



**STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT**  
**SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE**



## **Djupstabilisering i sulfidjord – laboratorie- och fältstudie**

Botniabanan delen Stöcke – centrala Umeå

Mattias Andersson  
Yvonne Rogbeck  
Bo Westerberg

Varia 597

LINKÖPING 2009





**STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT**  
**SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE**

Varia 597

**Djupstabilisering i sulfidjord**  
**– laboratorie- och fältstudie**

Botniabanan delen Stöcke – centrala Umeå

Mattias Andersson  
Yvonne Rogbeck  
Bo Westerberg



<b>Varia</b>	Statens geotekniska institut (SGI) 581 93 Linköping
Beställning	SGI – Informationstjänsten Tel: 013–20 18 04 Fax: 013–20 19 09 E-post: <a href="mailto:info@swedgeo.se">info@swedgeo.se</a> Internet: <a href="http://www.swedgeo.se">www.swedgeo.se</a>
ISSN	1100-6692
ISRN	SGI-VARIA--09/597--SE
Dnr SGI	1-0401-0059
Proj.nr SGI	11925

## FÖRORD

Byggande i sulfidjord har ökat. Exempel på detta är byggandet av Botniabanan och Ådalsbanan. Även vägbyggnad har ökat i områden med sulfidjord. Ökade miljökrav har lett till att tidigare använda metoder som t.ex. urgrävning kan bli jämförelsevis dyrt pga det merarbete som hantering av sulfidjorden kräver ur miljösynpunkt. Det är en av anledningarna till att djupstabilisering kan vara en kostnadseffektiv metod även vid relativt begränsade jorddjup. Djupstabilisering av sulfidjord eller sulfidhaltig jord har utförts i flera projekt i Sverige. I flera fall har resultatet i fält blivit betydligt sämre än vad laboratorieresultaten indikerat och man har varit tvungen att komplettera djupstabiliseringen med andra metoder i byggskedet. Detta har lett till ökade kostnader i projekten. Orsaken till problemen har i många fall inte undersökts. Problemen i fält kan ha uppstått av att ”standardrecept” och inblandning som används för leror även tillämpats i sulfidjord och att det inte är lämpligt i dessa typer av jordar. Ett FoU-projekt har utförts för att klargöra möjligheterna med sulfidjordsstabilisering och resultaten presenteras i föreliggande rapport.

Projektet administreras av Ramböll AB. Finansiärer av projektet är Banverket, Vägverket, Svenska byggbranschens utvecklingsfond (SBUF), Botniabanan AB, Statens geotekniska institut (SGI), Svensk djupstabilisering, Nordkalk, Specialstabiliseringar i Stockholm AB, Svenska EnergiAskor AB samt Statens geotekniska institut.

Medverkande i projektgrupp fältstudie:

Yvonne Rogbeck, SGI (projektledare)  
Mattias Andersson, SGI  
Lennart Larsson, SGI (kemiska undersökningar)  
Bo Westerberg, SGI  
Stefan Dahlin, Hercules  
Martin Svensson, Hercules

Medverkande i referensgrupp:

Björn Dehlbom, Ramböll  
Göran Holm, SGI  
Stig Jansson, Cementa  
Magnus Karlsson, Banverket  
Lovisa Moritz, Vägverket  
Pär Odén, Nordkalk  
Claes Ribbing, Svenska EnergiAskor AB  
Göran Wallmark, Botniabanan AB  
Helen Åhnberg, SGI (teknisk granskare)

Linköping i januari 2009

Författarna



**INNEHÅLL**

<b>FÖRORD</b> .....	<b>3</b>
<b>SAMMANFATTNING</b> .....	<b>6</b>
<b>1 INLEDNING</b> .....	<b>7</b>
1.1 Bakgrund .....	7
1.2 Syfte .....	7
1.3 Genomförande / metodik.....	7
<b>2 PROVLOKAL</b> .....	<b>9</b>
2.1 Inledning.....	9
2.2 Områdesbeskrivning .....	10
2.3 Provområdet.....	10
<b>3 LABORATORIEFÖRSÖK</b> .....	<b>12</b>
3.1 Materialtekniska undersökningar.....	12
3.2 Kemiska undersökningar.....	18
<b>4 FÄLTFÖRSÖK</b> .....	<b>20</b>
4.1 Installation av pelare .....	20
4.2 Bindemedel .....	22
4.3 Inblandningsverktyg .....	22
4.4 Kontrollsondering .....	24
4.5 Framgrävning av pelare .....	26
<b>5 RESULTAT</b> .....	<b>29</b>
5.1 Resultat från laboratorieförsök .....	29
5.2 Resultat från fältförsök .....	29
<b>6 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER</b> .....	<b>38</b>
<b>7 REFERENSER</b> .....	<b>39</b>

**BILAGOR**

Bilaga 1	Installationsplan för djupstabilisering
Bilaga 2-11	Pelarsonderingar
Bilaga 12	Spetstrycksmätning med CPT i naturlig jord
Bilaga 13	Pelarsondering i naturlig jord
Bilaga 14	Resultat av CPT-sonderingar i naturlig jord
Bilaga 15	Kemiska undersökningar

## SAMMANFATTNING

Projektet syftar till att visa om djupstabilisering av sulfidjord är en möjlig förstärkningsmetod och att ge rekommendationer för att använda djupstabilisering på ett lämpligt sätt i väg- och järnvägsprojekt. En viktig del har varit att jämföra resultat mellan laboratorie- och fältresultat. Inblandningsförsök utfördes med 5 bindemedelstyper, 5 bindemedelsmängder i fyra olika typer av sulfidjord.

I fält har djupstabilisering utförts i en provlokal strax söder om Umeå. Den bestod av fyra olika typer av sulfidjord. Lämpliga inblandningsmedel och mängder provades utifrån resultat från laboratieförsök. I fält varierades även inblandningsarbetet (genom stigningen) och härdningstiden.

Totalt användes i fält fyra stycken olika bindemedel med inblandningsmängden 150 kg/m<sup>3</sup> och 250 kg/m<sup>3</sup>. De bindemedel, som användes var:

- KC 50/50 (kalk/cement)
- KCG 33/33/33 (kalk/cement/gips)
- CM 30/70 (cement/Merit)
- C (cement)
- C + vatten (cement med vatten enligt MDM-metoden)

Fältdelen av projektet omfattade 90 provpelare som installerades i maj 2008. Installationen utfördes med en pelardimension av  $\phi$  600 mm och en pelarlängd av 6 m eller ner till fast botten. Verktygen som användes var en sk "Pinnborr" och en MDM-bygel, den sistnämnda för de fall man hade en tillsats av vatten. Rotationshastigheten var 200 varv/min och försöken utfördes med 2 olika blandningsenergier (stigning), 10 mm/varv och 30 mm/varv. Effekten av djupstabilisering i fält undersöktes framförallt genom förborrad pelarsondering med spetskraftsmätning. Pelarsonderingarna utfördes för alla kombinationer efter 28 dygn och för 150 kg/m<sup>3</sup> även efter 90 dygn.

Hållfastheten som uppnått i fält visar att djupstabilisering i sulfidjord är en möjlig metod för väg- och järnvägsbyggnation. Standardrecept som används för vanlig lera bör inte användas, utan större mängd bindemedel bör provas. Inblandningsförsök bör utföras på laboratorium för att få en uppfattning om möjligheterna att stabilisera sulfidjorden. Preliminär dimensionering kan utföras utifrån laboratorieresultat, men slutligt val av bindemedel och verifiering av utförande ska ske med provpelare i fält. Homogeniteten bör undersökas genom framgrävning av pelare.

Redox potential, pH, spec. konduktivitet och även det organiska innehållet i jorden kan ha inverkan på stabiliseringseffekten. Det rekommenderas att dessa parametrar undersöks för att ge en indikation på svårigheten att stabilisera.

Det rekommenderas att vara försiktig vid projektering av pelare i sulfidjord. Detta projekt omfattar endast ett provområde. Fler uppföljningar bör utföras för att bygga upp mer erfarenhet och kunna dra mer generella slutsatser.



## 1 INLEDNING

### 1.1 Bakgrund

Byggande i sulfidjord har ökat. Exempel på detta är byggandet av Botniabanan och Ådalsbanan. Även Vägverket bygger i sulfidjord. Ökade miljökrav har lett till att tidigare använda metoder som t.ex. urgrävning kan ifrågasättas ur miljösynpunkt. I dagsläget råder en restriktiv syn på deponering av sulfidjord. Djupstabilisering bedöms vara intressant ur teknisk-, ekonomisk och miljömässig synpunkt.

Vid SGI och LTU har forsknings- och utvecklingsarbete angående sulfidjord pågått under de senaste 20 åren både vad gäller geoteknik och markkemi. SGI har gjort en förstudie med flera tänkbara metoder för användning i sulfidjord, bl.a. pelar- och masstabilisering eller en kombination av dessa. Förstudien har rapporterats i "Förstudie av metoder för byggnationer på sva-velhaltiga jordar – tekniska och miljömässiga aspekter" Håkansson (2002).

Djupstabilisering av sulfidjord eller sulfidhaltig jord har utförts i flera projekt i Sverige. I flera fall har resultatet i fält blivit betydligt sämre än vad laboratorieresultaten indikerat. Man har varit tvungen att komplettera djupstabiliseringen med andra metoder i byggskedet, vilket lett till ökade kostnader i projektet. Orsaken till problemen har inte undersökts. Problemen i fält kan ha uppstått av att "standardrecept" och inblandning som används för leror även tillämpats i sulfidjord och att det inte är lämpligt i dessa typer av jordar.

LTU/SCC har utfört ett projekt på uppdrag av Botniabanan AB med syfte att utveckla metod för karakterisering av sulfidjord utifrån kombinationen geotekniska- och markkemiska egenskaper Mácsik (2003). I denna förstudie har sulfidjordar delats in i fem olika typer. Förslaget till indelning har provats i detta projekt.

I Svensk Djupstabiliserings regi har ett projekt utförts i Bettna rörande djupstabilisering i organisk jord och lera, SD arbetsrapport 12 (2000). Där provades olika typer av utrustning, två kombinationer av bindemedel (kalk/cement och cement/Merit) och inblandningsarbete i fält. Stora skillnader erhöles i laboratorieförsöken mellan blandningarna cement/Merit och kalk/cement, medan resultatet i fält visade ungefär samma hållfasthet. Effekten av inblandningsarbetet hade större betydelse när Merit användes. Försöken visar att det är angeläget att ha fältresultat vid bestämning av lämpliga bindemedel och mängder. I detta projekt ingår därför jämförelse mellan laboratorie- och fältresultat.

### 1.2 Syfte

Projektet syftar till att visa om djupstabilisering av sulfidjord är en möjlig förstärkningsmetod och att ge rekommendationer för att använda djupstabilisering på ett lämpligt sätt i väg- och järnvägsprojekt. En viktig del har varit att jämföra resultat mellan laboratorie- och fältresultat för att få en uppfattning om vad som kan uppnås i fält och möjligheten att dimensionera utifrån laboratorieresultat.

### 1.3 Genomförande / metodik

Hela projektet omfattar följande delar:

- Inventera tidigare utförda fullskaleprojekt för att ge svar på i vilken typ av sulfidjord stabilisering fungerat bra i fält och orsakerna till varför vissa projekt misslyckats.
- Test av metod för karakterisering av sulfidjord.
- Utföra laboratorie- och fältförsök i olika typer av sulfidjord för att visa behovet av bindemedelsmängd, typ av bindemedel och inblandningsarbete för de olika sulfidjordstyperna.
- Utarbeta rekommendationer för användning av djupstabilisering i sulfidjord (platspecifikt).

Inventeringen och test av metod för karakterisering av sulfidjord behandlas inte i denna rapport utan dessa delar redovisas i ett examensarbete av Andersson och Norrman (2004) ”Stabilisering av sulfidjord, en litteratur- och laboratoriestudie”.

På grund av miljööverklaganden i byggskedet valdes att inte utföra djupstabilisering eftersom fältresultaten från föreliggande studie inte var tillgängliga. Istället valdes träpålar som förstärkningsmetod. Kompletterande laboratorieförsök har utförts för den naturliga jorden på den nya platsen för djupstabiliseringen i fält. Den ligger utanför kommande järnvägsbank, ca 15–20 m ifrån ursprunglig provplats som låg i järnvägslinjen och nu är förstärkt med träpålar.

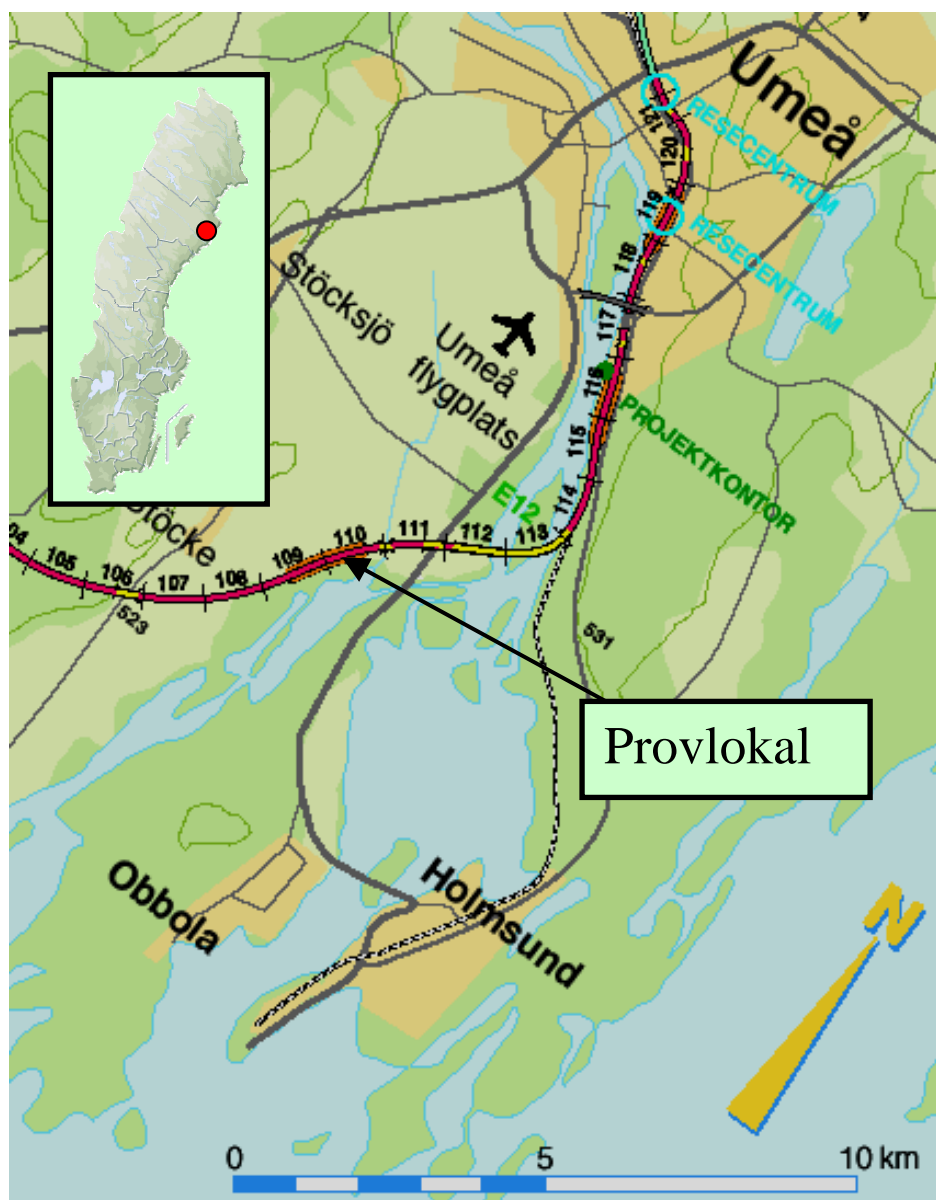
I fält har djupstabilisering utförts i en provlokal innehållande fyra olika typer av sulfidjord, enligt karakterisering av Mácsik (2003). Lämpliga inblandningsmedel och mängder provades utifrån resultat från laboratorieförsök. I fält varierades även inblandningsarbetet. Effekten av djupstabilisering i fält undersöktes framförallt genom sondering.

Jämförelse och analys har gjorts mellan laboratorie- och fältresultat och rekommendationer har utarbetats för användning av djupstabilisering i sulfidjord.

## 2 PROVLOKAL

### 2.1 Inledning

Provområdet är beläget längs Botniabanans sträckning strax söder om Umeå, ca 10 km från centrum, se Figur 2.1, vid sektion 110+080. Djupet på finsedimenten är ungefär 6 m. En plan över pelarinstallationerna redovisas i Bilaga 1.



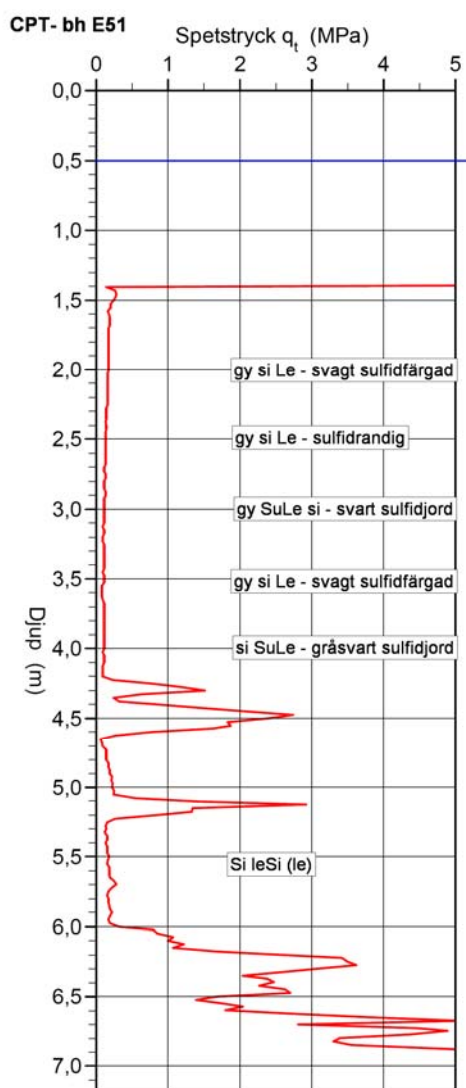
Figur 2-1. Vy över provområdet, vid sektion 110+080, Botniabanan (2004).

## 2.2 Områdesbeskrivning

Området består av varierande åker- och skogsmark. Topografiskt sett är höjdskillnaderna små, bebyggelse saknas i omgivningen. I söder ligger havet och i norr utsträcker sig ett öppet landskap, Degernässlätten. Platsen är belägen i Umeälvens utbredda deltaområde Botniabanan passerar genom värdefulla naturtyper och fågelskyddsområden som ingår i nätverket Natura 2000.

## 2.3 Provområdet

CPT-sonderingsresultat från det aktuella området presenteras i Bilaga 12 och Bilaga 14. Kompletterande laboratorieförsök har även utförts. Dessa överensstämmer bra med den jordprofil som upprättades utifrån tidigare CPT-undersökningar och rutinundersökningar, se Figur 2-2. Provområdet kan ses i Figur 2-3.



**Figur 2-2. Jordprofil vid området för fältförsöken. Figuren visar spetstrycket för CPT-sonderingen i bh E51 och benämningen för kolvprover upptagna i bh E50 och E52.**



**Figur 2-3. Provtagningsområdet för laboratorieförsöken, spårmitt i sektion 110+080 för Botniabanan.**

### 3 LABORATORIEFÖRSÖK

#### 3.1 Materialtekniska undersökningar

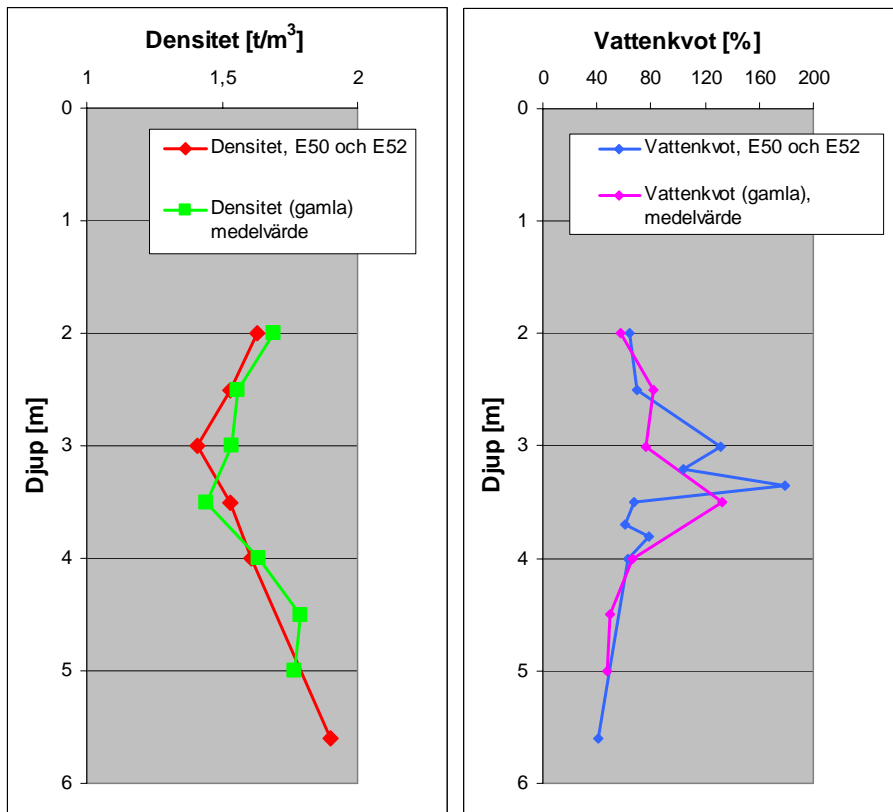
Eftersom provplatsen flyttats 15–20 m från ursprunglig provplats som låg i spårmitt, så utfördes en kompletterande kolvprovtagning. Detta för att verifiera att förhållandena var samma som i ursprungsområdet där inblandningsförsök tidigare utförts.

#### Naturlig lera, kompletterande undersökning vid fältförsök

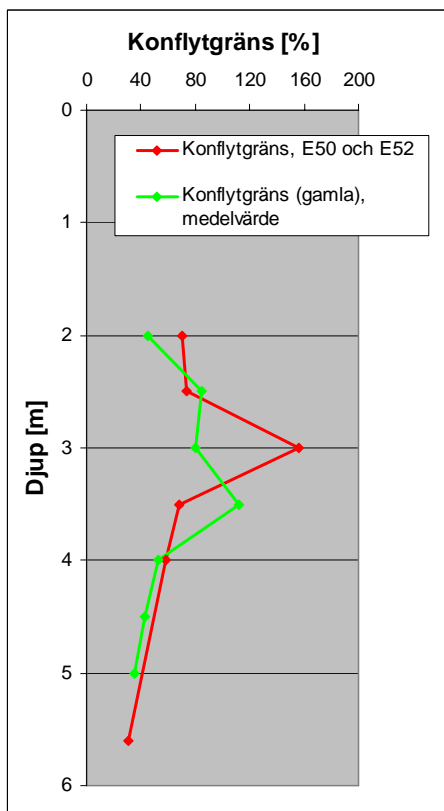
Kolvprovtagning utfördes i borrhål E50 och E52 (läge se planritning), proverna kan ses i Figur 3-1. Den naturliga jordens densitet och vattenkvot redovisas i Figur 3-2 och skjuvhållfastheten redovisas i Figur 3-3. Järn, svavel och organisk halt redovisas i Figur 3-4. Förhållandena bedöms som likvärdiga med ursprungsområdet. I Figur 3-2 till Figur 3-4 står det angivet ”(gamla) medelvärde”, vilket betyder att ett medelvärde oftast baserat på tre värden för varje nivå redovisas i grafen. För exakta värden se Andersson & Norrman (2004).



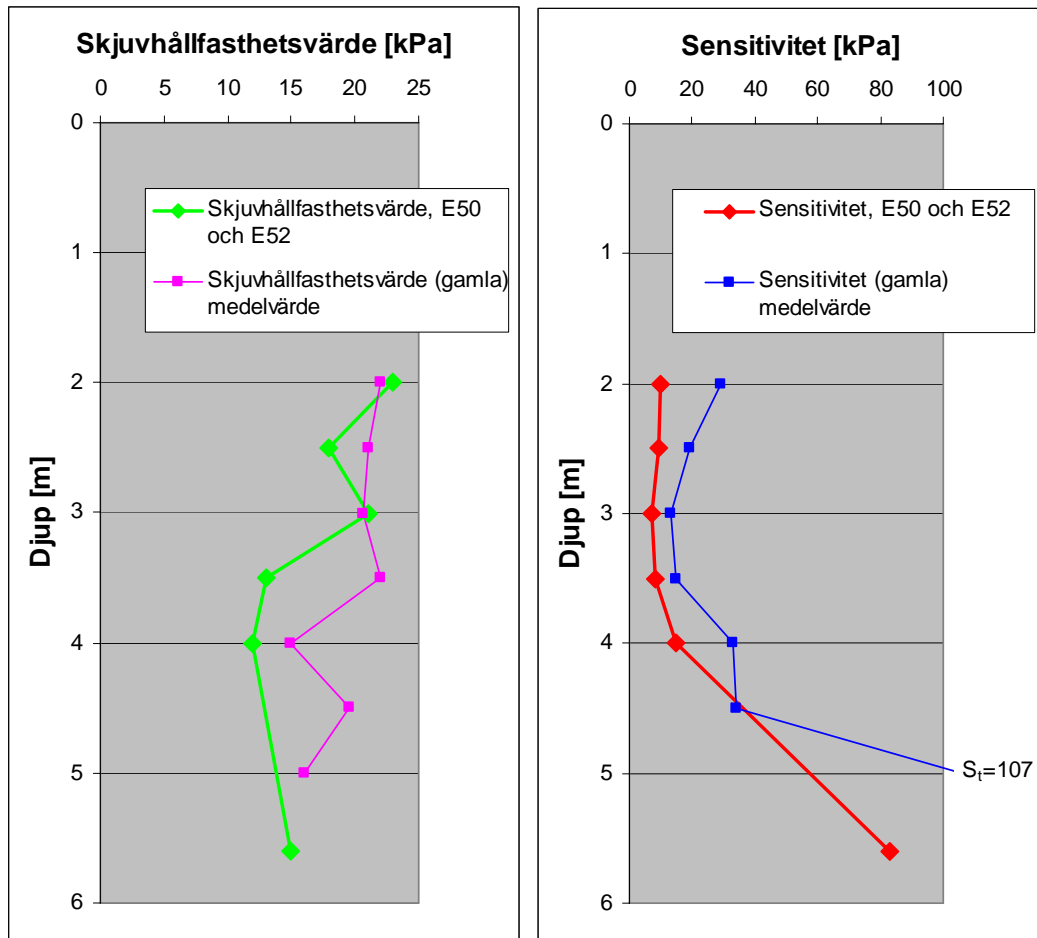
**Figur 3-1.** Upptagna kolvborrsprover från provområdet för fältförsöken utmed Botniabanan. Längst ned till vänster syns provkroppar tagna på 2 m djup under markytan, kontinuerlig provtagning mot djupt därefter och provet högst upp i mitten är från ca 4,3 m djup.



Figur 3-2. Den aktuella sulfidjordens densitet och vattenkvot.

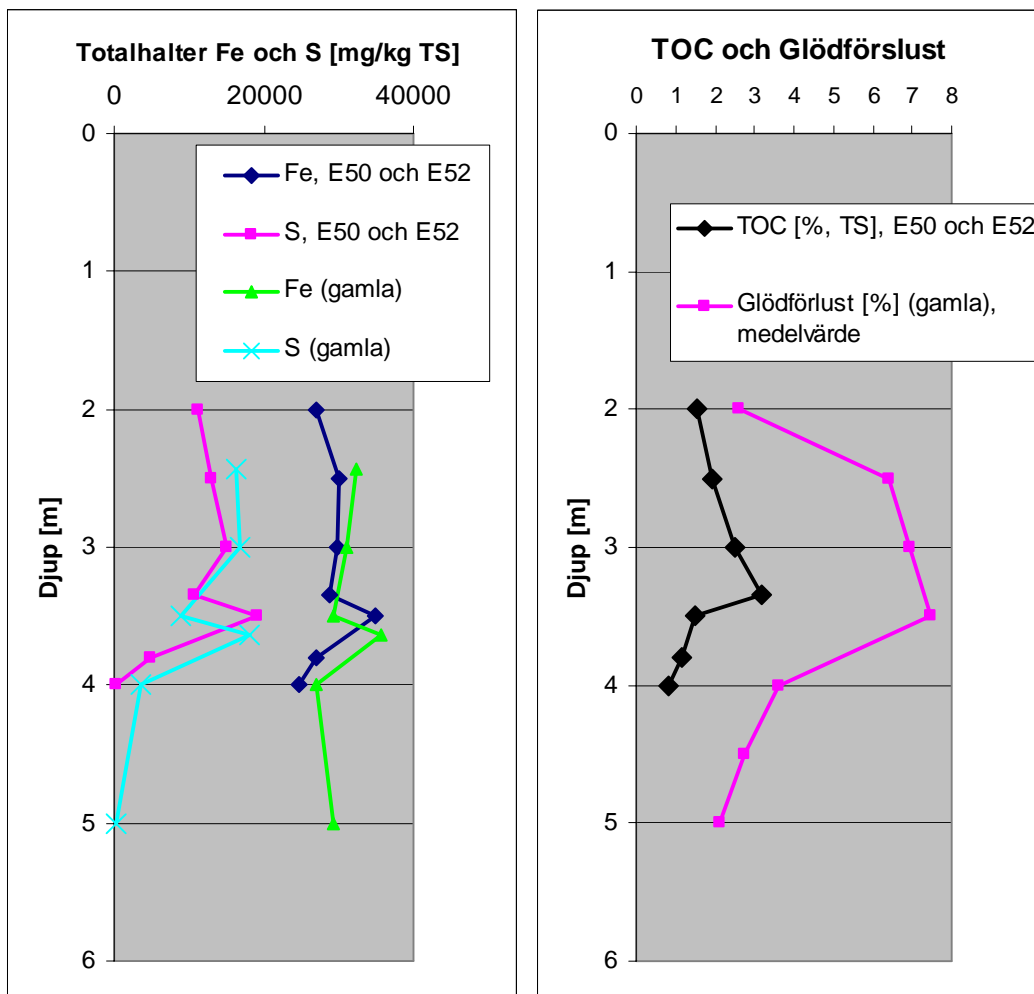


Figur 3-3. Den aktuella sulfidjordens konflytgräns.



Figur 3-4. Den aktuella sulfidjordens skjuvhållfasthetsvärde (okorrigerat) och sensitivitet, bestämd med fallkon.





Figur 3-5. Den aktuella sulfidjordens totalhalter av järn och svavel samt TOC.

I Figur 3-5 finns angivet en mätning av TOC och glödningsförlust (950 °C). Dessa värden är inte helt jämförbara men det finns en tydlig indikation på att det organiska innehållet i jorden är större på ca 2,5 – 3,5 m djup jämfört med omkringliggande jord. En omräkningsfaktor på 0,57 kan användas för organisk halt och TOC enligt,  $TOC_{beräknad} = 0,57 \cdot GF_{550\text{ °C}}$ . Organisk halt är således lika med TOC dividerat med en faktor 0,57, se t.ex. Larson et al. (1985).

### Inblandningsförsök

Laboratorieinblandningar utfördes år 2004 med kombinationen:

- 5 bindemedelstyper
- 5 inblandningsmängder
- 4 olika klasser av sulfidjord

Enaxiella tryckförsök utfördes på de inblandade proverna och analys av laboratorieresultatet användes för bestämning av vilka medel och mängder som skulle användas i fältförsöken. Endast ett antal av laboratoriekombinationerna användes i fält. Ett urval av resultaten presenteras i denna rapport och för resterande undersökningar hänvisas till examensarbete av Andersson och Norrman (2004).

**Maximal tryckspänning för varje djup och prov**

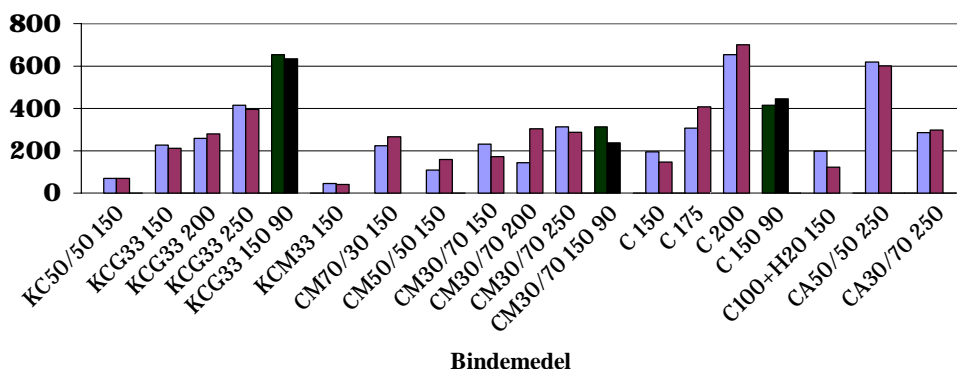
I stapeldiagrammen i Figur 3-6 och 3-7 presenteras maximal tryckspänning erhållen från enaxiella tryckförsök utförda på dubbelprov för olika bindemedelstyper och inblandningsmängder. Lagringstiderna är 28 och 90 dygn. I Figur 3-6 och 3-7 representerar de svarta staplarna prov med 90 dygns lagringstid och de ljusare är prov med 28 dygns lagringstid. Resultaten presenteras för varje djupen 3,5 m och 4 m. I examensarbete finns även prover från djup 2,3 – 3 respektive 5 m redovisade. De olika bindemedlen presenteras i samma inbördes ordning, från vänster till höger, i de olika diagrammen. Under varje dubbelstapel anges bindemedel, andel av respektive bindemedel och bindemedelsmängd, jämför Tabell 3-1. De staplar som dessutom har siffran 90 i förklaringstexten är prov med en lagringstid på 90 dygn, övriga prov har lagringstiden 28 dygn.

Nivåerna 3,5 m och 4 m är de nivåer som generellt ger lägst resultat och är därmed svårast att stabilisera. Flest kombinationer m.a.p. bindemedelstyp och inblandningsmängd genomfördes på ”problemdjupen” 3,5 m och 4 m.

**Tabell 3-1. Förteckning över de olika bindemedel som användes vid laboratorieinblandningen för nivåerna 3,5 och 4 meters djup.**

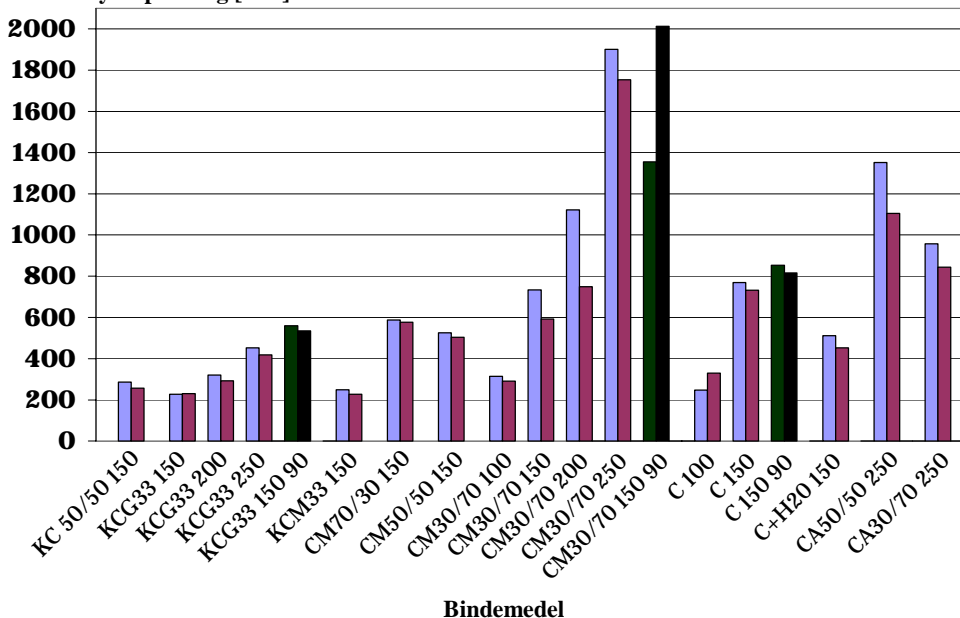
Förkortning	Proportioner [%]	Bindemedel	Bindemedelsmängd [kg/m <sup>3</sup> ]	Tidpunkt för provtryckning [dygn]
KC 50/50 150	50/50	Kalk och cement	150	28
KCG 33 150	33/33/33	Kalk, cement och gips	150	28
KCG 33 200	33/33/33	”	200	28
KCG 33 250	33/33/33	”	250	28
KCG 33 150 90	33/33/33	”	150	90
KCM 33 150	33/33/33	Kalk, cement och Merit	150	28
CM 70/30 150	70/30	Cement och Merit	150	28
CM 50/50 150	50/50	”	150	28
CM 30/70 100	30/70	”	100	28
CM 30/70 150	30/70	”	150	28
CM 30/70 200	30/70	”	200	28
CM 30/70 250	30/70	”	250	28
CM 30/70 150 90	30/70	”	150	90
C 100	100	Cement	100	28
C 150	100	”	150	28
C 175	100	”	175	28
C 200	100	”	200	28
C 150 90	100	”	150	90
C100+H2O 150	100	Cement och vatten	150	28
CA 50/50 250	50/50	Cement och Aska	250	28
CA 30/70 250	30/70	”	250	28

Maximal tryckspänning [kPa]



Figur 3-6. Maximal tryckspänning för dubbelprov, för olika typer, andelar och mängder bindemedel, lagringstid 28 och 90 dygn, djup 3,5 m.

Maximal tryckspänning [kPa]



Figur 3-7. Maximal tryckspänning för dubbelprov, för olika typer, andelar och mängder bindemedel, lagringstid 28 och 90 dygn, djup 4 m.

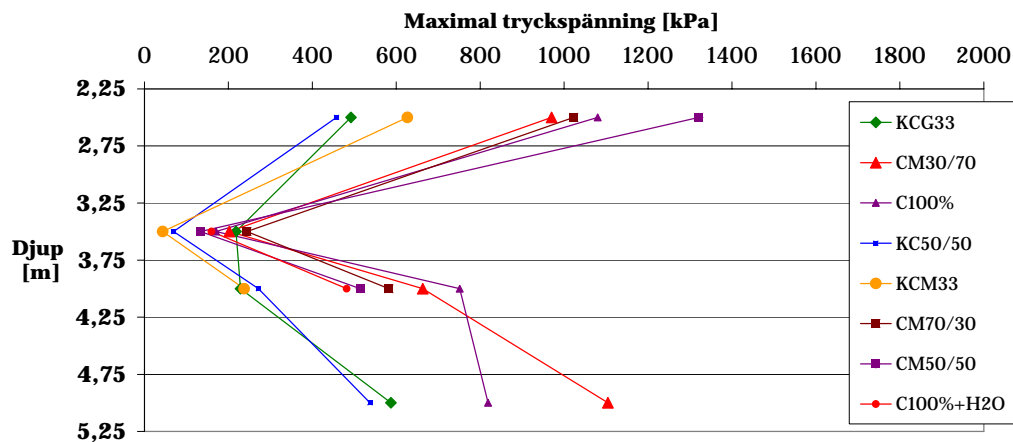
### Maximal tryckspänning som funktion av djupet för varje blandning

Maximal tryckspänning som funktion av djupet är sammanställda utifrån bindemedelstyp med varierande inblandningsmängd och lagringstid respektive samma inblandningsmängd med olika bindemedelstyper. På varje djup anges ett medelvärde av A- och B-provet för respektive blandning och dessa punkter har sedan sammanbundits med en heldragen linje. Varje kombination anges med en unik symbol.

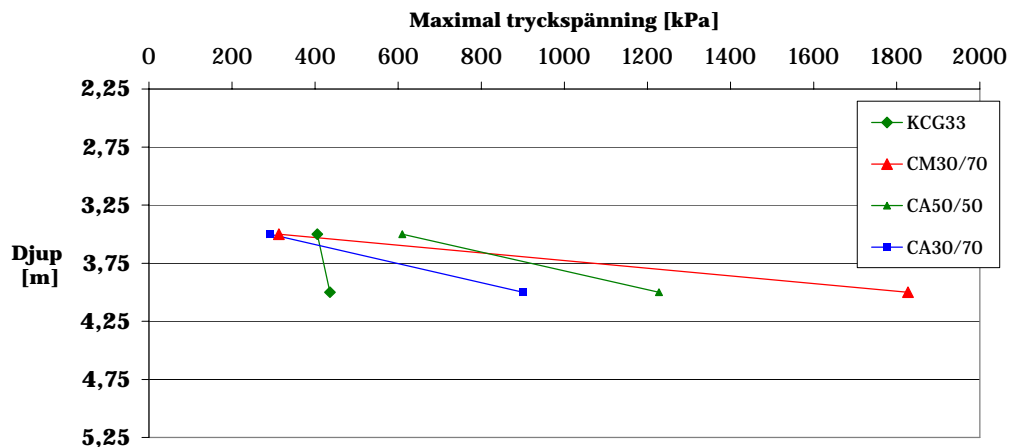
Figur 3-8 och Figur 3-9 visar maximal tryckhållfasthet för de olika bindemedlen med inblandningsmängd  $150 \text{ kg/m}^3$  respektive  $250 \text{ kg/m}^3$ . Dessa mängder valdes i fält. I diagrammen framgår tydligt hur samtliga bindemedel uppvisar lägst hållfasthet på djupet 3,5 m.

Kalk/cement/gips (KCG 33 %) är det bindemedel som varierar minst i maximal tryckspänning genom jordprofilen. Kalk/cement som undersökts på alla djup i referenssyfte, är den blandning

som tillsammans med kalk/cement/merit (KCM 33 %) överlag uppnått de lägsta hållfastheterna. Blandningarna med cement och flygaska gav bra hållfasthet i laboratoriet, men valdes inte i fält pga det kom med sent i projektet och ingick inte i MKB:n.



Figur 3-8. Tryckspänning vid brott som funktion av djupet. Bindemedelsmängd  $150 \text{ kg/m}^3$ , 28 dygn. Medelvärden på dubbelprov.



Figur 3-9. Tryckspänning vid brott som funktion av djupet. Bindemedelsmängd  $250 \text{ kg/m}^3$ , 28 dygn. Medelvärden på dubbelprov.

### 3.2 Kemiska undersökningar

Metallanalyser utfördes och det var framförallt järn och svavel som var av intresse i detta fall. Lakförsök har utförts enligt modell Mácsik (2000). Det utfördes bestämning av redoxpotential, pH och konduktivitet efter ett antal laksteg, även den organiska halten har bestämts genom glödningsförlust. Resultaten presenteras i

Tabell 3-3 och Tabell 3-4. I Tabell 3-2 redovisas ett klassificeringssystem för bedömning av försurningspotential för olika typer av sulfidjordar, Mácsik (2000). Lakförsöken finns även beskrivet i Andersson och Norrman (2004). I Bilaga 15 har Lennart Larsson, SGI, formulerat en hypotes till uppkomna effekter.

**Tabell 3-2. Sammanställning och klassificering av olika typer av sulfidjordar, Mácsik (2000).**

Typ	w [%]	$\rho$	S [mg/kg TS]	Fe/S	Eh [mV]	pH	Försurningspotential/ Försurningshastighet
1	65 - >120	<1,5	> 9000	< 3,5	< 0	> 6	hög/långsam
2	40 - 90	1,5 - 1,6	6000 - 9000	3,5- 4	0 - 500	3 - 6	hög/långsam
3	40 - 55	1,5 - 1,6	3800 - 6000	4 - 4,5	100 - 400	3 - 6	hög/medel
4	< 50	1,5 - 1,6	< 3800	4,5 - 16	100 - >500	4 - 6	medel/snabb
5	< 50	> 1,6	< 900	16 - 46	0 - 200	> 6	låg/-

**Tabell 3-3. Undersökta provers skrymdensitet, vattenkvot, pH och redoxpotential (Eh) efter 96 timmars lakning, lerhalt och glödningsförlust, Mácsik (2003).**

Provtub	Nivå	Bedömning	$\rho$ , ton/m <sup>3</sup>	w, %	pH (96h)	Eh, mV (96h)	Lerhalt, % TS	G %
KLBF1607	2 m	(su)saleSi	1,69	40,1	7,18	169	11	3,4
VFE160	2,6 m	susiLe	1,54	85	6,67	5,3	27	6,3
RB2003	3 m	susiLe	1,51	85,6	6,79	51,4	31	7,2
VFP260	3,4m	susiLe	1,37	118	7,12	-175	28	8,6
	3,6 -			190 -				12,6-
Orje E 3407	3,68m	susiLe	1,29	242	7,08	-223	27	15,3
SJ3072	4m	susiLe	1,62	61,3	6,81	115	25	3,6
DPF316	4,5m	Si	1,95	27	-	-	-	1,7
AIB796	5m	(su)siLe	1,69	57,7	7,37	141	31	3,1

**Tabell 3-4. Redovisning av olika typer av sulfidjordar i profilen, baserat på jordprover upptagna i spårmitt sektion 110+080, Mácsik (2003).**

Nivå	Provtub	w [%]	Fe, mg/kg TS	S, mg/kg TS	Fe/S	Typ
2 m	KLBF1607	40,1				5
2,5 m	VFE160	90	32400	16300	2,0	2
3,0 m	RB2003	85,6	31200	16800	1,9	2
3,5 m	VFC280	117	29400	8800	3,3	1
3,64 m	ORRJE E 3407	212	35700	18100	2,0	1
4,0 m	SJ3072	61,3	27100	3560	7,6	4
5,0 m	AIB796	57,7	29400	132	223	5

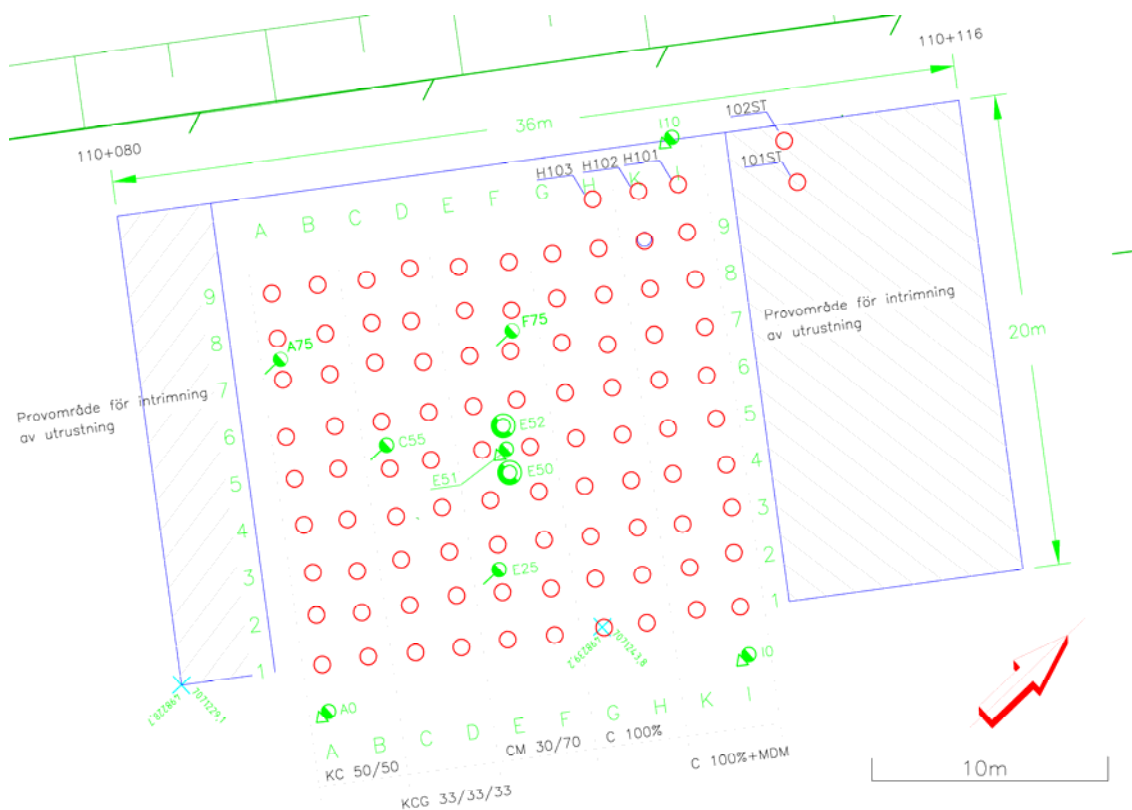
## 4 FÄLTFÖRSÖK

### 4.1 Installation av pelare

Fältdelen av projektet omfattade 90 provpelare som installerades den 12-14 maj 2008, se Figur 4-1 till Figur 4-4 samt detaljer om utförandet i Bilaga 1.

Installationen utfördes med en pelardimension av  $\phi$  600 mm och en pelarlängd av 6 m eller ner till fast botten. Verktygen som användes var en sk "Pinnborr" och en MDM – bygel, sistnämnda för de fall man hade en tillsats av vatten. Rotationshastigheten var 200 varv/min och försöken utfördes med 2 olika blandningsenergies (stigning), 10 mm/varv och 30 mm/varv.

Installationen av de olika pelarinblandningarna utfördes i ett rutnät med c/c 2 m, se Figur 4-1 och Bilaga 1.



**Figur 4-1. Installationsplan för djupstabilisering, Botniabanan, delen Stöcke – centrala Umeå.**

I Figur 4-2 visas en vy från söder mot norr över provområdet, spårmiten för Botniabanan ligger ca 15 m väster om området. I nederkant på figuren syns ett vattenfyllt dike, nivån på detta motsvarar ungefär grundvattenytans läge, dvs. ca 0,5 meter under markytan. Området ser relativt omrört ut, vilket beror på att en grävmaskin avlägsnat de största stubbarna och tagit bort ris före pelarinstallationen.



**Figur 4-2. Försöksområde för fältförsök utmed Botniabanan sektion 110+080, Umeå**

I Figur 4-3 och Figur 4-4 visas Hercules KC-maskin vid pelarinstallationen. På grund av maskinens tyngd krävdes det stockmattor att gå på för maskinen, dessa tillsammans med en ca 1,5 m tjock torrskorpa gjorde pelarinstallationen möjlig utan att erhålla några bärlighetsbrott.



**Figur 4-3. Installation av pelare med Hercules KC-maskin.**



Figur 4-4. Installerade pelare.

## 4.2 Bindemedel

Totalt användes fyra stycken olika bindemedel med inblandningsmängden 150 kg/m<sup>3</sup> och 250 kg/m<sup>3</sup>. De bindemedel, som användes var:

- KC 50/50 (kalk/cement)
- KCG 33/33/33 (kalk/cement/gips)
- CM 30/70 (cement/Merit)
- C (cement)
- C + vatten (cement med vatten enligt MDM-metoden)

Valet av bindemedel baserades på de tidigare utförda inblandningsförsöken i laboratoriet. Laboratorieresultaten för CM 70/30 gav högre hållfasthet än CM 30/70 men CM 30/70 valdes för att se effekten av mer merit och för att få större skillnader jämfört med ren cement. Blandningarna med cement och flygaska gav bra hållfasthet i laboratoriet, men valdes inte i fält pga det kom med sent i projektet och ingick inte i MKB:n.

## 4.3 Inblandningsverktyg

De inblandningsverktyg som användes var för den torra metoden en pinnborr, se Figur 4-5 och för den våta metoden (MDM) en bygel, se Figur 4-6. Valet av pinnborr för den torra metoden grundades på idéer inom projekt och referensgrupp om att blandningsarbetet skulle vara avgörande för att uppnå önskad stabiliseringseffekt i sulfidjord. Vägverket har i några projekt på västkusten konstaterat att ett bättre blandningsarbete erhålls med pinnborren jämfört med den traditionella bygeln. De båda verktygens BRN (Blade Rotation Number) redovisas i Tabell 4-1 och Tabell 4-2. Blade Rotation Number är antalet blad på blandningsverktyget multiplicerat med antalet rotationer hos verktyget per meter stigning, Larsson (2003). För pinnborren med 5 blad och stigningen 25 mm/varv blir BRN således;

$$\frac{1000}{25} = 200$$



Pinnborren består av en vinge längst ned och två vingpar ovanför enligt Figur 4-5. Bindemedel tillfördes genom ett munstycke i nivå med övre delen av de översta vingparen. All tillförsel av bindemedel samt blandningsarbete sker i samband med stigning.

**Tabell 4-1. Blade Rotation Number för Pinnborren, 5 blad uppåt vid blandning.**

Stigning mm/varv	BRN
10	500
15	333
20	250
25	200
30	167

MDM verktyget består av en bygel samt två extra vingpar enligt Figur 4-6. Bindemedel tillföres genom ett munstycke i nivå med övre delen av bygeln. Hälften av bindemedlet tillföres vid nedborrning och hälften i samband med stigning. Detta innebär att 3 blad blandar på väg ned och 5 blad på väg upp. Vatten tillfördes endast i samband med nedborrning genom ett munstycke i nedre delen av verktyget.

**Tabell 4-2. Blade Rotation Number för MDM-bygeln, 3 blad nedåt och 5 blad uppåt vid blandning.**

Stigning mm/varv	BRN
10	800
15	533
30	267



**Figur 4-5. Närbild av redskap för inblandning, ”Pinnborr”.**



Figur 4-6. Närbild av redskap för inblandning, ”MDM - bygel”.

Vid installationen av pelare med bindemedelsmängden  $250 \text{ kg/m}^3$  (torra metoden) kunde inte en stigning på 30 mm/varv uppnås. Utmatningsdiagrammen visar på en maximal stigning av ca 20 mm/varv. Maskinen är inställd så att stigningen automatiskt bestäms i relation till utmatningen så att tillräckligt inblandningsarbete ska ske.

#### 4.4 Kontrollsondering

Provtryckning av pelarna utfördes med förborrad traditionell kalkpelarsondering, en s.k. FKPS-sondering, efter 28 och 90 dygn på pelare med bindemedelsmängden  $150 \text{ kg/m}^3$  och efter 28 dygn på pelare med bindemedelsmängden  $250 \text{ kg/m}^3$ . Totalt utfördes 40 st sonderingar efter 28 dygn respektive 20 st efter 90 dygn.

Före sondering schaktades 0,5 m av översta jordlagret bort se Figur 4-7, varvid pelarna relativt lätt kunde urskiljas. Därefter förborrades varje pelare med en jb-sondering (geostång 44 mm och krona 57 mm). Mätningen av pelarnas hållfasthet utfördes med spetskraftsmätning, med en traditionell vinge för pelarsondering (500x15 mm) som det ryms en CPT-spets inuti, se Figur 4-9. För två av pelarna (C100 % och  $250 \text{ kg/m}^3$ ) var sonderingsmotståndet så högt att det inte var möjligt att trycka ned 500 x15 mm vingen. Istället utfördes en sondering med en 200x20 mm vinge med ”vanlig” registrering av tryckkraften (totalkraftsmätning).

Resultatet från pelarsonderingarna redovisas i Bilaga 2 till 11 där dubbelprov redovisas i samma diagram. För att räkna om de erhållna sonderingsresultaten från nettokraft mätt i kN till skjuvhållfasthet (kPa) används ekvationen, Larsson (2006):

$$\tau_{fu} = 0,1 \cdot \frac{\text{Nettokraft}}{A_{vinge}}$$

Den effektiva arean för de två använda vingarna har beräknats till  $A_{500} = 0,00675 \text{ m}^2$  och  $A_{200} = 0,003 \text{ m}^2$ , med hänsyn tagen till förborrningen. Detta innebär t.ex. att för vingen 500x15 mm motsvarar 10 kN i nettokraft 148 kPa i skjuvhållfasthet.



**Figur 4-7.** Överytan på installerade pelare. Före kontrollsonderingen schaktades pelarna fram, ca 0,5 m jord togs bort.

Vid pelarsonderingar användes en borrhandsvagn (Geotech 604D) från Tyréns i Sundsvall, se Figur 4-8. På samma bild syns även den 14 ton tunga grävmaskinen som användes dels som mothåll och dels för framschaktning av pelare.



**Figur 4-8.** Pelarsondering.



**Figur 4-9.** Närbild av pelarsond (500x15 mm), som användes för kontroll av pelarens hållfasthet.

#### 4.5 Framgrävning av pelare

Efter 90-dygns sonderingarna gjordes en framgrävning av några pelare för att studera strukturen och homogeniteten hos pelarna. Nedan redovisas bilder och beskrivande text från detta försök.

##### Pelare E8 och E9

Dessa pelare var tillverkade med bindemedlet cement/Merit i proportionerna 30/70 och med mängden  $150 \text{ kg/m}^3$ . Vid installation tillämpades stigningen 10 mm/varv och rotationshastigheten 200 varv/min. För resultat från spetskraftsmätning av aktuell pelare se Bilaga 9.

Båda pelarna uppvisade en hård och homogen yta, dvs. efter nedschaktning 0,5 m under markytan. Pelare E8 var relativt bra ett par meter ner, på pelarens mantelyta syntes en blåaktig ring. Den andre pelaren, E9 var fin och homogen i den siltiga leran, de översta 2 – 3 m av pelaren (Figur 4-10). Därefter kommer pelarna ner till den svartare sulfidjorden på 3 – 3,5 m djup, där framträdde pelarna först bra och ser ut att vara i fint skick. Därpå var det svårt att urskilja någon pelarstruktur mot djupet, se Figur 4-11 Pelarna upplevdes vara ”sporadiska” på detta djup och bestå av enskilda och hårda klumpar. Bindemedlet (cement/merit) syntes som ”grusstråk”. Schakten avbröts på ca 3,5 – 4 m djup pga att stora jordvolymmer började rasa in i gropen. Sammanfattningsvis upplevdes inte någon homogen pelare i sulfidjorden. Det som syntes var hårda enskilda klumpar och delvis grus- och sandstråk. I den siltig leran överst i jordprofilen var pelaren mycket hård och helt homogen ungefär som dålig betong.



Figur 4-10. Pelare E9 nedschaktad fram till djup 2 – 3 m, pelarstrukturen syns tydligt.



**Figur 4-11. Pelare E9 framschaktad i sulfidjorden. Det är svårt att urskilja någon pelare från 3 m djup och nedåt.**

### **Pelare A9**

Denna pelare var tillverkad med bindemedlet kalk/cement i proportionerna 50/50 och med mängden  $150 \text{ kg/m}^3$ . Vid installation tillämpades stigningen 10 mm/varv och rotationshastigheten 200 varv/min. För resultat från spetskraftsmätning se Bilaga 7 (OBS denna pelare provtrycktes inte, jämför med pelare A7 och A8).

Vid framgrävning av pelare A9 framkom en hård och homogen pelare de översta två metrarna. I en upptagen bit av pelaren från ca 3 m djup syntes bindemedlet (kalk/cement) tydligt och provet höll ihop bra i stora stycken, dock inte lika bra som i de översta två metrarna i den siltiga leran, se Figur 4-12. Därefter mot djupet då jorden övergår till den svartare sulfidjorden framträdde pelaren fortfarande tydligt. När schaktdjupet började närma sig 4 m rasade gropen plötsligt igen och framgrävningen avbröts. Denna pelare upplevdes bättre än E8 ner i den svarta sulfidjorden.



**Figur 4-12. Pelare A9 på ca 3 m djup.**

Resultat från kontrollsonderingar har visat att pelare E8 och E9 är de som uppnått lägst hållfasthet av samtliga pelare i provfältet, som lägst knappt 60 kPa i skjuvhållfasthet vid 90 dygns sondering. Sonderingsresultaten visar dock att en hållfasthetsökning har skett i jorden även om det var svårt att urskilja någon pelarstruktur i sulfidjorden. I efterhand kan man konstatera att det hade varit önskvärt att schakta fram fler pelare. Av kostnadsskäl schaktades inte fler pelare fram och valet av pelare E8 och E9 (CM 30/70) och A9 (KC 50/50) grundade sig på att det var önskvärt att schakta fram en referenspelare (KC 50/50) samt minst ett av de ”nya” bindemedlen, vilket blev CM 30/70.

## 5 RESULTAT

Resultat från fältförsök avseende variation av hållfasthet med djupet mätt med förborrad pelarsondering med spetskraftsmätning med CPT-spets redovisas i Bilaga 2 till Bilaga 11. I vissa av bilagorna redovisas även resultat från laboratorieresultat omräknade från tryckhållfasthet från enaxliga tryckförsök till skjuvhållfasthet, så att en jämförelse kan göras mellan laboratorie- och fältresultat.

### 5.1 Resultat från laborieförsök

Resultaten från laborieförsöken visar:

- Karakterisering enligt Mácsik (2000) ger att Typ 1 jorden (se Tabell 3-2) är svårast att stabilisera (w, Fe/S-kvot, redox potential, pH, spec. konduktivitet ingår i karakteriseringen).
- Stjärndiagram i Bilaga 15 visar att redox potential, pH, spec. konduktivitet men även det organiska innehållet i jorden kan ha stor betydelse för stabiliseringseffekten.
- Godtagbar förstärkningseffekt kan uppnås, men mer bindemedel krävs i sulfidjord jämfört med annan lera.
- Bindemedel CM 70/30 och C100 gav högst tryckhållfasthet i den mest problematiska jorden.

### 5.2 Resultat från fältförsök

För att få en överblick av fältresultaten så visas en sammanställning av medelskjuvhållfastheterna på ett visst djup i Tabell 5.1. I Bilaga 2-11 redovisas erhållen spetskraft från pelarsonderingarna (dubbelprovning) och dessa ger en bättre detaljeringsgrad.

De parametrar som varierat i fält är typ av bindemedel, bindemedelsmängd, inblandningsarbete (här mätt som stigningshastighet) och härdningstid.

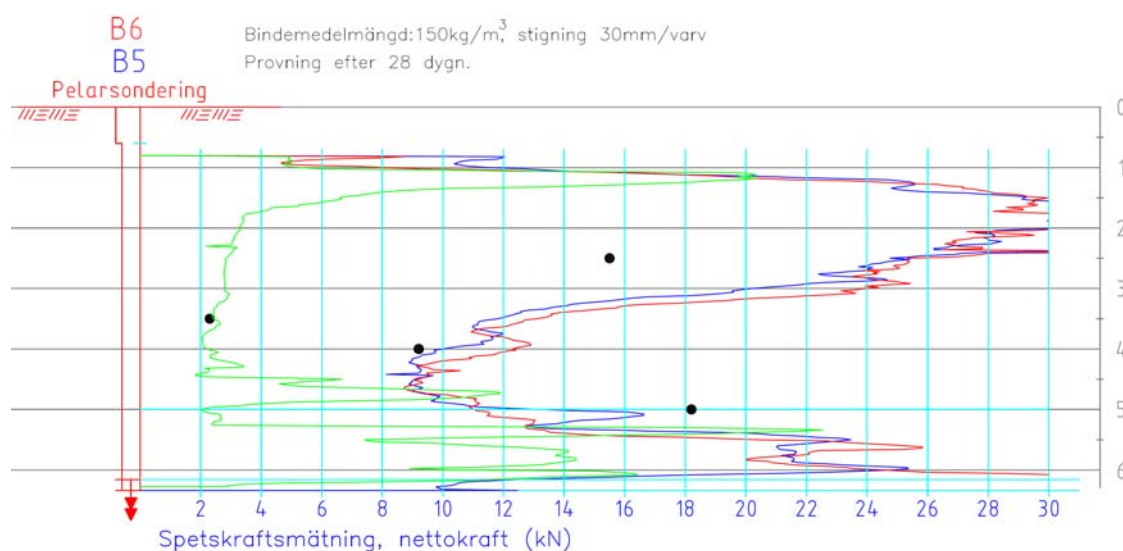
En jämförelse har utförts för pelarsondering i naturlig jord och i stabiliserad jord, se Figur 5-1 och Figur 5-2, sonderingarnas läge redovisas i Bilaga 1. En tydlig stabiliseringseffekt går att urskilja.

Tabell 5-1. Medelskjuvhållfasthet vid pelarsondering, ett medelvärde för två sonderingar.

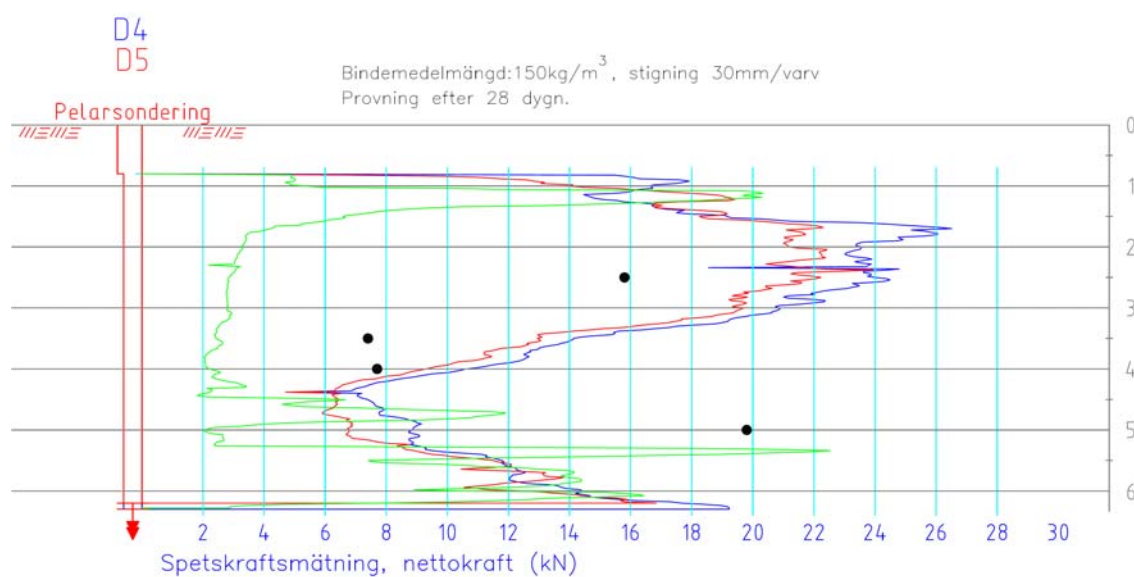
Bindemedel	Mängd	Tidpunkt för prov- ning	Stigning	Medel skjuv- hållfasthet på ett visst djup	Djupet för den i kolumnen bred- vid angivna skjuvhållfastheten
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[dygn]	[mm/varv]	[kPa]	[m.u.m.y]
KC 50/50	250	28	10	190	4,4-4,7
”	”	”	20	150	4,3-4,8
”	150	”	10	130	4,1-4,7
”	”	”	30	135	4,1-4,7
”	”	90	10	165	4,2-5,0
”	”	”	30	165	4,7-4,9
KCG 33/33/33	250	28	10	120	4,2-5,0
”	”	”	20	120	4,2-4,4
”	150	”	10	85	4,4-4,9
”	”	”	30	105	4,2-5,1
”	”	90	10	120	4,3-5,5
”	”	”	30	135	4,4-4,7
CM 30/70	250	28	10	250 <sup>1</sup>	3,7-4,6
”	”	”	20	205	4,0-4,7
”	150	”	10	105 <sup>1</sup>	4,3-4,8
”	”	”	30	105	3,4-4,7
”	”	90	10	90	2,8-4,6
”	”	”	30	90	3,9-4,2
C	250	28	10	190	3,3-4,8
”	”	”	20	430	2,9-4,2
”	150	”	10	120	3,5-4,6
”	”	”	30	90	4,0-4,7
”	”	90	10	145	4,0-4,3
”	”	”	30	130	3,3-4,6
C + Vatten	250	28	10	150 <sup>2</sup>	2,7
”	”	”	30	105	2,0-2,7
”	150	”	10	240	3,2-4,7
”	”	”	30	120	1,7-3,3
”	”	90	10	200	2,7-3,2
”	”	”	30	140	3,2-3,9

<sup>1</sup> Stor spridning<sup>2</sup> Endast ett värde



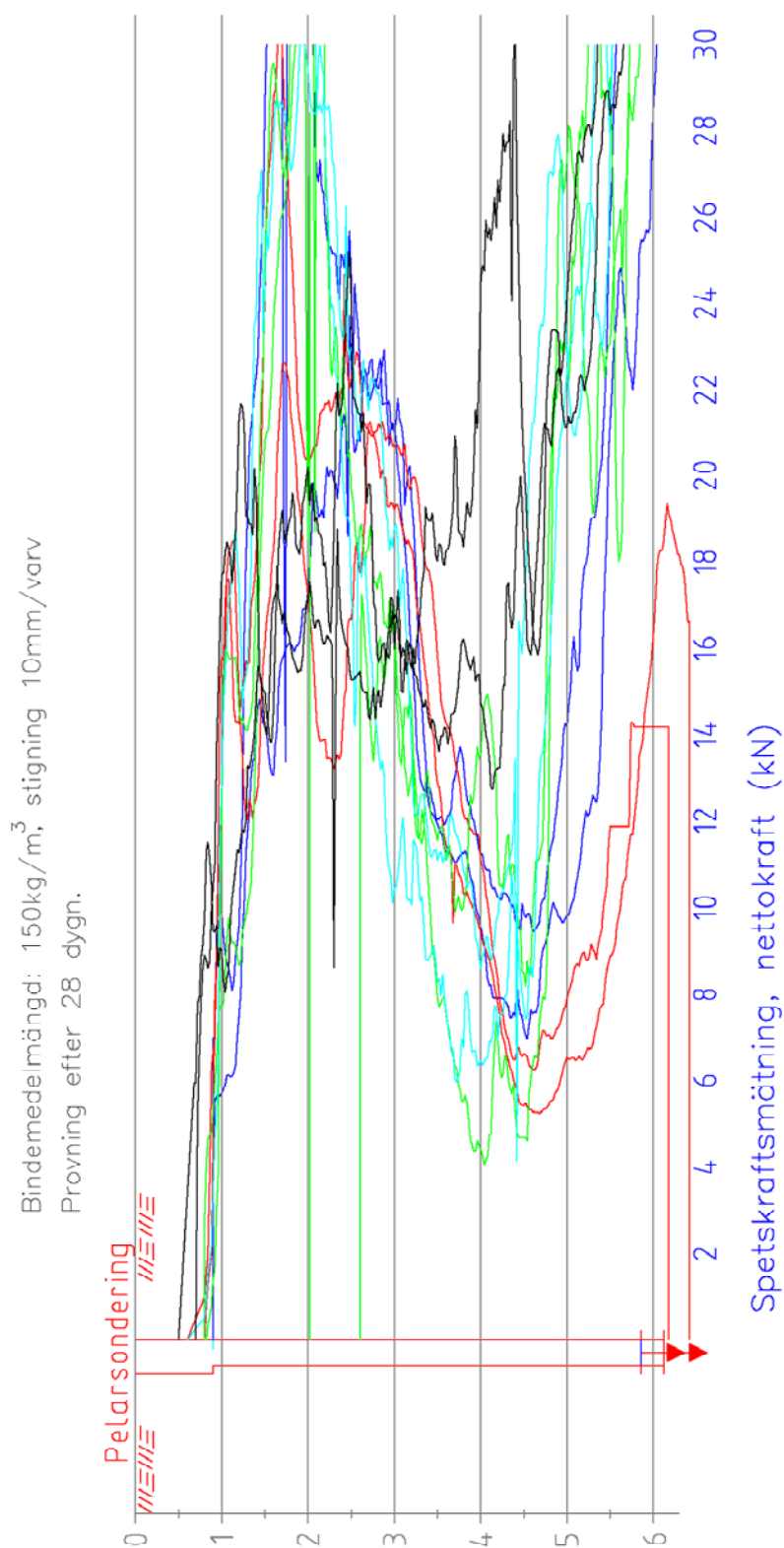


**Figur 5-1.** Jämförelse mellan pelarsounding i naturlig jord (grön linje) och stabiliserad sulfidjord (KC 50/50 röd och blå linje, dubbel sounding). Grön linje är referenssounding C55, se Bilaga 13. Svarta punkter är laboratorieresultat, ett medelvärde för dubbelprov.

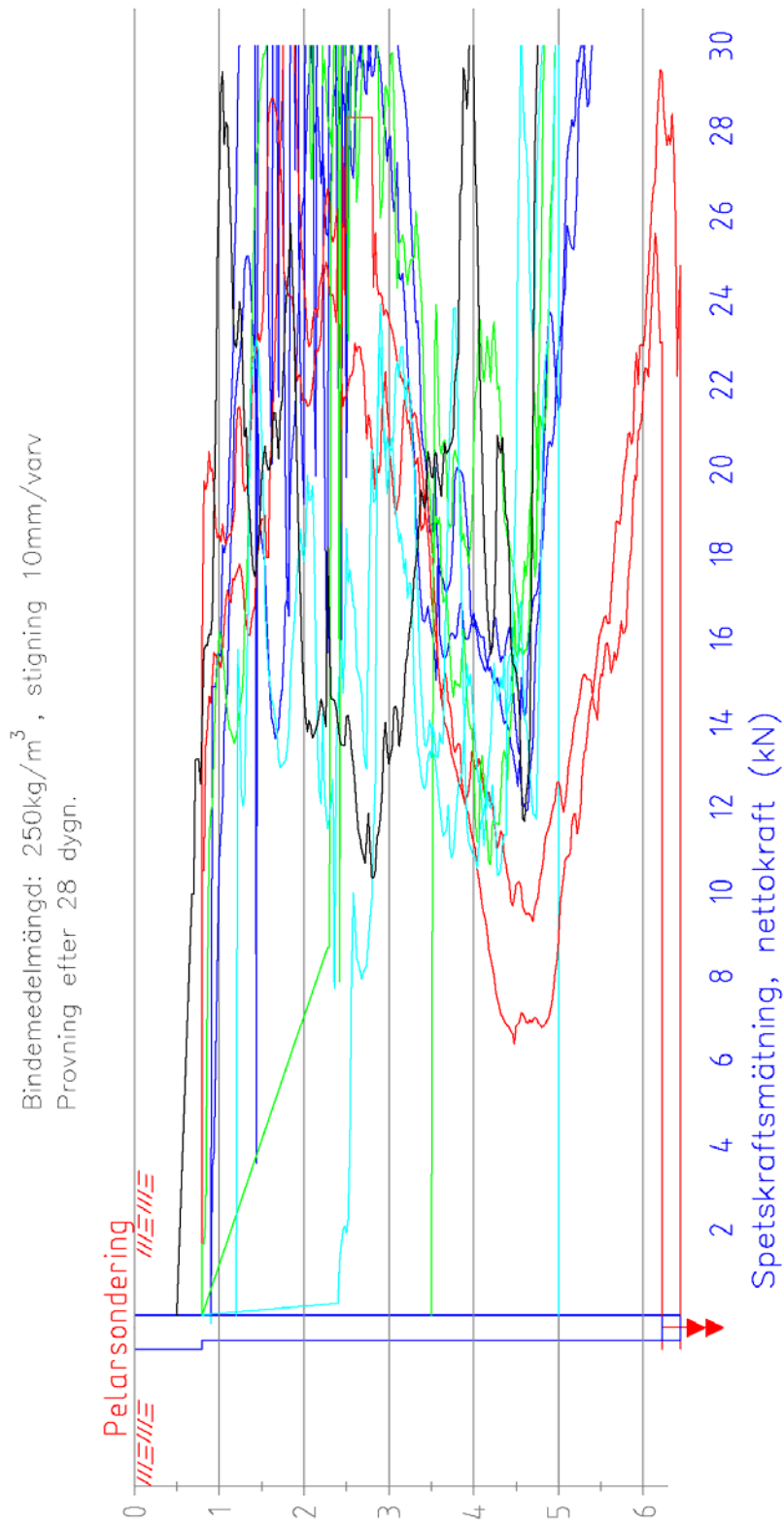


**Figur 5-2.** Jämförelse mellan pelarsounding i naturlig jord (grön linje) och stabiliserad sulfidjord (KCG 33/33/33, röd och blå linje, dubbel sounding). Grön linje är referenssounding C55, se Bilaga 13. Svarta punkter är laboratorieresultat, ett medelvärde för dubbelprov.

För att se skillnaden mellan olika bindemedel har resultaten från pelarsoundingar placerats i ett och samma diagram, se Figur 5-3 och Figur 5-4. Diagrammen visar sounderingar utförda för samtliga bindemedel efter 28 dygns härdning med bindemedelsmängderna 150 respektive 250 kg/m<sup>3</sup> samt med stigningen 10 mm/varv.

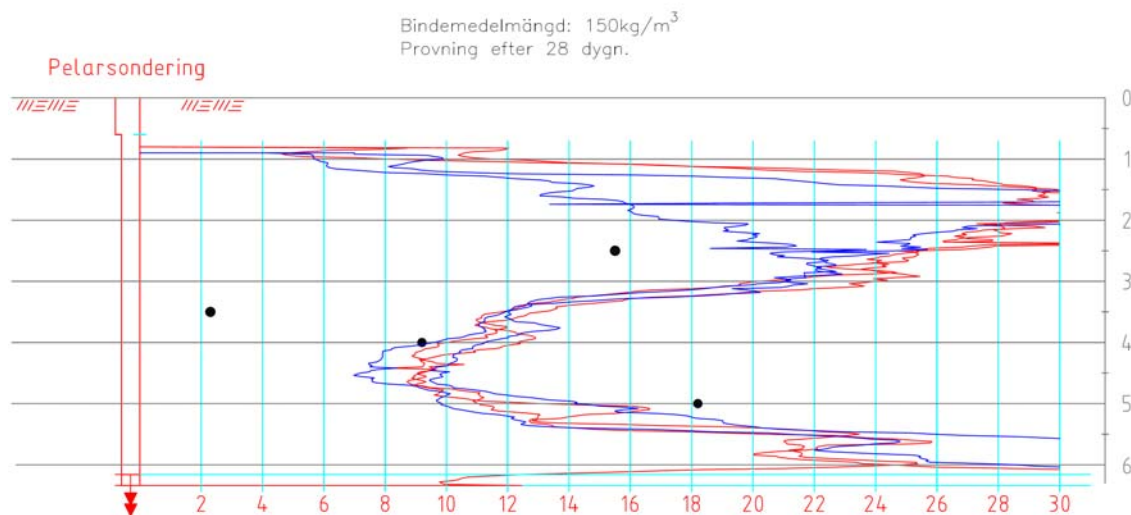


Figur 5-3. Jämförelse mellan olika bindemedel med mängden 150 kg/m<sup>3</sup>, stigning 10mm/varv och provning efter 28 dygn.  
Blå=KC50/50, röd=KCG 33/33/33, grön=CM 30/70, Turkos=C, svart=C+vatten.

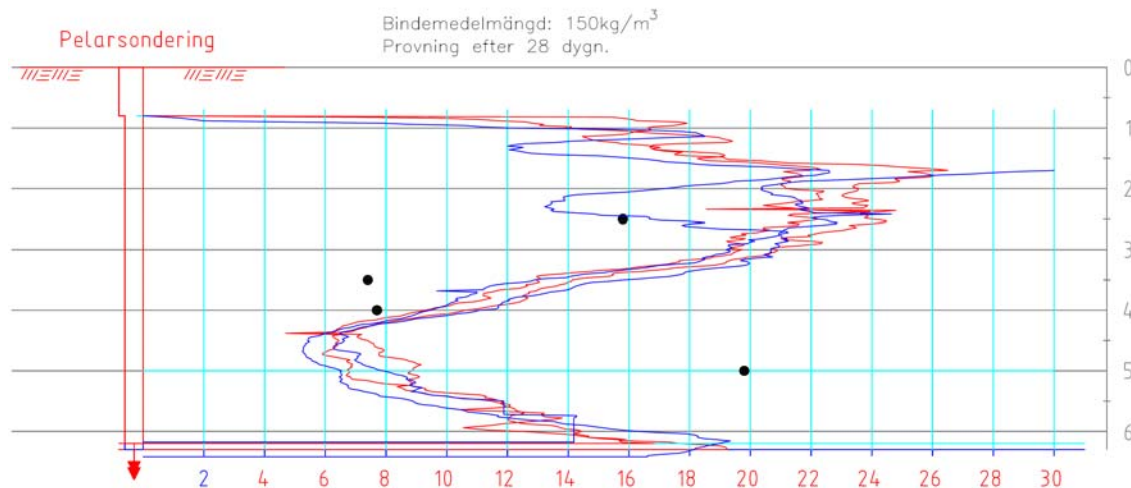


Figur 5-4. Jämförelse mellan olika bindemedel med mängden 250 kg/m<sup>3</sup>, stigning 10mm/varv och provning efter 28 dygn.  
Blå=KC50/50, röd=KCG 33/33/33, grön=CM 30/70, Turkos=C, svart=C+vatten.

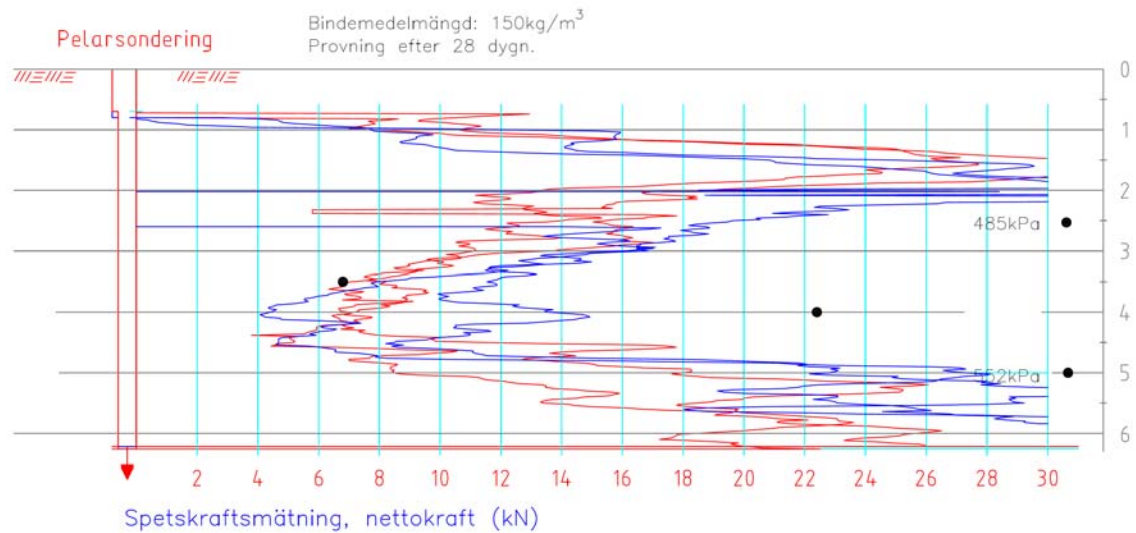
I Figur 5-5 till Figur 5-9 görs en jämförelse mellan olika stigningshastigheter för respektive bindemedel med mängden  $150 \text{ kg/m}^3$  och provningstiden 28 dygn. Pelarsonderingarna visar att det är svårt att påvisa att någon av stigningshastigheterna 10 eller 30 mm/varv skulle vara bättre än den andra för den torra metoden. Det finns dock små skillnader för bindemedel C och CM 30/70 där stigningen 10 mm/varv gett en något högre hållfasthet jämfört med stigningen 30 mm/varv. För pelarna med cement+vatten (MDM-bygel) däremot har stigningshastigheten 10 mm/varv gett ett bättre resultat jämfört med stigningen 30 mm/varv.



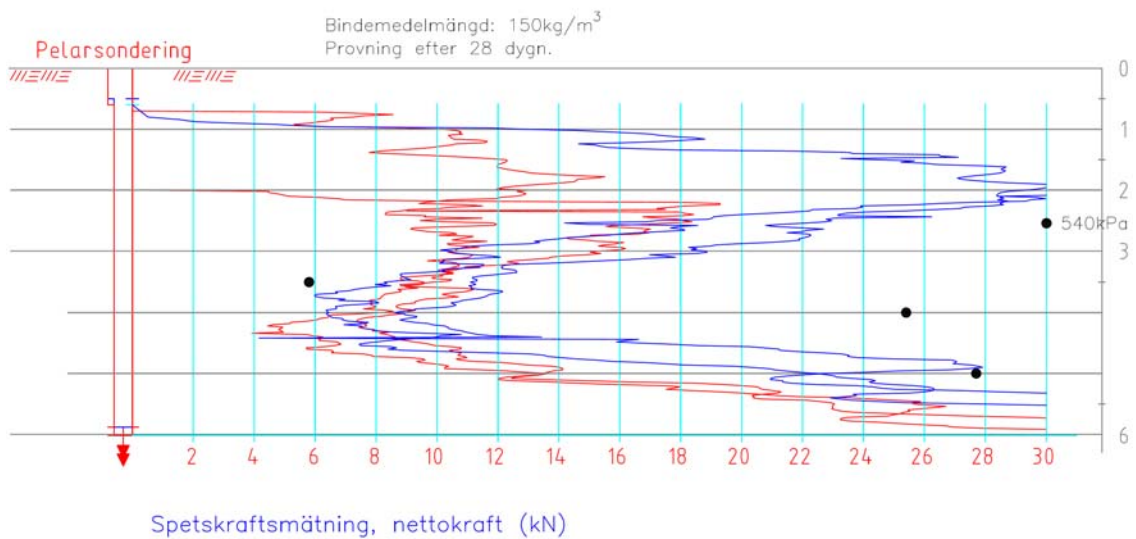
**Figur 5-5. Jämförelse mellan olika stigningshastigheter för bindemedel KC 50/50, blå = 10mm/varv och röd = 30mm/varv. Svarta punkter är laboratorieresultat, ett medelvärde för dubbelprov.**



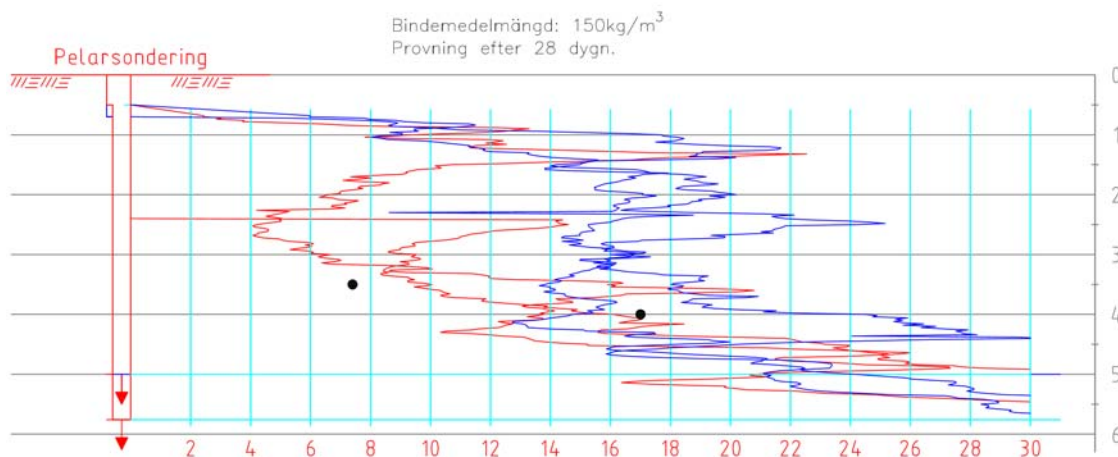
**Figur 5-6. Jämförelse mellan olika stigningshastigheter för bindemedel KCG 33/33/33, blå = 10mm/varv och röd = 30mm/varv. Svarta punkter är laboratorieresultat, ett medelvärde för dubbelprov.**



**Figur 5-7. Jämförelse mellan olika stigningshastigheter för bindemedel CM 30/70, blå = 10mm/varv och röd = 30mm/varv. Svarta punkter är laboratorieresultat, ett medelvärde för dubbelprov.**



**Figur 5-8. Jämförelse mellan olika stigningshastigheter för bindemedel C, blå = 10mm/varv och röd = 30mm/varv. Svarta punkter är laboratorieresultat, ett medelvärde för dubbelprov.**



**Figur 5-9. Jämförelse mellan olika stigningshastigheter för bindemedel C+vatten (MDM), blå = 10mm/varv och röd = 30mm/varv. Svarta punkter är laboratorieresultat, ett medelvärde för dubbelprov.**

Resultaten från försöken visar:

#### Generellt:

- Förborrad pelarsondering med spetskraftsmätning med CPT-spets visar repeterbara resultat, vilket innebär att metoden kan antas väl spegla hållfasthetsvariationen i pelarna.
- Skjuvhållfastheten i pelarna följer i princip den naturliga lerans variation i skjuvhållfasthet mot djupet.
- Hållfasthetsökning mellan 28 och 90 dygn uppskattas grovt till ca 20 %, för flertalet av pelarna bedöms merparten av hållfastheten har uppnåtts efter 28 dygn.
- Uppgrävning av pelare visade på vissa problem med homogeniteten för några pelare.
- Överensstämmelse i resultat mellan laboratorie- och fältförsök är tämligen god för samtliga bindemedel, med undantag på 5 m djup.

#### Typ av bindemedel:

- Överlag tämligen god förstärkningseffekt med flertalet bindemedel.
- Tydlig ökning (ca 20 %) av förstärkningseffekt i skiktet med problemjord mellan 28 och 90 dygn med bindemedel KC, KCG och C.
- Bäst förstärkningseffekt i fält med bindemedelsmängden 150 kg/m<sup>3</sup> i skiktet med problemjord erhöles i pelare med C+ vatten (MDM-bygel) och låg stigning.
- Lägst uppmätta förstärkningseffekt i fält blev det i pelarna med bindemedel CM 30/70 och mängden 150 kg/m<sup>3</sup>. Dessa pelare uppvisade också relativt stor spridning i resultaten.
- För bindemedel KC 50/50 var fältresultaten betydligt bättre jämfört med inblandningsförsöken i laboratorium.

#### Bindemedelsmängd:

- Bindemedelsmängden 250 kg/m<sup>3</sup> ger en högre hållfasthet än 150 kg/m<sup>3</sup>, men för de flesta bindemedlen ger 150 kg/m<sup>3</sup> en godtagbar förstärkningseffekt.
- Med 150 kg/m<sup>3</sup> erhålls ca 3-5 ggr högre sonderingsmotstånd i pelare än naturlig jord beroende på bindemedelstyp. Med 250 kg/m<sup>3</sup> är stabiliseringseffekten högre än 4.
- Det är större variationer mellan olika bindemedel vid mängden 250 kg/m<sup>3</sup> än vid 150 kg/m<sup>3</sup> vilket möjligen kan bero på större svårighet att blanda vissa bindemedel i så stora mängder.
- För C och CM 30/70 är skillnaden i hållfastheten större mellan mängden 250 kg/m<sup>3</sup> och 150 kg/m<sup>3</sup> jämfört med övriga bindemedel.

**Stigningshastighet:**

- Stigningshastighet 30 mm/varv var i många fall svår att uppnå för bindemedelsmängden 250 kg/m<sup>3</sup>.
- Generellt är det ingen större skillnad avseende stigningshastigheterna 10 och 30 mm/varv med den torra metoden. Små skillnader erhöles dock för bindemedel C och CM 30/70 där stigningen 10 mm/varv gav en något högre hållfasthet jämfört med stigningen 30 mm/varv.
- För pelare med C+vatten (MDM-bygel) har stigningen stor betydelse och låg stigning gav bättre resultat.

## 6 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Några av de slutsatser som kan dras från projektet är:

- Hållfastheten som uppnåtts i fält visar på att djupstabilisering i sulfidjord är en möjlig metod för väg- och järnvägsbyggnation. Undersökningar i både laboratorium och fält är dock nödvändiga.
- Uppgrävning av pelare visade på problem med homogeniteten för vissa pelare och det är därför viktigt att utföra provpelare för undersökning av hållfastheten i fält, gärna med framshaktning av pelare.
- Hållfasthetsökning mellan 28 och 90 dygn uppskattas grovt till 20 %, dvs. merparten av hållfastheten har uppnåtts efter 28 dygn.
- Bindemedelmängden 250 kg/m<sup>3</sup> ger en högre hållfasthet än 150 kg/m<sup>3</sup>, men för de flesta bindemedlen ger 150 kg/m<sup>3</sup> en godtagbar förstärkningseffekt.
- För C och CM 30/70 är skillnaden i hållfasthet större mellan mängden 250 kg/m<sup>3</sup> och 150 kg/m<sup>3</sup> jämfört med övriga bindemedel.
- Generellt är det ingen större skillnad avseende stigningshastigheterna 10 och 30 mm/varv med den torra metoden. Små skillnader erhöles dock för bindemedel C och CM 30/70 där stigningen 10 mm/varv gav en något högre hållfasthet jämfört med stigningen 30 mm/varv.
- För pelare med C+vatten (MDM-bygel) har stigningen stor betydelse och låg stigning gav bättre resultat.
- Pelarsonderingar med spetskraftsmätning visar repeterbara resultat och det är lämpligt att utföra mätningarna på det sättet.
- Kemiska parametrar hos den naturliga jorden bör undersökas.

Hållfastheten som uppnåtts i fält visar att djupstabilisering i sulfidjord är en möjlig metod för väg- och järnvägsbyggnation. Jordprofiler med sulfidjord är ofta skiktade med jordlager som har varierande egenskaper och erfordrar noggranna undersökningar. Standardrecept som används för vanlig lera bör inte användas, utan större mängd och olika typer av bindemedel bör provas. Överensstämmelse i resultat mellan laboratorie- och fältförsök var tämligen god. Inblandningsförsök bör utföras på laboratorium för att få en uppfattning om möjligheterna att stabilisera sulfidjorden. Preliminär dimensionering kan utföras utifrån laboratorieresultat, men slutligt val av bindemedel och verifiering av utförande ska ske med provpelare i fält. Homogeniteten bör undersökas genom framgrävning av pelare.

Karakterisering enligt Mácsik (2000) ger att Typ 1 jorden (se Tabell 3-2) är svårast att stabilisera (w, Fe/S-kvot, redox potential, pH, spec. konduktivitet ingår i karakteriseringen). Stjärndiagram i Bilaga 15 visar att redox potential, pH, spec. konduktivitet men även det organiska innehållet i jorden kan ha stor betydelse för stabiliseringseffekten. Det rekommenderas att dessa parametrar undersöks för att de ger en indikation på svårigheten att stabilisera även om karakteriseringen i sig är till för att bedöma försurningspotential.

Detta projekt utgörs endast av ett provområde. Det rekommenderas därför att vara försiktig vid projektering av pelare i sulfidjord. Fler uppföljningar krävs för att bygga upp mer erfarenhet och kunna dra mer generella slutsatser.

Beständigheten hos pelarna i sulfidjord bedöms inte påverkas så länge det inte kommer in syre. Det finns inget som talar för att någon förändring skulle ske, men för att verifiera detta borde platsen undersökas igen efter ca fem år för att se om någon förändring av hållfastheten har skett i pelarna.

I det här fallet har pinnborr och MDM-bygel använts och jämförelse har därför inte kunnat göras av mest lämpligt verktyg för inblandning i sulfidjord.



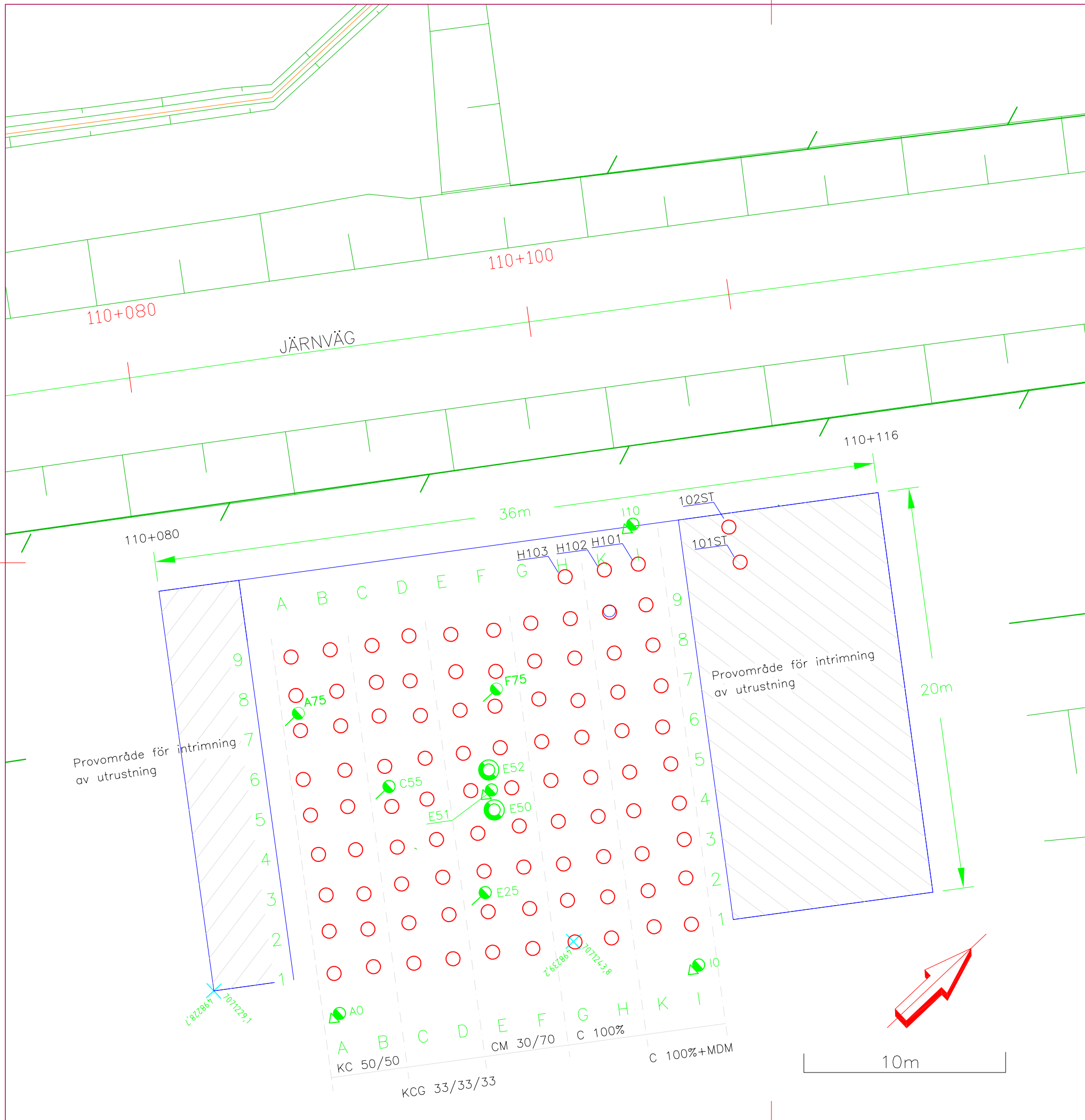
Kvarstående frågor som borde utredas ytterligare är bl a verifiering på fler platser för att kunna dra mer generella slutsatser, homogenitet, beständighet och val av verktyg.

## 7 REFERENSER

- Andersson, M. och Norrman, T. (2004).** Stabilisering av sulfidjord – en litteratur- och laboratoriestudie. Luleå tekniska universitet, Institutionen för Samhällsbyggnad, Avdelningen för Geoteknik. Examensarbete 2004:126, Luleå.
- Hansson, T., Rogbeck, Y. och Säfström, L. (2000).** Undersökning i fält av stabiliseringseffekt i organisk jord och lera. svensk Djupstabilisering, arbetsrapport 12.
- Håkansson K. (2002).** ”Förstudie av metoder för byggnationer på svavelhaltiga jordar – tekniska och miljömässiga aspekter”, SGI Dnr 1-0011-0754.
- Larsson, R., Nilson, G. och Rogbeck, J. (1985).** Bestämning av organisk halt, karbonathalt och sulfidhalt i jord. Statens geotekniska institut, Rapport 27. Linköping.
- Larsson, R., (2006).** Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserade pelare och massstabilisering. En vägledning. Svensk Djupstabilisering. Rapport 17. Linköping.
- Larsson, S. (2003).** Mixing Processes for ground improvement by deep mixing. Doktorsavhandling. Kungliga tekniska högskolan. Avdelningen för jord och bergmekanik. Stockholm.
- Mácsik, J. (2000).** Försurningspotential i sulfidjord–Metodutveckling/förstudie, Luleå tekniska universitet, Luleå.
- Mácsik, J. (2003).** Bedömning av sulfidjord - Stabiliseringseffekt vs typ av sulfidjord, internrapport, Scandiaconsult, Sundsvall.



# **Bilagor**



**INSTALLATION AV PELARE**

- Pelardimension  $\phi$  600 mm
- Pelarlängd 6 m eller ner till fast botten
- Verktyg Pinnborr och MDM - bygel
- Rotationshastighet 200 varv/min
- Stigning 10 mm/varv  
30 mm/varv (20mm/varv för torra metoden och 250kg/m<sup>3</sup>)
- Inblandningsmedel KC 50/50 (kalk/cement)  
KCG 33/33/33 (kalk/cement/gips)  
CM 30/70 (cement/Merit)  
C 100 % (cement)  
C 100% + vatten (MDM med cement)
- Inblandningsmängd 150 kg/m<sup>3</sup> = 42,4 kg/m, pelare  
250 kg/m<sup>3</sup> = 70,7 kg/m, pelare
- MDM Tillsats av vatten: 28,3 – 42,4 liter/m, pelare vilket motsvarar 100 - 150 liter/ m<sup>3</sup>, jord. Val av mängder sker efter utprovning i intrimningsområde.
- Installationsmönster Rutnät med c/c 2 m
- Intrimningspelare Fördela dessa jämt på ömse sidor om provområdet.
- Kontroll FKPS-sondering utförs efter 28 och 90 dygn på pelare med bindemedelsmängden 150 kg/m<sup>3</sup> samt efter 28 dygn på pelare med bindemedelsmängden 250 kg/m<sup>3</sup>. Totalt 40 st sonderingar efter 28 dygn respektive 20 st efter 90 dygn.

**Installationsplan**

Kolumn	Rad	Bindemedel	Bindemedelsmängd [kg/m, pelare]	Stigning [mm/varv]
A	1-3	KC 50/50	70,7	10
B	1-3	KC 50/50	70,7	20
A	4-9	KC 50/50	42,4	10
B	4-9	KC 50/50	42,4	30
C	1-3	KCG 33/33/33	70,7	10
D	1-3	KCG 33/33/33	70,7	20
C	4-9	KCG 33/33/33	42,4	10
D	4-9	KCG 33/33/33	42,4	30
E	1-3	CM 30/70	70,7	10
F	1-3	CM 30/70	70,7	20
E	4-9	CM 30/70	42,4	10
F	4-9	CM 30/70	42,4	30
G	1-3	C	70,7	10
H	1-3	C	70,7	20
G	4-9	C	42,4	10
H	4-9	C	42,4	30
I	1-3	C+vatten (MDM)	70,7	10
K	1-3	C+vatten (MDM)	70,7	30
I	4-9	C+vatten (MDM)	42,4	10
K	4-9	C+vatten (MDM)	42,4	30

BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN

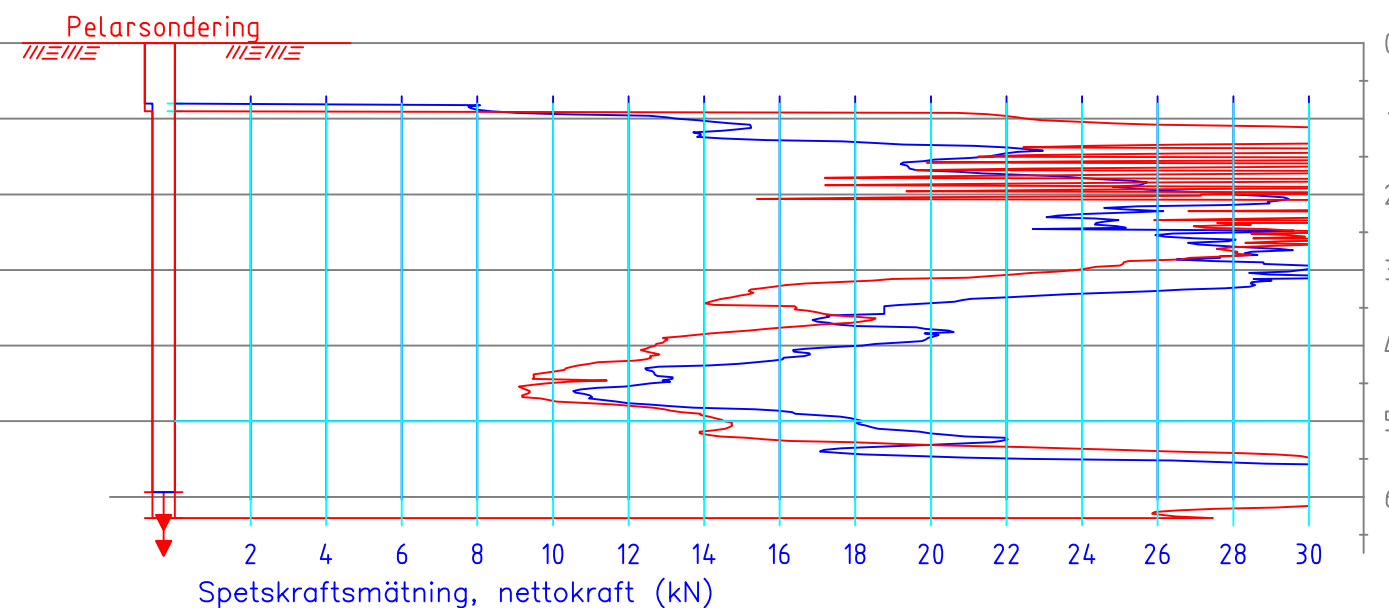
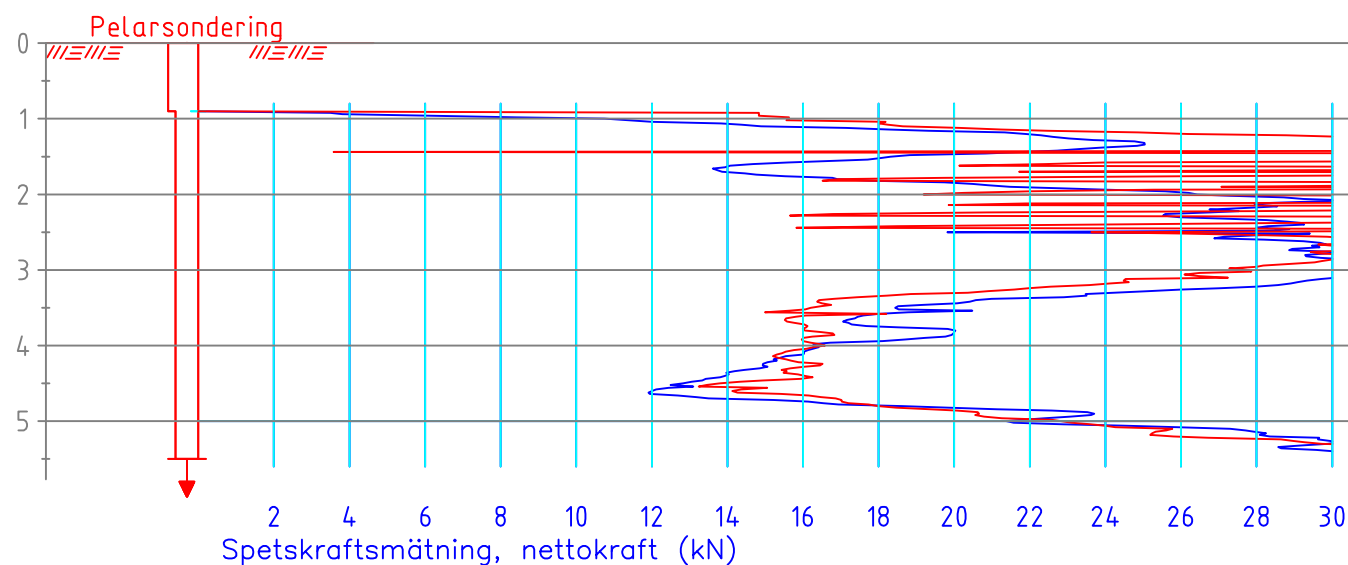


Statens geotekniska institut  
581 93 LINKÖPING Telefon:013-20 18 00 Telefax:013-20 19 14

UPPDRAG NR 11925	RITAD AV V.PUUSTINEN	BOTNIABANAN
DATUM 081110	HANDLÄGGARE M.ANDERSSON	STÖCKE-CENTALA UMEÅ KM 110+086-110+104
TEKNIKANSVARIG Y.ROGBECK	SKALA 1:200	NUMMER 1

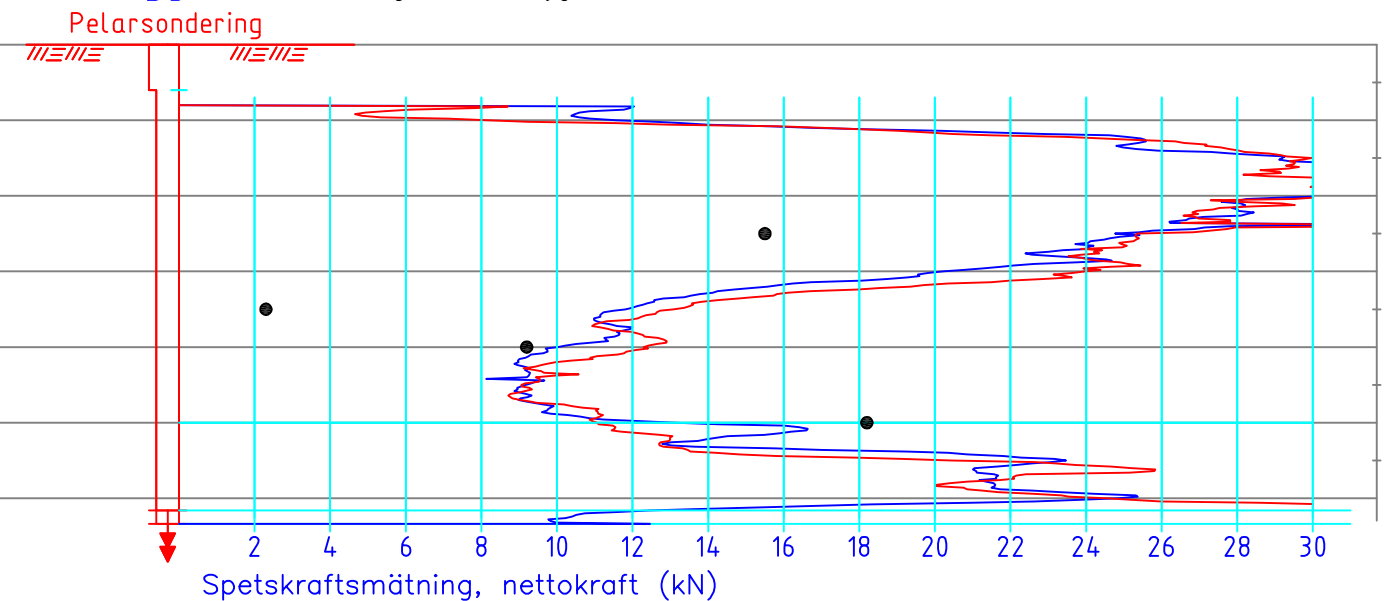
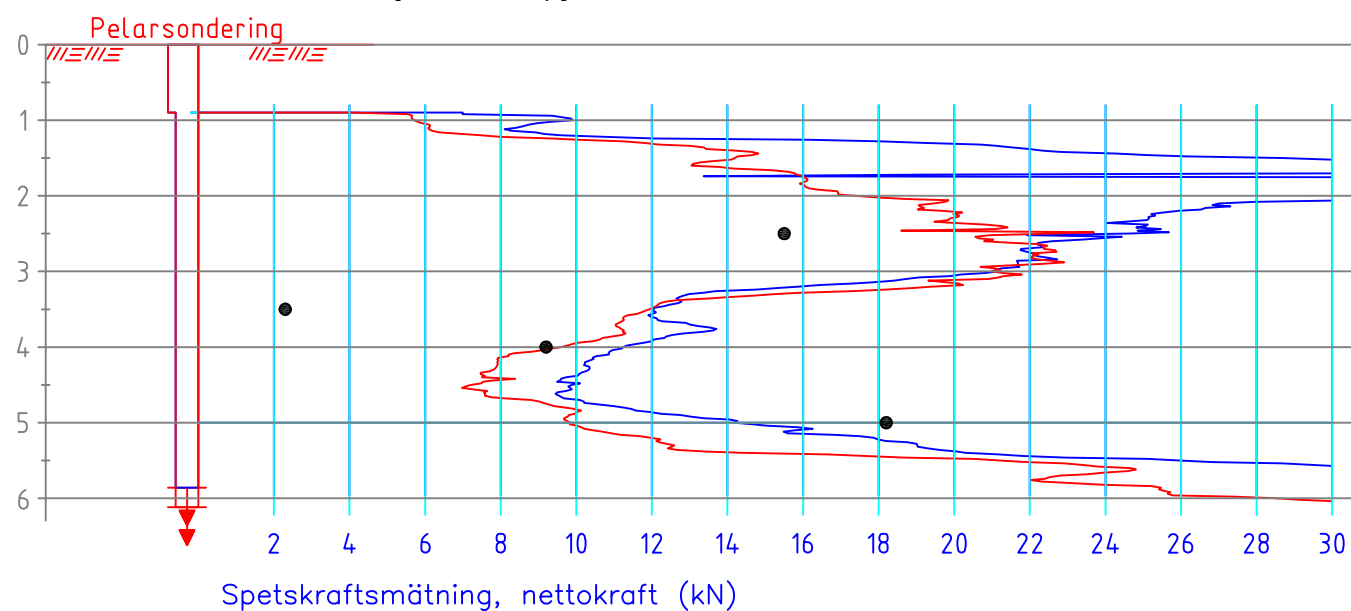
A2 Bindemedelmängd: 250kg/m<sup>3</sup>, stigning 10mm/varv  
 A3 Provning efter 28 dygn.

B1 Bindemedelmängd: 250kg/m<sup>3</sup>, stigning 20mm/varv  
 B2 Provning efter 28 dygn.



A4 Bindemedelmängd: 150kg/m<sup>3</sup>, stigning 10mm/varv  
 A5 Provning efter 28 dygn.

B6 Bindemedelmängd: 150kg/m<sup>3</sup>, stigning 30mm/varv  
 B5 Provning efter 28 dygn.



● Laboratorieinblandning, 10kN motsvarar 148 kPa i skjuvhållfasthet.

BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN



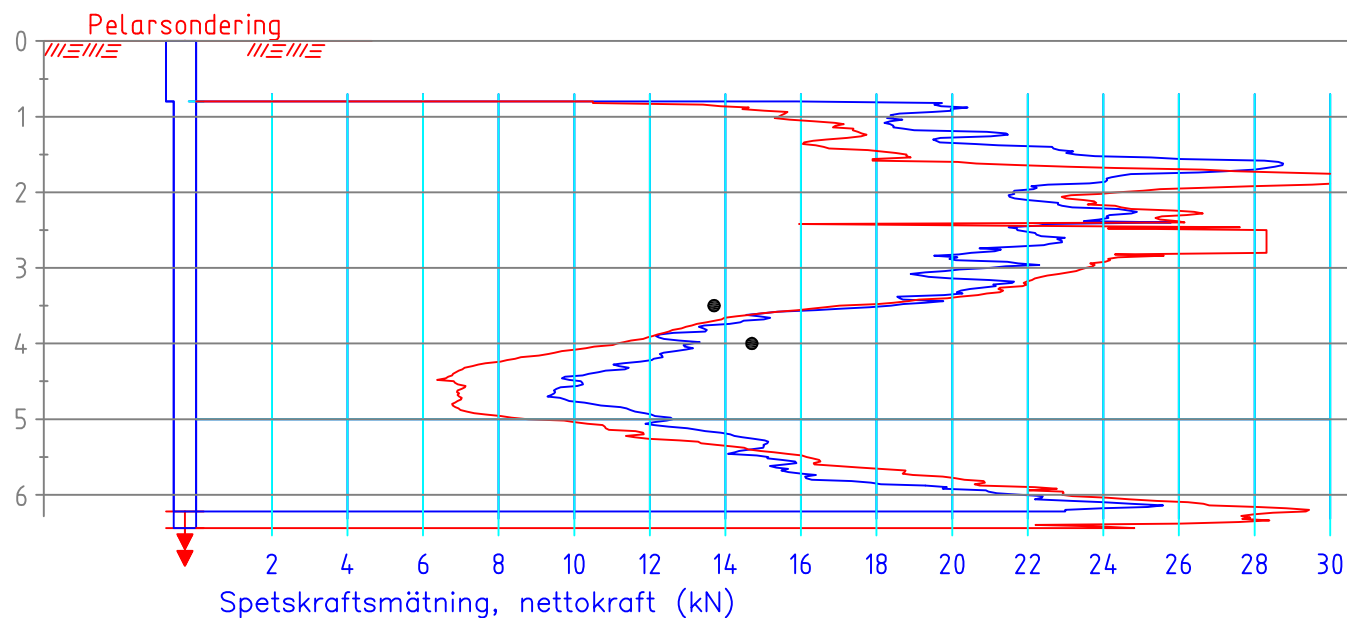
Statens geotekniska institut

581 93 LINKÖPING Telefon:013-20 18 00 Telefax:013-20 19 14

UPPDRAG NR 11925	RITAD AV V.PUUSTINEN	BOTNIABANAN STÖCKE-CENTRALA UMEÅ KM 110+086-110+104
DATUM 081110	HANDLÄGGARE M.ANDERSSON	DJUPSTABILISERING, KC 50/50 PELARSONDERING,(FKPS) vinge 500x15 mm
TEKNIKANSVARIG Y.ROGBECK	SKALA 1:100	NUMMER 2

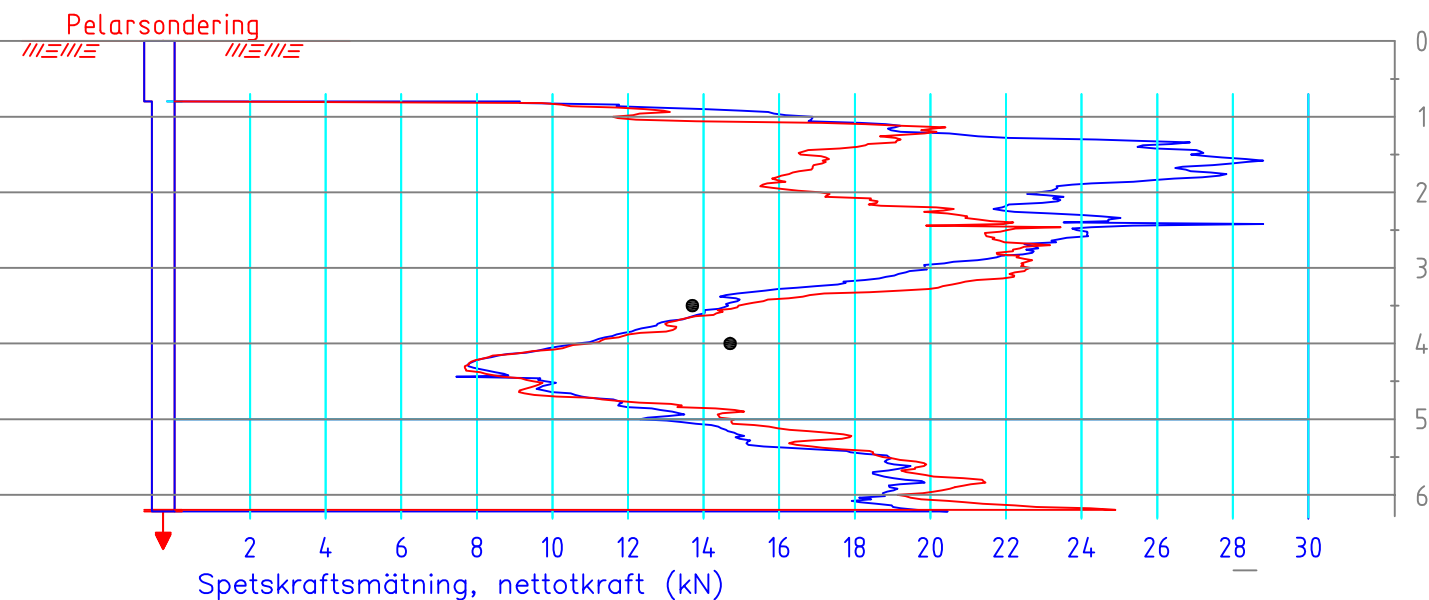
C2  
C3

Bindemedelmängd: 250kg/m<sup>3</sup>, stigning 10mm/varv  
Provning efter 28 dygn.



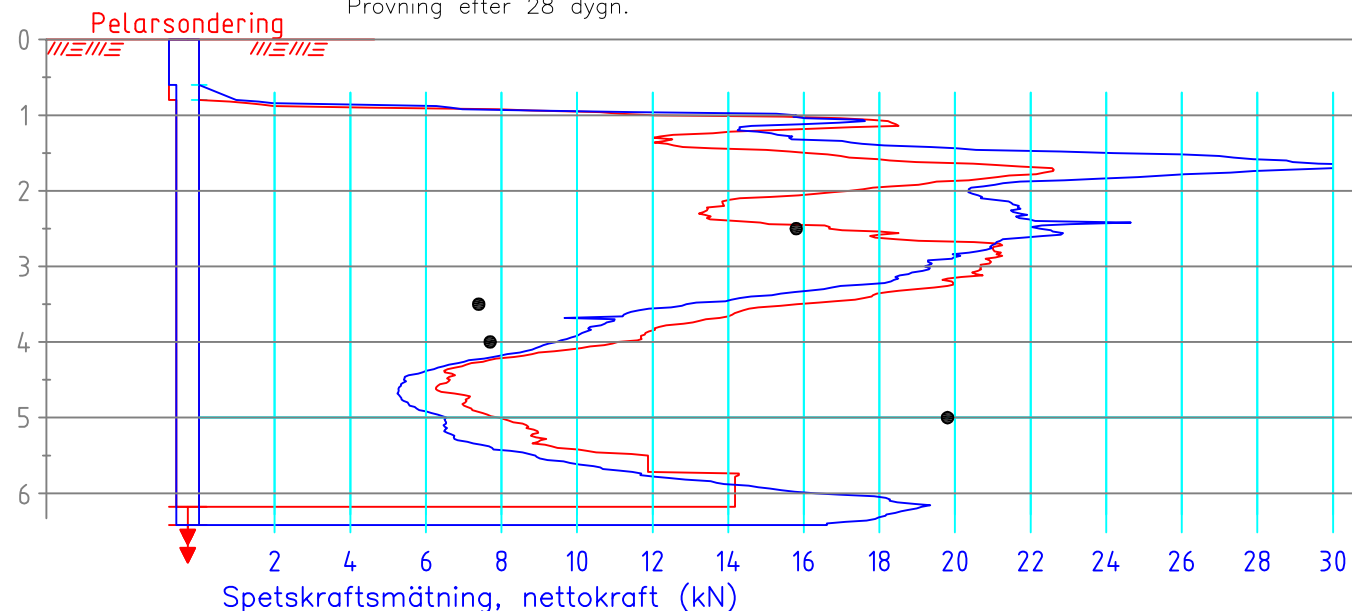
D2  
D3

Bindemedelmängd: 250kg/m<sup>3</sup>, stigning 20mm/varv  
Provning efter 28 dygn.



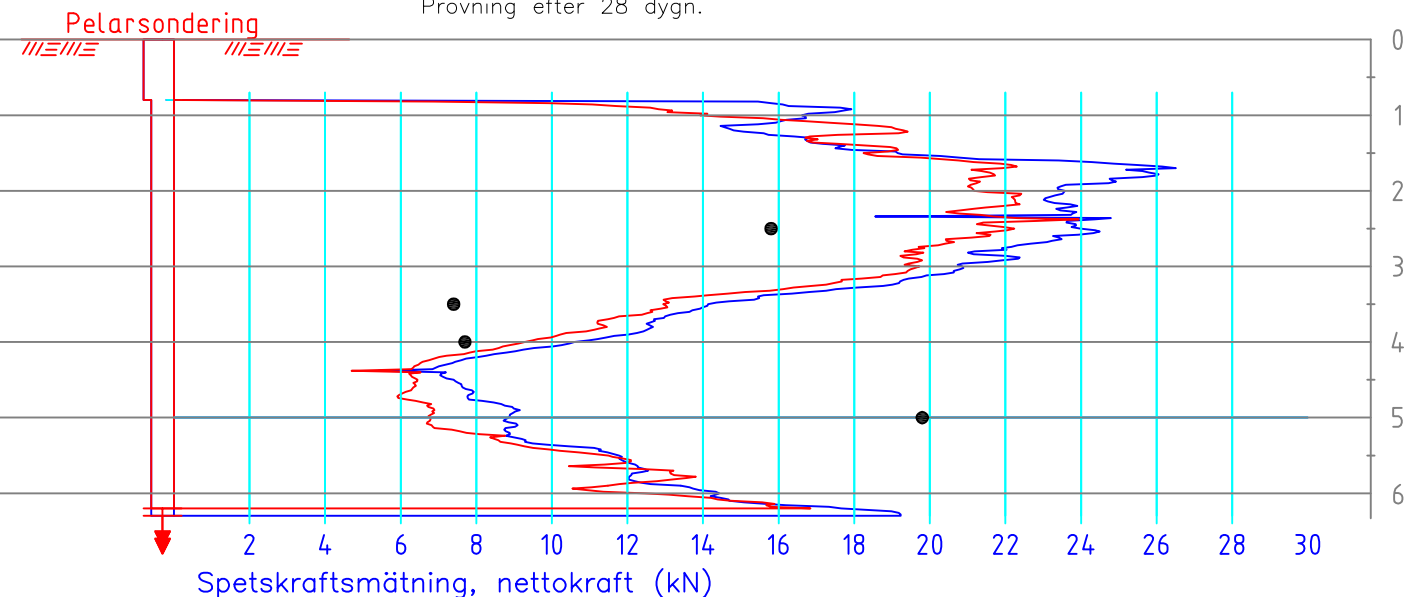
C6  
C5B

Bindemedelmängd: 150kg/m<sup>3</sup>, stigning 10mm/varv  
Provning efter 28 dygn.



D4  
D5

Bindemedelmängd: 150kg/m<sup>3</sup>, stigning 30mm/varv  
Provning efter 28 dygn.



● Laboratorieinblandning, 10kN motsvarar 148 kPa i skjuvhållfasthet.

BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN



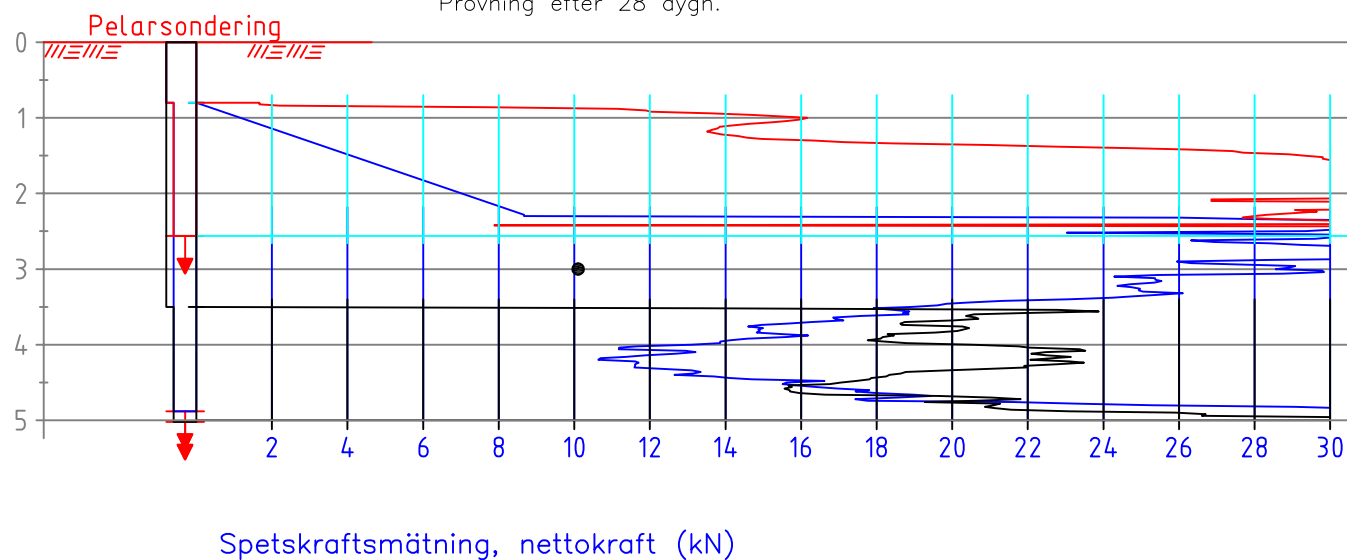
Statens geotekniska institut

581 93 LINKÖPING Telefon:013-20 18 00 Telefax:013-20 19 14

UPPDRAG NR	RITAD AV	BOTNIABANAN
11925	V.PUUSTINEN	STÖCKE-CENTRALA UMEÅ
DATUM	HANDLÄGGARE	KM 110+086-110+104
081110	M.ANDERSSON	DJUPSTABILISERING, KCG 33/33/33
TEKNIKANSVARIG	Y.ROGBECK	PELARSONDERING,(FKPS) vinge 500x15 mm
SKALA	NUMMER	BET
1:100	3	

E2  
E3A  
E3

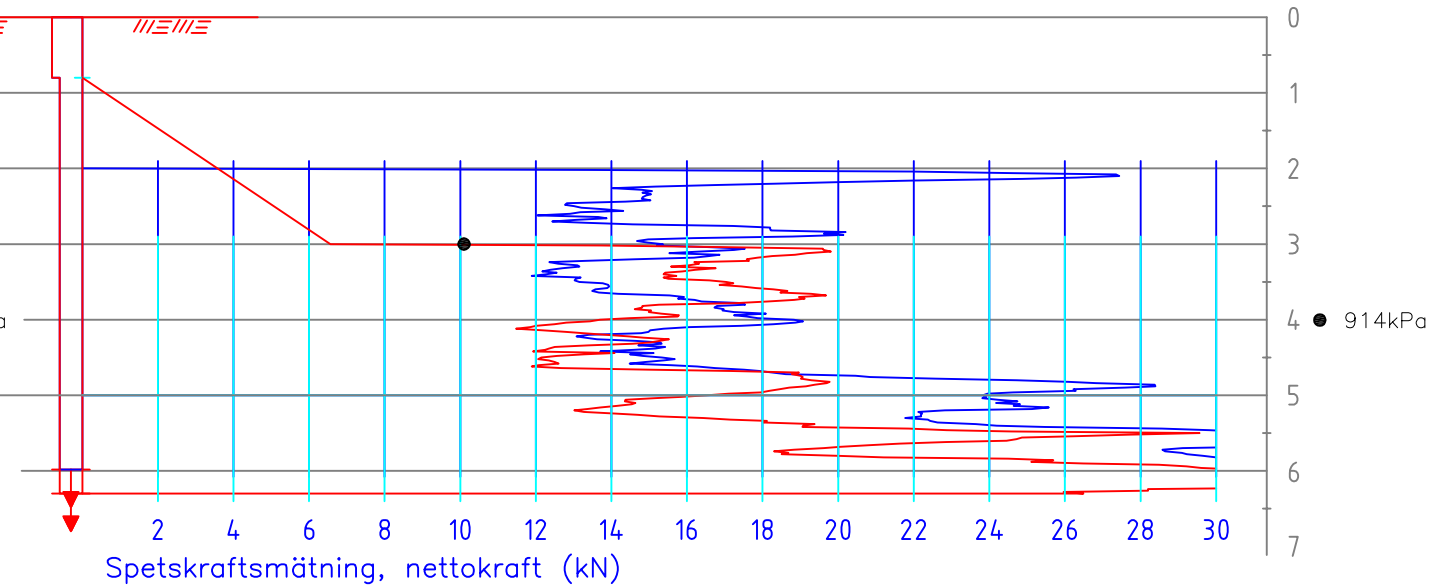
Bindemedelmängd: 250kg/m<sup>3</sup>, stigning 10mm/varv  
Provning efter 28 dygn.



F2  
F3

Bindemedelmängd: 250kg/m<sup>3</sup>, stigning 20mm/varv  
Provning efter 28 dygn.

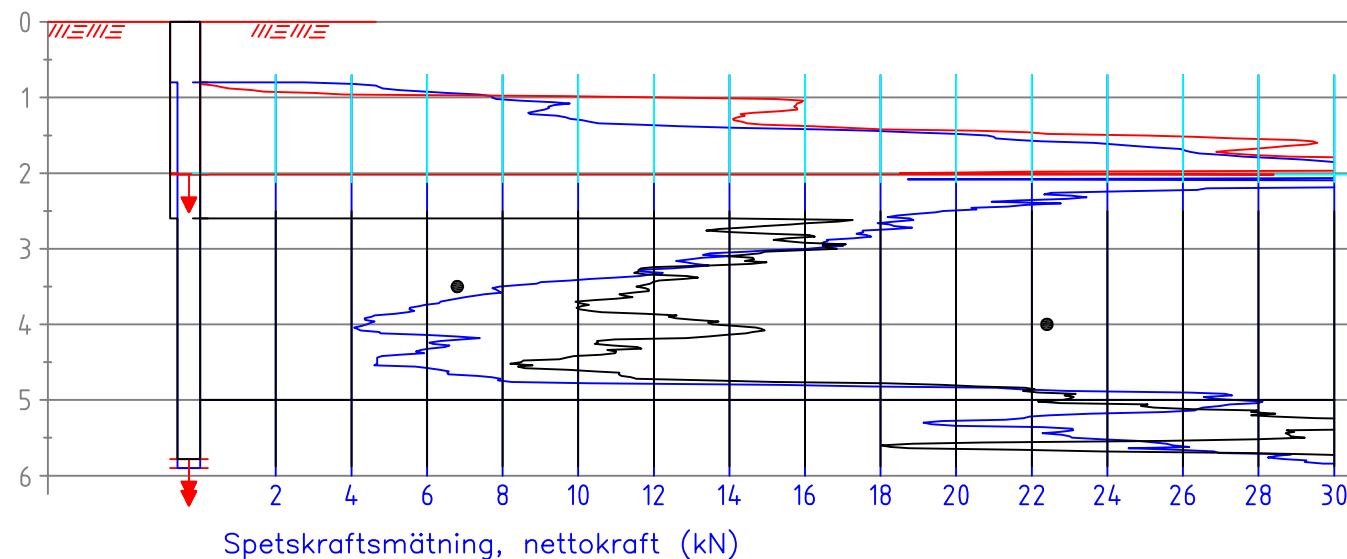
Pelarsöndering



E6A  
E6  
E5

Bindemedelmängd: 150kg/m<sup>3</sup>, stigning 10mm/varv  
Provning efter 28 dygn.

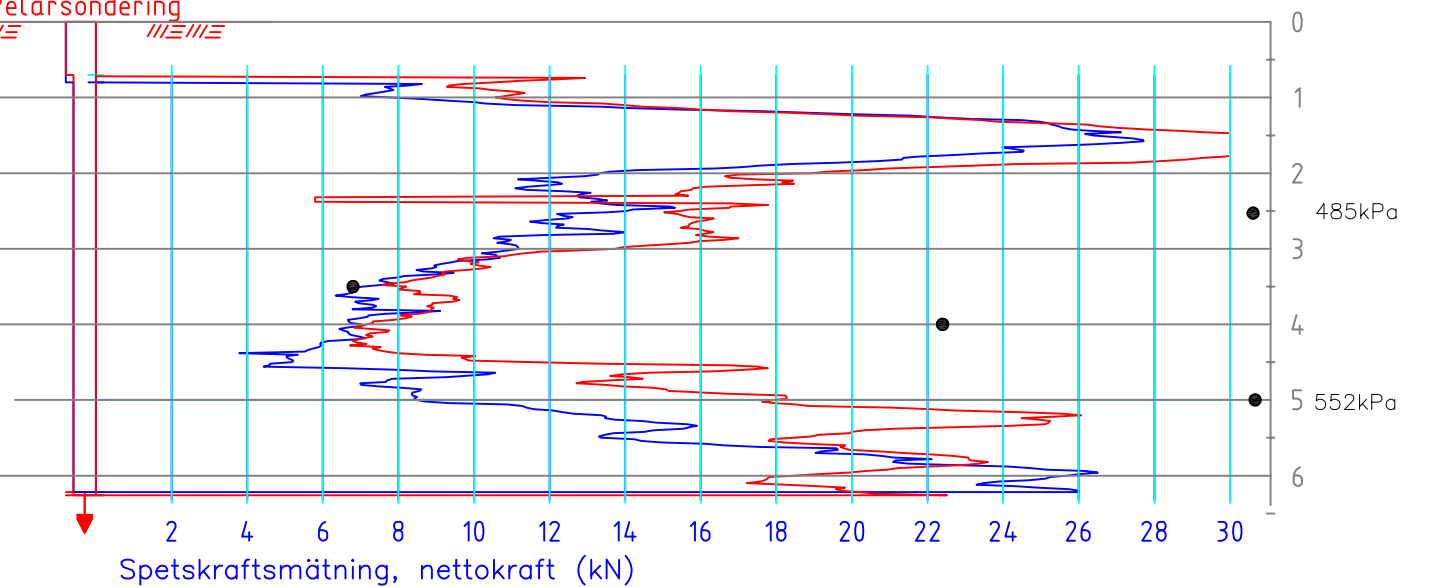
Pelarsöndering



F4  
F5

Bindemedelmängd 150kg/m<sup>3</sup>, stigning 30mm/varv  
Provning efter 28 dygn.

Pelarsöndering



BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN

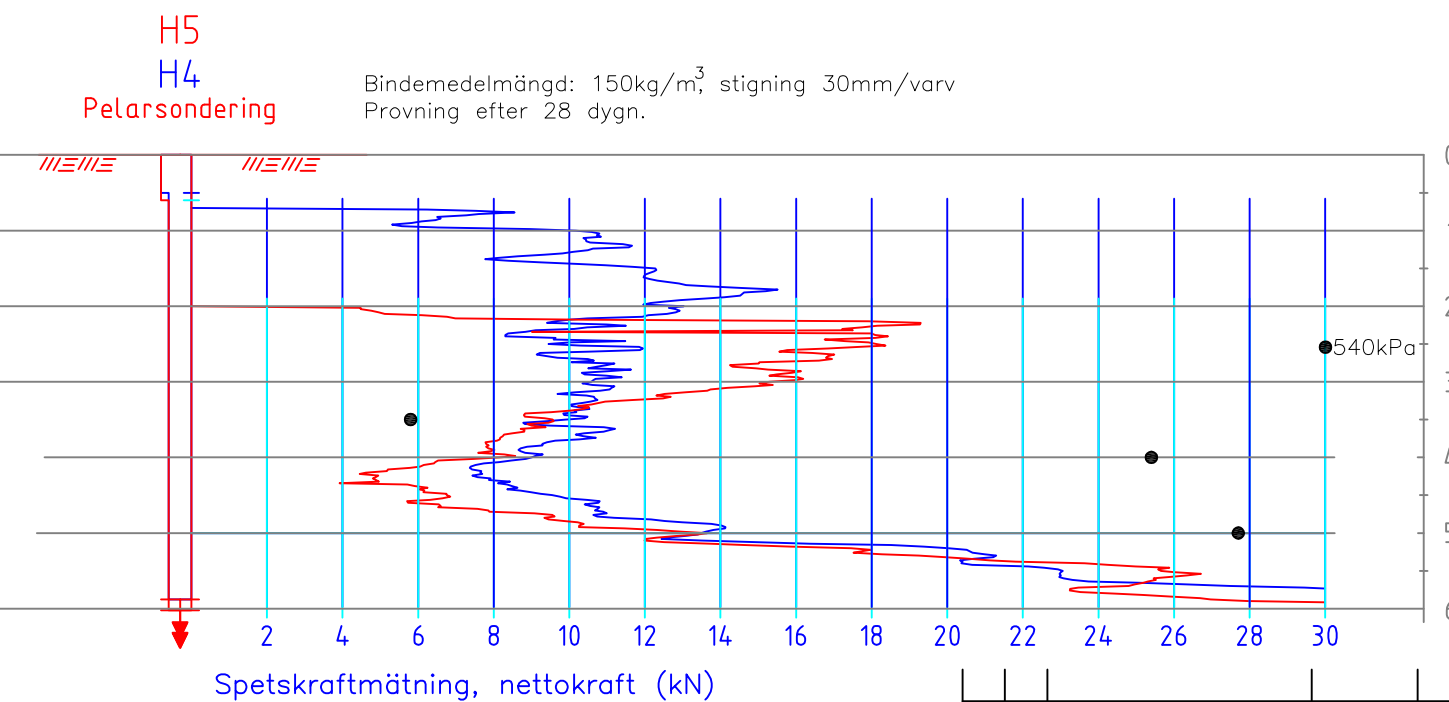
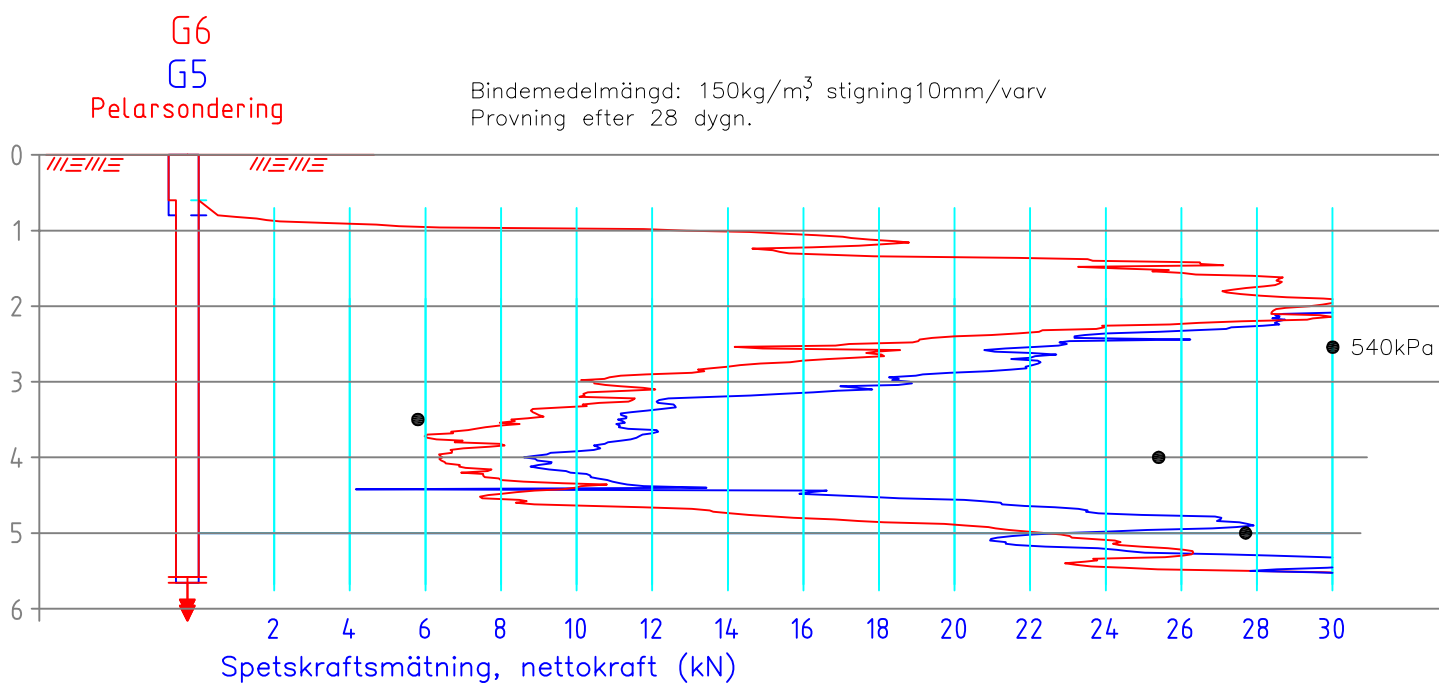
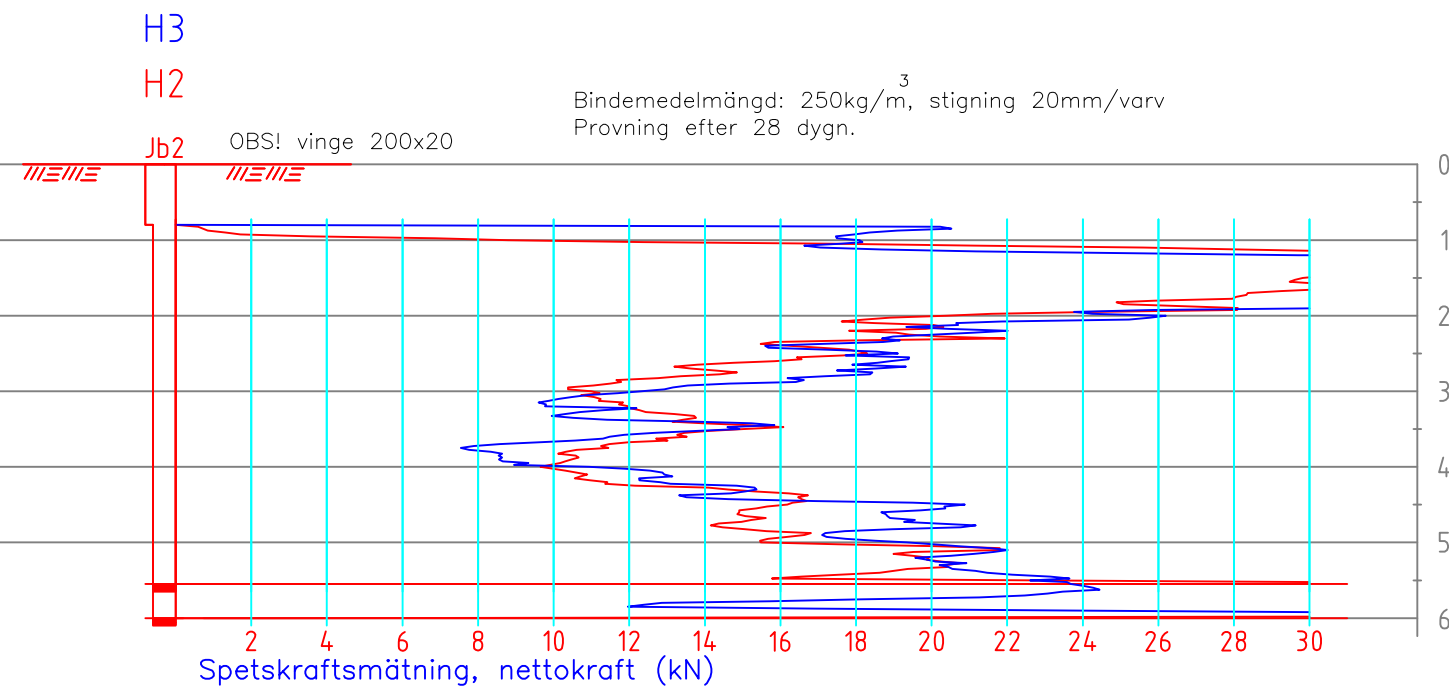
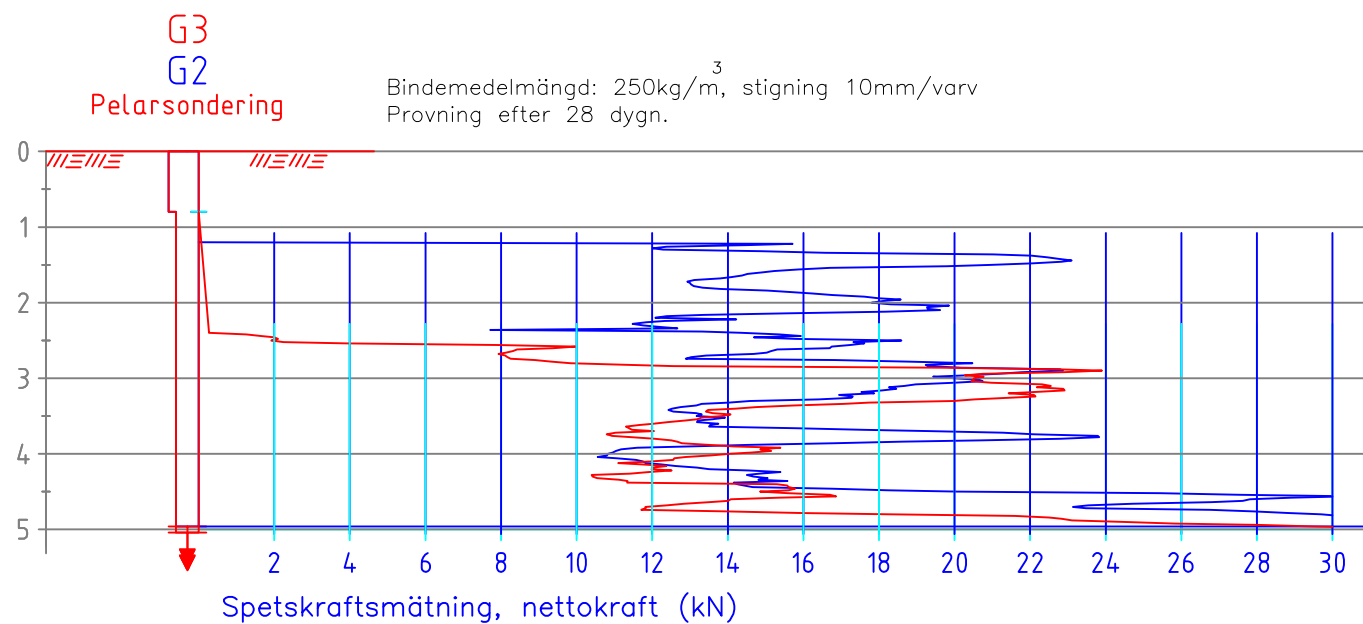


Statens geotekniska institut

581 93 LINKÖPING Telefon:013-20 18 00 Telefax:013-20 19 14

UPPDRAG NR	RITAD AV	BOTNIABANAN STÖCKE-CENTRALA UMEÅ KM 110+086-110+104		
11925	V.PUUSTINEN			
DATUM	HANDLÄGGARE	DJUPSTABILISERING, CM 30/70 PELARSONDERING,(FKPS) vinge 500x15 mm		
081110	M.ANDERSSON			
TEKNIKANSVARIG	Y.ROGBECK	SKALA	NUMMER	BET
		1:100		4

● Laboratorieinblandning, 10kN motsvarar 148 kPa i skjuvhållfasthet.



BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN

● Laboratorieinblandning, 10kN motsvarar 148 kPa i skjuvhållfasthet.



Statens geotekniska institut

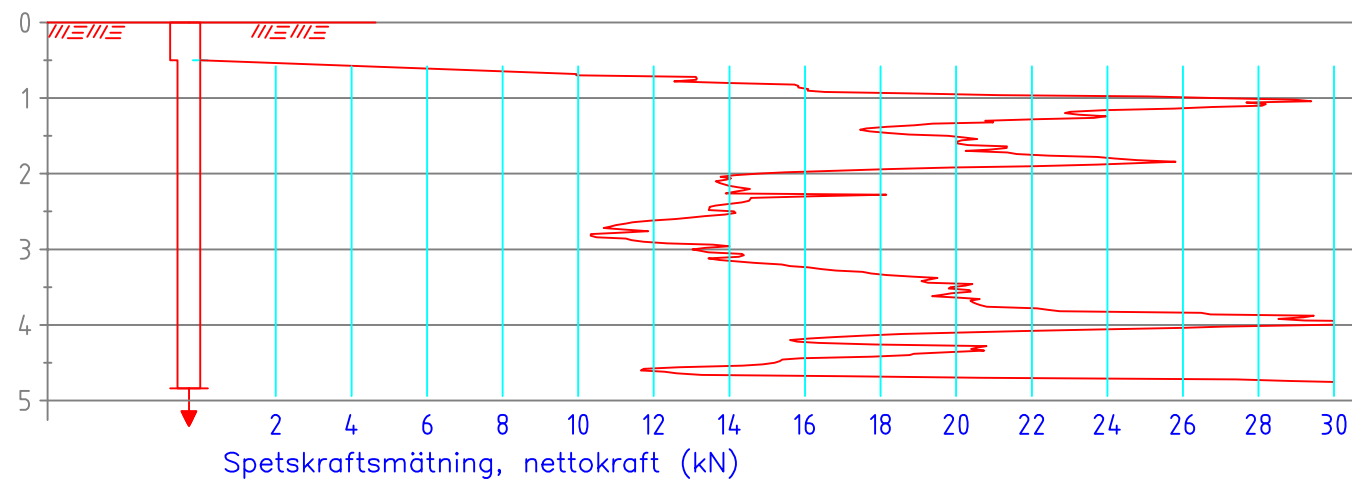
581 93 LINKÖPING Telefon:013-20 18 00 Telefax:013-20 19 14

UPPDRAG NR 11925	RITAD AV V.PUUSTINEN	BOTNIABANAN STÖCKE-CENTRALA UMEÅ KM 110+086-110+104
DATUM 081110	HANDLÄGGARE M.ANDERSSON	DJUPSTABILISERING, C 100% PELARSONDERING,(FKPS) vinge 500x15 mm
TEKNIKANSVARIG Y.ROGBECK	SKALA 1:100	NUMMER 5



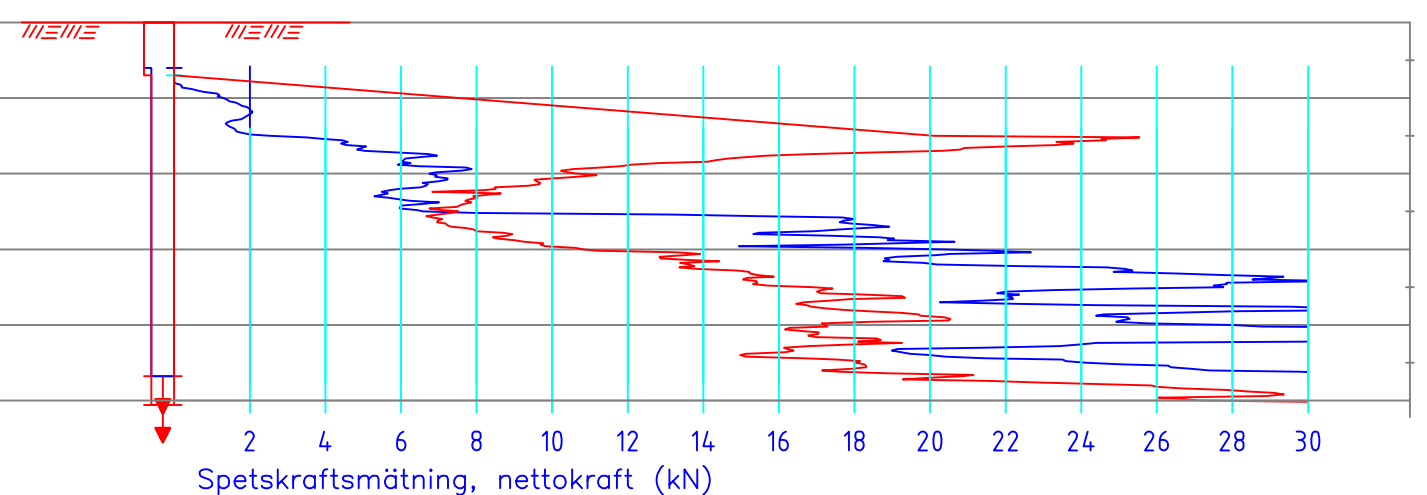
13  
Pelarsondering

Bindemedelmängd: 250kg/m<sup>3</sup>, stigning 10mm/varv  
Provning efter 28 dygn.



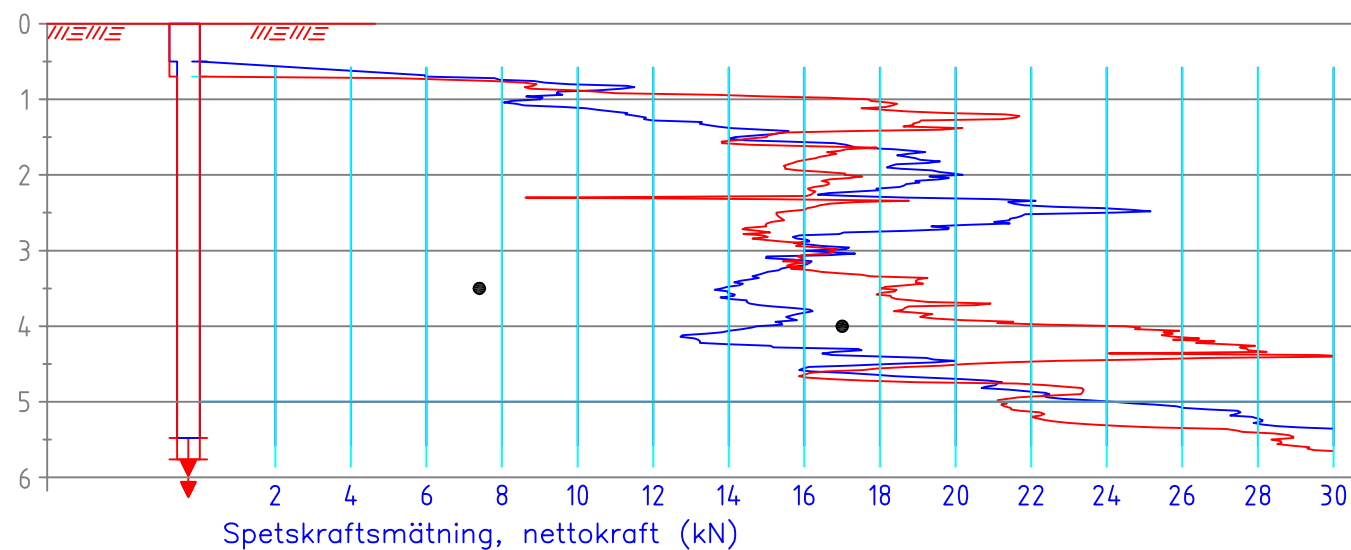
K3  
K2  
Pelarsondering

Bindemedelmängd: 250kg/m<sup>3</sup>, stigning 10mm/varv  
Provning efter 28 dygn.



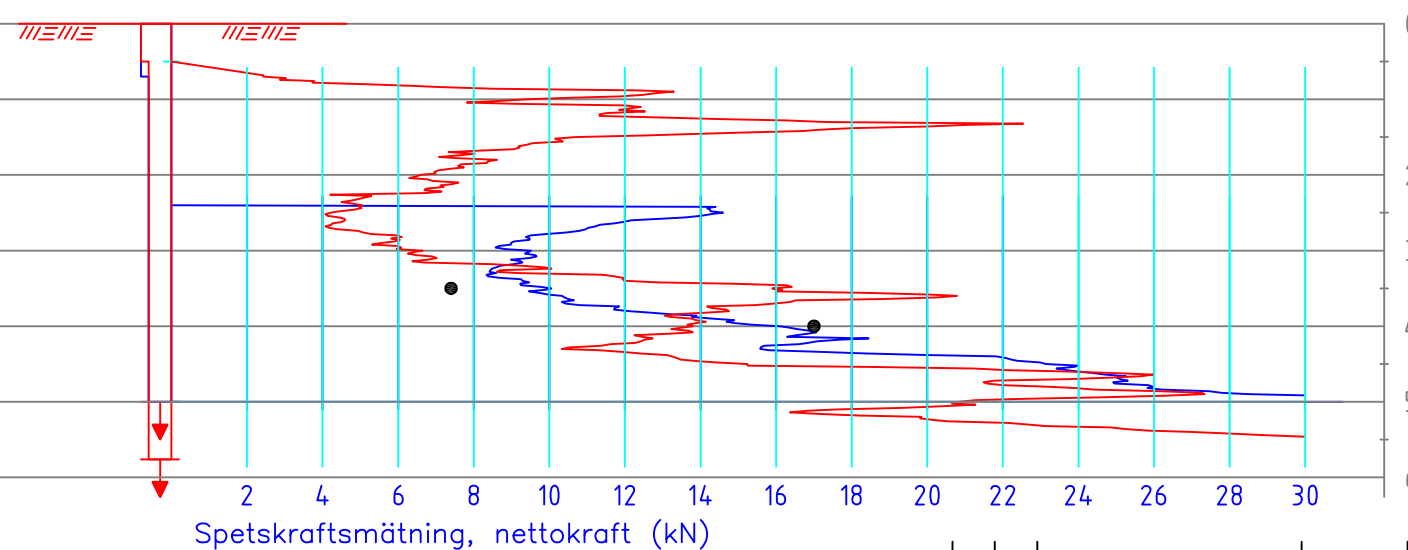
16  
15  
Pelarsondering

Bindemedelmängd: 150kg/m<sup>3</sup>, stigning 10mm/varv  
Provning efter 28 dygn.



K5  
K4  
Pelarsondering

Bindemedelmängd: 150kg/m<sup>3</sup>, stigning 30mm/varv  
Provning efter 28 dygn.



BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN

• Laboratorieinblandning, 10kN motsvarar 148 kPa i skjuvhållfasthet.



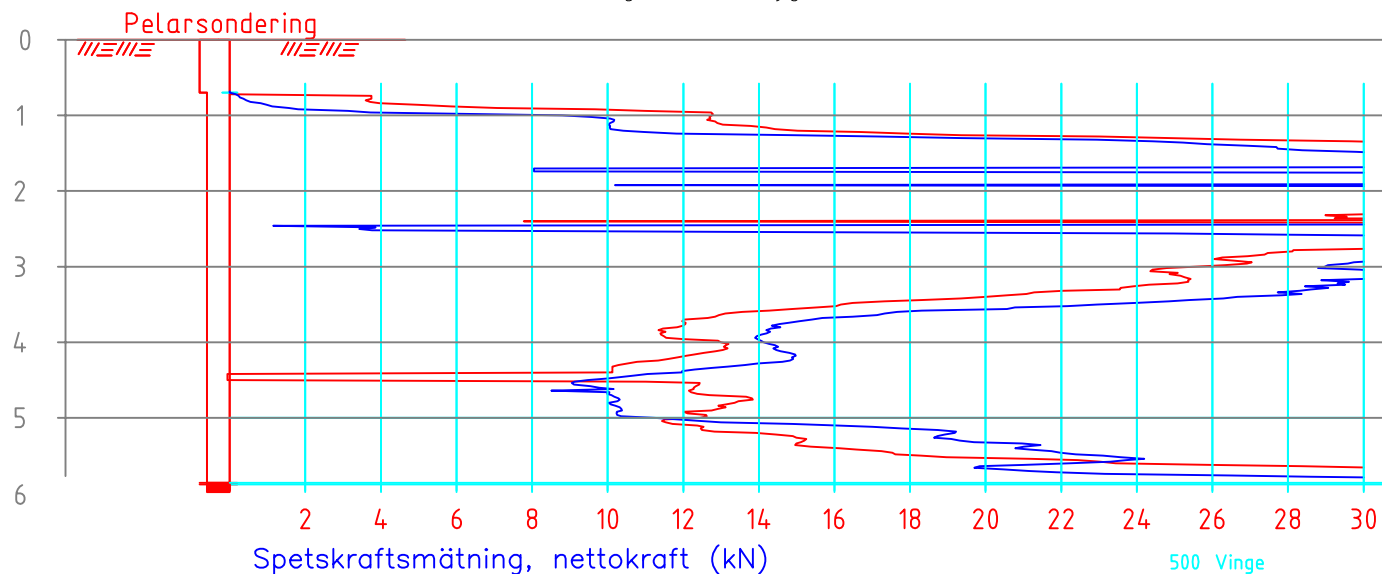
Statens geotekniska institut

581 93 LINKÖPING Telefon:013-20 18 00 Telefax:013-20 19 14

UPPDRAG NR 11925	RITAD AV V.PUUSTINEN	BOTNIABANAN STÖCKE-CENTRALA UMEÅ KM 110+086-110+104
DATUM 081110	HANDLÄGGARE M.ANDERSSON	DJUPSTABILISERING, C100% + MDM PELARSONDERING,(FKPS) vinge 500x15 mm
TEKNIKANSVARIG Y.ROGBECK	SKALA 1:100	NUMMER 6

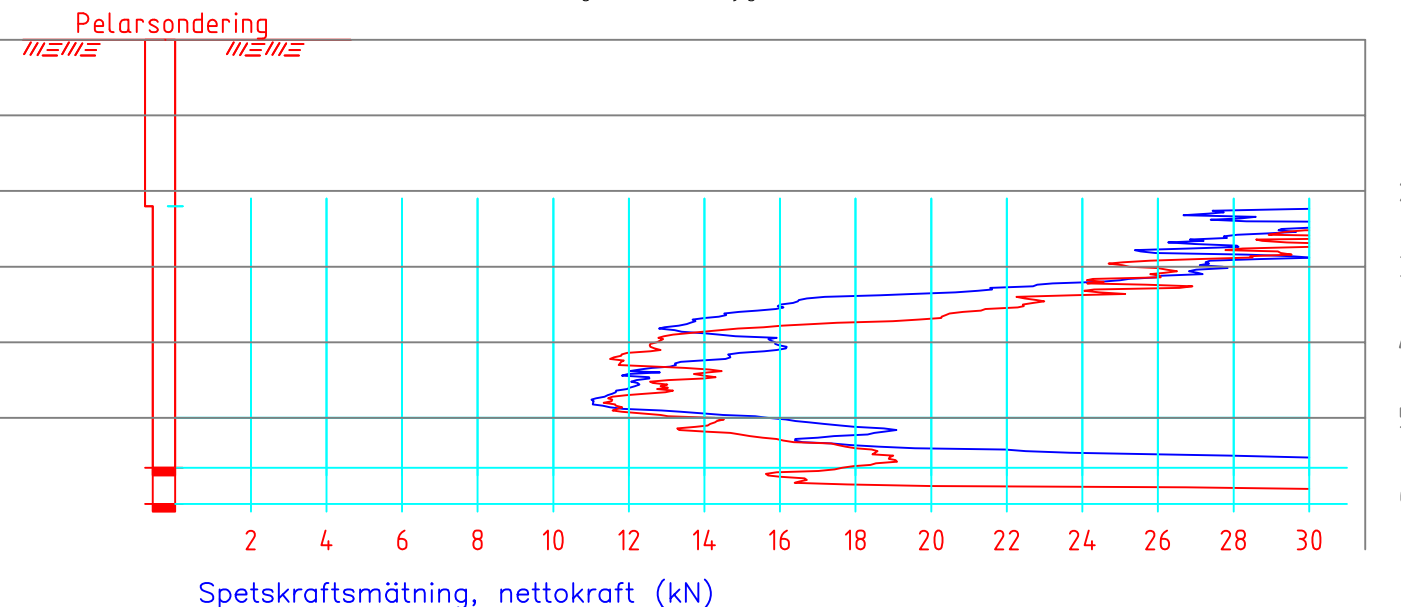
A8  
A7

Bindemedelmängd: 150kg/m<sup>3</sup>, stigning 10mm/varv  
Provning efter 90 dygn.



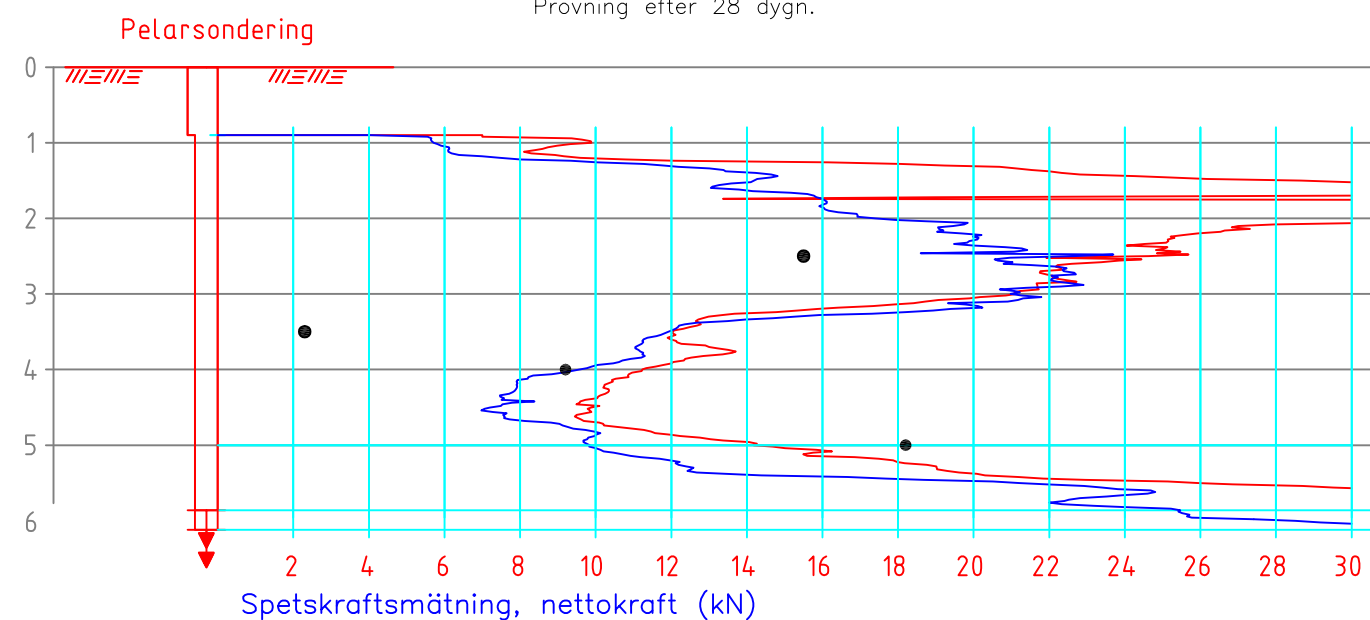
B8  
B7

Bindemedelmängd: 150kg/m<sup>3</sup>, stigning 30mm/varv  
Provning efter 90 dygn.



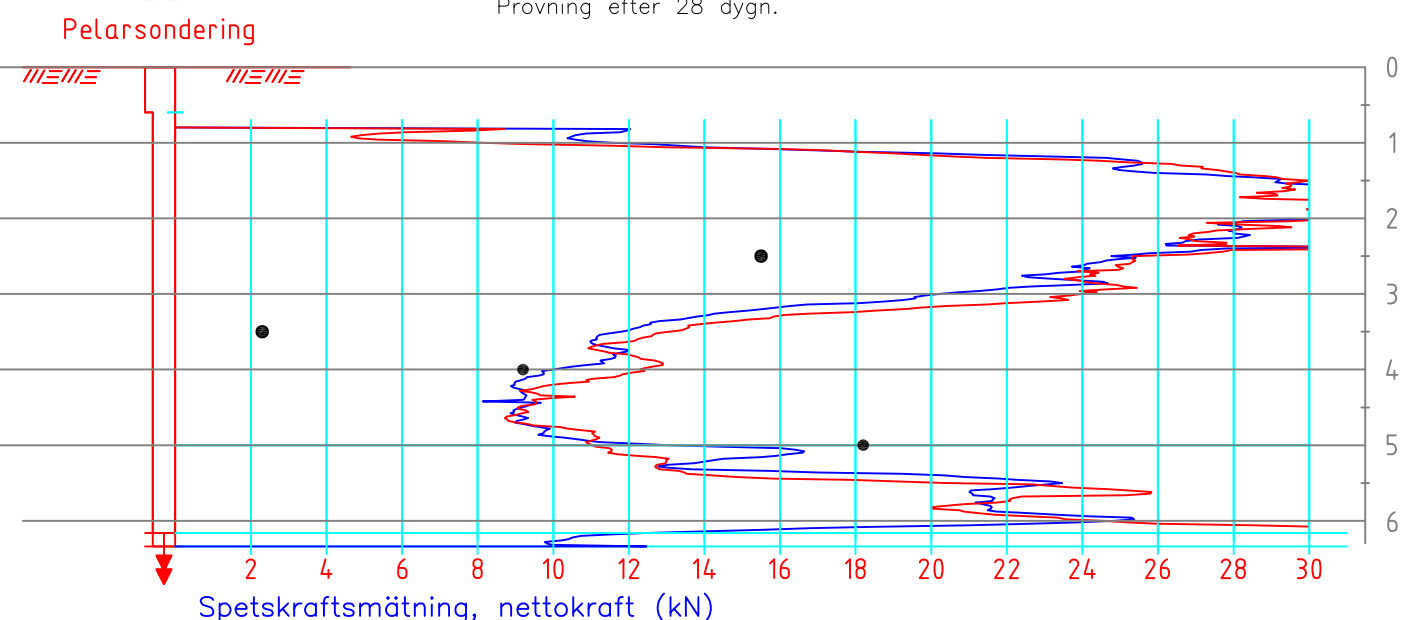
A5  
A4

Bindemedelmängd: 150kg/m<sup>3</sup>, stigning 10mm/varv  
Provning efter 28 dygn.



B6  
B5

Bindemedelmängd: 150kg/m<sup>3</sup>, stigning 30mm/varv  
Provning efter 28 dygn.



● Laboratorieinblandning, 10kN motsvarar 148 kPa i skjvuhållfasthet.

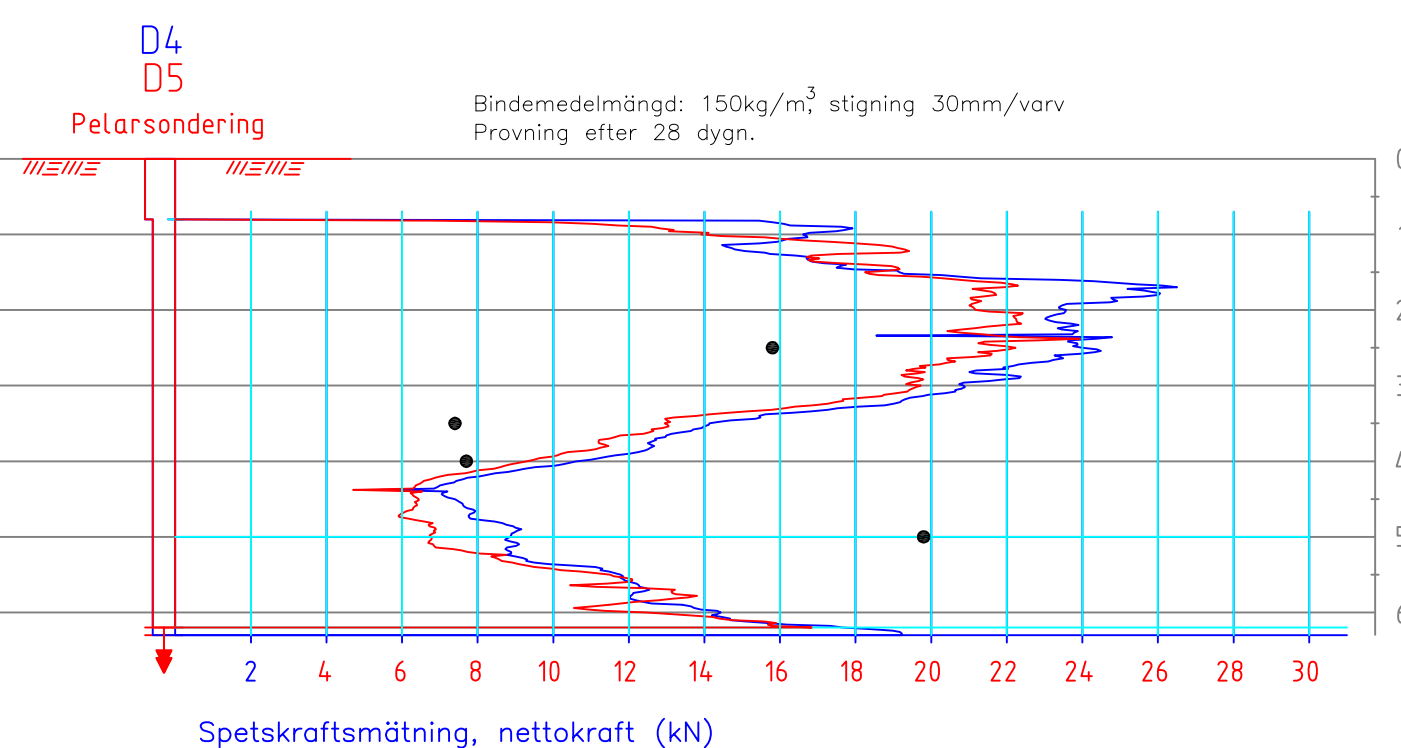
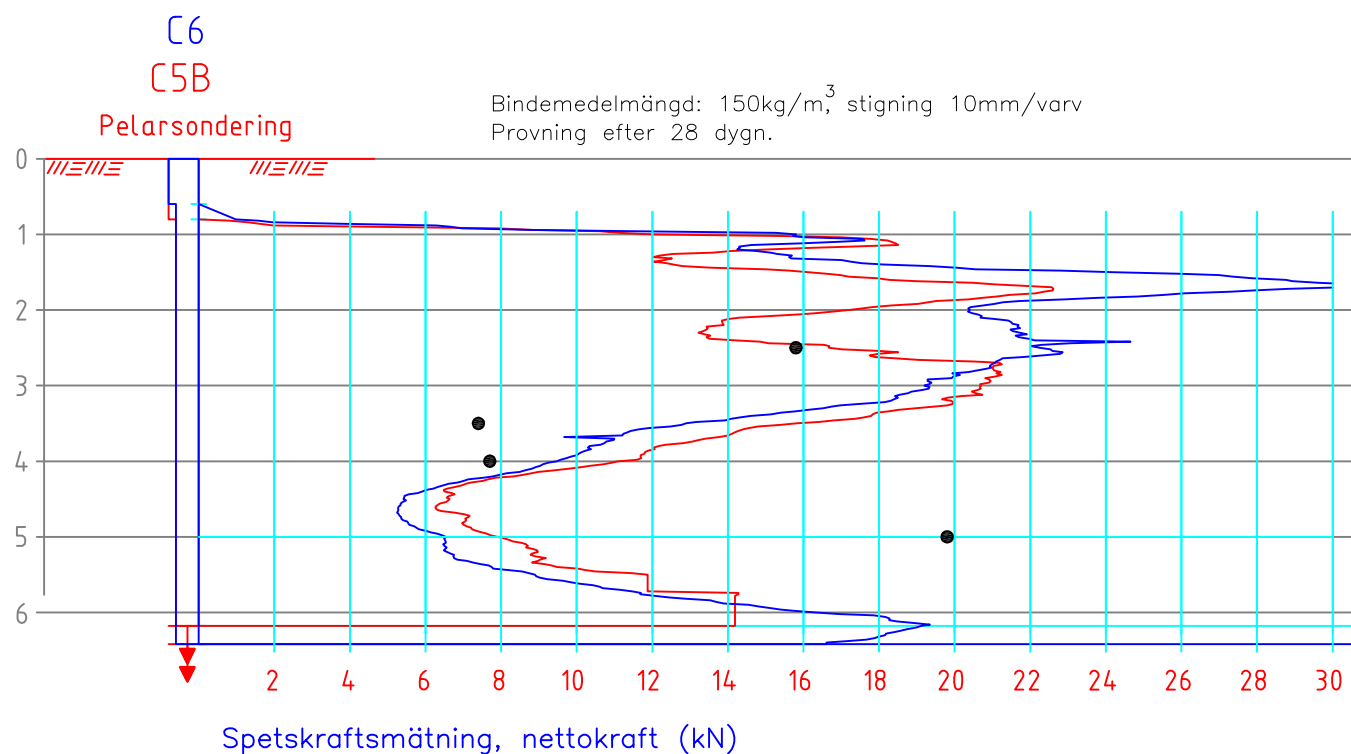
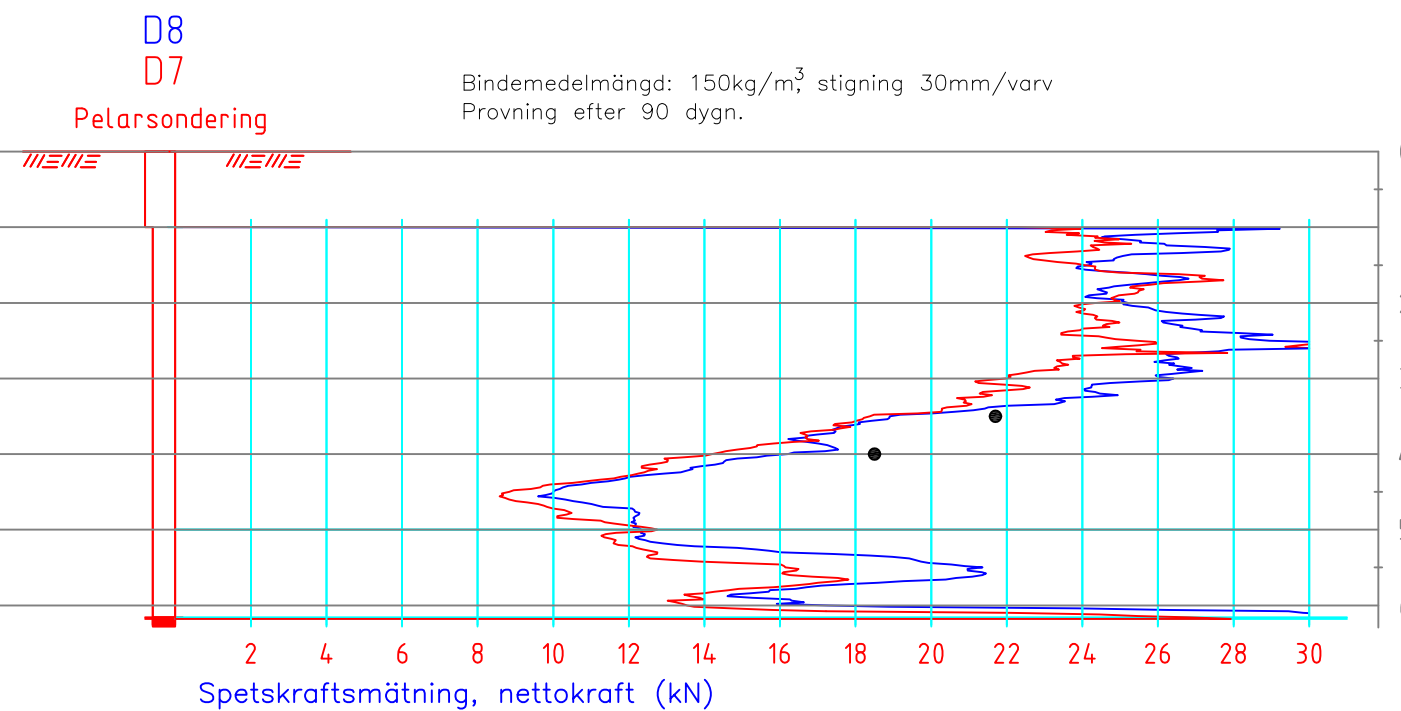
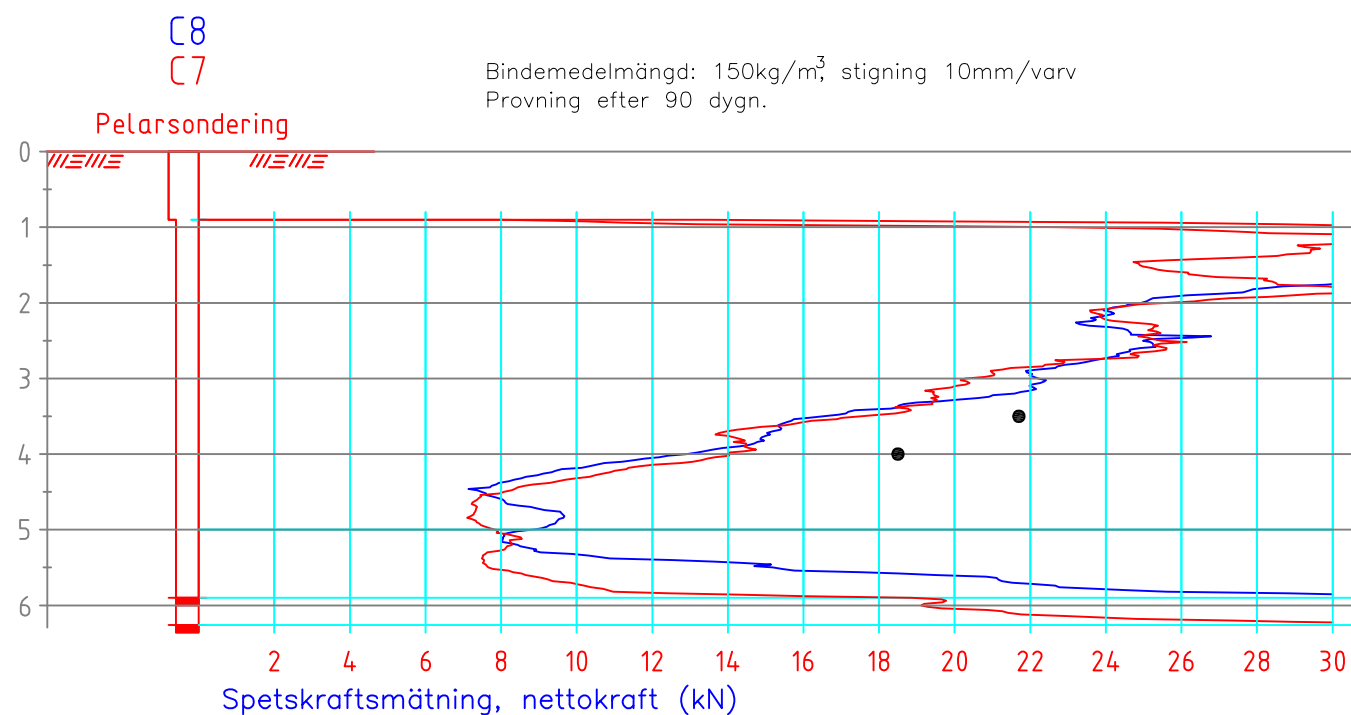
BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM



Statens geotekniska institut

581 93 LINKÖPING Telefon:013-20 18 00 Telefax:013-20 19 14

UPPDRAG NR 11925	RITAD AV V.PUUSTINEN	BOTNIABANAN STÖCKE-CENTRALA UMEÅ KM 110+086-110+104	
DATUM 081110	HANDLÄGGARE M.ANDERSSON	DJUPSTABILISERING, KC 50/50 PELARSONDERING,(FKPS), vinge500x15 mm	
TEKNIKANSVARIG Y.ROGBECK	SKALA 1:100	NUMMER 7	



BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN

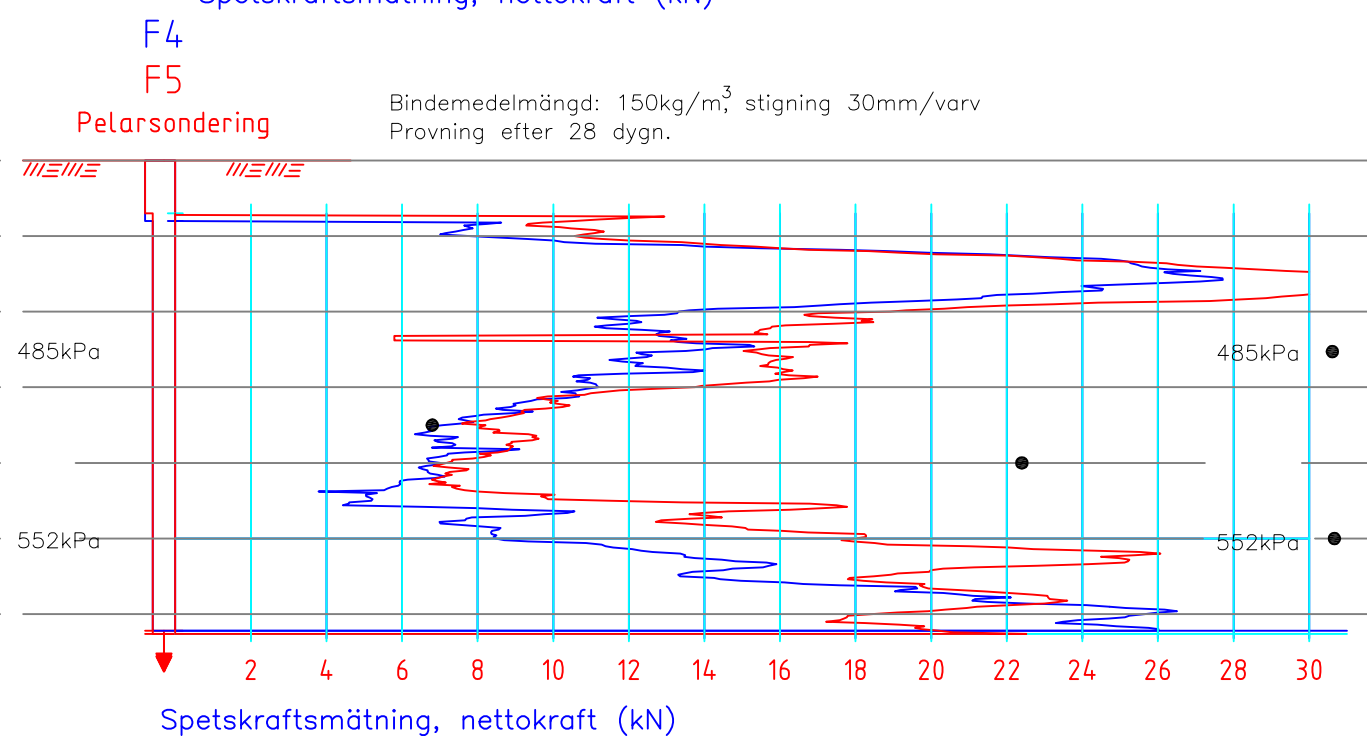
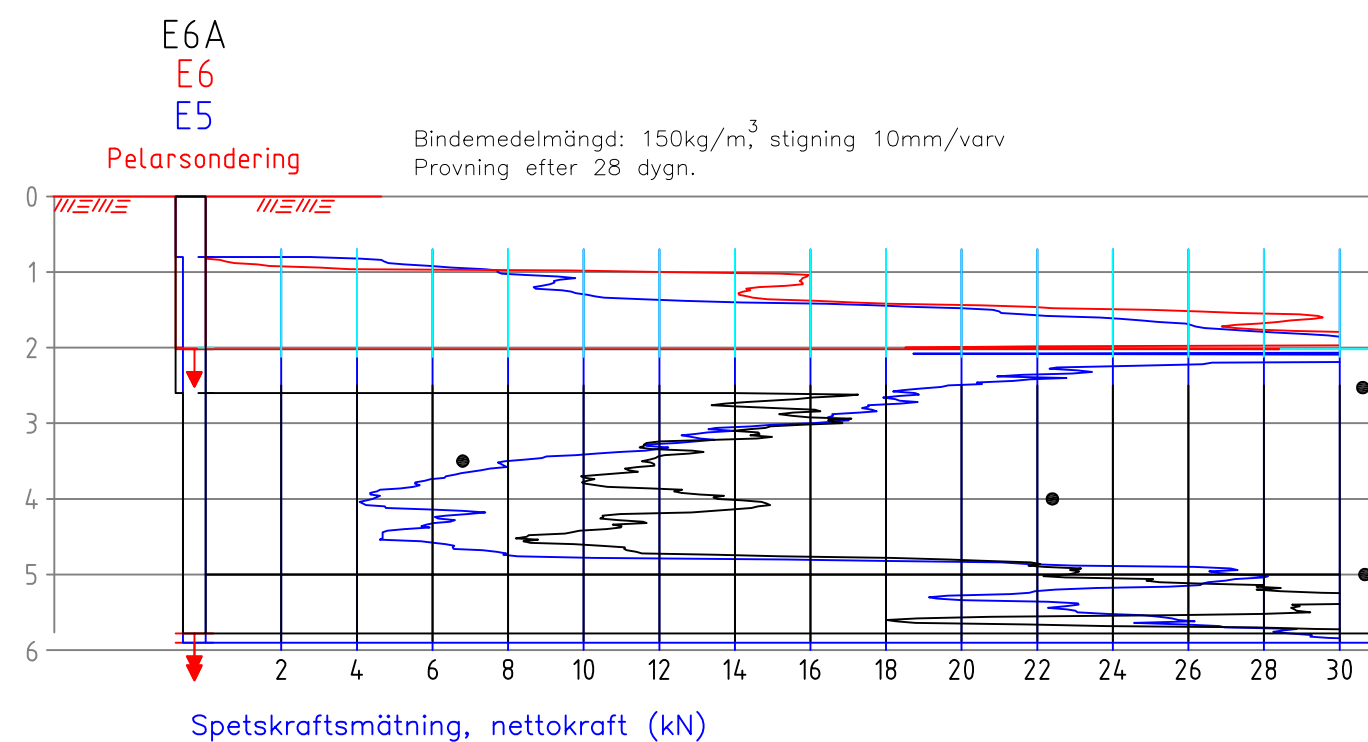
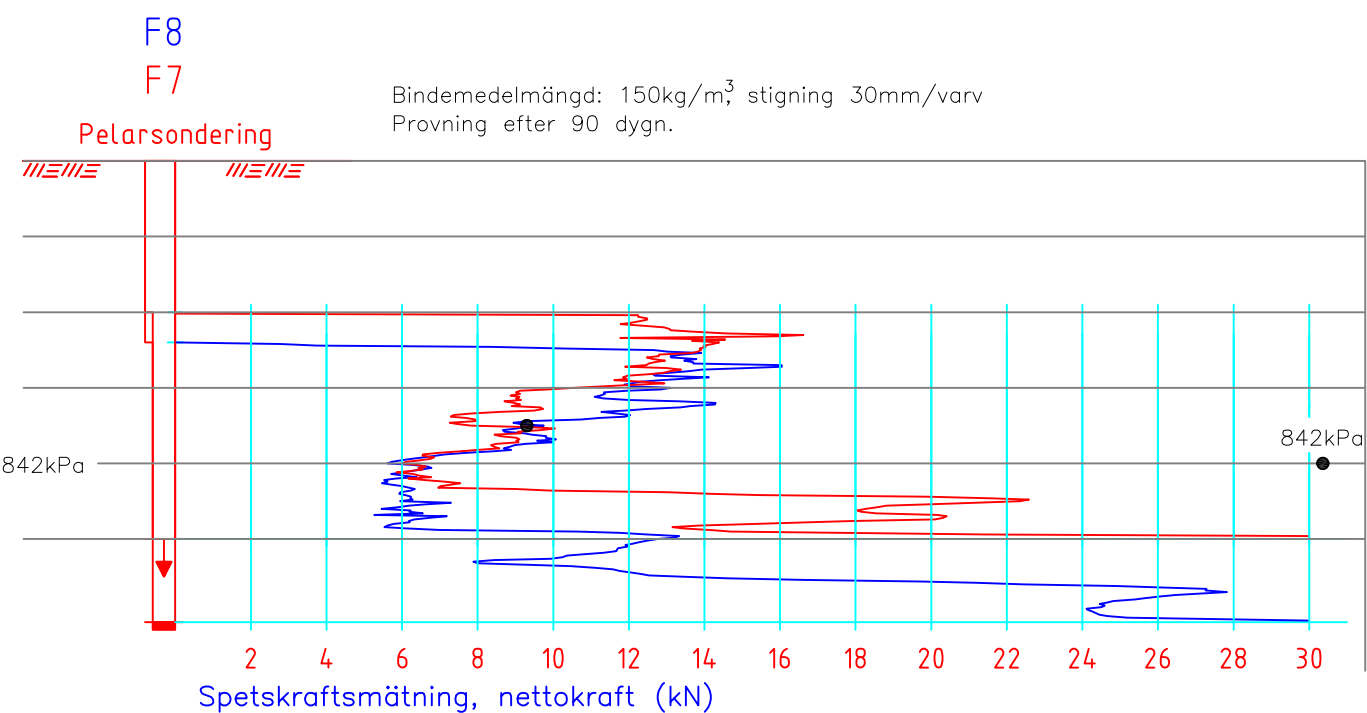
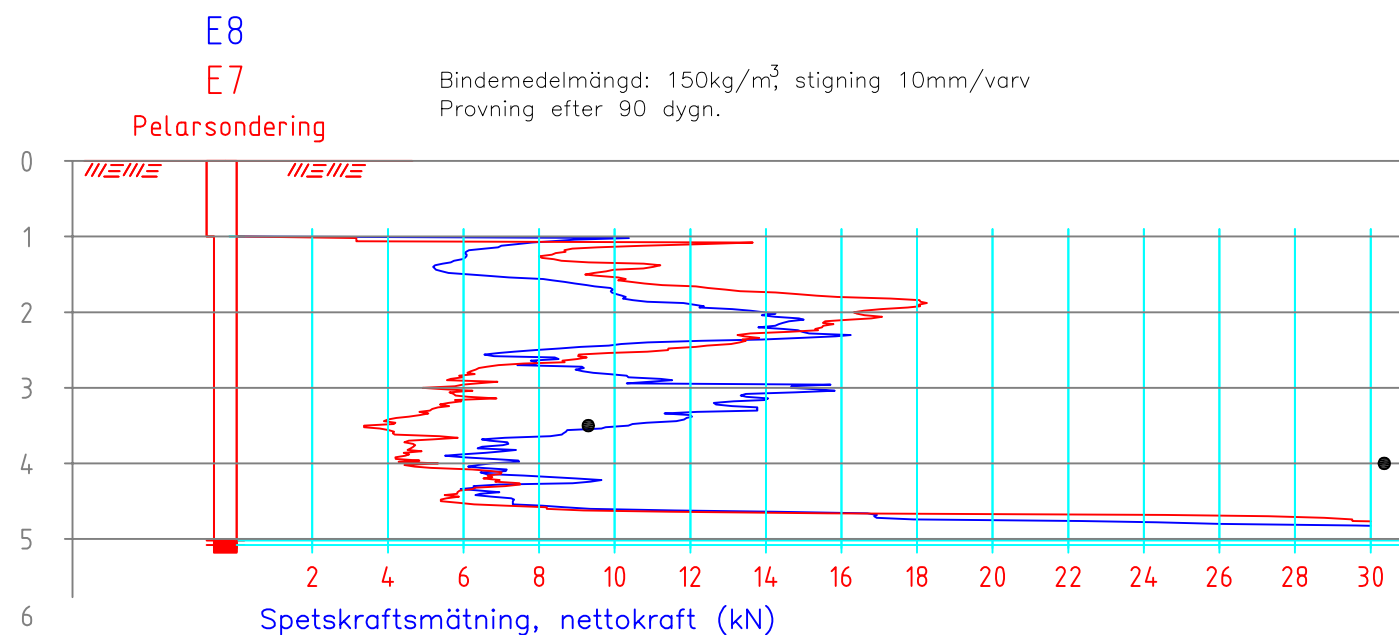


Statens geotekniska institut

581 93 LINKÖPING Telefon:013-20 18 00 Telefax:013-20 19 14

UPPDRAG NR 11925	RITAD AV V.PUUSTINEN	BOTNIABANAN STÖCKE-CENTRALA UMEÅ KM 110+086-110+104
DATUM 081110	HANDLÄGGARE M.ANDERSSON	DJUPSTABILISERING,KCG 33/33/33 PELARSONDERING,(FKPS), vinge 500x15 mm
TEKNIKANSVARIG Y.ROGBECK	SKALA 1:100	NUMMER 8

● Laboratorieinblandning, 10kN motsvarar 148 kPa i skjuvhållfasthet.



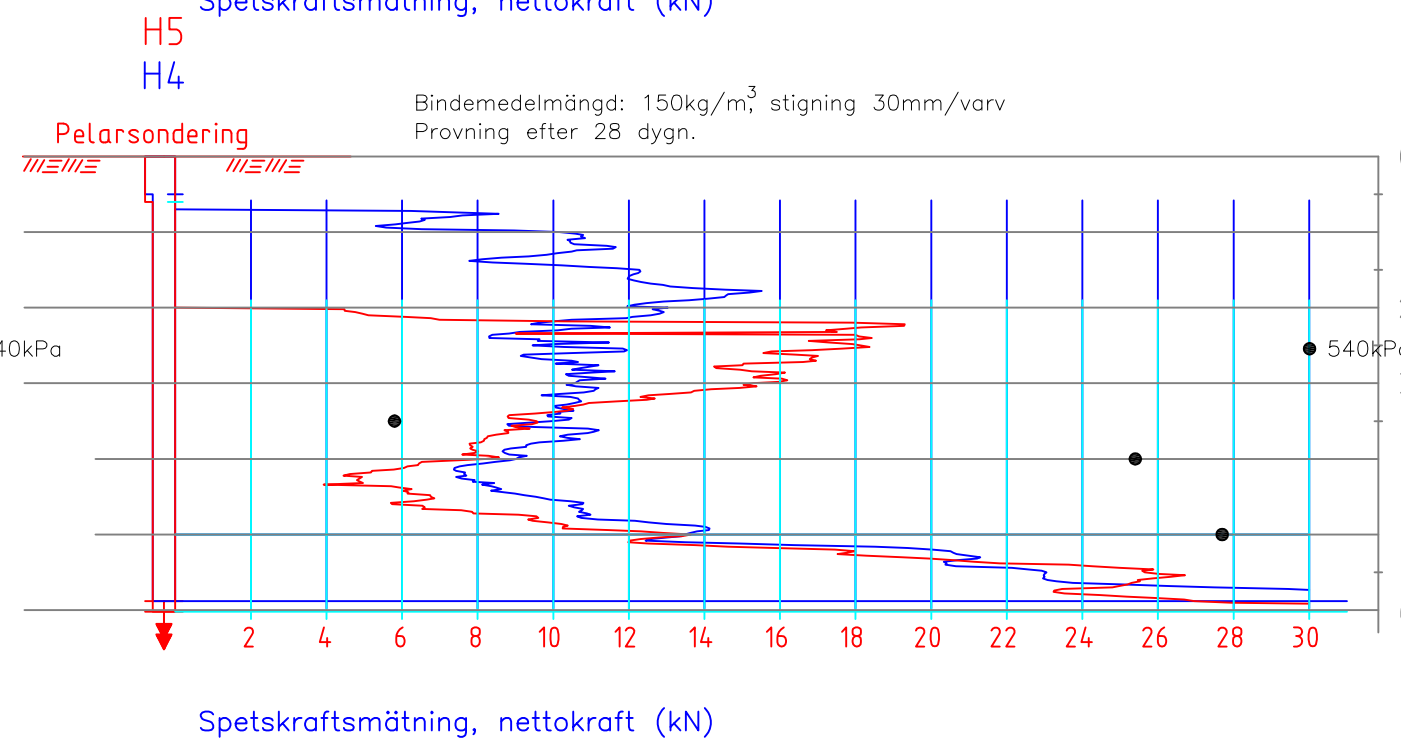
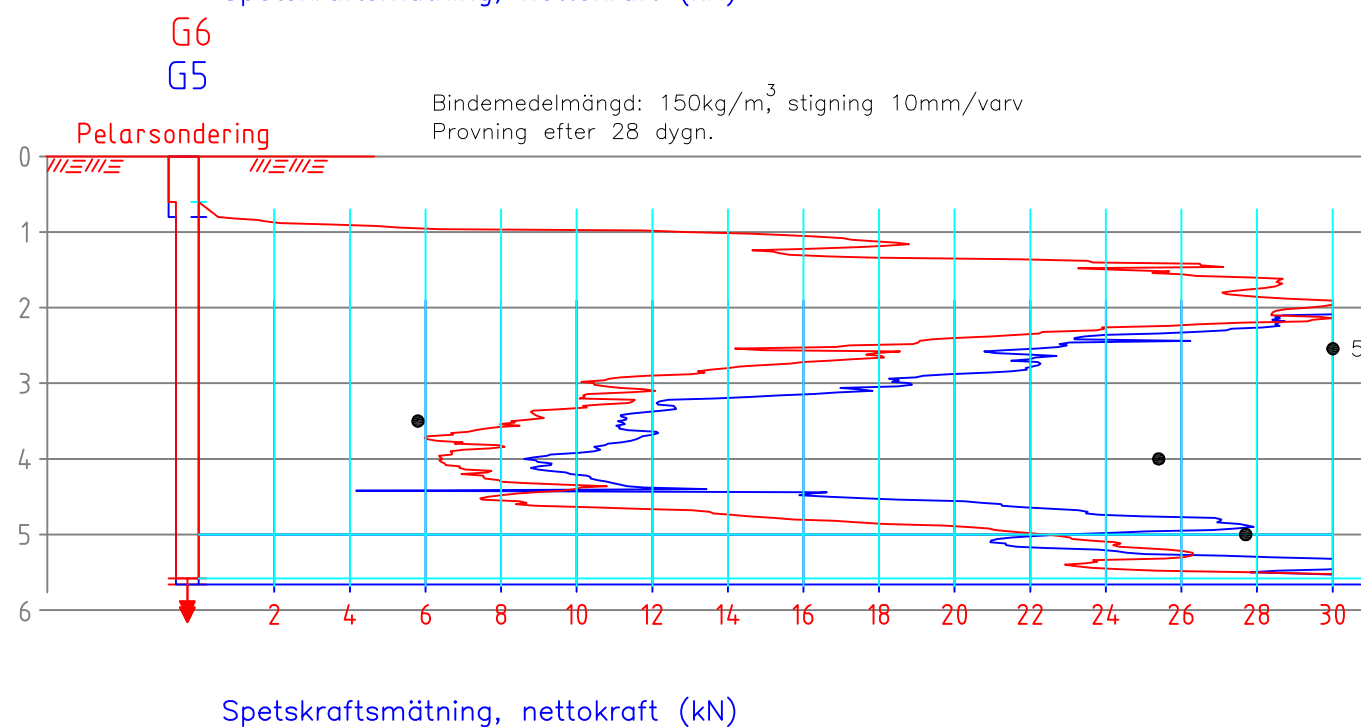
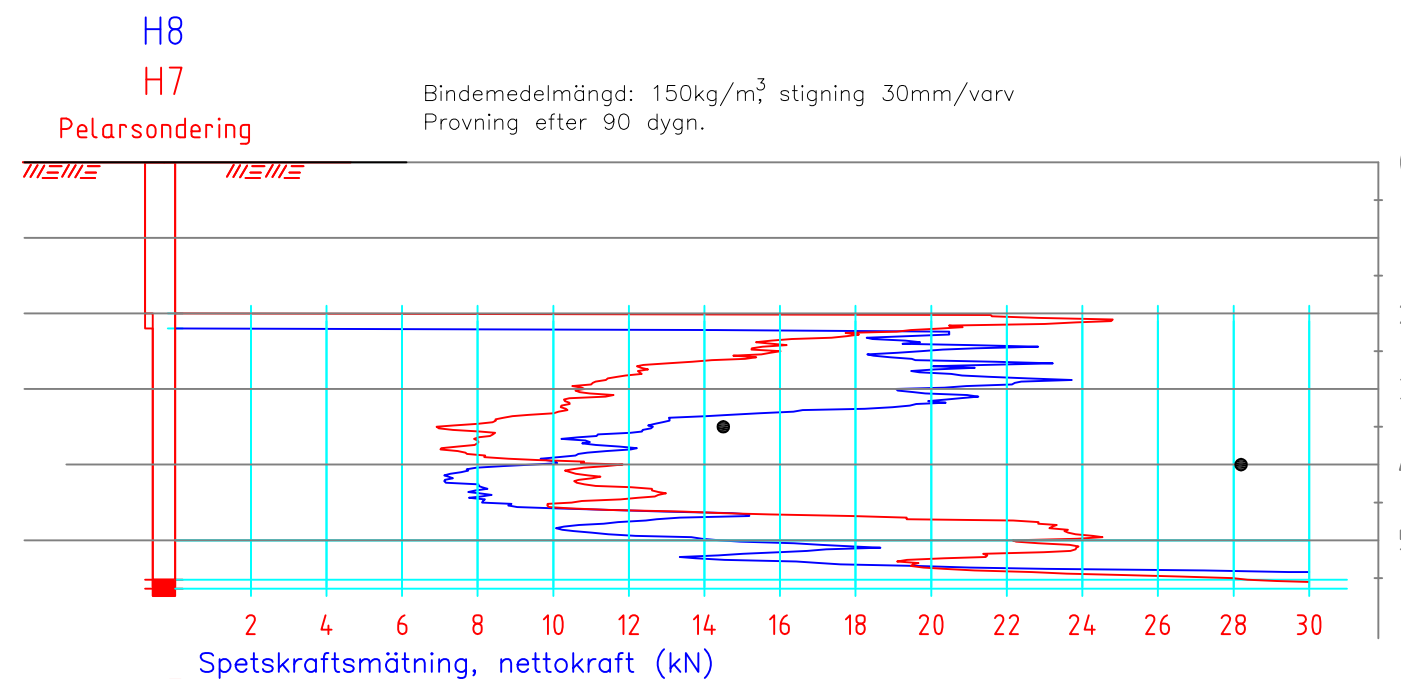
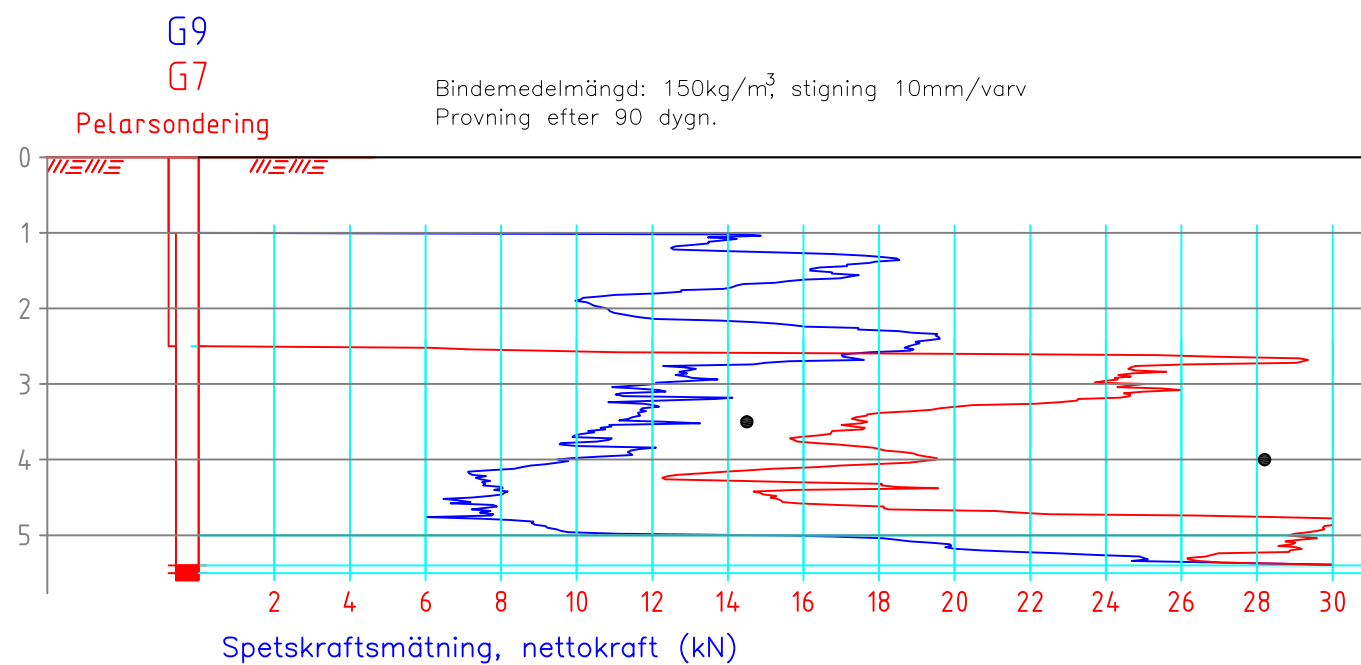
● Laboratorieinblandning, 10kN motsvarar 148 kPa i skjuvhållfasthet.

BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN



**SGI** Statens geotekniska institut  
581 93 LINKÖPING Telefon:013-20 18 00 Telefax:013-20 19 14

UPPDRAG NR	RITAD AV	BOTNIABANAN
11925	V.PUUSTINEN	STÖCKE-CENTRALA UMEÅ
DATUM	HANDLÄGGARE	KM 110+086-110+104
081110	M.ANDERSSON	DJUPSTABILISERING, CM 30/70
TEKNIKANSVARIG	Y.ROGBECK	PELARSONDERING, (FKPS), vinge 500x15
SKALA		NUMMER
1:100		9



● Laboratorieinblandning, 10kN motsvarar 148 kPa i skjvuhållfasthet.

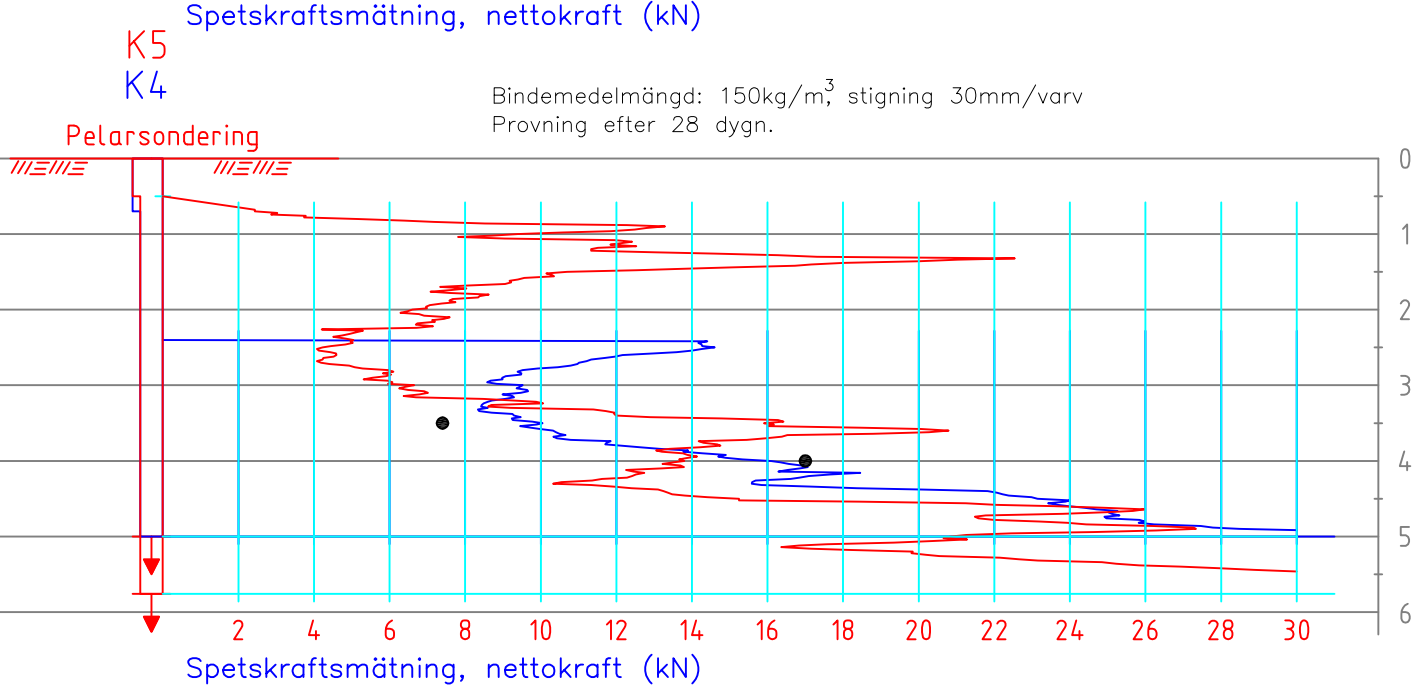
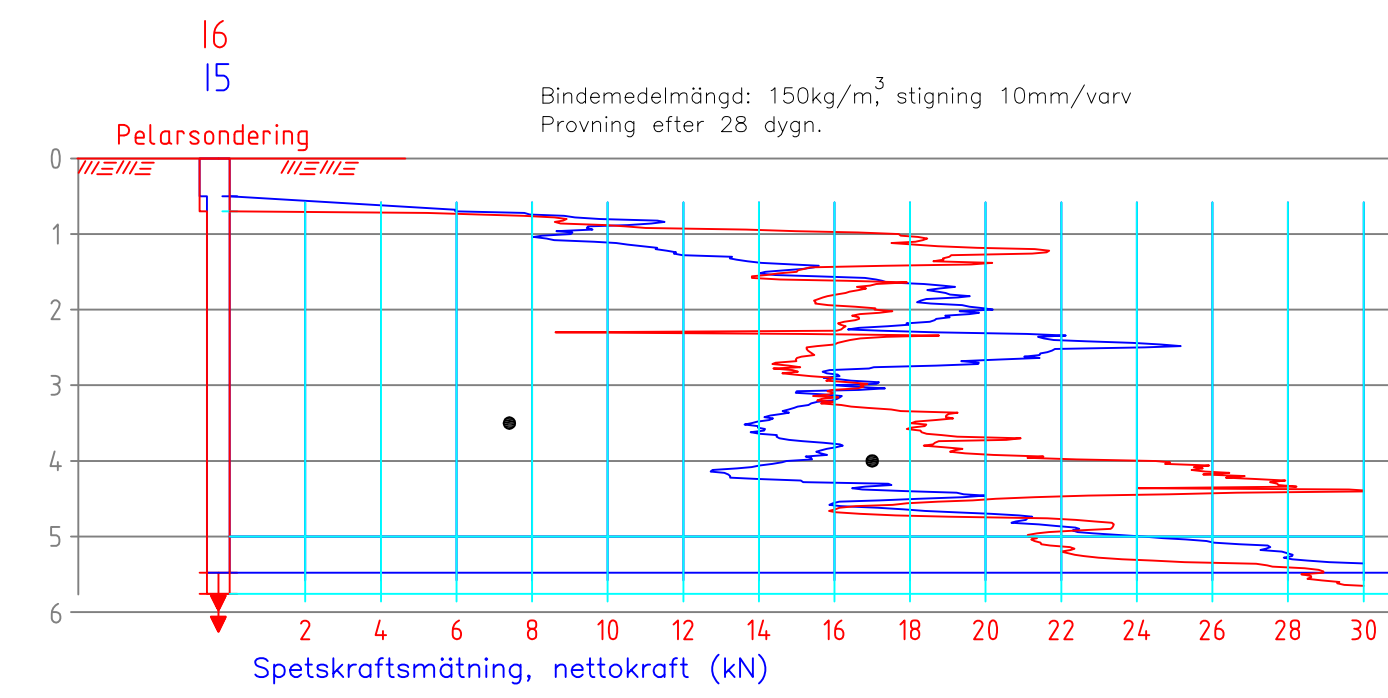
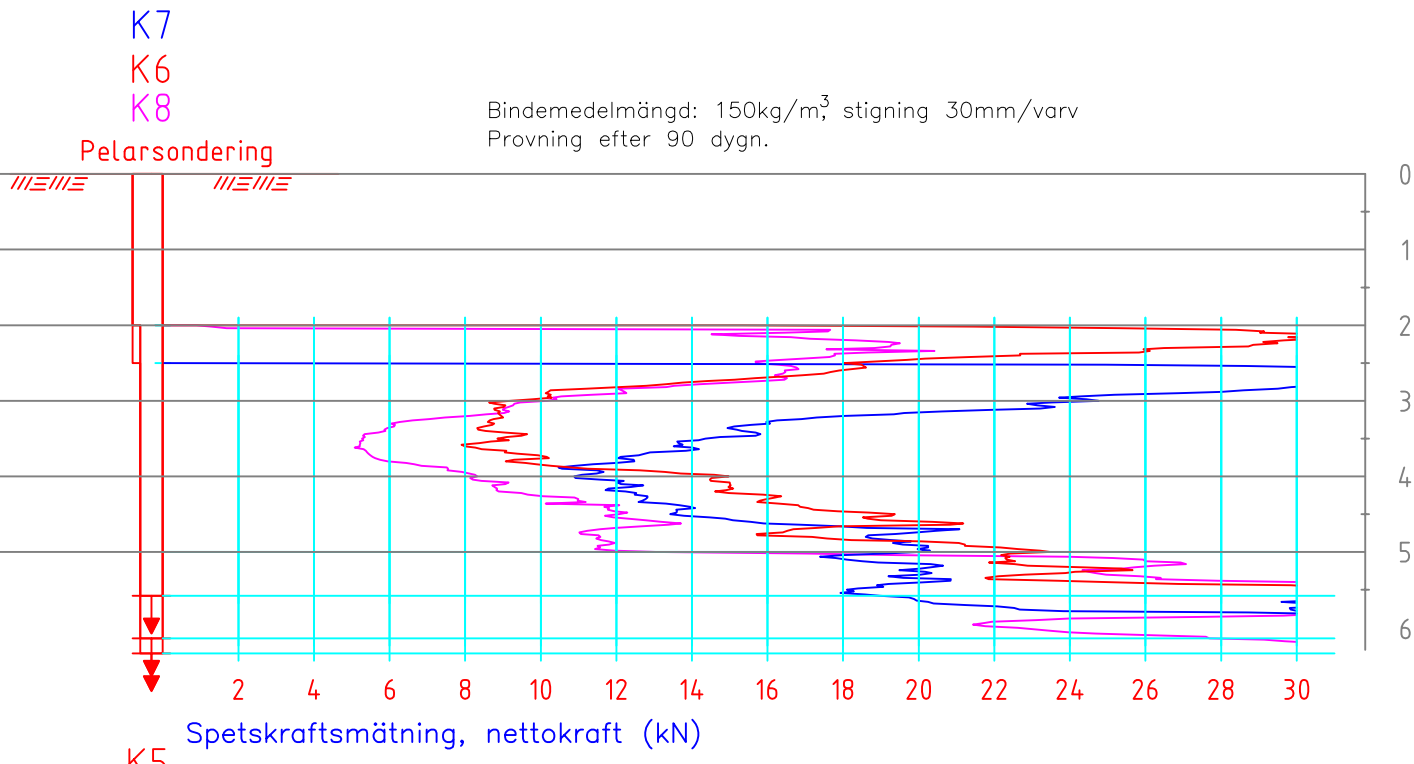
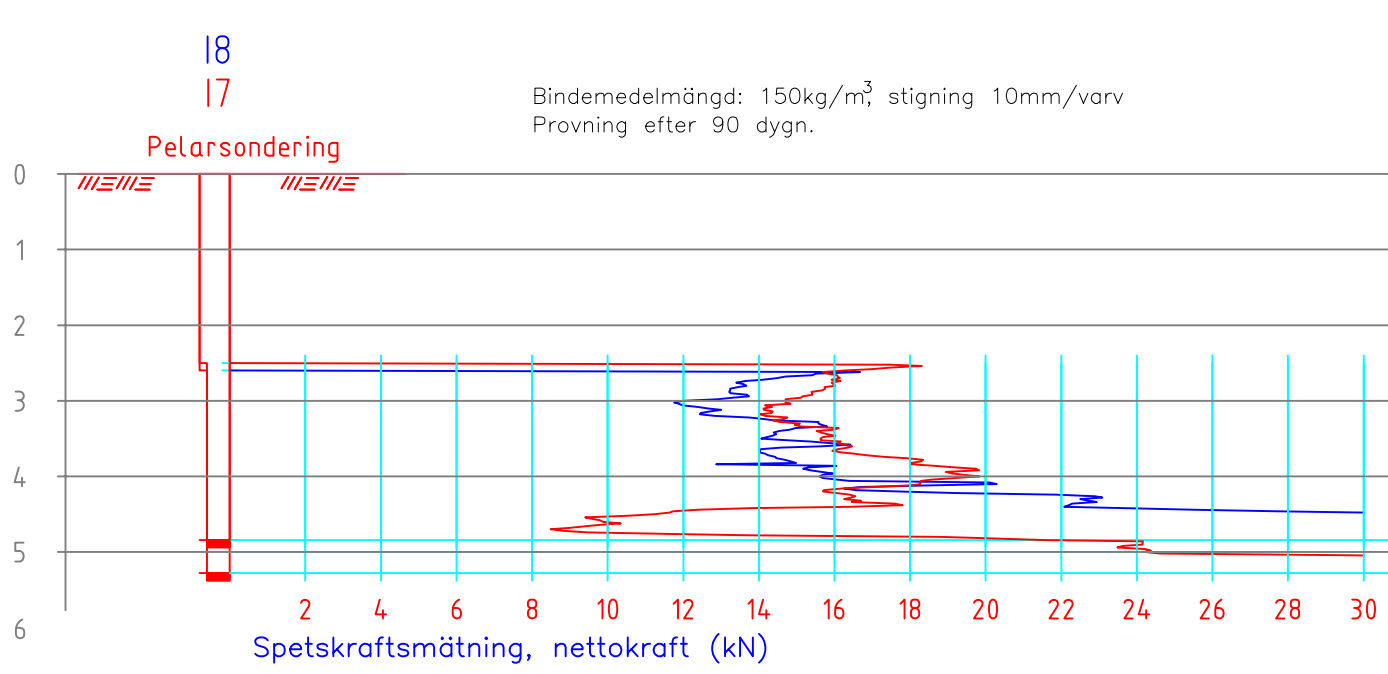
BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN



Statens geotekniska institut

581 93 LINKÖPING Telefon:013-20 18 00 Telefax:013-20 19 14

UPPDRAG NR 11925	RITAD AV V.PUUSTINEN	BOTNIABANAN STÖCKE-CENTRALA UMEÅ KM 110+086-110+104
DATUM 081110	HANDLÄGGARE M.ANDERSSON	DJUPSTABILISERING, C100% PELARSONDERING,(FKPS), vinge 500x15 mm
TEKNIKANSVARIG Y.ROGBECK	SKALA 1:100	NUMMER 10



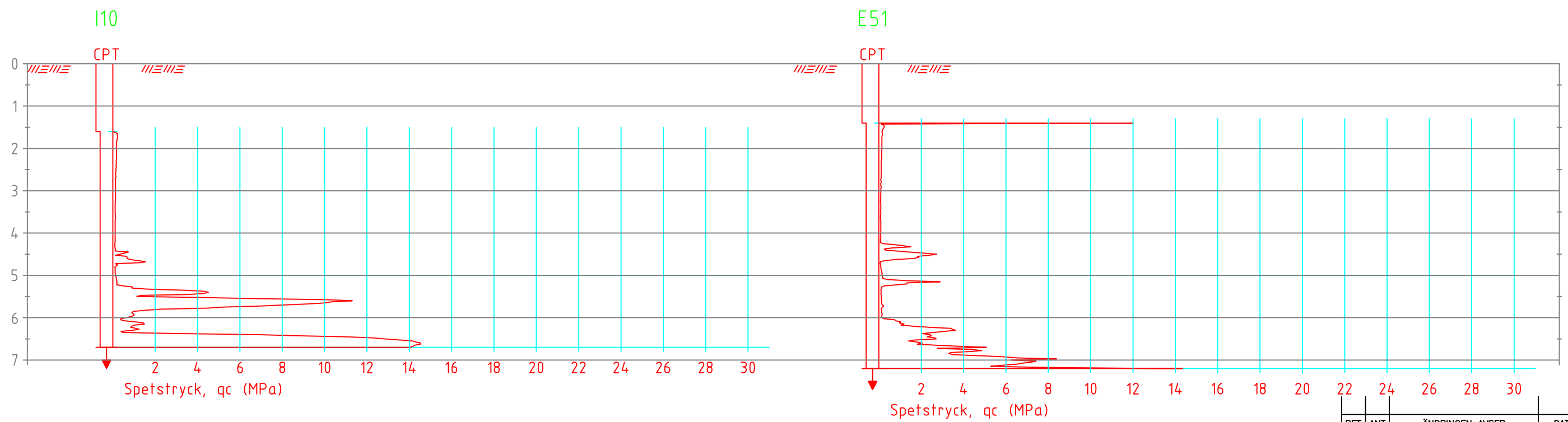
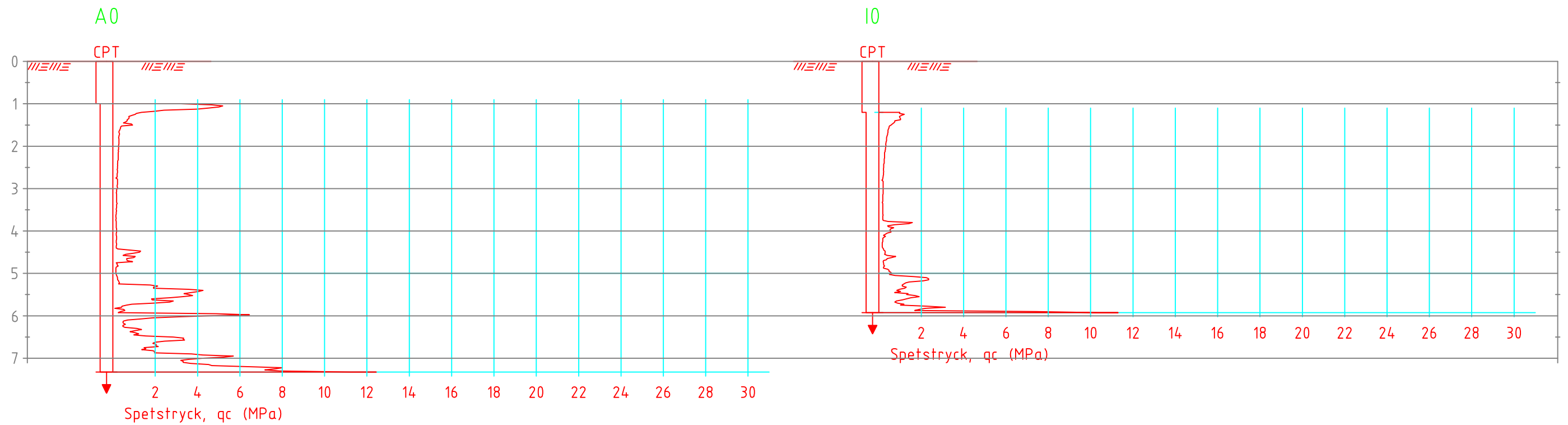
● Laboratorieinblandning, 10kN motsvarar 148 kPa i skjvuhållfasthet.

BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN



**SGI** Statens geotekniska institut  
581 93 LINKÖPING Telefon:013-20 18 00 Telefax:013-20 19 14

UPPDRAG NR 11925	RITAD AV V.PUUSTINEN	BOTNIABANAN STÖCKE-CENTRALA UMEÅ KM 110+086-110+104
DATUM 081110	HANDLÄGGARE M.ANDERSSON	DJUPSTABILISERING, C 100%+MDM PELARSONDERING,(FKPS), vinge 500x15 mm
TEKNIKANSVARIG Y.ROGBECK	SKALA 1:100	NUMMER 11

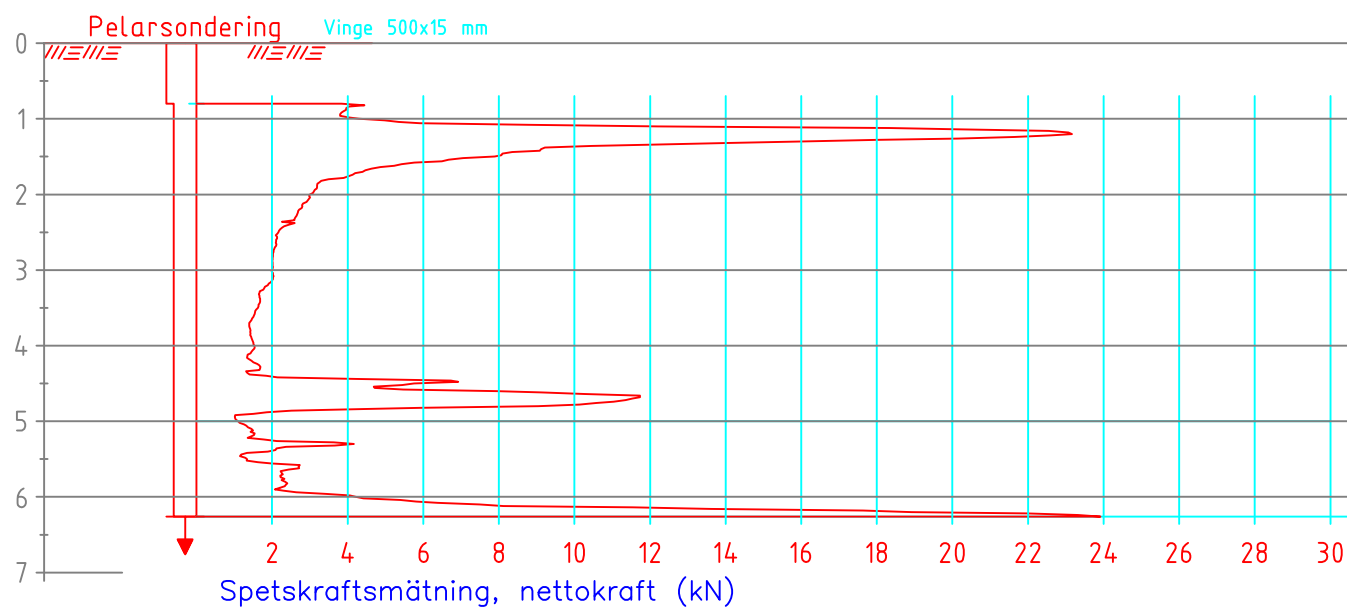


BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN

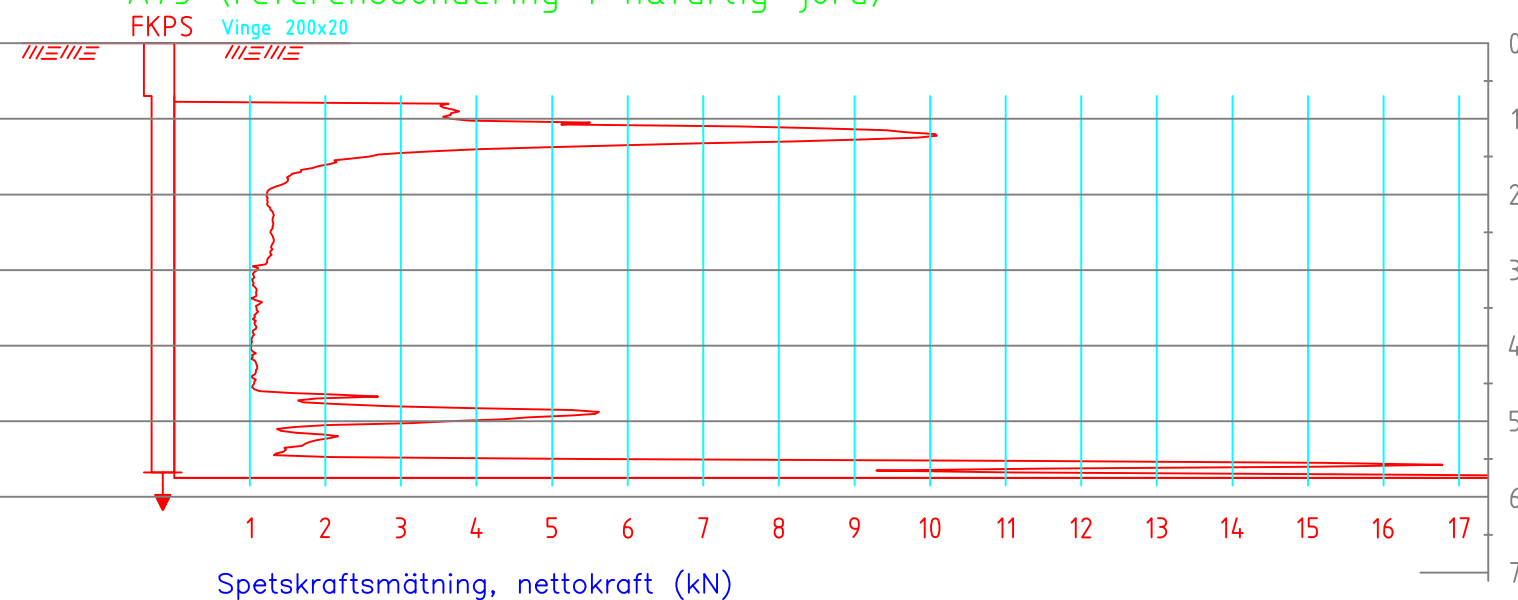

**SGI** Statens geotekniska institut  
 581 93 LINKÖPING Telefon:013-20 18 00 Telefax:013-20 19 14

UPPDRAG NR	RITAD AV	BOTNIABANAN DJUPSTABILISERING STÖCKE-CENTRALA UMEA		
11925	V.PUUSTINEN			
DATUM	HANLÄGGARE	KM 110+086-110+104 CPT-SÖNDERING I NATURLIG JORD		
081110	M.ANDERSSON			
TEKNIKANSVARIG	Y.ROGBECK	SKALA	NUMMER	BET
		1:100		12

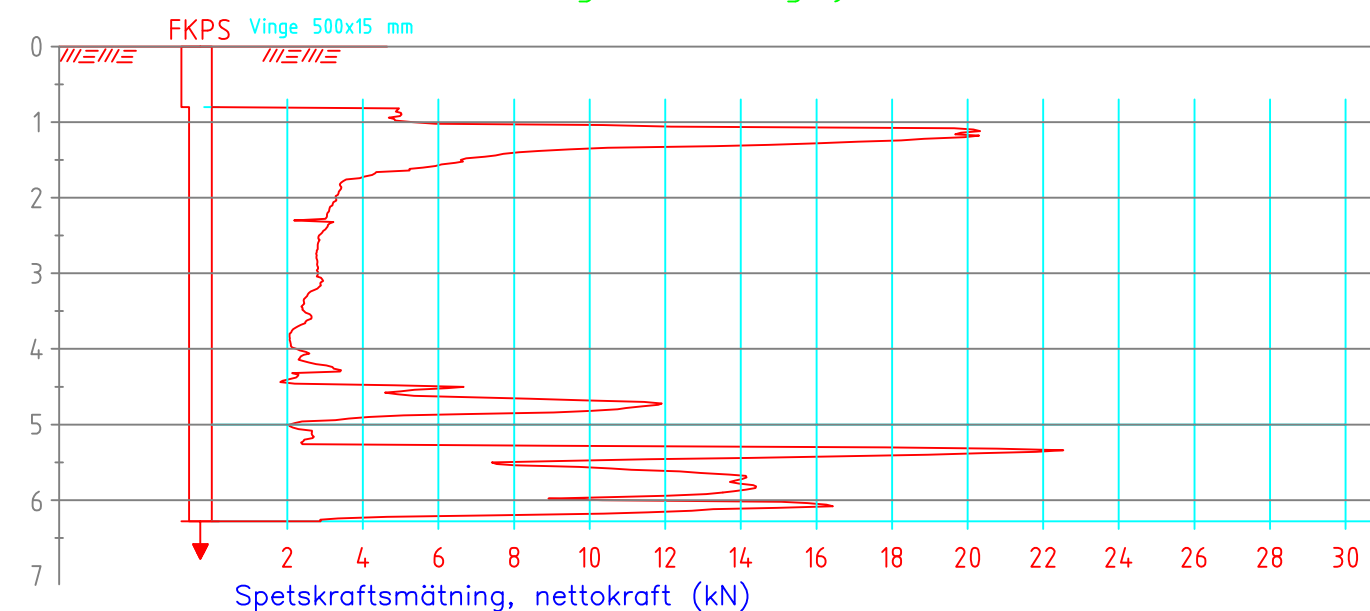
E25 (referenssondering i naturlig jord)



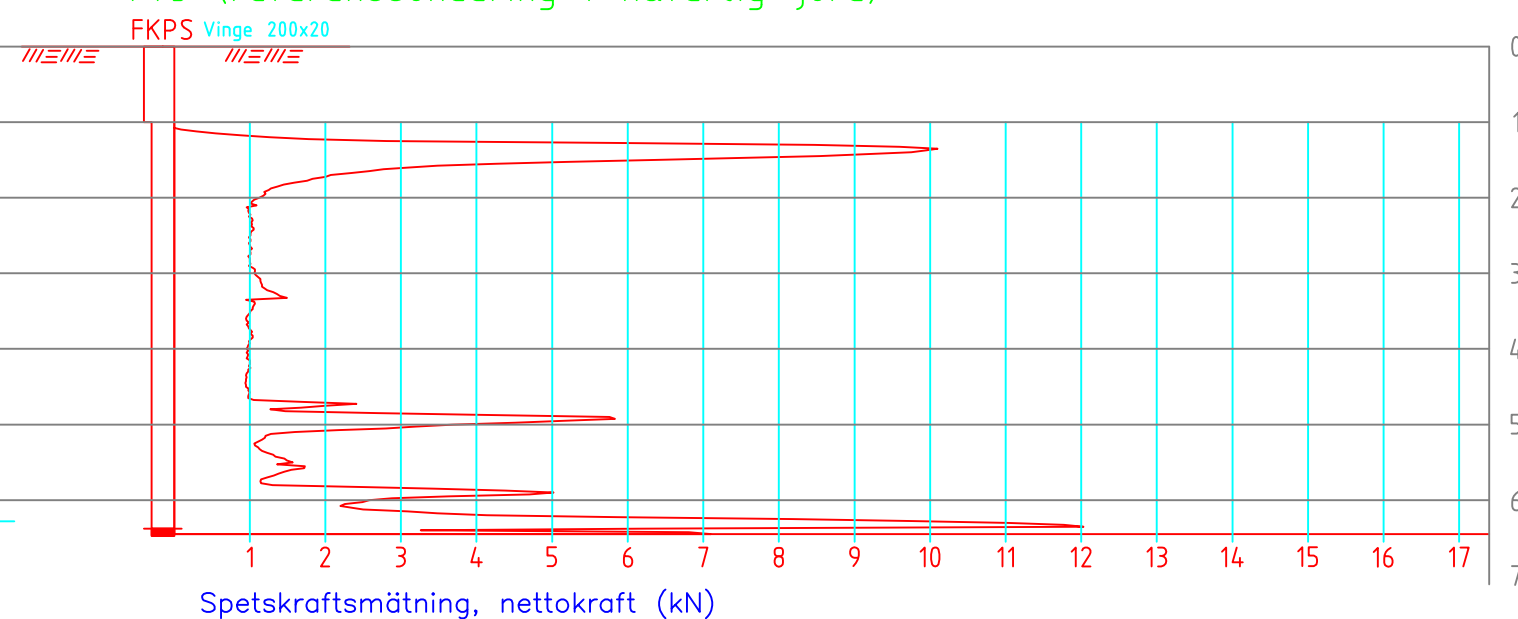
A75 (referenssondering i naturlig jord)



C55 (referenssondering i naturlig jord)



F75 (referenssondering i naturlig jord)



BET	ANT	ÄNDRINGEN AVSER	DATUM	SIGN



Statens geotekniska institut

581 93 LINKÖPING Telefon:013-20 18 00 Telefax:013-20 19 14

UPPDRAG NR 11925	RITAD AV V.PUUSTINEN	BOTNIABANAN DJUPSTABILISERING STÖCKE-CENTRALA UMEA
DATUM 081110	HANDLÄGGARE M.ANDERSSON	
TEKNIKANSVARIG Y.ROGBECK	SKALA 1:100	NUMMER 13



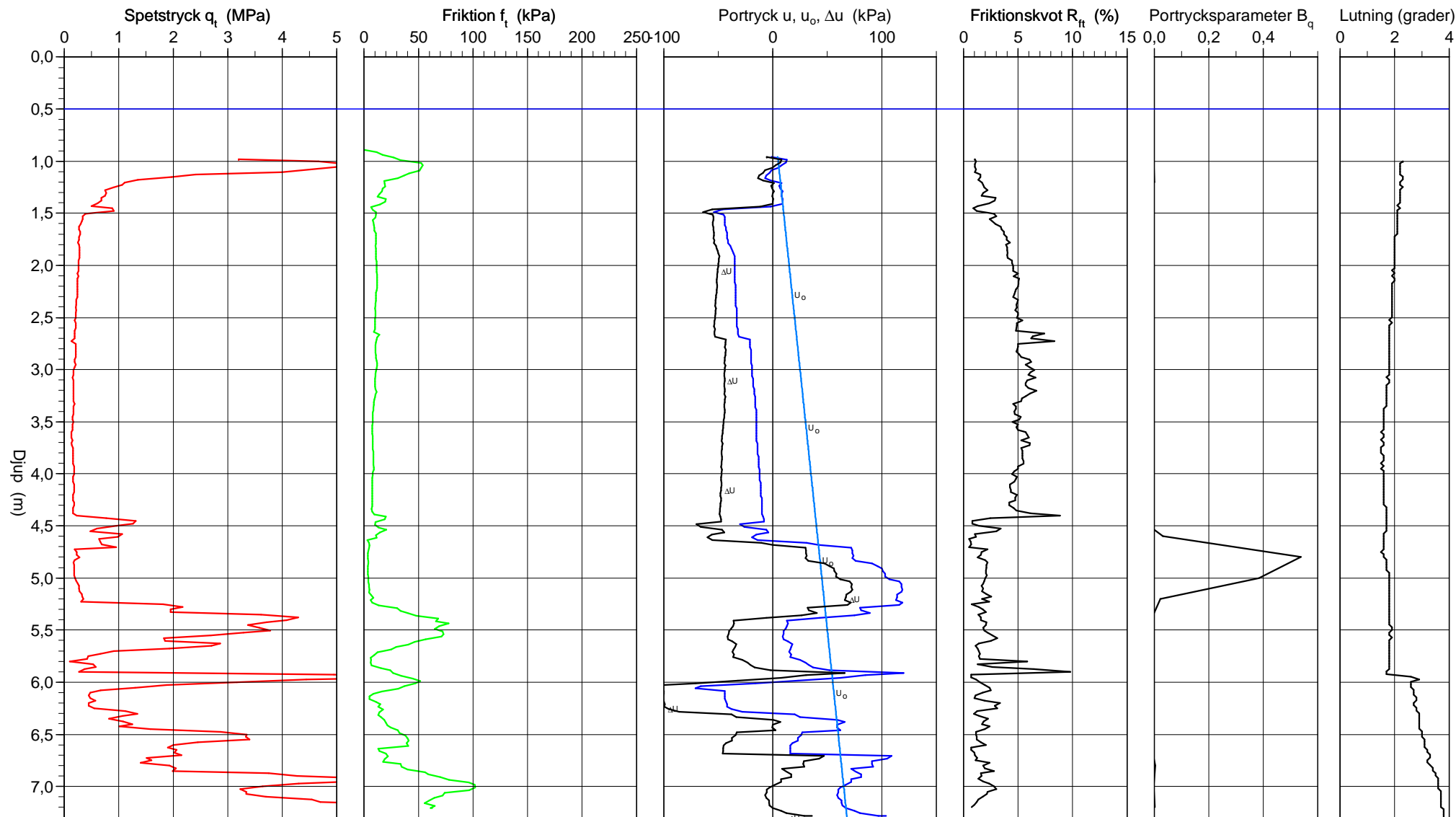
### CPT-sondering utförd enligt EN ISO 22476-1

Förborrningsdjup 1,00 m  
 Start djup 1,00 m  
 Stopp djup 7,33 m  
 Grundvattennivå 0,50 m

Referens  
 Nivå vid referens  
 Förborrat material Let  
 Geometri Normal

Vätska i filter Glycerin  
 Borrpunktens koord.  
 Utrustning  
 Sond nr 3380

Projekt Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan  
 Projekt nr 11925  
 Plats Umeå  
 Borrhål A0  
 Datum 080609

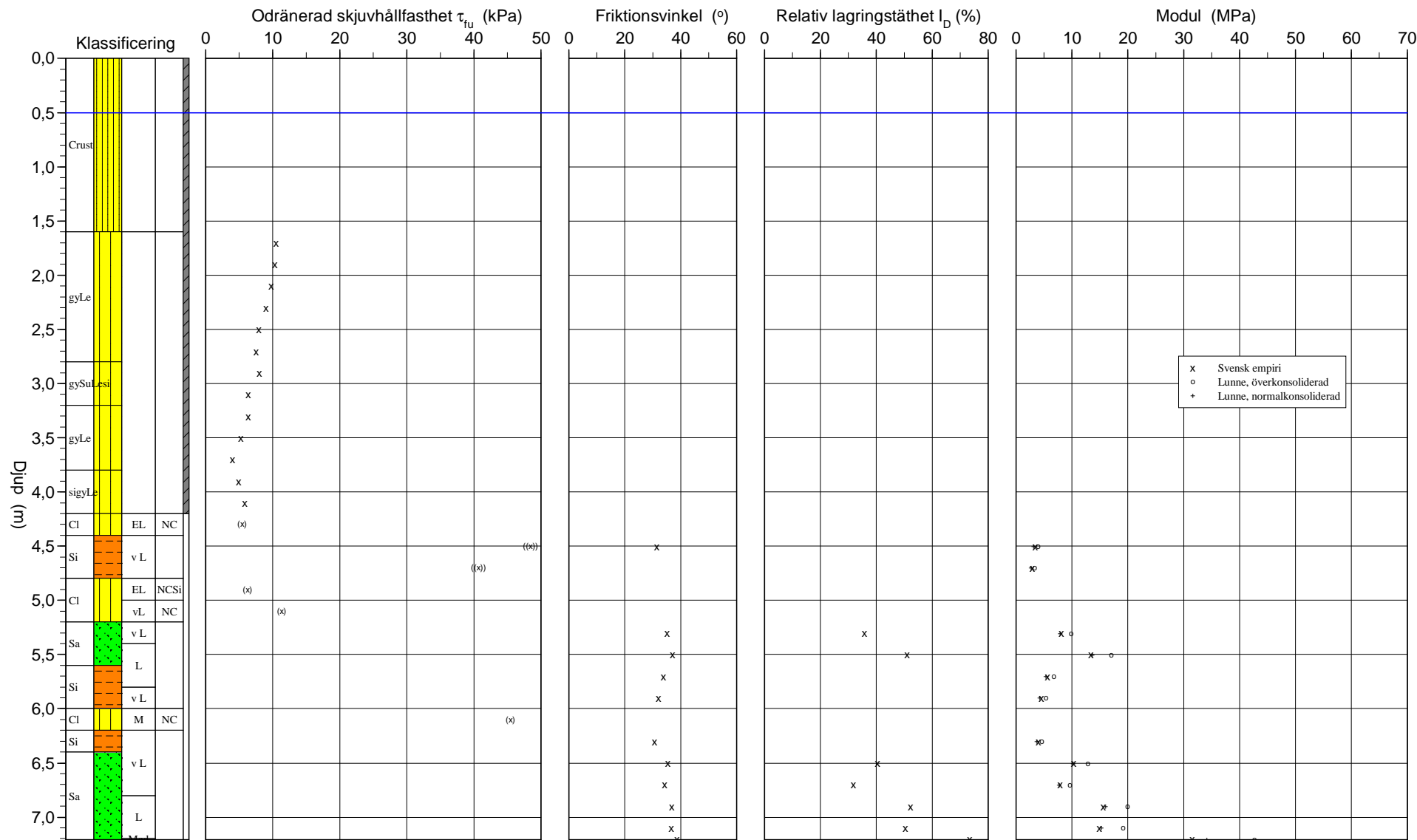


# Utvärderad enligt SGI rapport 69 - sulfidjord

Referens Förobörningsdjup 1,00 m  
 Nivå vid referens Förobörat material Let  
 Grundvattenyta 0,50 m Utrustning  
 Startdjup 1,00 m Geometri Normal

Utvärderare Mattias Andersson  
 Datum för utvärdering 2008-06-16

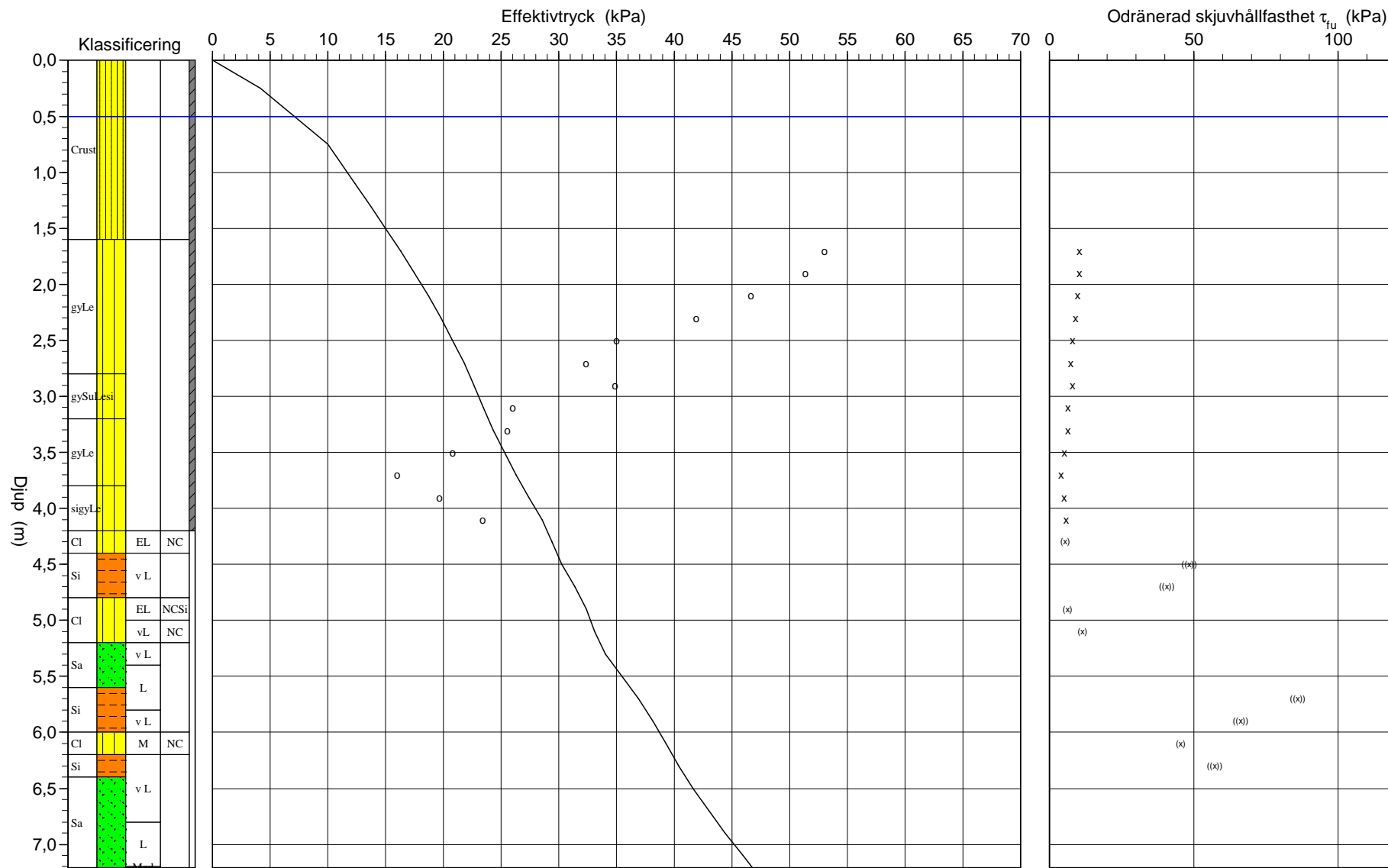
Projekt Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan  
 Projekt nr 11925  
 Plats Umeå  
 Borrhål A0  
 Datum 080609



# Utvärderad enligt SGI rapport 69 - sulfidjord

Referens Förobörningsdjup 1,00 m Utvärderare Mattias Andersson  
 Nivå vid referens Förobörat material Let Datum för utvärdering 2008-06-16  
 Grundvattenyta 0,50 m Utrustning  
 Startdjup 1,00 m Geometri Normal

Projekt Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan  
 Projekt nr 11925  
 Plats Umeå  
 Borrhål A0  
 Datum 080609



# CPT - sondering

<b>Projekt</b> <b>Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan 11925</b>		<b>Plats</b> <b>Umeå</b>																
		<b>Borrhål</b> <b>A0</b>																
		<b>Datum</b> <b>080609</b>																
Förbörningsdjup 1,00 m	Förbörnat material Let																	
Startdjup 1,00 m	Geometri Normal																	
Stoppdjup 7,33 m	Vätska i filter Glycerin																	
Grundvattenyta 0,50 m	Operatör Markku Jämse																	
Referens	Utrustning																	
Nivå vid referens	<input checked="" type="checkbox"/> <b>Portryck registrerat vid sondering</b>																	
<b>Kalibreringsdata</b>		<b>Nollvärden, kPa</b>																
Spets 3380	Inre friktion $O_c$ 0,0 kPa																	
Datum	Inre friktion $O_f$ 0,0 kPa																	
Areafaktor a 0,610	Cross talk $c_1$ 0,000																	
Areafaktor b 0,011	Cross talk $c_2$ 0,000																	
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Portryck</th> <th>Friktion</th> <th>Spetstryck</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Före</td> <td>101,00</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>Efter</td> <td>101,00</td> <td>1,00</td> <td>0,04</td> </tr> <tr> <td>Diff</td> <td>0,00</td> <td>1,00</td> <td>0,04</td> </tr> </tbody> </table>		Portryck	Friktion	Spetstryck	Före	101,00	0,00	0,00	Efter	101,00	1,00	0,04	Diff	0,00	1,00	0,04
	Portryck	Friktion	Spetstryck															
Före	101,00	0,00	0,00															
Efter	101,00	1,00	0,04															
Diff	0,00	1,00	0,04															
<b>Skalfaktorer</b>		<b>Korrigerig</b>																
Portryck Område Faktor	Friktion Område Faktor	Spetstryck Område Faktor																
		Portryck (ingen) Friktion (ingen) Spetstryck (ingen)																
		Bedömd sonderingsklass																
<input type="checkbox"/> Använd skalfaktorer vid beräkning																		
<b>Portrycksobservationer</b>		<b>Skiktgränser</b>																
Djup (m)	Portryck (kPa)	Djup (m)																
0,50	0,00																	
		<b>Klassificering</b>																
Djup (m)	Densitet (ton/m <sup>3</sup> )	Flytgräns	Jordart															
Från	Till																	
0,00	1,50	1,70	Crust															
1,50	2,25	1,63	gyLe															
2,25	2,75	1,53	gyLe															
2,75	3,25	1,41	gySuLesi															
3,25	3,75	1,53	gyLe															
3,75	4,25	1,61	sigyLe															
<b>Anmärkning</b>																		

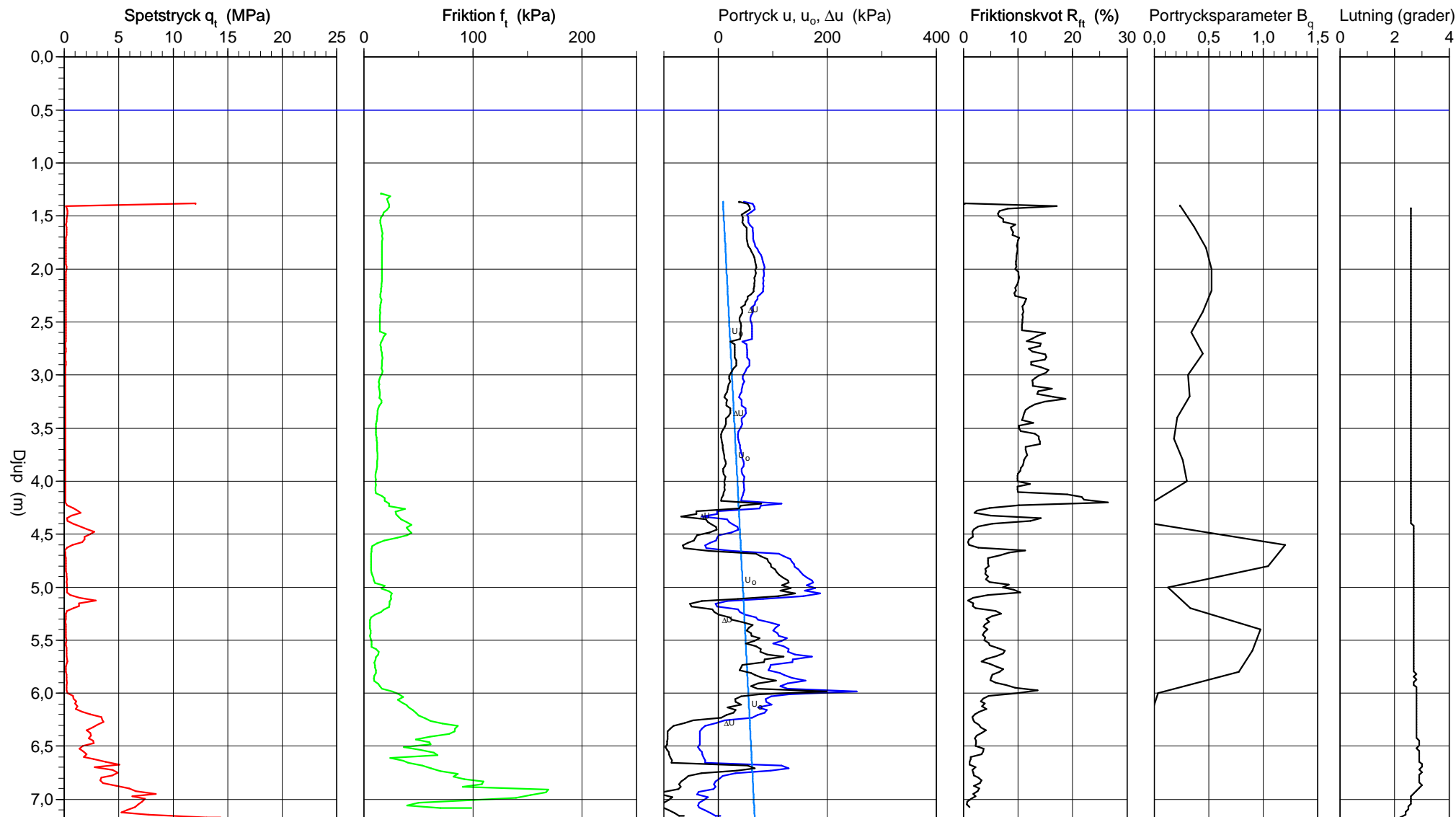
### CPT-sondering utförd enligt EN ISO 22476-1

Förborrningsdjup 1,40 m  
 Start djup 1,40 m  
 Stopp djup 7,20 m  
 Grundvattennivå 0,50 m

Referens  
 Nivå vid referens  
 Förborrat material  
 Geometri Normal

Vätska i filter Glycerin  
 Borrpunktens koord.  
 Utrustning  
 Sond nr 3380

Projekt Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan  
 Projekt nr 11925  
 Plats Umeå  
 Borrhål E51  
 Datum 080609

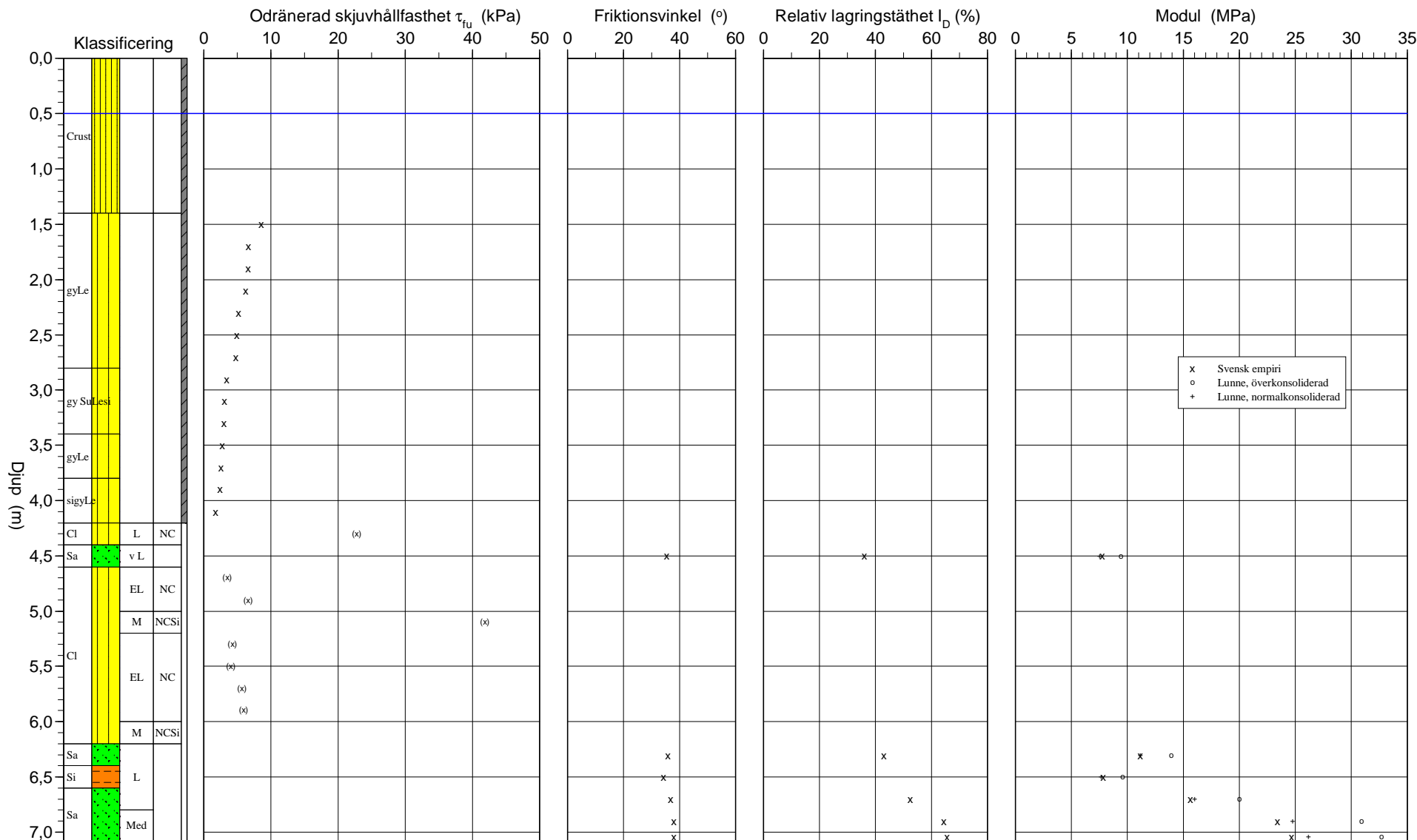


# Utvärderad enligt SGI rapport 69 - sulfidjord

Referens Förobörningsdjup 1,40 m  
 Nivå vid referens Förobörat material  
 Grundvattenyta 0,50 m Utrustning  
 Startdjup 1,40 m Geometri Normal

Utvärderare Mattias Andersson  
 Datum för utvärdering 2008-06-16

Projekt Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan  
 Projekt nr 11925  
 Plats Umeå  
 Borrhål E51  
 Datum 080609



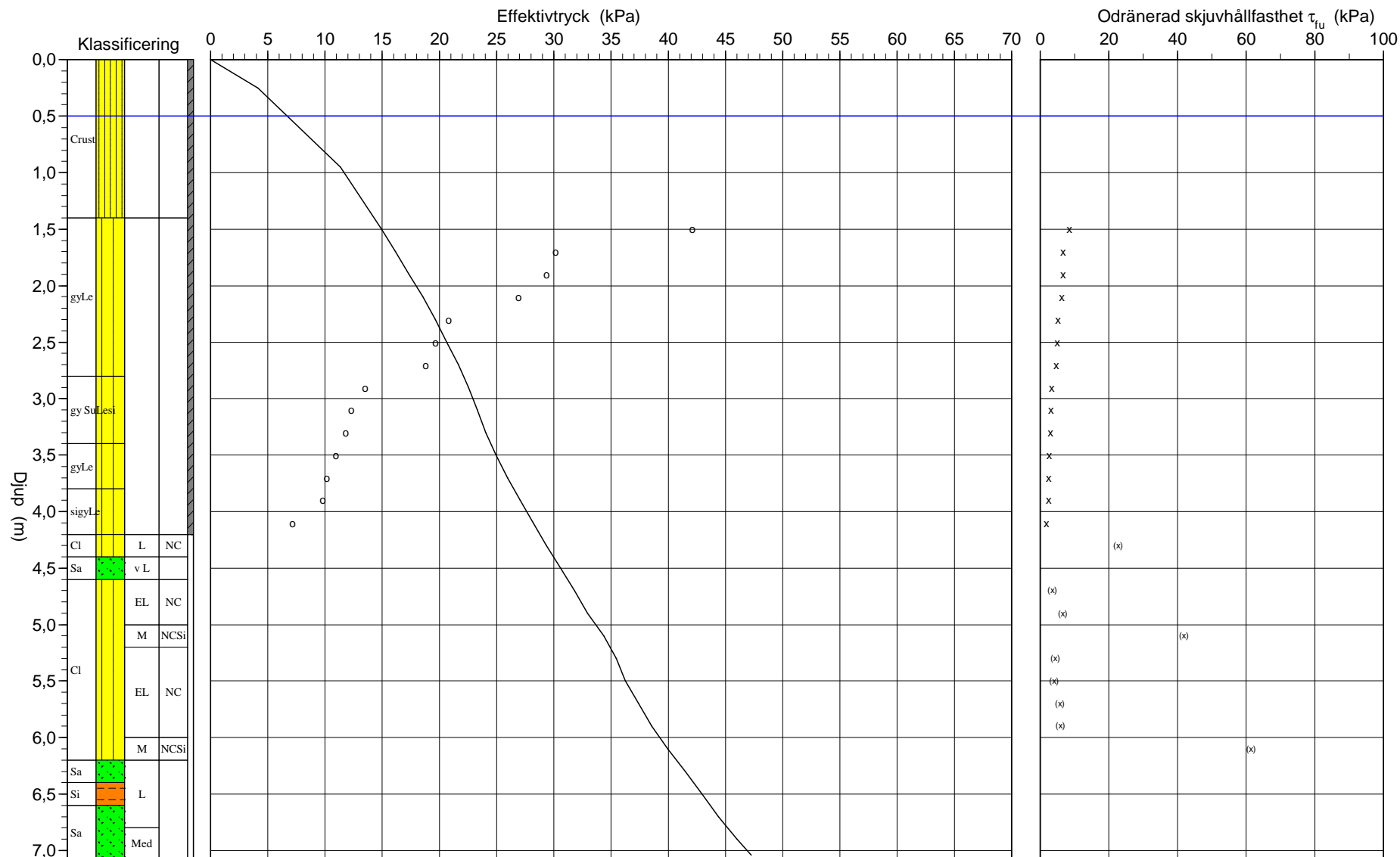
# Utvärderad enligt SGI rapport 69 - sulfidjord

Referens  
 Nivå vid referens  
 Grundvattenyta 0,50 m  
 Startdjup 1,40 m

Förborrningsdjup 1,40 m  
 Förborrat material  
 Utrustning  
 Geometri Normal

Utvärderare Mattias Andersson  
 Datum för utvärdering 2008-06-16

Projekt Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan  
 Projekt nr 11925  
 Plats Umeå  
 Borrhål E51  
 Datum 080609







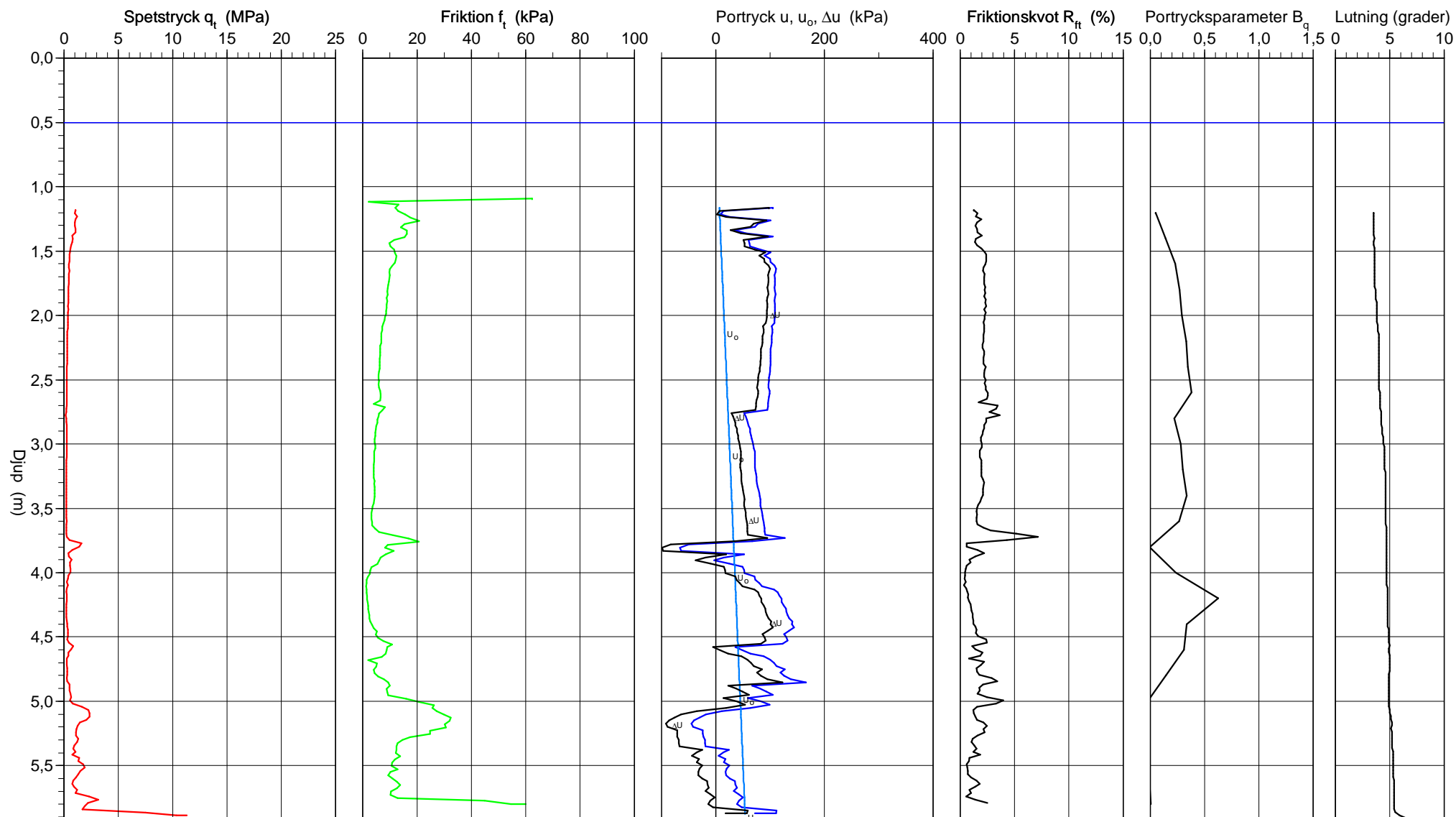
### CPT-sondering utförd enligt EN ISO 22476-1

Förborrningsdjup 1,20 m  
 Start djup 1,20 m  
 Stopp djup 5,92 m  
 Grundvattennivå 0,50 m

Referens  
 Nivå vid referens  
 Förborrat material  
 Geometri Normal

Vätska i filter Glycerin  
 Borrpunktens koord.  
 Utrustning  
 Sond nr 3380

Projekt Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan  
 Projekt nr 11925  
 Plats Umeå  
 Borrhål IO  
 Datum 080609

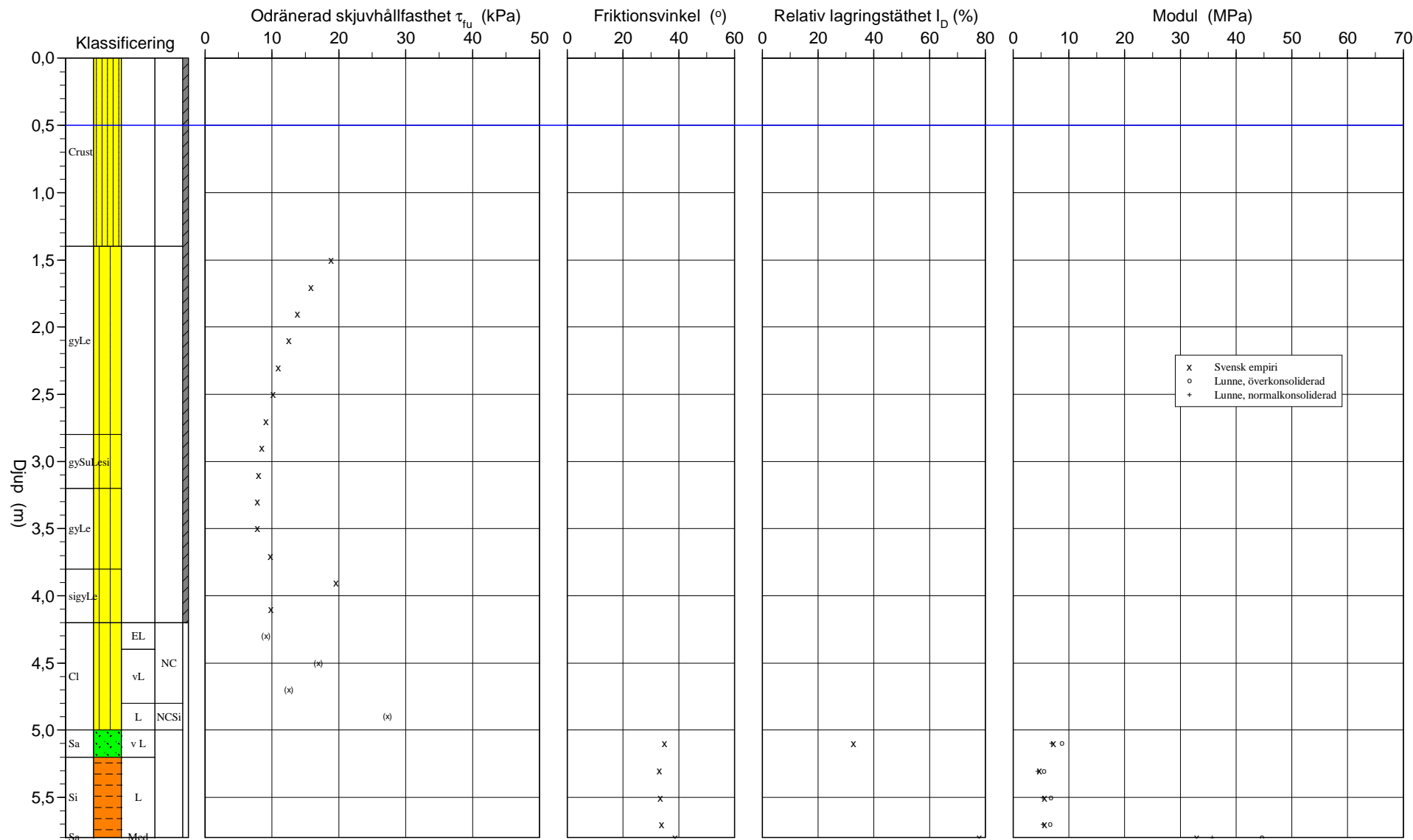


# Utvärderad enligt SGI rapport 69 - sulfidjord

Referens Förobörningsdjup 1,20 m  
 Nivå vid referens Förobörat material  
 Grundvattenyta 0,50 m Utrustning  
 Startdjup 1,20 m Geometri Normal

Utvärderare Mattias Andersson  
 Datum för utvärdering 2008-06-16

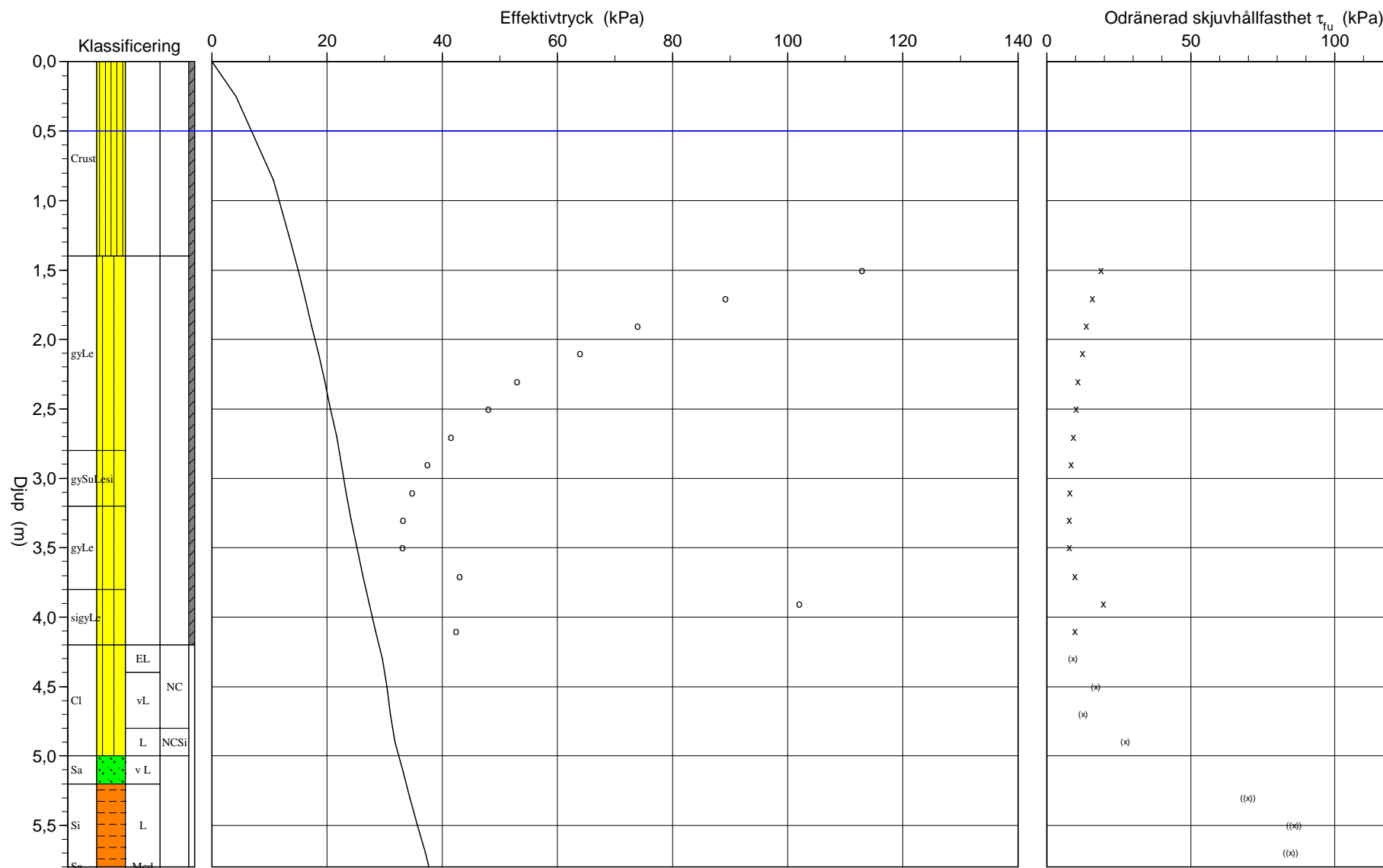
Projekt Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan  
 Projekt nr 11925  
 Plats Umeå  
 Borrhål IO  
 Datum 080609



# Utvärderad enligt SGI rapport 69 - sulfidjord

Referens Förobörningsdjup 1,20 m Utvärderare Mattias Andersson  
 Nivå vid referens Förobörat material Datum för utvärdering 2008-06-16  
 Grundvattenyta 0,50 m Utrustning  
 Startdjup 1,20 m Geometri Normal

Projekt Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan  
 Projekt nr 11925  
 Plats Umeå  
 Borrhål IO  
 Datum 080609



# CPT - sondering

<b>Projekt</b> Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan 11925		<b>Plats</b> Umeå																	
		<b>Borrhål</b> I0																	
		<b>Datum</b> 080609																	
Förbörningsdjup	1,20 m	Förbörat material																	
Startdjup	1,20 m	Geometri	Normal																
Stoppdjup	5,92 m	Vätska i filter	Glycerin																
Grundvattenyta	0,50 m	Operatör	Markku Jämse																
Referens		Utrustning																	
Nivå vid referens		<input checked="" type="checkbox"/> <b>Portryck registrerat vid sondering</b>																	
<b>Kalibreringsdata</b>		<b>Nollvärden, kPa</b>																	
Spets	3380	Inre friktion $O_c$	0,0 kPa																
Datum		Inre friktion $O_f$	0,0 kPa																
Areafaktor a	0,610	Cross talk $c_1$	0,000																
Areafaktor b	0,011	Cross talk $c_2$	0,000																
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Portryck</th> <th>Friktion</th> <th>Spetstryck</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Före</td> <td>100,00</td> <td>0,00</td> <td>0,02</td> </tr> <tr> <td>Efter</td> <td>99,00</td> <td>0,00</td> <td>0,04</td> </tr> <tr> <td>Diff</td> <td>-1,00</td> <td>0,00</td> <td>0,02</td> </tr> </tbody> </table>			Portryck	Friktion	Spetstryck	Före	100,00	0,00	0,02	Efter	99,00	0,00	0,04	Diff	-1,00	0,00	0,02
	Portryck	Friktion	Spetstryck																
Före	100,00	0,00	0,02																
Efter	99,00	0,00	0,04																
Diff	-1,00	0,00	0,02																
<b>Skalfaktorer</b>		<b>Korrigerig</b>																	
Portryck	Friktion	Spetstryck																	
Område Faktor	Område Faktor	Område Faktor																	
<input type="checkbox"/> <b>Använd skalfaktorer vid beräkning</b>		Portryck (ingen) Friktion (ingen) Spetstryck (ingen)  Bedömd sonderingsklass																	
<b>Portrycksobservationer</b>		<b>Skiktgränser</b>	<b>Klassificering</b>																
Djup (m)	Portryck (kPa)	Djup (m)	Djup (m)																
0,50	0,00		Från Till Densitet (ton/m <sup>3</sup> ) Flytgräns Jordart																
			0,00 1,40 1,70																
			1,40 2,25 1,63 0,70																
			2,25 2,75 1,53 0,74																
			2,75 3,25 1,41 1,56																
			3,25 3,75 1,53 0,68																
			3,75 4,25 1,61 0,58																
			Crust gyLe gyLe gySuLesi gyLe sigyLe																
<b>Anmärkning</b>																			

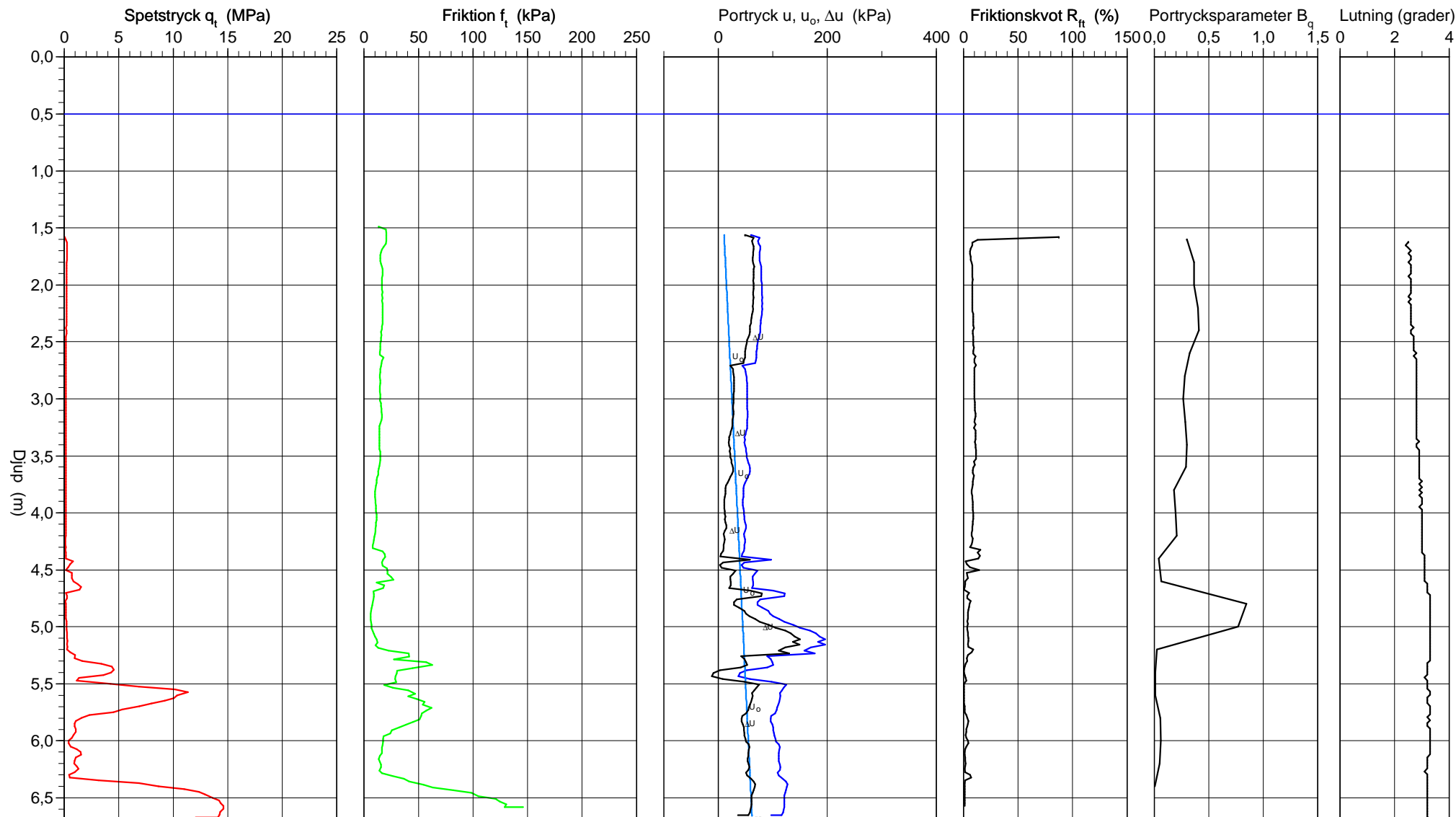
### CPT-sondering utförd enligt EN ISO 22476-1

Förborrningsdjup 1,60 m  
 Start djup 1,60 m  
 Stopp djup 6,70 m  
 Grundvattennivå 0,50 m

Referens  
 Nivå vid referens  
 Förborrat material  
 Geometri Normal

Vätska i filter Glycerin  
 Borrpunktens koord.  
 Utrustning  
 Sond nr 3380

Projekt Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan  
 Projekt nr 11925  
 Plats Umeå  
 Borrhål I10  
 Datum 080609

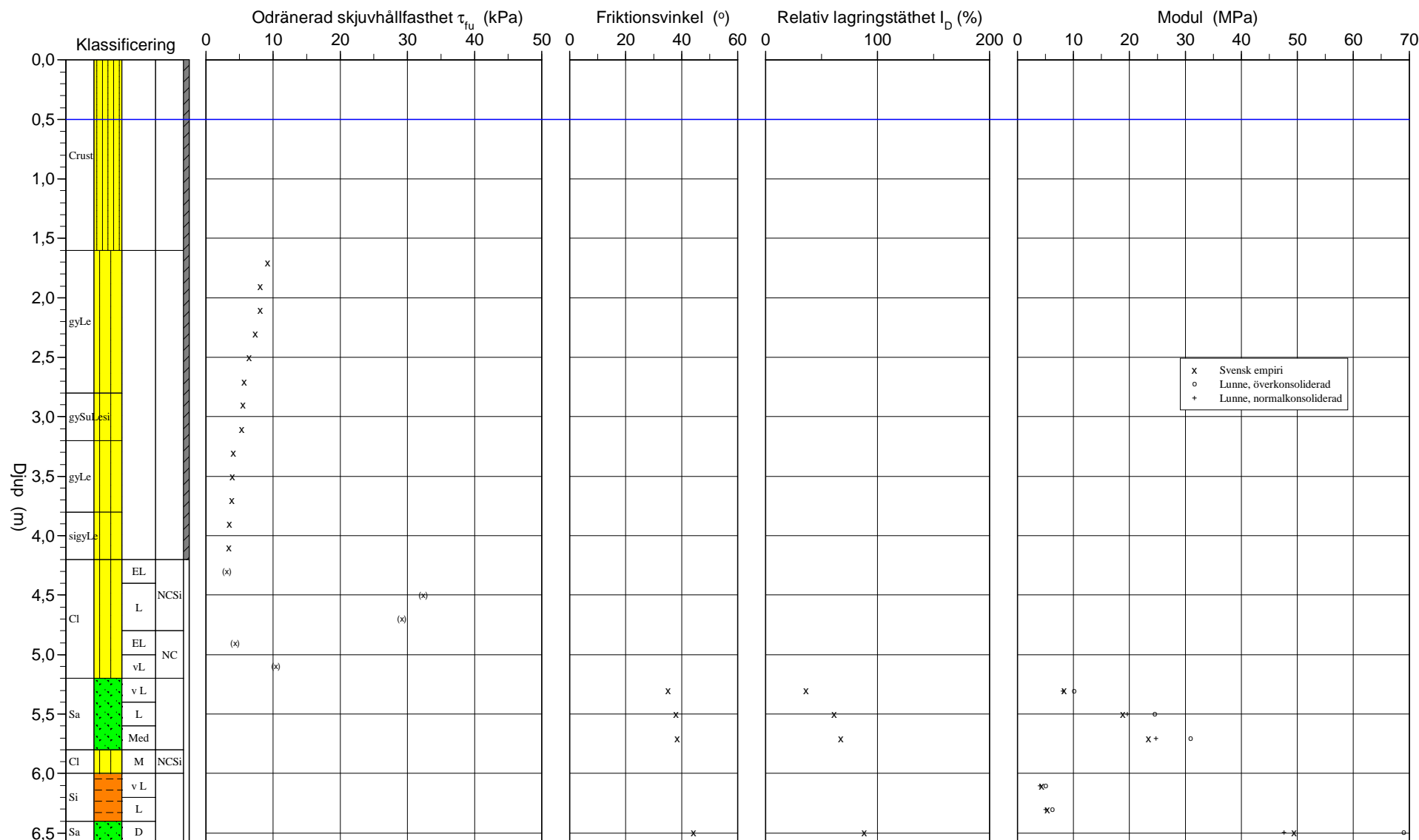


## Utvärderad enligt SGI rapport 69 - sulfidjord

Referens Förobörningsdjup 1,60 m  
 Nivå vid referens Förobörat material  
 Grundvattenyta 0,50 m Utrustning  
 Startdjup 1,60 m Geometri Normal

Utvärderare Mattias Andersson  
 Datum för utvärdering 2008-06-16

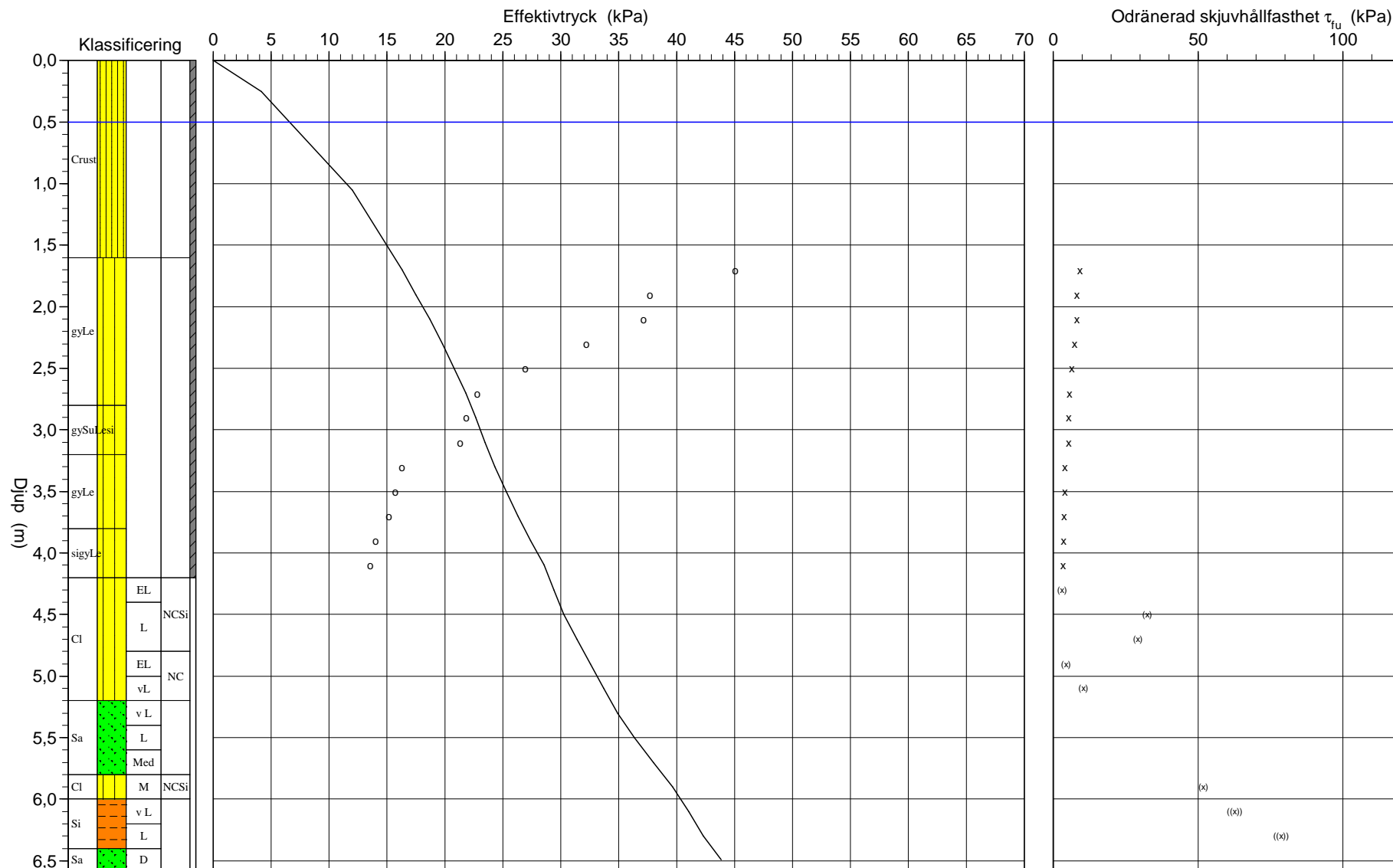
Projekt Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan  
 Projekt nr 11925  
 Plats Umeå  
 Borrhål I10  
 Datum 080609



# Utvärderad enligt SGI rapport 69 - sulfidjord

Referens: Förbörningsdjup 1,60 m      Utvärderare: Mattias Andersson  
 Nivå vid referens: Förbörat material      Datum för utvärdering 2008-06-16  
 Grundvattenyta 0,50 m      Utrustning:  
 Startdjup 1,60 m      Geometri: Normal

Projekt: Sulfidjordsstabilisering, Botniabanan  
 Projekt nr: 11925  
 Plats: Umeå  
 Borrhål: I10  
 Datum: 080609





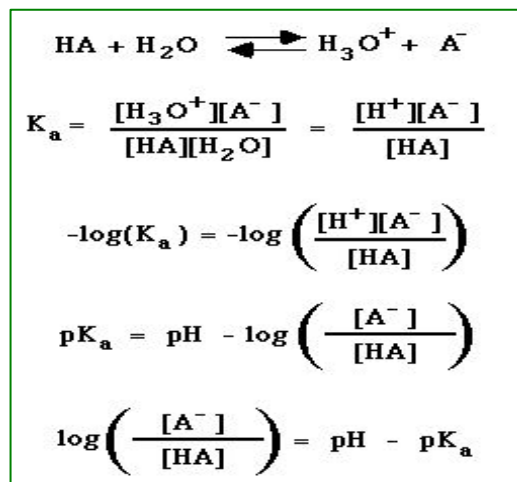


## Kemiska Undersökningar

### Fakta

Labbtester indikerar varierande resultat avseende stabilisering i sulfidjordsprover tagna på olika nivåer under markytan. Följande allmänna fakta rör stabilisering i organisk sulfidjord:

- Mycket högt pH (>12-13) genereras vid stabiliseringen.
- Tillförda fria  $\text{Ca}^{2+}$  joner spelar en viktig roll för god stabilisering.
- Organiska jordar innehåller i huvudsak fulvus syror (även kallade fulvic syror), humussyror och humin.
- Humussyror består av större molekyler med ökad löslighet med ökat pH medan fulvus syror består av mindre molekyler, lösliga i ett brett pH-intervall (i princip i hela pH skalan); humin molekyler är i princip olösliga i vatten.
- Humussyrors polära molekyldel består i huvudsak av OH-grupper.
- Humussyror är s.k. svaga syror och deras specifika värde på pKa (dissociationskonstant) relaterat till omgivningens/vattnets pH styr andelen som föreligger i negativt laddad jonform i vatten. Sambandet mellan pKa och pH kan beskrivas enligt följande:



Härav, när en svag syra är 50 % dissocierad (dvs. då  $[\text{A}^-] = [\text{HA}]$ ), dvs. när den är negativt laddad då är  $\text{pH} = \text{p}K_a$ . Med dissocierad menas att vätet i den polära molekyldelen, t.ex. OH-ändan i humusmolekylen, har lämnat änden och kvar finns en negativt laddad molekyldände. Av ovanstående informationsruta fås dessutom:

pH - pKa	% dissociation
0	50
- 1	10
+1	90
- 2	1
+2	99

Generellt gäller att hög dissociation resulterar i hög löslighet. Humussyror kan ha pKa upp till kring 9-10.

- Sulfidjordar kan innehålla svavelväte ( $\text{H}_2\text{S}$ ).
- $\text{H}_2\text{S}$  är en svag syra och, på samma sätt som för humussyror, dess specifika värde på pKa relaterat till omgivningens/vattnets pH styr andelen som föreligger i negativt laddad jonform i vatten.  $\text{H}_2\text{S}$  är därtill sk diprotic, dvs den har två pKa. pKa<sub>1</sub> ligger kring 7,0, pKa<sub>2</sub> ligger strax under 13.  
För pKa<sub>1</sub> gäller:  $\text{H}_2\text{S} \leftrightarrow \text{HS}^- + \text{H}^+$ .  
För pKa<sub>2</sub> gäller:  $\text{HS}^- \leftrightarrow \text{S}^{2-} + \text{H}^+$ .

Av ovanstående fakta framgår att när vattnet har pH 9 – pH 10 så är minst ca 50 % av allt humus i negativt laddad form. Vid pH 12 så är minst 99 % av humusmolekylerna i negativt laddad form. Fulvus syror är i laddad form i princip i hela pH intervallet. Vid pH 7 är 50 % av svavelvätet i laddad löst form. Kring pH 13 är allt  $\text{H}_2\text{S}$  i jonform varav ca 50 % är i form av  $\text{HS}^-$  och ca 50 % i form av  $\text{S}^{2-}$ .

Molekyler som är negativt laddade har stor attraktionskraft på positivt laddade molekyler som t.ex.  $\text{Ca}^{2+}$ .

Humussyror, fulvus syror och svavelväte i vatten med högt pH, är alltså en cocktail av laddade föreningar med stark potential att binda till sig positivt laddade joner. Vilka positiva joner som de binder beror av enskild molekyl.  $\text{Ca}^{2+}$  jonerna får anses som starka kandidater i denna bindingsprocess.

### Hypotes

Jordar med högt organiskt innehåll i form av fulvus syror och humus syror binder upp  $\text{Ca}^{2+}$  jonerna. Detta resulterar i reducerade möjligheter att producera stabila/hårda pelare. Än mer reducerad effekt fås då jorden dessutom innehåller svavelväte. Allt triggat av att pH höjs avsevärt (pH 12 - pH 14) under produktionen av pelarna. Förutom att  $\text{Ca}^{2+}$  binds upp på ett ofördelaktigt sätt produceras komplex av Ca-fulvus och Ca-humus. Sådana komplex kan lägga sig som ett skyddande täcke över de mineralkornsytor på vilka önskade reaktioner annars skulle ha skett.

### Indikationer på att hypotes har potential att vara relevant

Utifrån ovanstående fakta och hypotes kan följande faktorer indikera negativa förutsättningar för stabilisering av pelare:

- *hög konduktivitet kopplat till hög organiskt halt* (alltså mycket negativa joner, t.ex. dissocierade fulvus syror och svavelväte) redan vid pH 7. Sambandet kan vara en indikation på signifikant andel organiska syror.
- *Lågt redox*. Svavelväte förekommer/produceras mikrobiellt vid lågt redox, därtill produceras korta organiska syror med hög löslighet/jonbindande förmåga, vid bl.a. lågt redox.

En indirekt indikation på att dessa i verkligheten också är av betydelse att undersöka ges i stjärndiagram Figur 1. Det kan även finnas andra värdefulla parametrar med vilka stjärndiagrammet får utökas med.

Stjärndiagrammet är baserat på en sammanställning av utförda enaxliga tryckförsök på laboratorieinblandade prover med olika bindemedel samt på data från Josef Mácsiks rapport "Bedömning av sulfidjord" 2003-12-05, SCC AB. Förhoppningen är att stjärndiagrammet ska tydliggöra data visavi problemet.

Linjefärgerna i stjärndiagrammet betyder:

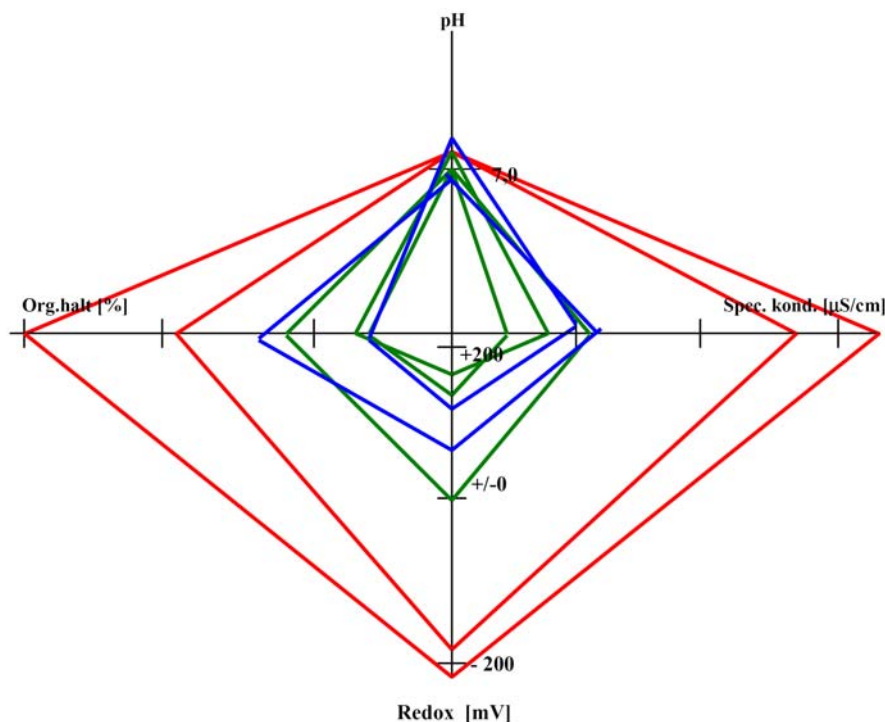
Prov tagna på nivå 2,0 m – 2,6 m u m y, samt 5 m u m y: hög tryckhållfasthet på laboratorieinblandade prover, inga problem på de nivåerna, härav gröna linjer.

Nivå 3 m samt nivå 4 m: i viss mån angränsade till "problemnivån", härav blå linjer.

Nivå 3,4 m – 3,7 m: "problemnivåer", härav röda linjer.

Med "problemnivå" avses den nivå där det blir lägre hållfasthet än övriga nivåer, men därmed inte sagt att det är för låg hållfasthet.

(Not: linjerna inlagda för hand direkt i Word, varvid de inte på millimetern går att få exakt på de olika axlarna, gäller främst inom det snäva pH intervallet).



Figur 1. Stjärndiagram för organisk halt, pH, konduktivitet och redox.

Figur 1 visar att ju högre organisk halt, lägre redox, högre pH samt ju högre spec. konduktivitet desto sämre pelare, speciellt när man kommer ut i det röda området (förutsatt samma tillsatta bindemedelsmängd).



Statens geotekniska institut  
Swedish Geotechnical Institute

SE-581 93 Linköping, Sweden

Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800

Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914

E-mail: [sgi@swedgeo.se](mailto:sgi@swedgeo.se) Internet: [www.swedgeo.se](http://www.swedgeo.se)