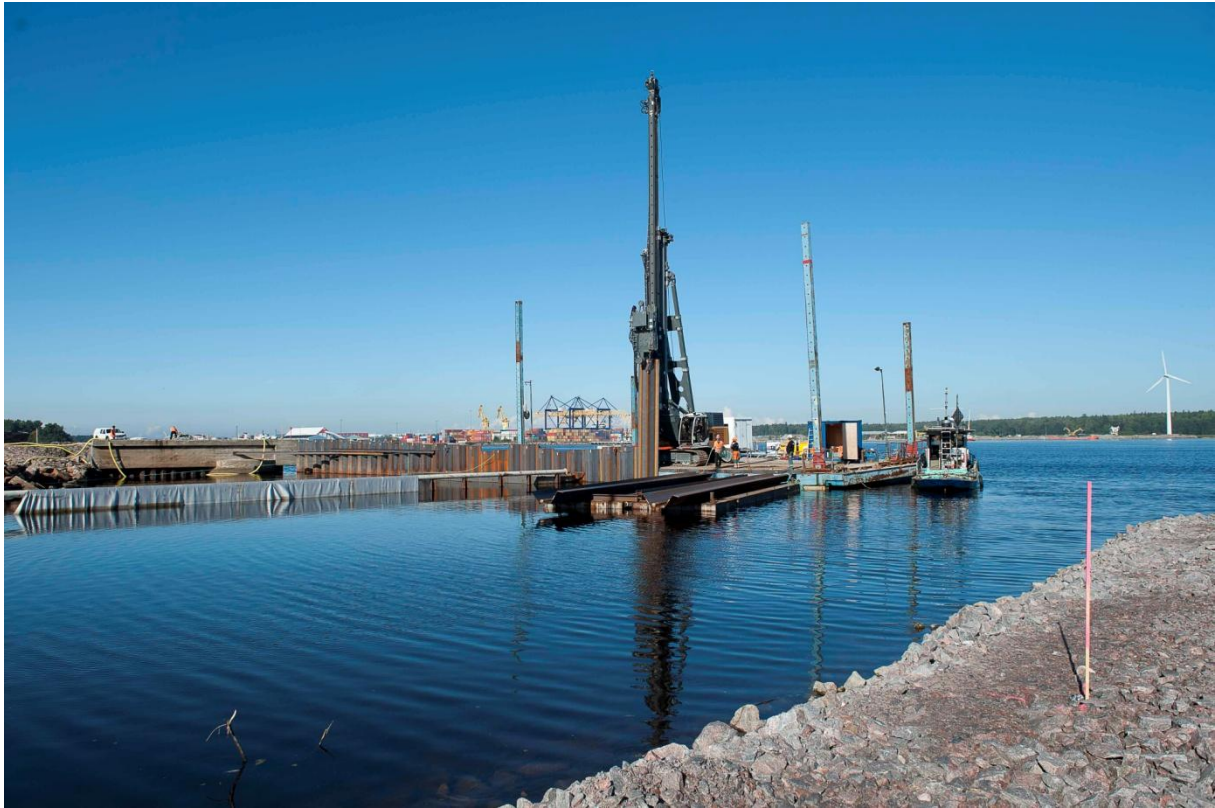


Figur 13. Djupkarta efter muddring för spont. Secora, 2010

Efter muddring utfördes fyllning med sprängsten i spontlinjen för att sponten skulle kunna fungera som en konsolspont under fyllningsskedet, jmf kap 3. Vidare utfördes en sprängstenvall se Figur 12. Sprängstenvallen är till för att avgränsa fyllnadsområde 2 mot öster.

### 3. Spontkonstruktioner

Sponten dimensionerades för fyra olika lastfall (Anon, 2010b). Dessa lastfall motsvarar olika produktionsskeden. Där sponten i de tre första stegen fungerar som en konsolspont. I beräkningarna användes en spont med profilen AZ 37-700 medans i pilotstudien användes en AZ 39-700. Sponten installerades från en flotte, se Figur 14.



**Figur 14. Foto visande spontslagning från flotte. Notera avgränsningen mellan område 1 och 2. I nedre högra hörnet syns sprängstensvallen, jmf Figur 12. Foto Per Lindh.**

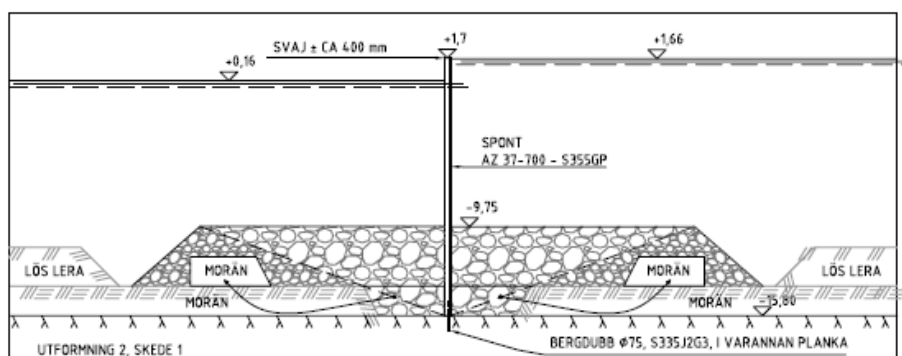
I Figur 14 syns avgränsaren mellan område ett och två. Avgränsaren består av ett rör som bärs upp av balkar. Över röret ligger en geotextil vilken är belastad med tyngder för att säkerställa täthet mot botten. Figur 15 visar det färdigställda området före fyllningen med stabiliserade muddermassor.



Figur 15. Foto visande området för pilotförsöket på Granudden. Foto Per Lindh.

### 3.1 Konstruktionssteg ett

Konstruktionssteg ett. I detta skede är sponten nerslagen genom en sprängstensfyllning ned till berg där den dubbats. I detta steg är sponten enbart belastad av skillnader i vattenstånd mellan hamnen och invallningen, se Figur 16. Då hamnbassängen och invallningen är förbundna med en högpermeabel sprängstensvall är detta ett teoretiskt lastfall.

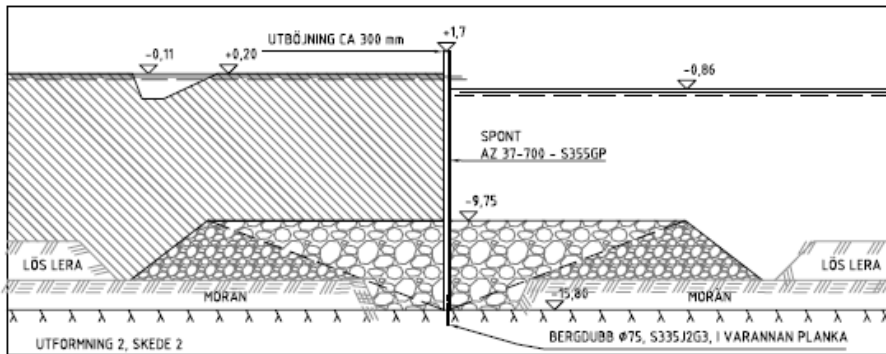


Figur 16. Sektion som visar konstruktionssteg ett.

### 3.2 Konstruktionssteg två

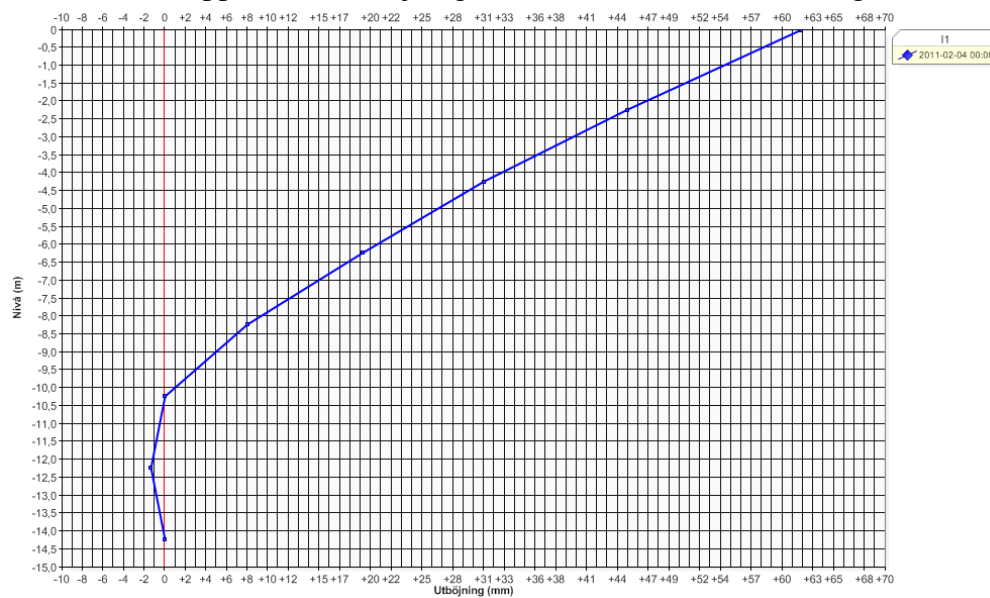
I konstruktionssteg två är volymen bakom sponten fylld till + 0,2 m, se Figur 17. I detta laststeg har allt stabiliserat material fyllts ut. Den maximala utböjningen är beräknad till 300 mm. Hållfastheten hos det stabiliserade materialet antogs till  $1,25+z$  kPa, där  $z$  är djupet under ytan.





**Figur 17. Sektion som visar konstruktionssteg två.**

Den maximalt uppmätta ut utbøjningen blev lite över 60 mm, se Figur 18.



**Figur 18. Uppmätt spontutbøjning med inklinometer för område 1 vid belastningsfall som ungefär motsvarar konstruktionssteg 2.**

Här bör noteras att det verkliga laststeget inte helt överensstämmer med det beräknade då fiberduk och jordarmeringsnät användes som material skiljande skikt, se Figur 19. Notera även brunnar för provtagning och peglar för sättningmätning.

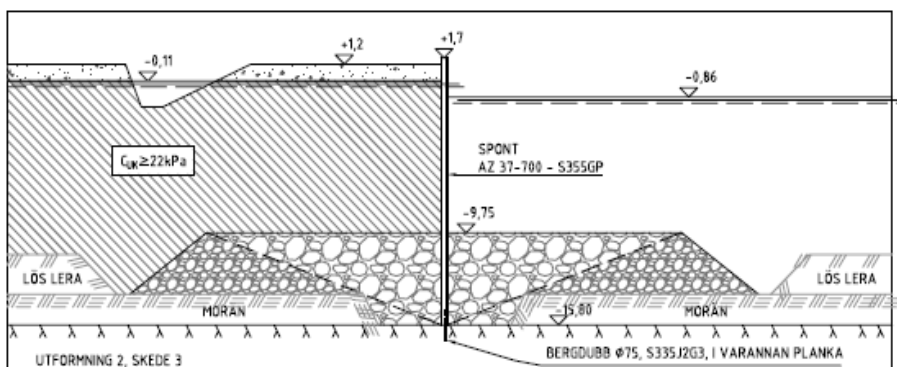


Figur 19. Foto visande påförandet av fiberduk, jordarmeringsnät, grus och krossmaterial. Foto Karl Mattson, Peab.

Eftersom vattnet ovanpå det stabiliserade materialet var fruset placerades fiberduk och jordarmeringsnät på isen varefter grus och sprängsten påfördes. Förfarandet gav ett komplext lastfall.

### 3.3 Konstruktionssteg tre

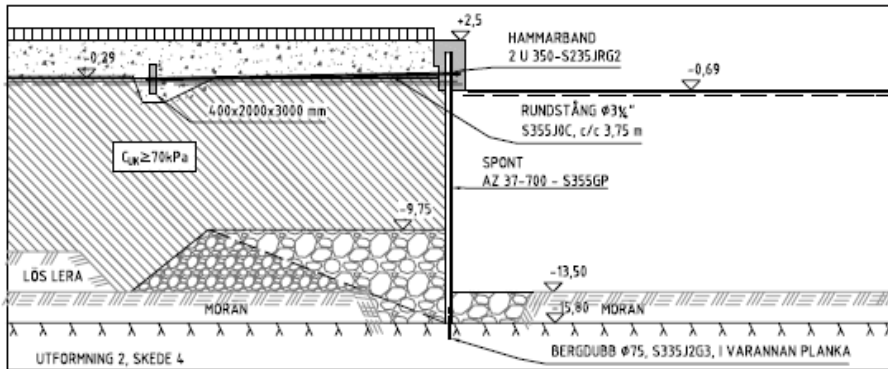
I detta beräkningsskede antogs de stabiliserade massorna har uppnått en minsta hållfasthet på 22 kPa, se Figur 20.



Figur 20. Sektion som visar byggskede tre.

### 3.4 Konstruktionssteg fyra

Figur 21 visar hur den färdiga konstruktionen kommer att se ut. Hamnplanen är uppfylld till +2,5 meter. Här har skjuvhållfastheten hos de stabiliserade massorna antagits öka till minst 70 kPa. I detta steg är dragstag, ankarplattor och krönbalk färdigställt. Notera även att sjösidan är muddrad ner till -13,5 meter.

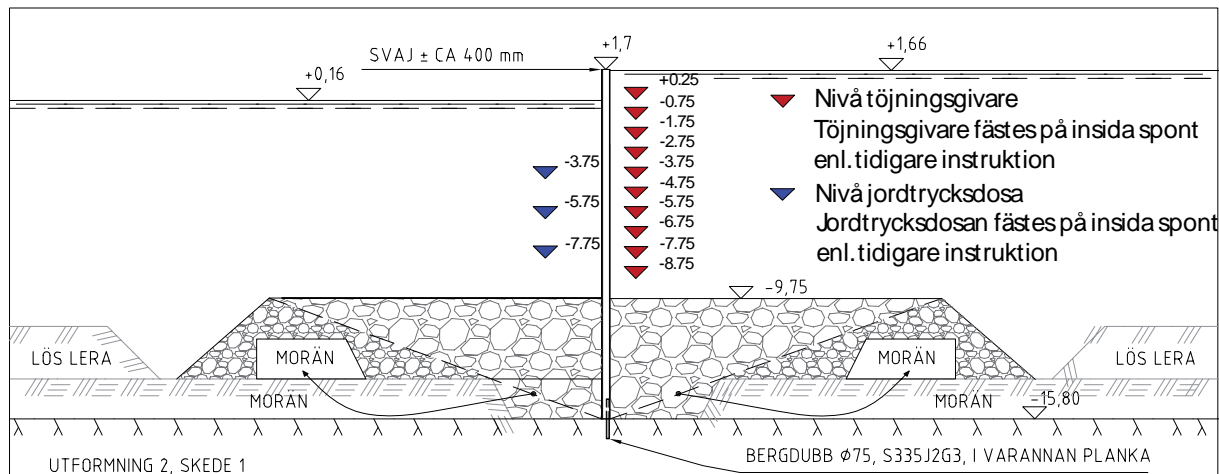


Figur 21. Sektion som visar byggskede fyra vilket även motsvarar färdig konstruktion.

I skrivande stund är stag och ankarplattor på plats men inte krönbalken.

### 3.5 Instrumentering

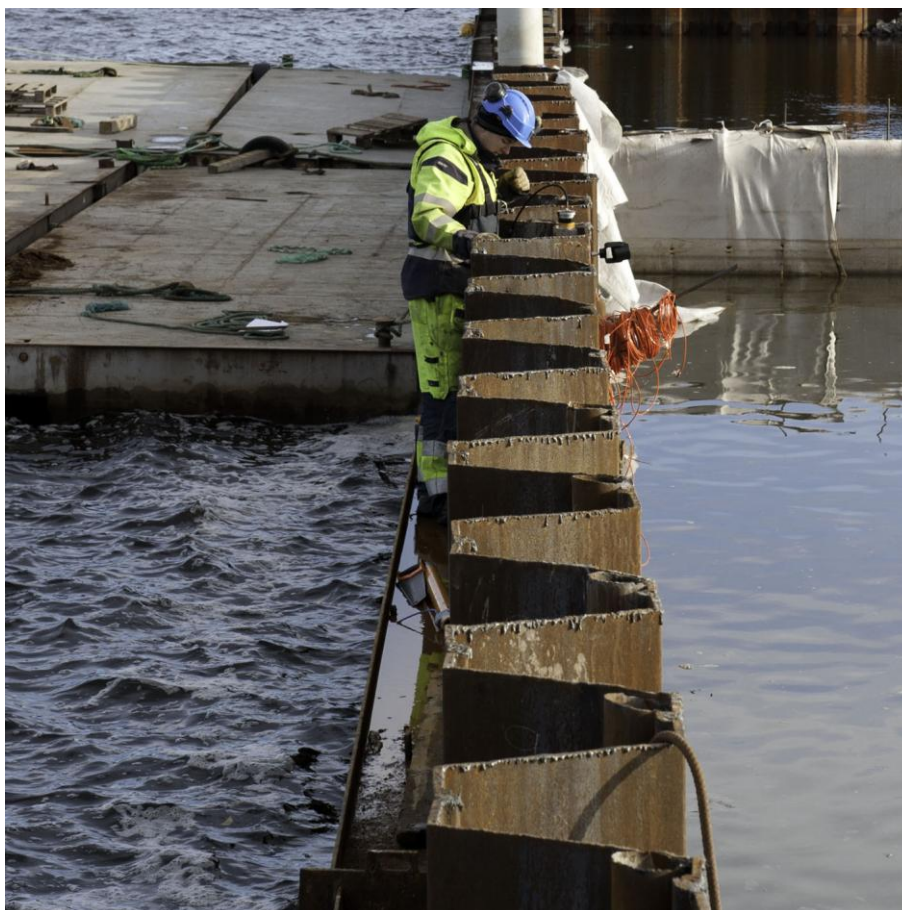
För att bedöma spontens rörelser och därmed indirekt kunna beräkna de stabiliserade muddermassornas egenskaper vid olika tidpunkter efter stabiliseringen och efter påförandet av överlaster instrumenterades två spontsektioner, se Figur 22.



**Figur 22. Spontsektion med markerade nivåer för instrumentering.**

I båda sektionerna installerades även inklinometerrör. Inklinometerrören installerades i rören för bergdubben och injekterades fast i botten. I övrigt användes en cement/bentonitlurry för fastgjutning av inklinometerröret. Trådtöjningsgivare och jordtrycksdosor fästes till sponten före nedvibreringen. För trådtöjningsgivare och jordtrycksdosor valdes manuella avläsningar och för inklinometermätningarna valdes ett automatiserat web-baserat system. Mätdata registrerades varje timma och uppdatering av webbsidan utfördes varje dygn. Till detta installerades prismor för att det även skulle finnas möjligheter att mäta spontkrönets rörelse med totalstation, se Figur 23.

Här kan noteras att valet av manuell avläsning var baserat på tekniska och ekonomiska faktorer, d.v.s. tekniskt mer komplicerat och betydligt dyrare lösning. I efterhand måste man dock konstatera att beslutet var helt fel i och med vind, temperatur och nederbördsförhållanden på platsen. Vid många tillfällen var det förenat med mycket stor risk att transportera sig ut till sponten för att mäta. Författarens rekommendation är att all sjönära mätningar SKALL ske med automatiserad mätning.



**Figur 23. Fotot visar den manuella nollmätningen av sponten. Notera även prismet som är fastsatt på insidan av sponten.**

Figur 23 visar mätningar under gynnsamma förhållanden. Vid minusgrader var det mycket svårt att komma ut på sponten.

## 4. Muddring

Muddringen för pilotprojektet har utförts av Secora. Två olika muddringsutrustningar har använts. Figur 24 visar Secora TRANSPORT 052 vilken har en muddringskapacitet på 100 till 400 m<sup>3</sup> per timme.



**Figur 24. Foto visande muddring utanför Fredriksskans, jmf Fel! Hittar inte referensälla. och Tabell 2. Foto Per Lindh**

Det maximala muddringsdjupet är 20 meter. Skopvolymen kan väljas till 4 eller 8 m<sup>3</sup>. Skoporna var försedda med lock för att minska sedimentspill. Även en mindre utrustning bestående av en flotte med en djupgrävande grävmaskin har använts. Under ett skede av pilotprojektet provades även sugmuddrings utrustning.

Muddermassorna lastades på pråm och transporterades till kaj, se Figur 25.



**Figur 25. Foto visande pråm för transport av muddermassor till Kaj. Foto Per Lindh.**

På fotot syns även manöverarm med pump för uppsugning av muddermassor till processtabiliseringen.

## 5. Stabilisering av muddermassorna

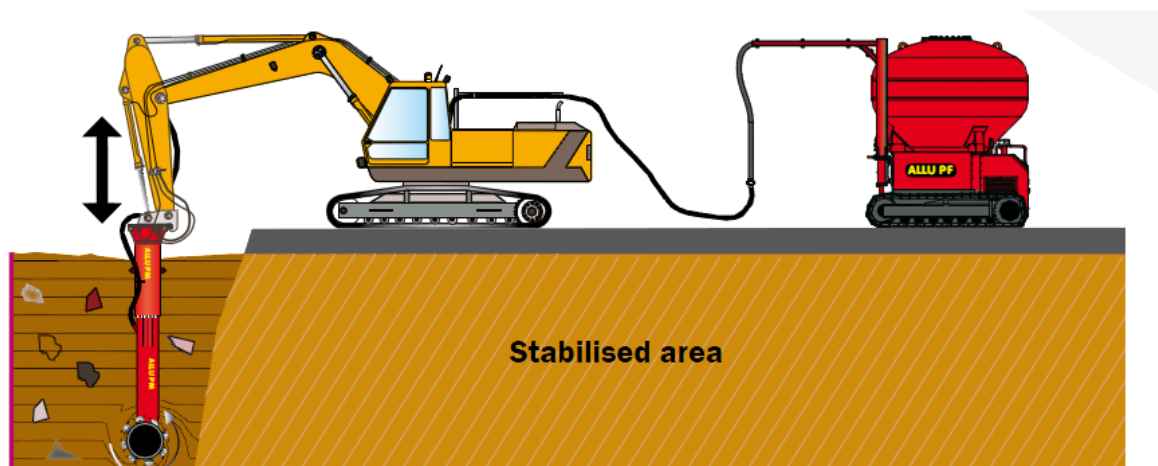
Stabilisering av förorenade muddermassor kan utföras på olika sätt:

- Masstabilisering
- Djupstabilisering
- Processtabilisering

Masstabilisering och djupstabilisering utföres efter det att muddermassorna har placerats på avsedd plats. Processtabilisering innebär att muddermassorna stabiliseras i en process före placering på avsedd plats. Processtabiliseringen kan utföras genom att en begränsad volym stabiliseras i en blandare som sedan tömms och nya ostabiliserade massor tas in i blandaren, jmf betongblandare. En annan variant på processtabilisering är en kontinuerlig blandning av bindemedel och muddermassor.

### 5.1 Masstabilisering

Masstabilisering är en metod som har utvecklats för stabilisering av organiska jordar där hela massan stabiliseras till ett styvt block. Utrustningen för masstabilisering monteras på en 25 till 40 tons grävmaskin. Till detta finns bindemedelstankar och en kompressor. Kompressorn används för att transportera bindemedlet från tankarna till blandningsverktyget. Blandningsverktyget är normalt 600 till 800 mm i diameter och roterar med 80 till 100 varv i minuten (Anon, 2005a; Allu), se Figur 26.



Figur 26. Principskiss masstabilisering (Illustration Allu)

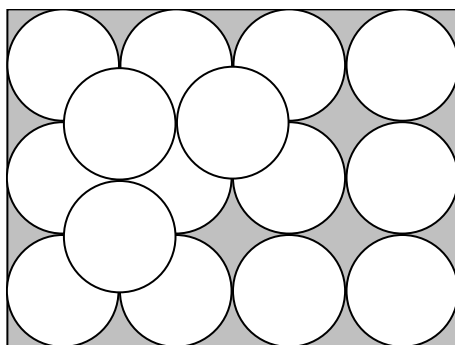
Föraren av grävmaskinen rör verktyget i plan och djup för att blanda in bindemedlet. Rörelsemönstret på armen beskriver en kub. Metoden har kritiserats för att inte ge en homogen inblandning i matrisen beroende på hastigheten sänks nära kubens begränsningsytor och där erhålles en större koncentration av bindemedel jämfört med mitten på kubens. Vid användning av blandade bindemedel bör bindemedlen blandas innan inblandning för att säkerställa rätt förhållande mellan bindemedlen. Vid en blandning av olika bindemedel bör dessa blandas i silos innan masstabilisering för att minimera riken för variation av inbördes förhållande mellan de olika bindemedlen.

Då metoden bygger på att bindemedlet transporteras in med komprimerad luft bör en överlast appliceras snaras för att minimera oxidationsprocessen.



## 5.2 Djupstabilisering

Djupstabilisering är en väl beprövad metod när det gäller att förstärka lera med bindemedel. Metoden innebär att ett verktyg roteras ner till önskat djup varefter bindemedlet, oftast kalk och cement, blandas in med hjälp av tryckluft och verktygets rotationsriktning vänds, (Anon. 2005b). I normalfallet tillverkas pelarna med ett c/c avstånd som överstiger pelarens diameter. Vid stabilisering av förorenade massor tillämpas cellstabilisering. Med cellstabilisering menas att pelarna utföres så att de går in i varandra på ett sådant sätt att hela volymen blir behandlad, se Figur 27 (Larsson, 2006).



Figur 27. Principskiss av pelarplacering vid cellstabilisering.

Metoden innebär en ojämn fördelning av bindemedelsmängden och för att säkerställa korrekt bindemedelsmängd i hela volymen krävs en ”överdimensionering” av bindemedelsmängden. Vid en blandning av olika bindemedel bör dessa blandas i silos innan cellstabilisering för att minimera risken för variation av inbördes förhållande mellan de olika bindemedlen.

Då metoden bygger på att bindemedlet transporteras in med komprimerad luft bör en överlast appliceras snarast för att minimera oxidationsprocessen.

## 5.3 Processtabilisering

Processtabiliseringen kan antingen ske kontinuerligt eller i olika satsar. Vid satsblandning tas en bestämd mängd muddermassor in i ett blandningskärl och bindemedlet tillsätts under omrörning varefter den behandlade volymen töms och en ny sats tas in i utrustningen. Uppehållstiden baseras på tillförd blandningsenergi för att erhålla en homogen produkt. Denna typ av förfarande liknar betongtillverkning och har använts i Finland (ref, 2009).

Vidkontinuerlig blandning sker intaget av muddermassor och blandning med bindemedel kontinuerligt. Här måste uppehållstiden i blandningsdelen vara tillräcklig för att en homogen blandning skall erhållas. Vid processtabilisering kan bindemedlen tillföras var för sig och relationen mellan de olika bindemedlen kan förändras momentant. Processtabilisering innebär att där även finns möjlighet att justera bindemedelsmängden efter de inkommande muddermassornas aktuella vattenkvot. Detta innebär att en optimering av bindemedelsmängden kan utföras baserade på tidigare utförda labbförsök.

#### 5.4. ProSol utrustningen

ProSol utrustningen är en processtabiliseringsutrustning som är utvecklad av Peab i Finland. Maskinen består av ett larvburet chassi som bär upp blandningstankar och fyra silos, se Figur 28.



Figur 28. ProSol utrustningen uppställd vid pilotprojektet på Granudden, Gävle. Foto Per Lindh.

Utrustningen kan blanda muddermassor med upp till fyra olika bindemedel med valfri mängd och inbördes förhållande mellan bindemedlen. Maskinen matas med muddermassor från en pråm. Massorna pumpas via en kranarmsmonterad pump in i förblandningskammaren. Den maximala kapaciteten är 300 m<sup>3</sup>/h. ProSol maskinen styrs från en förarhytt där bindemedelsmängd och bindemedelsförhållanden ställs in samt manövrering av den kranmonterade pumpen sker, se Figur 29.



**Figur 29. Foto visande ProSol maskinens förarhytt och kranarm med pump för uppfodring av muddermassor. Foto Per Lindh.**

Den inställda bindemedelsmängden kontrolleras via givare som avläser skruvarnas rotation, se Figur 30.



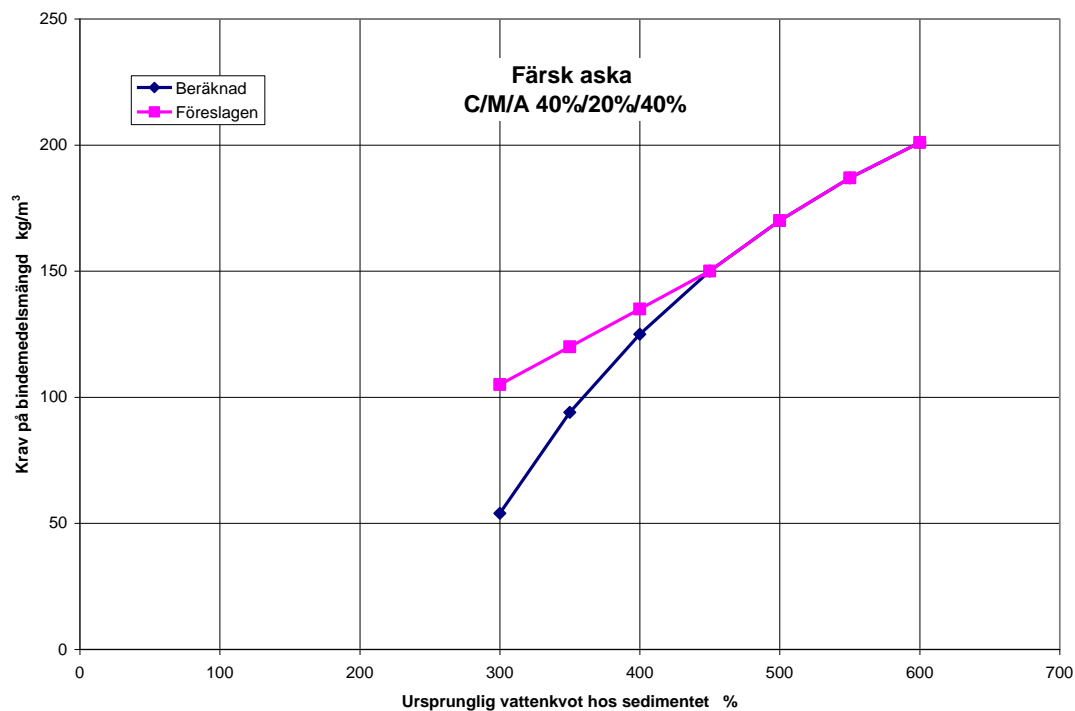
**Figur 30. Givare för att kontrolleras matarskruvarnas rotation. Foto Per Lindh.**

## 6. Utförande och provning

Efter färdigställande av spont påbörjades processtabiliseringen i slutet av oktober. Pilotprojektet omfattade en behandling av 10.000 m<sup>3</sup> som skulle användas för att fylla upp de två bassängerna. Processtabiliseringen utfördes med ProSol utrustningen.

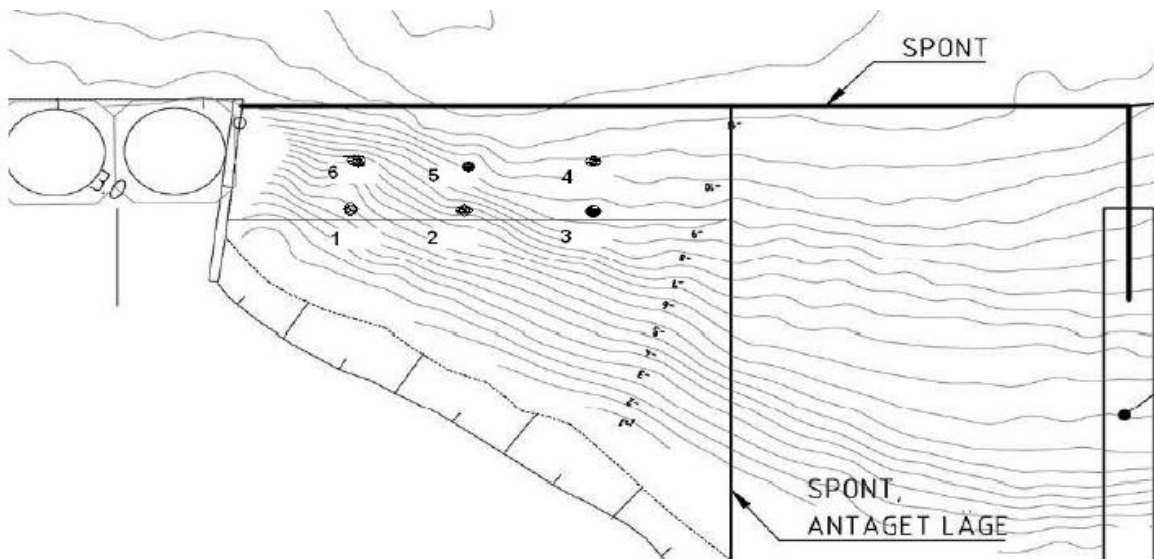
### 6.1 Utförande

Den inledande tanken var att testa olika förfaringssätt vad gällde placeringen av muddermassorna i vattnet, jmf. Figur 5 och Figur 12. Initiellt fanns tankar på att variera bindemedelsmängden efter inkommande muddermassors vattenkvot. Detta förfarande valdes bort vilket innebar en väldig variation av vatten bindemedelstal i de stabiliserade muddermassorna. Den av SGI föreslagna kravet på bindemedelsmängd finns redovisat i Figur 31. I projektet valdes att hålla bindemedelsmängden konstant på 150 kg/m<sup>3</sup>. De uppmätta vattenkvoterna varierade mellan trehundra procent upp till över niohundra procent.



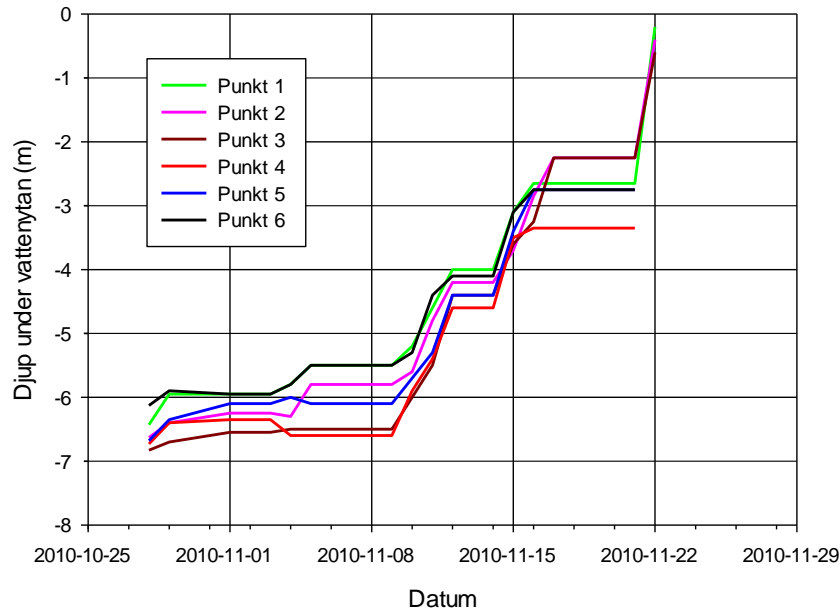
**Figur 31. Krav på bindemedelsmängd som funktion av den ursprungliga vattenkvoten hos sedimentet. Färsk aska, C/M/A = 40%/20%/40%. Efter SMOCS, 2010.**

Det var projekterat att fyllningen skulle ske med 1 meter om dagen. I Figur 32 visas placeringen av lodpunkter för att verifiera fyllningshastigheten.



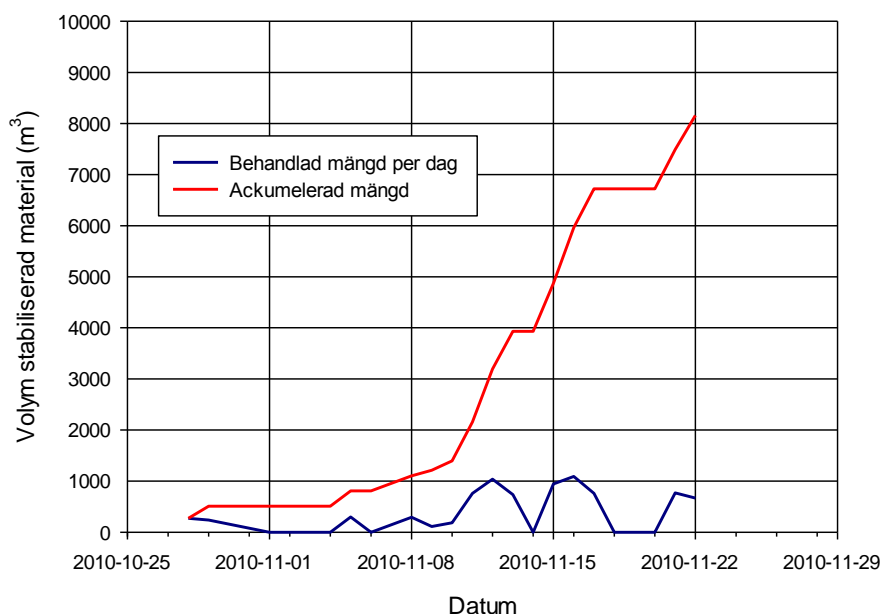
**Figur 32. Lodpunkter för lodning av djup under vattenytan i pilotprojektet.**

De sex olika punkterna lodades till nivån för uppfyllda stabiliserade muddermassor. Loddjupen finns redovisade i Figur 33. De horisontella partierna innebär att stabiliseringsprocessen inte var igång vid de tillfällena.



**Figur 33. Förändring av loddjup med tid.**

Fyllningshastigheten med en meter per dygn uppfylldes endast vissa enstaka tillfällen. Här bör dock påpekas att denna fyllhastighet baserades på felaktiga antaganden om bassängernas volym. Grafen i Figur 34 visar ackumulerad mängd muddermassor samt behandlad mängd muddermassor per dag. Den maximalt behandlade mängden per skift var ca 1100 m<sup>3</sup>.



**Figur 34. Volym stabiliserade muddermassor mot tid.**

Som framgår av figurerna ovan behandlades över 8000 m<sup>3</sup> muddermassor och det räckte knappt till att fylla den ena av bassängerna. Tanken från början var att fylla båda bassängerna men dessvärre räckte de muddermassorna knappt till för att fylla en bassäng. Anledningen till ”bristen” på muddermassor berodde på det aktuella tillståndet att muddra under aktuell period. I och med detta kunde testen med att fylla de stabiliserade muddermassorna i ett mellanlager på land för att sedan blada ut massorna i bassäng 2 inte utföras. Dels kunde mätningarna i denna sektion inte utföras. I dagsläget finns ingen förklaring till varför denna diskrepans mellan antagen volym och verklig volym i bassängerna har uppstått.

Efter muddring och stabilisering av muddermassorna blev vädersituationen sådan att vattnet ovanpå muddermassorna frös till is varför ingen överlast kunde påföras. Eftersom muddermassornas fyllnadshöjd var lägre än den stipulerade fyllnadshöjden innebar fyllning med sprängsten en större belastning på sponten på grund av högre densitet i sprängstensmassorna jämfört med stabiliserade muddermassor. Vidare hade det konstaterats med CPT att hållfastheten hos det stabiliserade materialet var lägre än de 22 kPa som använts vid dimensioneringen. Sammantaget innebar dessa förutsättningar att en förstärkning/avlastning behövdes för att erhålla rimlig belastning på sponten som vid tillfället fungerade som en konsolspont. I februari 2011 påbörjades sprängstensfyllningen. Fyllningen placerades ovanpå istäcket efter det att först en geotextil och sedan ett jordarmeringsnät hade påförts. Fyllningen bestod först av sand för att fungera som ett filter mot de stabiliserade muddermassorna samt för att skydda geotextil och jordarmeringsnät, se Figur 35.



**Figur 35. Foto visande geotextil, jordarmeringsnät samt sandfyllningen. Observera att geotextilen ligger vinkelrät sponten medans jordarmeringsnätet ligger längs spontlinjen. Fotot taget den 3/2-2011. Foto Kalle Mattson, Peab.**

Fyllningen påfördes med grävmaskin för att minimera belastningen på sponten. Fyllningen bestod av 20 cm sand 20 cm kross 0-150. Samtidigt som fyllningen utfördes placerades brunnar för provtagning och peglar för sättningmätningar. Användandet av jordarmeringsnät innebar att sponten inte blev fullt belastad av sprängstensfyllningen. Den färdigställda ytan kan ses i Figur 36.



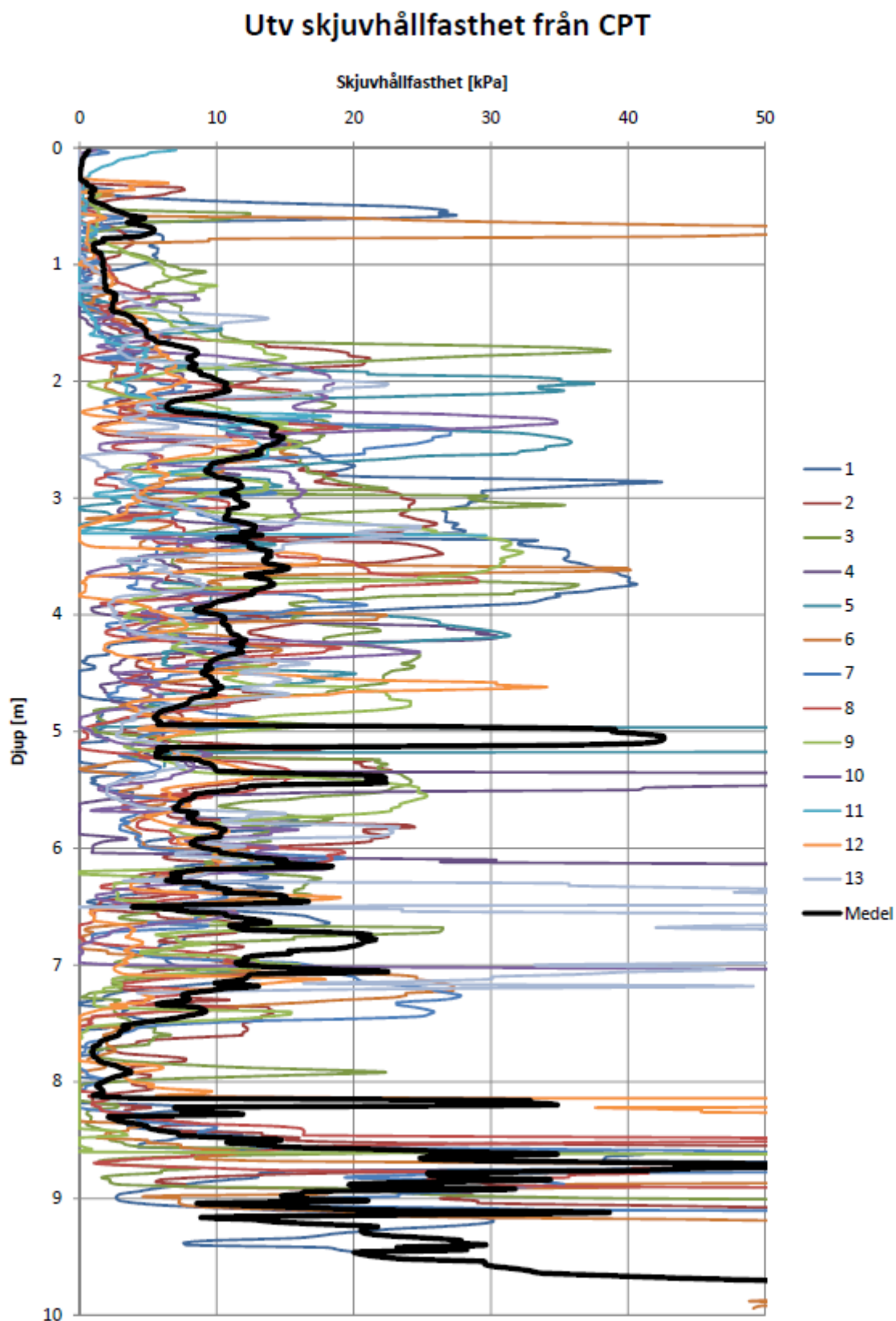


**Figur 36. Foto visande sprängstensfyllning, peglar och provtagningsbrunnar. Fotot är taget den 7/2 -2011. Foto Karl Mattson, Peab.**

## **6.2 Fält- och labprovning**

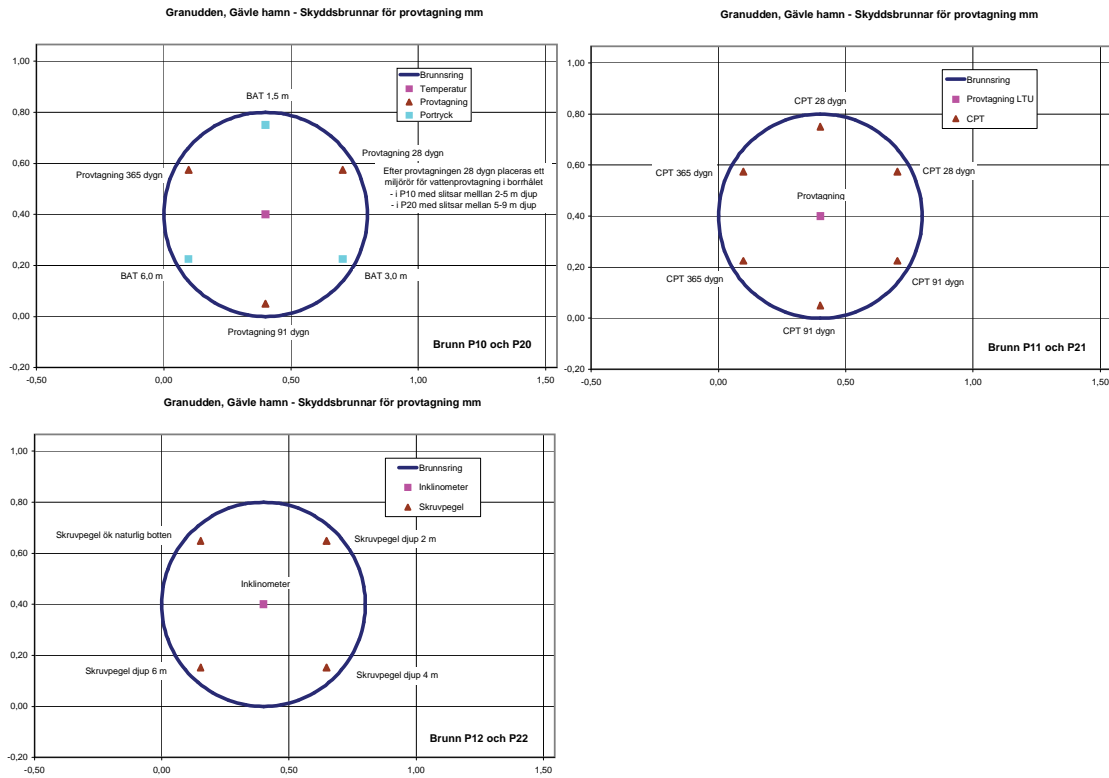
Provning i fält utfördes dels in situ och som kolvprovtagning för vidare analys på SGI:s laboratorie. Förutom den geotekniska provningen utfördes även miljöundersökningar vilka dock inte redovisas här. Innan fyllningen med sprängsten påbörjades utfördes en CPT undersökning av fyllningen. Resultatet visade på låga hållfastheter, se Figur 37.

Efter denna första CPT sonderingen bestämdes dag ”noll”, d.v.s. den dag från vilken härdningstiden skulle börja räknas. Den initiella tanken var att dag ”noll” skulle inträffa direkt efter det att de stabiliserade muddermassorna var uppfyllda till nivå + 0,2 meter. Projektet bestämde dag noll till den 16 mars 2011, d.v.s. från denna dag börjar de stabiliserade muddermassornas hållfasthetstillväxt räknas. Denna dag var den färdigställda fyllnadshöjden var 2,5 meter.



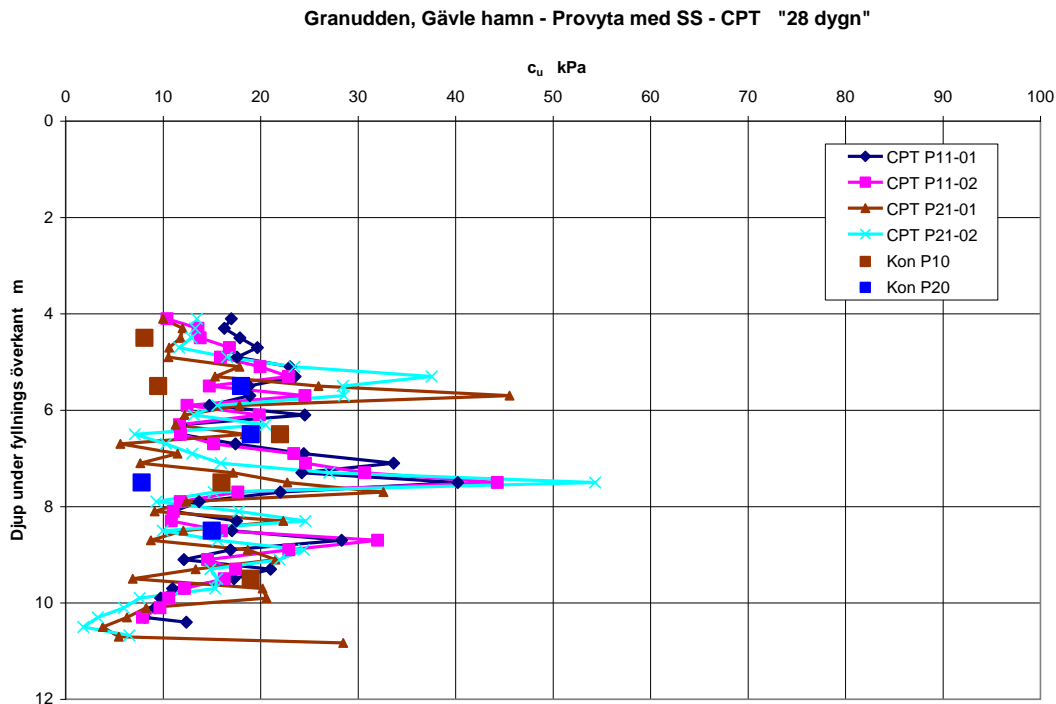
Figur 37. CPT sondering utförd på Granudden februari 2011.

I de sex provbrunnarna som placerades i fyllningen fanns tre olika varianter baserat på vilken provning som skulle utföras, se Figur 38.



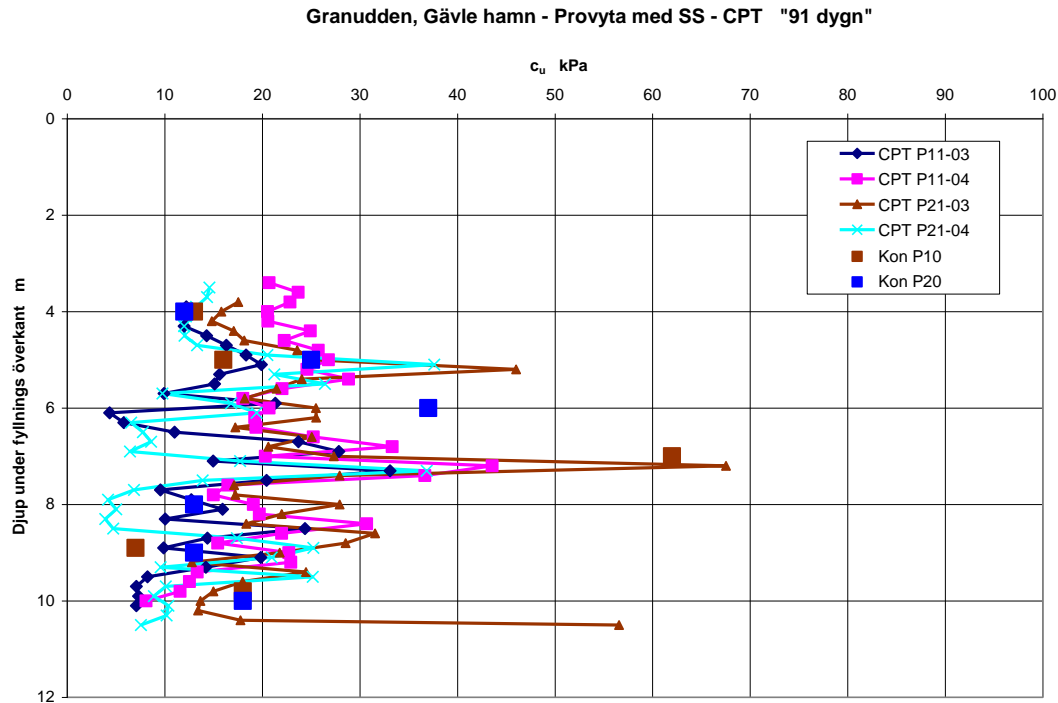
Figur 38. En principskiss över utformningen de olika provbrunnarna som installerats i sprängstensfyllningen. Notera att all planerad provtagning inte utfördes.

Efter 28 dygn utfördes en ny CPT sondering, se Figur 39. I samma figur finns även hållfasthetsbestämningar med tryckförsök på kolvprover från brunn P10 och P20. Resultaten visar god överensstämmelse mellan de olika hållfasthetsbedömningarna.



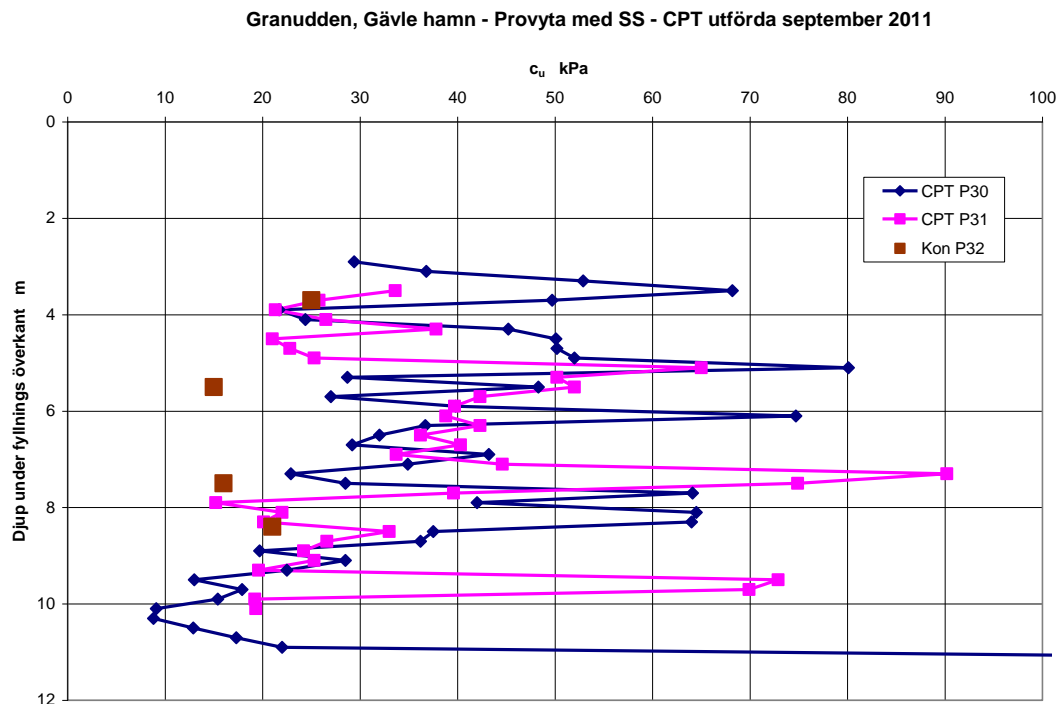
Figur 39. Resultat från CPT sondering efter "28" dygn. I figuren redovisas även skjuvhållfasthetsvärden från enaxiella tryckförsök på provkroppar upptagna med kolvprovtagare.

Efter ”91 dygn” (baserat på 20110316) utfördes ytterligare CPT sonderingar och konförsök på kolkolvprover. Hållfastheten har ökat något jämfört med ”28 dygnsvärdena”. Även här stämmer hållfasthetsbestämning med CPT och hållfasthetsbestämning via tryckförsök på kolvprover mycket väl överens. CPT sonderingarna utfördes i provbrunnarna P11 och P21. Resultaten redovisas i Figur 40.



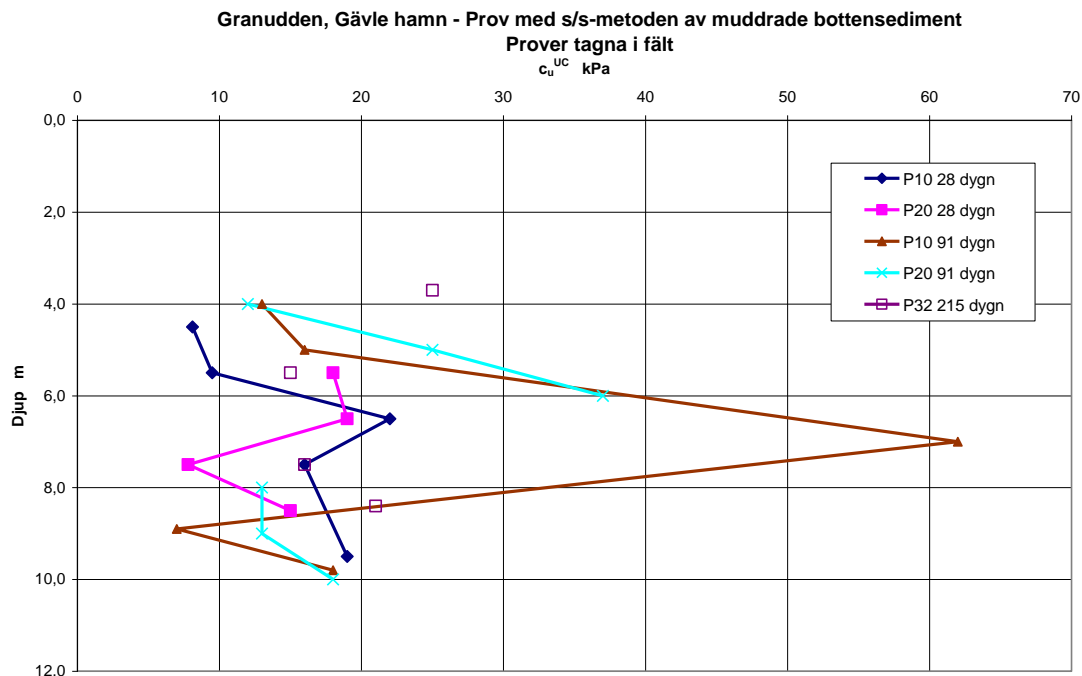
**Figur 40. Resultat från CPT sondering efter ”91” dygn. I figuren redovisas även skjuvhållfasthetsvärden från enaxiella tryckförsök på provkroppar upptagna med kolvprovtagare.**

I september 2011 utfördes ytterligare en CPT sondering och kolvprovtagning, se Figur 41. Hållfasthetsvärdena har ökat då man jämför värdena utvärderade från CPT sonderingarna emedan skjuvhållfasthetsvärdena utvärderade från enaxiella tryckförsök visar på lägre eller oförändrade resultat jämfört med prover tagna vid ”91 dygn”. Vidare visar CPT resultaten på en större spridning vid mätningen i september jämfört med ”91 dygnsvärdena”.

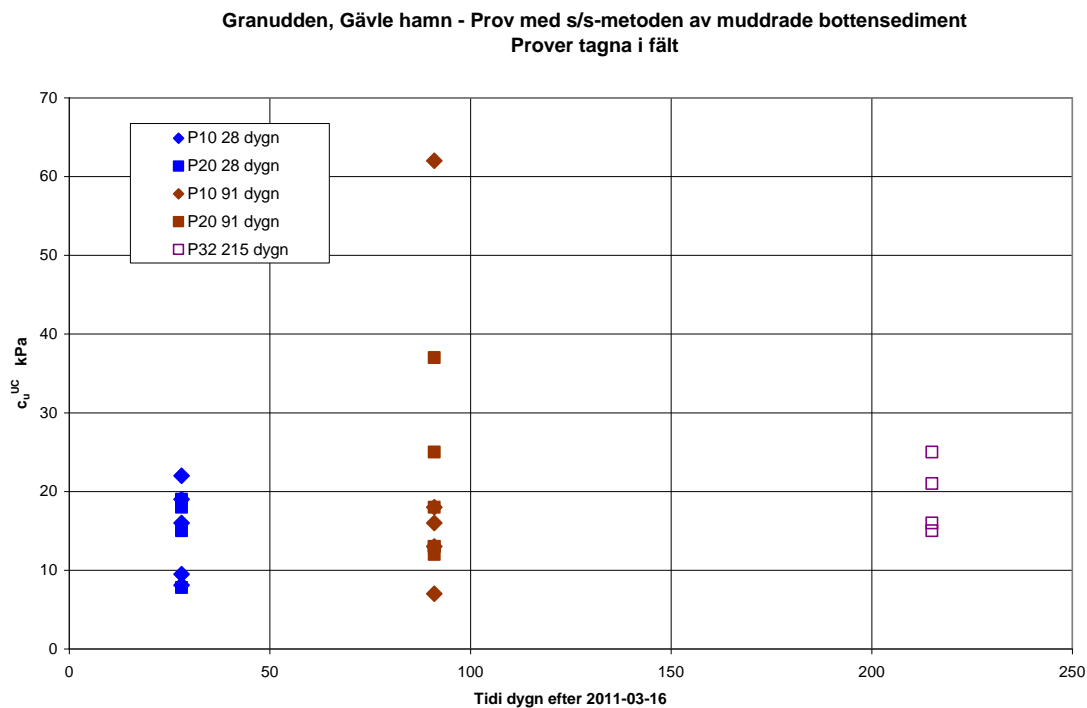


**Figur 41. Resultat från CPT sondering på Granudden utförda september 2011. I figuren redovisas även skjuvhållfasthetsvärden från enaxiella tryckförsök på provkroppar upptagna med kolvprovtagare.**

Ett annat sätt att redovisa skjuvhållfastheten som baseras på de enaxiella tryckförsöken visas i Figur 42. I Figur 43 redovisas hållfastheterna efter härdningstid.



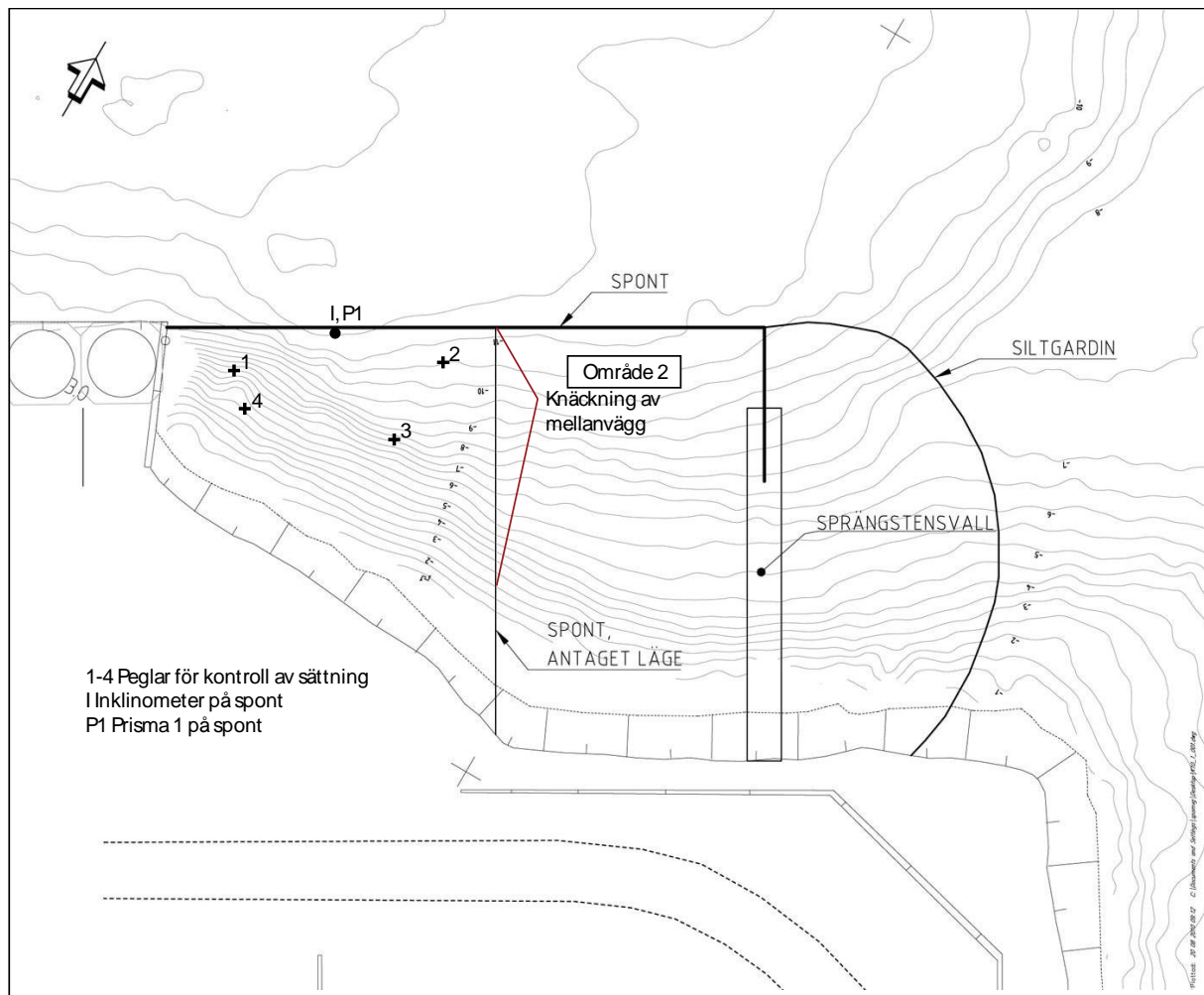
**Figur 42. Skjuvhållfasthet utvärderad från enaxiella tryckförsök utförda på kolvprover tagna vid olika djup och vid olika tidpunkter.**



**Figur 43. Skjuvhållfasthet utvärderad från enaxiella tryckförsök utförda på kolvprover tagna vid olika tidpunkter.**

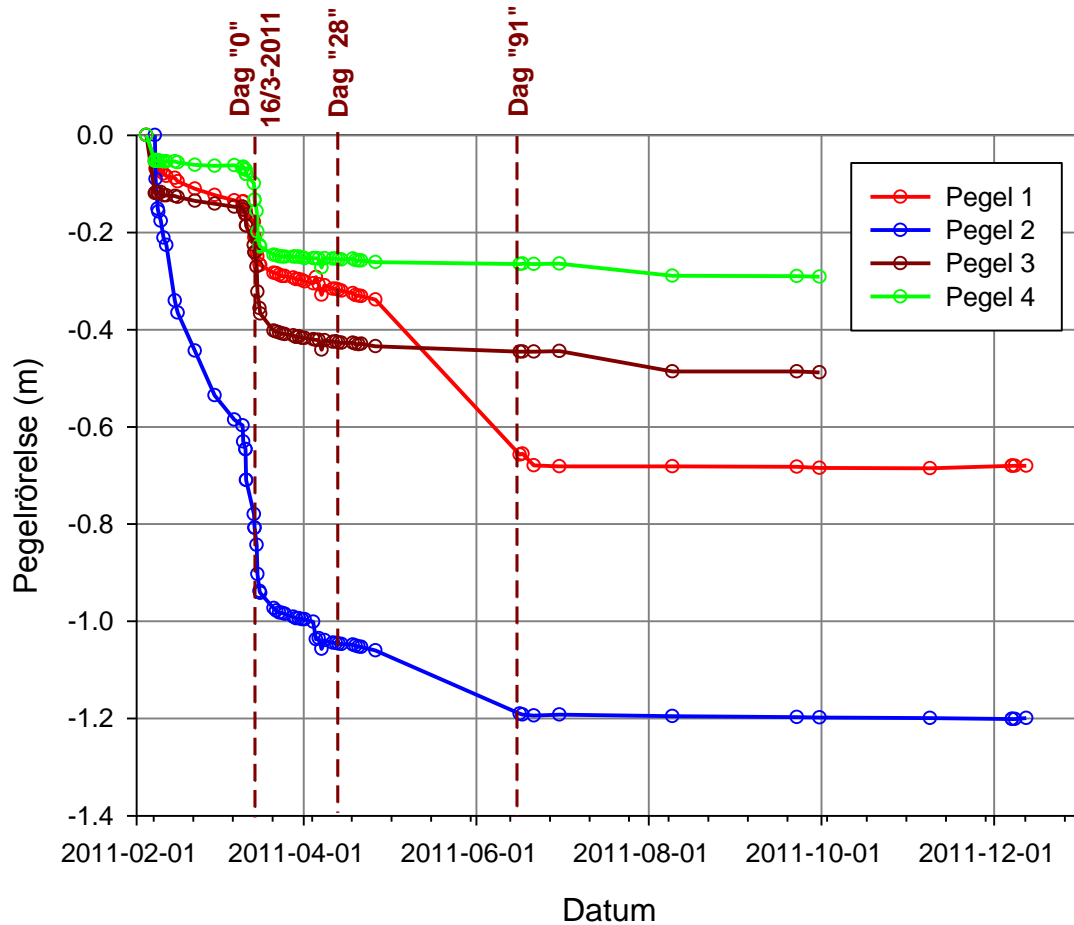
Variationerna i hållfasthet i Figur 43 beror på variationen i vattenkvot hos de inkommande muddermassorna. Denna variation ger med ett konstant bindemedelsmängd en variation i hållfasthet. Figur 43 kan felaktigt tolkas som att en längre lagringstid inte medför en ökning av hållfastheten. Här kan noteras att om ickeförstörande provning varit möjligt hade samma provkroppar kunnat studeras vid olika lagringstid och därigenom hade hållfasthetstillväxten på samma provkroppar kunnat studeras. Denna provningsmetodik kräver i dagsläget högre hållfastheter hos materialet. Inför kommande projekt bör vi försöka utveckla denna teknik för stabiliserade muddermassor.

I samband med påförandet av överlasten utfördes avvägningar av sättningspeglar. Sättningspeglarnas ungefärliga placering redovisas i Figur 44.



**Figur 44. Placering av sättningspeglar i fyllningsområde 1. Jmf Figur 36.**

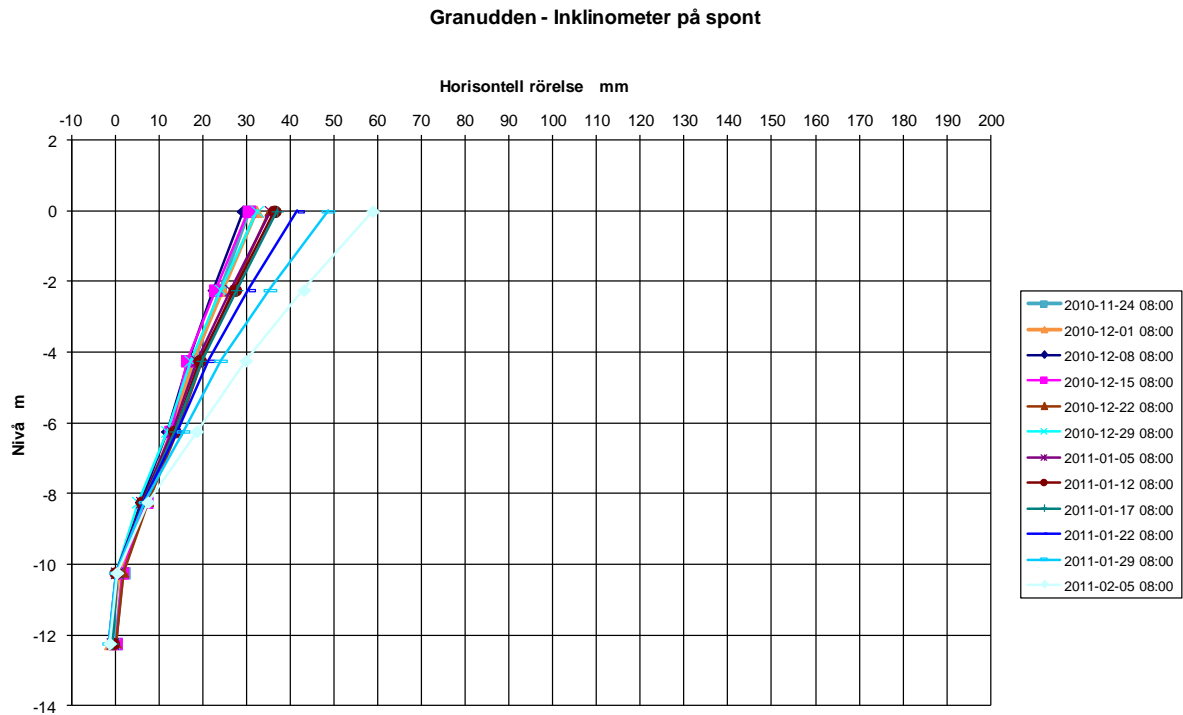
Överlasten började påföras den 3 februari 2011 och nollmätningen av peglarna skedde den 3 februari. Sättningsdata redovisas i Figur 45. Den snabba sättningen hos pegel 2 berodde på en utböjning av mellanväggen mellan område 1 och område 2, jmf Figur 44. För att minska lasten på mellanväggen utfördes en sprängstensfyllning i område 2 längs mellanväggen. Den 10 mars-2011 påfördes ytterligare fyllning vilket syns tydligt i sättningsdiagrammet. Fyllningsarbetet var klart den 16 mars 2011. För pegel 3 och 4 var sättningarna avsevärt mindre än för pegel 1 och 2.



Figur 45. Resultat från mätningar på peglar, jmf Figur 36.

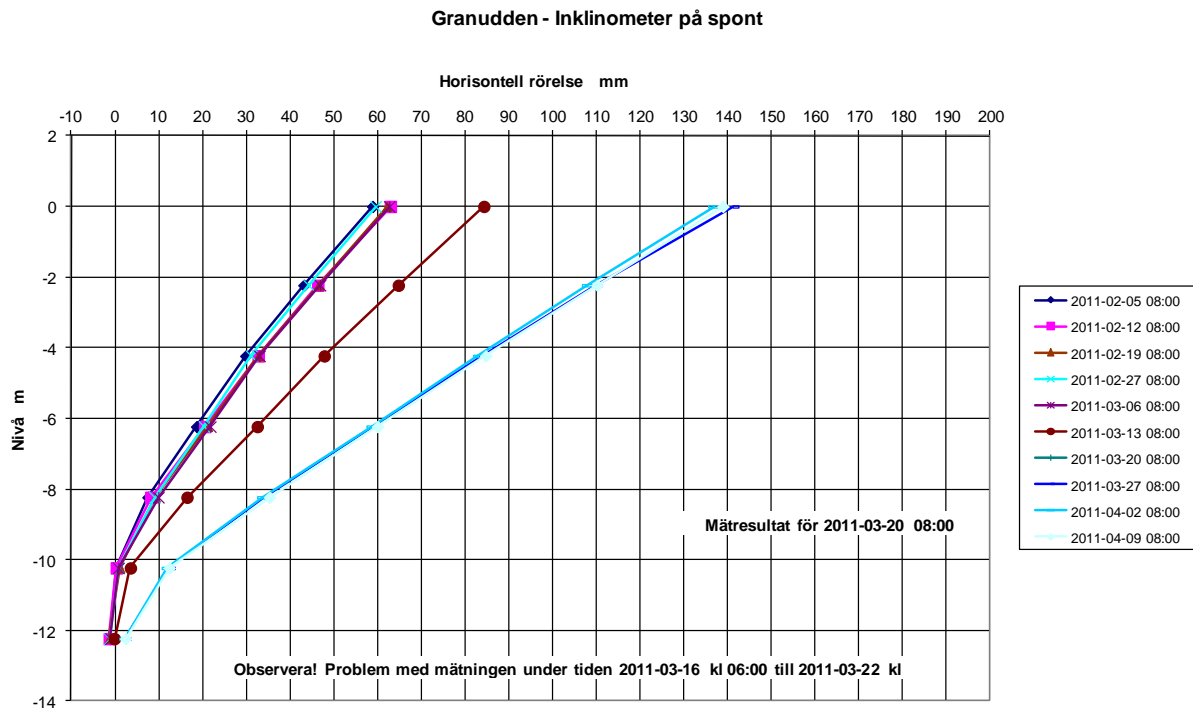
Inklinometermätningarna utfördes med fasta inklinometrar som mätte rörelserna varje hel timma. Data skickades via GSM-modem till en databas med ett web gränssnitt. Nedan följer ett antal figurer som visar spontrörelserna med tiden se Figur 46 till Figur 48.





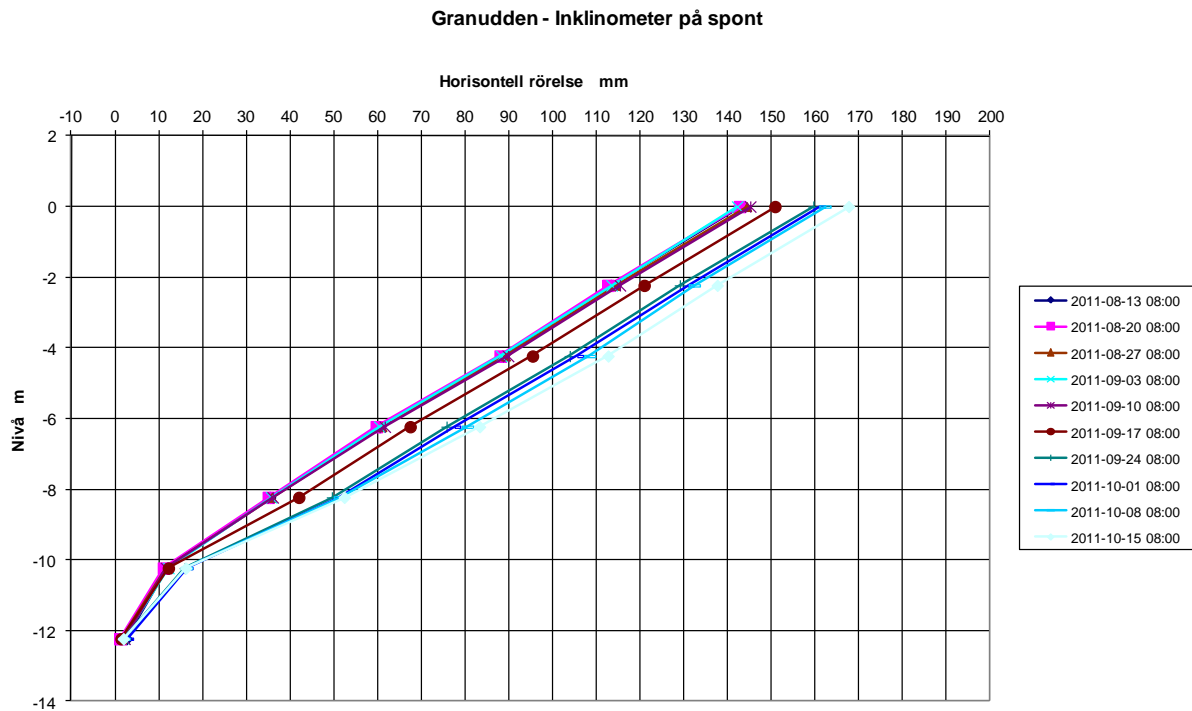
**Figur 46. Resultat från inklinometermätningar från november 2010 till februari 2011.**

Figur 46 visar på små rörelser hos sponten. Ökningen av utböjningen mellan 17 januari och 5 februari beror förmodligen på tillväxt av isskiktet på insida spont.



**Figur 47. Resultat från inklinometermätningar från februari 2011 till april 2011.**

Figur 47 visar på spontutböjningen före och efter påförandet av överlasten. Den fördröjda responsen berodde sannolikt på att istäcket tog hand om lasterna från sprängstensfyllningen. När sedan isen började smälta fick sponten ta emot en ökad del av belastningen. Under andra halvan av mars fick sponten ta hand om hela belastningen.



**Figur 48. . Resultat från inklinometermätningar från augusti 2011 till oktober 2011.**

Figur 48 visar på skedet då sponten fortfarande fungerar som konsolspont. Skillnaden mellan utböjningen i Figur 47 (april 2011) och Figur 48 (oktober 2011) visar en viss krypning hos sponten.

## 7. Modellerings

Spontkonstruktionen är dimensionerad enligt traditionella metoder och jordparametrarna valdes efter förväntade resultat från de inledande laboratorieförsöken. Inom ramen för detta SBUF projektet har spontkonstruktionen även beräknats enligt FEM och beräknade deformationer har jämförts med uppmätta deformationer (Akbar, 2011). För dessa beräkningar har Plaxis 2-D använts. Initieellt användes samma indata och jordmodell för FEM beräkningar som använts för den traditionella beräkningen. Följande beräkningssteg har använts:

1. Muddring av spontrännen.
2. Fyllning med sprängsten i spontrännen.
3. Neddrivning av spont.
4. Borrning av bergdubb.
5. Fastgjutning av bergdubb.
6. Fyllning med stabiliserade massor.
7. Uppspänning av stag, slutfyllning samt överlast

Muddringen har utförts enligt tidigare beskrivning och muddermassorna transporteras till Granudden för vidare behandling. Schakten fylldes med krossat material upp till nivå -9,75 varefter sponten drevs ned till berg. Sponten var utrustad med rör för bergdubb. Den ursprungliga havsbotten bestod av tre lager; berg, morän och bottensediment. Sponten är 17,5 m hög och drevs ned till nivå -15,80 m där den förankrades med bergdubbar.

Enligt förutsättningarna skulle landsidan (aktiva sidan) fyllas med stabiliserande muddermassor upp till nivå +0,2 och sedan skulle ett lager av krossat material påföras till nivå +2,5 m. Under denna uppfyllning installeras ankarplattor och dragstag c/c 3,75 m. Sponten skall även dimensioneras för en överlast på 30 kN/m<sup>2</sup>. Detta blev ett hypotetiskt fall eftersom bassängerna inte var uppfyllda.

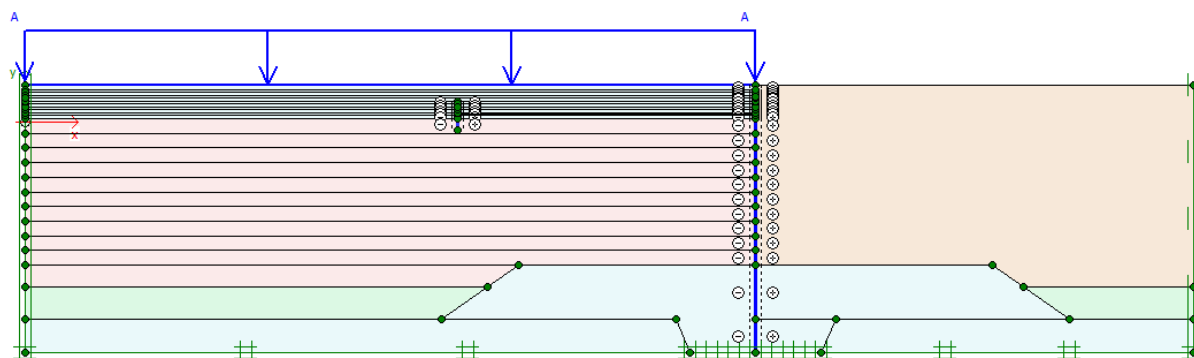
### 7.1 Geometrisk modell

Sponten modelleras som ett plant töjningsfall med en geometrisk modell som har en bredd på 80 m och en höjd på 18,3 m. Modellens bredd valdes genom en iterativ process där bredden ökades tills ökningen av modellens bredd inte påverkade resultatet. Sponten, krönbalken och ankarplattan modellerades som balkar. Mellan spont och jord skapades kontaktytelement för att beakta reduktion av jordens skjuvhållfasthet längs med konstruktionen och att ge möjlighet för konstruktionen att deformeras fritt relativt jorden. Staget modellerades som en kombination av en stång och en balk som representerar ankarplattan.

För att modellera olika konstruktionssteg och olika jordlager delades konstruktionen in i olika områden. Den del som representerade muddermassorna delades in i ett antal lager om 1 m och delen med bergkross delades in i till ett antal lager om 0,2 m.

I programmet genererades randvillor för modellen, de två vertikala ränderna antas vara vertikala rullager (fri förskjutning i vertikalled och noll förskjutning i horisontalled), den

översta horisontella randen har fri deformation och den nedersta horisontella randen antas vara fixlager (noll förskjutning i x- och y-led), se Figur 49.



Figur 49. Geometrisk FE-Modell över spont och hamnkonstruktionen (Akbar, 2011)

## 7.2 Materialparametrar

Jordparametrar antas för de olika jordlagren i de olika byggskedena, sprängsten och lös lera antas vara konstanta medans muddermassorna antas med tiden ha varierande odränerad skjuvhållfasthet och elasticitetsmodul för att simulera härdningsprocessen. Tabell 6. Materialparametrar för sprängsten och lös lera Tabell 6 och Tabell 7 visar de antagna jordparametrar som använts vid beräkningarna.

Tabell 6. Materialparametrar för sprängsten och lös lera (Akbar, 2011).

Material	Sprängsten	Lös lera
Materialmodell	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Dräneringstyp	Dränerad	Odränerad A
Tunghet över G.V kN/m <sup>3</sup>	18	15
Tunghet under G.V kN/m <sup>3</sup>	21	18
Effektiv E kPa	30000	10000
Effektiv $\nu$	0,3	0,3
Effektiv c kPa	1	2
Effektiv $\phi'$	35	24
Dilatationsvinkel $\psi$	5	0
Konduktivitetskoefficient i horisontell riktning $k_x$ m/dag	1	0,0001
Konduktivitetskoefficient i vertikal riktning $k_y$ m/dag	1	0,0001
R interface	0,7	0,5

Tabell 7. Materialparametrar för muddermassor i byggskede 2,3 och 4 (Akbar, 2011).

Material	Muddermassor skede 2	Muddermassor skede3	Muddermassor skede4
Materialmodell	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Dräneringstyp	Odränerad B	Odränerad B	Odränerad B
Tunghet över G.V kN/m <sup>3</sup>	13	13	13
Tunghet under G.V kN/m <sup>3</sup>	13	13	13
Effektiv E kPa	5000	7000	10000
Effektiv $\nu$	0,3	0,3	0,3
Odränerad $c_u$ kPa	1,25+0,912/m	22	70
Odränerad $\phi_u$	0	0	0
Dilatationsvinkel $\psi$	0	0	0
Konduktivitetskoefficient i horisontell riktning $k_x$ m/dag	0,0001	0,0001	0,0001
Konduktivitetskoefficient i Vertikal riktning $k_y$ m/dag	0,0001	0,0001	0,0001
R interface	0,5	0,5	0,5

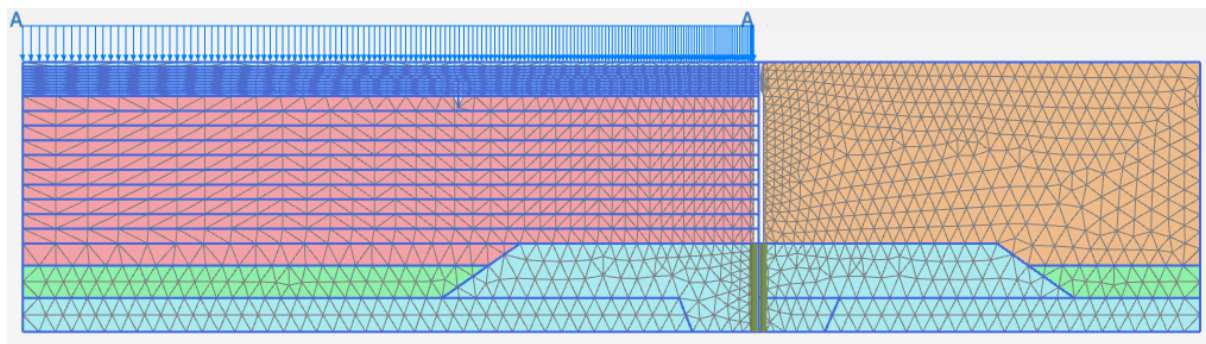
Materialparametrar beräknas för sponten, krönbalken, staget och ankarplattan. Indata i FE-programmet beräknas per en meter för att simulera ett plant töjningsfall. Tabell 8 visar materialparametrar för betong och stål.

Tabell 8. Material parametrar för stål och betong (Akbar, 2011).

Material	Stål	Betong
Densitet kg/m <sup>3</sup>	7800	2400
E-modulen GPa	210	35
Tvärkontraktionstalet $\nu$	0,15	0,15

### 7.3 FE-Modell med genererat nät

I programmet kan olika varianter och storlekar av nät genereras. Vid speciella geometrier t.ex. sponten kan FE-nätet göras mer finmaskigt för att förbättra precisionen i beräkningarna, se Figur 50.



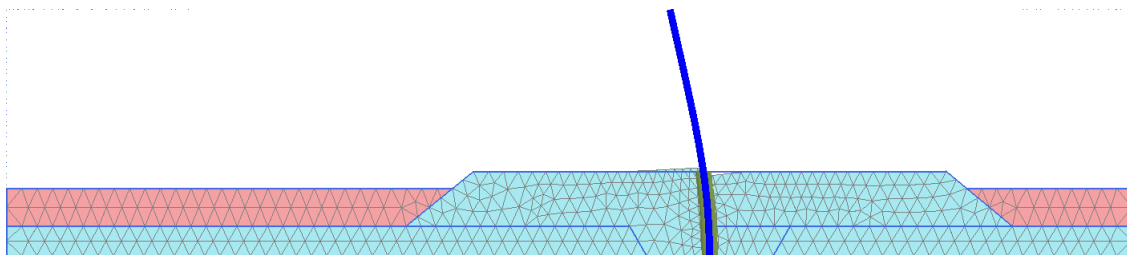
**Figur 50. FE-Modell med genererat nät. De olika färgerna representerar olika material. (Akbar, 2011).**

## 8. FE-beräkningar

För att kunna göra en jämförelse med de traditionella beräkningarna har FE-beräkningarna också delats in i fyra byggskedet, jmf. Kap 3.

### 8.1 Resultat från beräkningar enligt byggskede ett

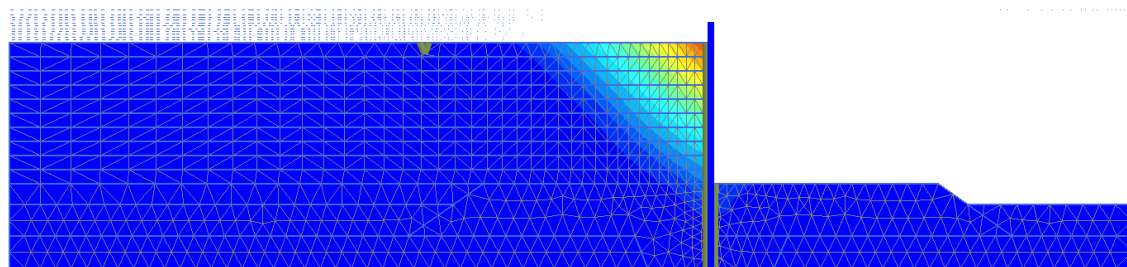
Detta skede skall simulera när sponten fungerar som en konsolspont, jmf Figur 16, och belastad av ett yttre vattenstånd som är en meter högre på utsidan av sponten jämfört med spontens insida. Detta skede kan betraktas som hypotetiskt då de båda sidorna endast är avgränsade med en mycket permeabel spängstenvall. Beräkningarna från byggskede visar på en förväntad deformation enligt belastningsförutsättningarna, se Figur 51.



Figur 51. Figuren visar ett deformerat nät med modellens aktiva delar färglagda (Akbar, 2011).

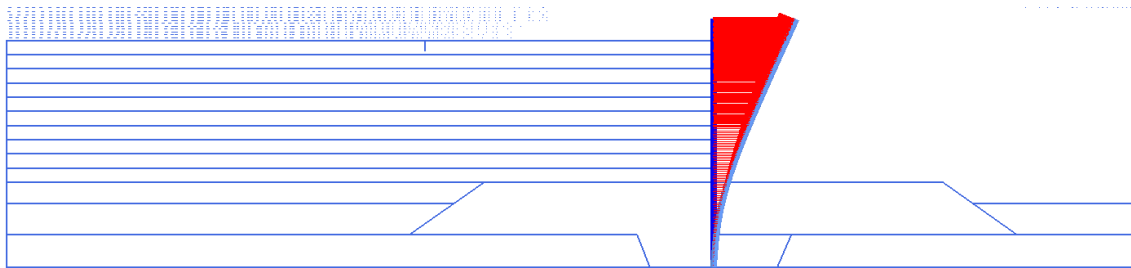
### 8.2 Resultat från beräkningar enligt byggskede två

I byggskede två har muddermassorna fyllt upp till nivå +0,2 meter. Muddermassorna har ännu inte erhållit full hållfasthet utan modelleras med en hållfasthet på ca  $1,25 \text{ kPa} + 1 \cdot z \text{ kPa}$ , där  $z$  är djupet under nollnivån. Beräkningsresultat av totalförskjutningen visas i Figur 52



Figur 52. Figuren beskriver totalförskjutningen  $|u|$ , där röd färg motsvarar  $360 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  och blå färg innebär ingen förskjutning (Akbar, 2012).

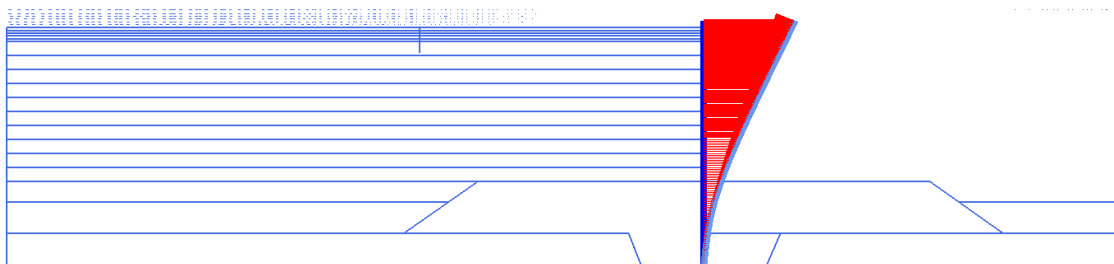
Den maximala horisontella förskjutningen  $u_x$  är beräknad till 0,29 m, se Figur 53.



Figur 53. Figuren visar den maximala horisontella förskjutningen  $u_x = 0,29$  m i byggskede två (Akbar, 2011).

### 8.3 Resultat från beräkningar enligt byggskede tre

I byggskede tre antas hållfastheten hos de stabiliserade muddermassorna ha ökat till 22 kPa i hela volymen. Vidare har en meter av sprängstensfyllningen placerats ut på de stabiliserade muddermassorna, jmf Figur 20. Utfyllningen med sprängsten ökar belastningen på spanten och därmed också den horisontella förskjutningen  $u_x = 0,33$  m, se Figur 54.



Figur 54. Figuren visar den maximala horisontella förskjutningen  $u_x = 0,33$  m i byggskede tre (Akbar, 2011).

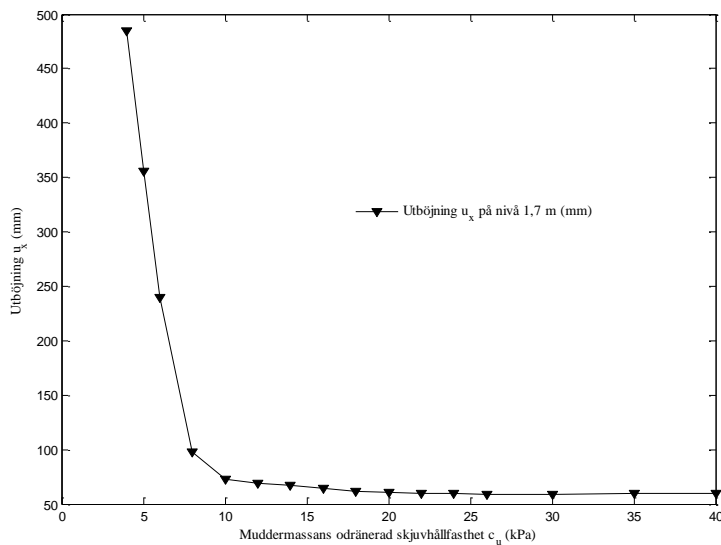


## 9 Parameterstudie

Syftet med parameterstudien var att studera vilken inverkan olika parametrar hade på spontens deformation samt att utifrån labb och fältresultat passa indata så att beräknad deformation överensstämmer med uppmätt deformation. Efter byggskede två skiljer sig beräkningsgången och det faktiska utförandet. Därför valdes konstruktionssteg två till grund för parameterstudien.

### 9.1 Muddermassans skjuvhållfasthet

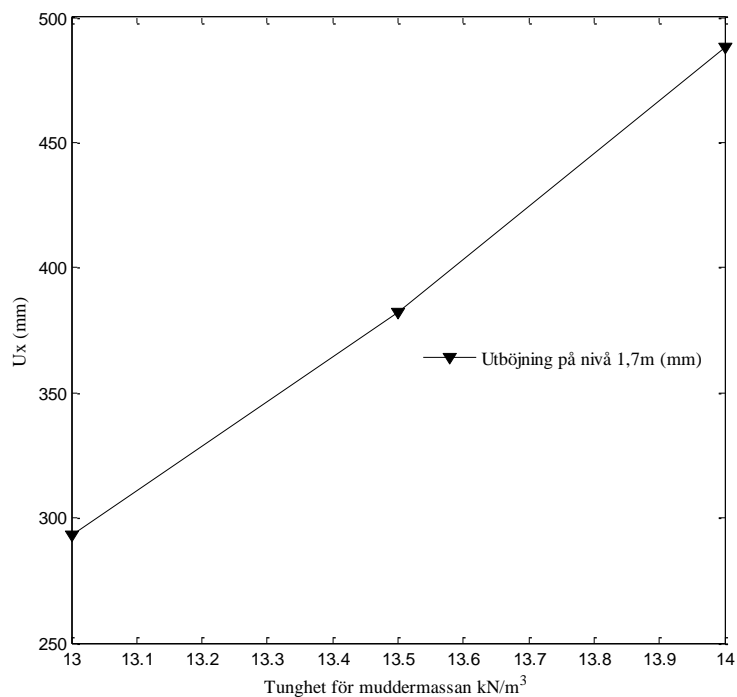
Indata för den odränerade skjuvhållfastheten varierades i FE-modellen mellan 5 och 40 kPa. Brytpunkten, när utböjningen accelererar ligger kring en skjuvhållfasthet på 10 kPa, se Figur 55.



Figur 55. Spontens beräknade utböjning som funktion av muddermassans skjuvhållfasthet (Akbar, 2011).

### 9.2 Muddermassans tunghet

I indata till FE-modellen varierades muddermassans tunghet mellan 13 och 14 kN per kubikmeter, se Figur 56. Muddermassans tunghet har stor betydelse för spontens utböjning.



**Figur 56. Spontens beräknade utböjning som funktion av muddermassans tunghet (Akbar, 2011).**

Indata till denna beräkning baserades på resultat från fältmätningar på Granudden. Dessa fältmätningar har i efterhand visat sig felaktiga. Tyvärr finns inte rådata från mätningarna kvar. De uppmätta resultaten ligger 10 till 15 % över vad som är rimligt.

## 10 Slutsatser

Fältförsöket har visat på att processtabilisering fungerat och har för detta projekt en tillräcklig kapacitet. Vidare har försöket visat att en processtabilisering ger en jämn inblandning av bindemedel i muddermassorna, d.v.s. bindemedlet blir väl fördelat i muddermassorna. För att optimera nyttan av bindemedel för stabilisering av förorenade muddermassor bör mängden bindemedel baseras på de inkommande muddermassornas vattenkvot. I den aktuella processtabiliseringsutrustningen kan fyra olika bindemedel användas. Om adekvata labförsök har utförts på de olika bindemedlen kan inte bara bindemedelsmängden utan också den inbördes relationen mellan bindemedlen varieras beroende på muddermassornas karaktär (vattenkvot, kornfördelning, fasthet etc).

Nedan följer några rekommendationer;

- De inledande labförsöken bör utföras enligt statistisk försöksplanering, t.ex. Simplex metoden.
- Dimensionering av spontkonstruktioner bör utföras med FE-Metoden för att erhålla rimliga värden på deformation etc. Detta innebär en säkrare uppföljning av konstruktionen samt möjligheter att sätta korrekta larm och stoppkriterier.
- Instrumentering av konstruktioner bör vara helt automatiserad för att kontinuerligt ge data samt för att bästa möjlighet till uppföljning. En automatiserad inklinometer fungerar mycket bra i samband med spontkonstruktion och bakomliggande muddermassor.
- Processtabilisering är en användbar teknik som kan optimeras med avseende på både mängd och typ av bindemedel baserat på inkommande material.
- Processtabilisering ger en jämn inblandning av bindemedlen i muddermassorna.
- Processtabilisering kan med fördel kombineras med ett avvattningsystem.
- Överlasten i kombination med bindemedelsmängden är kritiska parametrar för att ett homogent och därmed beständig produkt erhålles.
- CPT-sondering fungerar men kan behöva kompletteras med kolvprover

## 11. Referenser

Anon 2005. METODBLAD 1 KC-pelare SGF Jordförstärkningskommitté. [www.sgf.net](http://www.sgf.net).

Anon 2007. UTBYGGNAD AV GÄVLE HAMN FÖRSTUDIE – SAMMANFATTNING 2007-12-01. [www.gavle-port.se](http://www.gavle-port.se)

Bennert, T. A., Maher M. H., Jafahri F., och Gucunski N. 2000. Use of Dredged Sediments from Newark Harbor for Geotechnical Applications. Pp 152-164. Geotechnics of High Water Content Materials. Editors T. B. Edil and P. J. Fox. ASTM Stock Number: STP 1374.

Fossenstrand, I. 2009. Stabilisering och solidifiering av muddermassor i Gävle hamn. Examensarbete Luleå Tekniska Universitet 2009:168 CIV.

Lagerlund, J. 2010a S/S AV MUDDERMASSA FRÅN GÄVLE HAMN, STEG 1. Rapport nummer U 09:109. VATTENFALL RESEARCH AND DEVELOPMENT AB.

Lagerlund, J. 2010b S/S AV MUDDERMASSA FRÅN GÄVLE HAMN, STEG 2. Rapport nummer U 10:162. VATTENFALL RESEARCH AND DEVELOPMENT AB.

Larsson, R. 2006. Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserade pelare och masstabilisering. Svensk djupstabilisering. SD-R17. Linköping.

Akbar, S. 2011. Finita elementanalys av en kajspont. Examensarbete LTH ISRN LUTVDG/TVGT--11/5045—SE(1-91).

