

d

# Horisontalrörelser och portryck i en lerslänt vid olika säkerhetsnivåer

Karls Grav, Vänersborg

HJÖRDIS ANDERSSON  
ELVIN OTTOSSON

Linköping i mars 1997



**Statens geotekniska institut**  
**Swedish Geotechnical Institute**

S-581 93 Linköping, Sweden  
Tel. 013-11 51 00, Int. +46 13 11 51 00  
Fax. 013-13 16 96, Int +46 13 13 16 96

ISSN 1100-6692

1997-03-03  
Dnr 1-90-370



*Horisontalrörelser och portryck i en lerlänt vid olika  
säkerhetsnivåer*

*KARLS GRAV, Vänersborg*

*Varia 455*

*Hjördis Andersson  
Elvin Ottosson*

## **FÖRORD**

Mätningar i naturliga slänter är värdefulla och centrala för att öka kunskaperna om slänters beteende, naturligt och vid ingrepp.

Föreliggande rapport redovisar resultat av horisontalrörelse- och portrycksmätningar i en ler-slänt vid en hastig sänkning av släntens säkerhetsnivå. Mätresultaten jämförs med utförda beräkningar.

Jöran Hermansson, fd SGI, har svarat för handläggningen vid mätningarnas genomförande. Per-Evert Bengtsson, SGI, har svarat för FLAC-beräkningarna och i övrigt bidragit med värdefulla synpunkter. Utredningen har finansierats av SGI.

Linköping, februari 1997

Författarna

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>Text</b>	<b>Sida</b>
1. BAKGRUND OCH SYFTE	4
2. UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR	4
2.1 Tidigare utförda undersökningar	4
2.2 Kompletterande undersökningar	4
3. JORD- OCH GRUNDVATTENFÖRHÅLLANDEN	5
4. UTFÖRDA MÄTNINGAR	5
4.1 Portrycksmätningar	5
4.2 Rörelsemätningar	7
5. STABILITETSBERÄKNINGAR	7
5.1 Beräkningar med SLOPE/W	7
5.2 Beräkningar med FLAC	8
6. BERÄKNING AV FÖRSKJUTNINGAR	9
7. JÄMFÖRELSER	10
7.1 Stabilitetsberäkningar	10
7.2 Förskjutningar	10
8. DISKUSSION OCH ANALYS	11
8.1 Stabilitet	11
8.2 Förskjutningar	12
9. SLUTSATSER	12
<b>Bilagor</b>	<b>Nr</b>
Sektion, geoteknisk undersökning	1
Resultat av laboratorieundersökningar	2
Resultat av inklinometermätningar	3
Resultat av stabilitetsberäkningar med SLOPE/W	4
Effektivspänning och moduler använda vid FLAC-beräkning	5
Resultat av stabilitetsberäkningar med FLAC	6

## 1. BAKGRUND OCH SYFTE

Föreliggande utredning ingår i SGIs forskning om slänters beteende. Syftet med utredningen har varit att studera horisontalrörelser och porttrycksändringar i en lerslânt vid en snabb ökning av skjuvspänningarna. Syftet har dessutom varit att redovisa uppmätta rörelser och porttryck i den aktuella slânten samt att jämföra dessa rörelser med motsvarande förskjutningar beräknade med avancerade numeriska metoder. Det är viktigt att jämföra beräkningsresultatet vid denna typ av beräkningar med uppmätta rörelser. Jämförelser med mätningar utförda i andra slânter har ej ingått i utredningen.

I utredningen har ingått fältundersökningar och mätningar som utförts vid Karls Grav i Vänersborg i samband med att kanalen tömdes på vatten för underhållsarbeten under augusti 1987. Ett avsnitt, vid farledsmarkering 162, där kanalen passerar lerlager med 10 m mäktighet utvaldes för undersökning. Kanalslântens höjd är här drygt 8 m och vattendjupet före tömningen var drygt 7 m. Tömningen av kanalen utfördes inom loppet av 12 timmar med början 87-08-18 och kanalen var därefter torrlagd under 17 dygn, perioden 87-08-19 -- 87-09-04.

## 2. UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR

### 2.1 Tidigare utförda undersökningar.

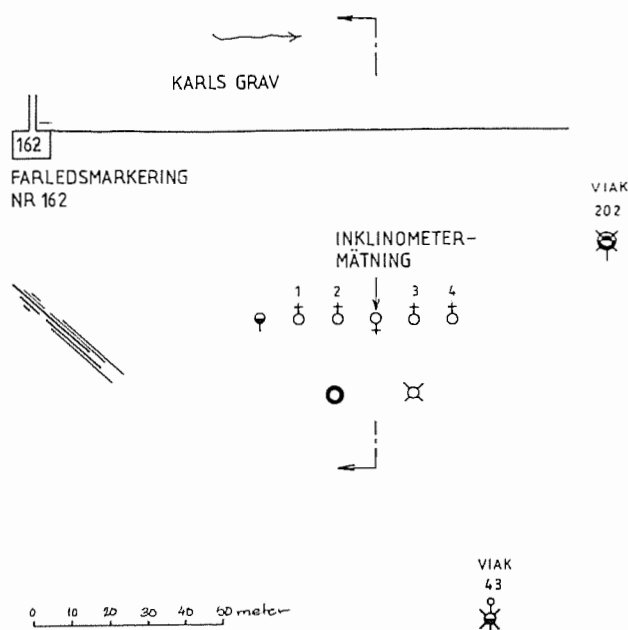
VIAK AB utförde 1986 geotekniska undersökningar utmed kanalen ("PM angående geoteknisk undersökning för slântstabiliteten vid tömning av Karls Grav + förslag till arbetsväg fram till Sätten i Onsjö", daterad 1986-12-19). Två undersökningspunkter ligger i närheten av den aktuella mätplatsen, se Figur 1, och har ingått som underlag i denna studie.

### 2.2 Kompletterande undersökningar.

Följande kompletterande undersökningar, vilka även redovisas i Figur 1 (plan) och Bilaga 1 (sektion) har utförts av SGI:

- Avvägning och lodning av en profil tvärs kanalen.
- Mekanisk trycksondering typ Geotech i en punkt.
- Vingförsök typ Geotech i en punkt.
- Provtagning med skruvprovtagare och kolvprovtagare StI i en punkt.
- Porttrycksmätningar i en punkt. Mätningarna utfördes på fyra nivåer, djup 3,7, 5,5, 8,0 och 9,3 m under markytan (se även sektionsritning, Bilaga 1). Mätspetsarna var av typ BAT, delvis modifierade av SGI.
- Mätning av horisontalrörelser med inklinometer i en punkt.

Upptagna jordprover har undersökts på SGIs laboratorium genom rutinprovning och ödometerförsök (CRS). De senare har delvis dubblerats med hänsyn till att hållfasthetsvärdena för leran visade stor spridning. Resultaten redovisas i Bilaga 2.



Figur 1. Plan över undersökningspunkter.

### 3. JORD- OCH GRUNDVATTENFÖRHÅLLANDEN

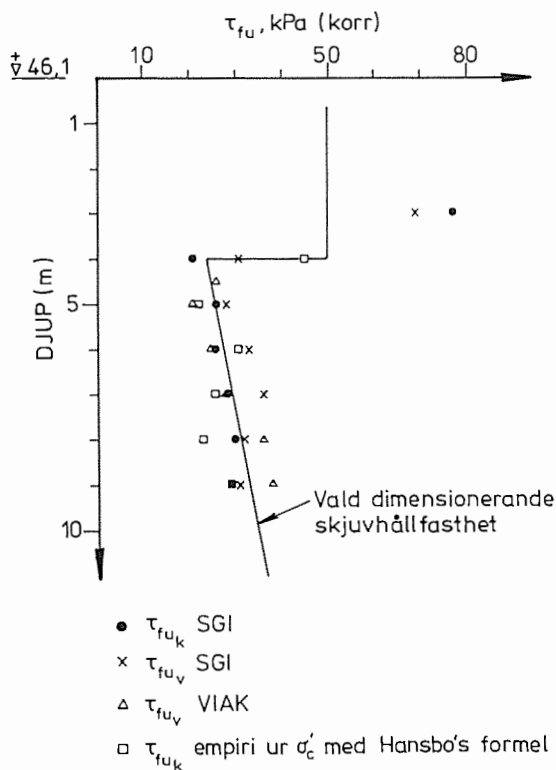
Jorden består i huvudsak av lera till ca 10 m djup. Utförd trycksondering bedöms ha stoppat i underlagande friktionsmaterial. Till 1,5 m djup bedöms jorden bestå av utfylld lera och därunder av torrskorpelera till 3 à 4 m djup. Under torrskorpeleran är leran halvfast med en skjuvhållfasthet mellan 25 och 35 kPa, vilken varierar med nivån. Av SGI och VIAK uppmätta skjuvhållfastheter, korrigerade med hänsyn till konflytgränsen enligt SGI Information 3, samt ur förkonsolideringstrycket utvärderade hållfastheter, redovisas i Figur 2. Vattenkvoten varierar mellan 51 och 66 %. Leran är överkonsoliderad. Under torrskorpeleran är förkonsolideringstrycket 50 - 100 kPa större än det rådande effektivtrycket, dvs en överkonsolideringsgrad (OCR) av 2,0-2,7. Leran är i huvudsak kvick med sensitivitetvärden mellan 170 och 360, se även Bilaga 2.

Porvattentrycket i leran på 5 - 9 m djup motsvarade före tömningen en fri vattenyta på ca 1 m under kanalbankens markyta (87-08-10). Vattennivån i kanalen var ett par decimeter lägre vid en avvägning utförd 87-07-17. Resultatet av portrycksmätningarna redovisas i Figur 3 och kommenteras i texten nedan.

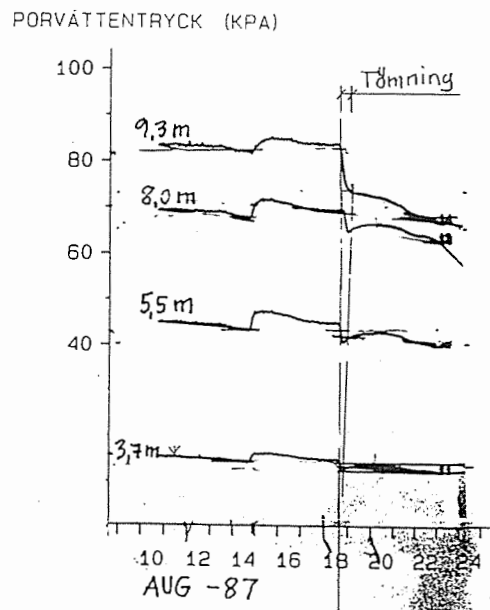
### 4. UTFÖRDA MÄTNINGAR

#### 4.1 Portrycksmätningar

Portrycksmätningar utfördes på fyra nivåer: 3,7, 5,5, 8,0 och 9,3 m djup under markytan i en sektion ca 4 m från slänkrön (se Figur 1). Registrering av portrycken gjordes varje timme med ett automatiskt mätsystem. Mätningarna påbörjades tre veckor före tömningen och pågick fram till tre veckor efter det att kanalen åter vattenfylldes. Resultaten av mätningarna är svårtolkade beroende på störningar orsakade av åsknedslag och därför redovisas endast mätresultat från perioden i samband med tömningen. Resultatet av utförda portrycksmätningar för perioden i samband med tömningen redovisas i Figur 3.



Figur 2. Uppmätt skjuvhållfasthet samt vald dimensionerande skjuvhållfasthet. Uppmätt skjuvhållfasthet har korrigerats med hänsyn till flytgränsen.



Figur 3. Resultat av utförda portrycksmätningar.

Mätarna på 5,5 - 9,3 m djup visar före tömning ett portryck motsvarande en grundvattenyta ca 1 m under markytan. Portrycksmätaren på 3,7 m djup visar ett betydligt lägre portryck, motsvarande en grundvattenyta ca 2 m under markytan. Sannolikt beror detta snarare på ett fel på mätaren än en faktiskt uppmätt portrycksskillnad. Tre dagar före tömning ökade portrycken något, ca 2 kPa, i samtliga mätare.

Då kanalen tömdes, natten till den 19 augusti, reagerade portrycksmätarna omedelbart och portrycken sjönk snabbt i samtliga fyra mätare. Portrycken i mätarna på djupen 5,5 och 8,0 m under markytan sjönk inom loppet av några timmar 3 - 4 kPa. På 9,3 m djup sjönk trycket ca 10 kPa inom loppet av 12 timmar, dvs ungefär den tid det tog att tömma kanalen. Under de två dygn som följde efter tömningen av kanalen registrerades en liten ökning i portrycken på 3,7 - 8,0 m djup, medan trycket sjönk ytterligare på 9,3 m djup.

Fyra dygn efter tömning visar mätarna på 5,5 och 8,0 m djup ett portryck motsvarande en grundvattenyta ca 1,5 m under markytan. Mätaren på den djupaste nivån visar den största sänkningen av portrycket, en nivå motsvarande en grundvattenyta 2 - 2,5 m under markytan. Orsaken till detta kan vara att leran på denna nivå har inslag av siltskikt och därigenom är mer vattengenomsläpplig.



## 4.2 Rörelsemätningar

Mätning av kanalbankens horisontalrörelser har utförts med inklinometer i en punkt 4 m från släntkrön (se Figur 1 ovan). Mätningar har utförts manuellt vid sex tillfällen utöver nollmätningen, vilken utfördes ca 10 dagar efter installationen. Inklinometeröret installerades 1 månad före tömningen av kanalen. Resultatet av mätningarna redovisas i Bilaga 3.

Två inklinometermätningar utfördes då kanalen var tömd. Vid mätning utförd 87-08-20, 1,5 dygn efter tömningen av kanalen, uppmättes en horisontalförskjutning av ca 4,5 mm ut mot kanalen. Förskjutningen var störst i markytan och avtog i stort sett linjärt med ökande djup. Efter ytterligare 14 dygn hade förskjutningen ökat till ca 5,5 mm.

Efter att kanalen åter vattenfylldes utfördes ytterligare tre mätningar, två dygn (87-09-07), en månad (87-10-05) och tre år (90-11-05) efter återfyllningen. Resultaten visar att hälften av horisontalrörelsen gick tillbaka då kanalen återfylldes och att denna rörelse inträffade under de första två dygnen efter återfyllningen.

## 5. STABILITETSBERÄKNINGAR

### 5.1 Beräkningar med SLOPE/W

Stabilitetsberäkningar har utförts under antagandet om cirkulär-cylindriska glidytor och med såväl odränerad som kombinerad analys. Vid kombinerad analys väljs för varje glidytedel det lägsta värdet av den odränerade och den dränerande hållfastheten som dimensionerande hållfasthet. Datorprogrammet SLOPE/W har använts vid beräkningarna.

Beräkningsförutsättningar:

- Lerans odränerade skjuvhållfasthet har bestämts med ledning av, enligt SGI Information 3, korrigerade värden från konprov och vingförsök, samt empiriska värden utvärderade från förkonsolideringstryck och flytgräns. Den odränerade skjuvhållfastheten och vald skjuvhållfasthet för beräkningarna redovisas i Figur 2 ovan.
- Lerans dränerade hållfasthet har bestämts med antagandet om en inre friktionsvinkel av 30° och ett värde på  $c'$  av 5 kPa i den ej uppspruckna delen av torrskorpan och 3 kPa på nivåer under 4 m djup.
- Leran har antagits uppsprucken ner till 1 m djup.
- Lerans densitet har antagits till 1,9 t/m<sup>3</sup> ner till 4 m djup och 1,65 t/m<sup>3</sup> därunder.
- Portryck har valts med ledning av uppmätta värden före och efter tömning av kanalen, samt den i kanalen uppmätta vattennivån före tömning. Portrycken före tömning har bedömts motsvara en grundvattenyta 1,2 m under markytan med en hydrostatisk tryckfördelning mot djupet. Ovanför släntkrön har portrycken efter tömning bedömts motsvara en grundvattenyta 2,0 m under markytan med en hydrostatisk tryckfördelning mot djupet.
- Djupet från släntkrön till fast botten har antagits till 11 m. Fast botten har antagits vara horisontell (se Bilaga 4).

Lägsta säkerhetsfaktor beräknad med odränerad analys är 2,52 för fallet med vattenfylld kanal. Denna säkerhetsfaktor sjunker till 1,39 då kanalen tömts på vatten. Resultatet av beräkningarna inklusive beräkningsförutsättningar redovisas i Bilaga 4:1-4:2.

Den dränerade skjuvhållfastheten blir lägre än den odränerade vid en överkonsolideringsgrad av storleksordningen 2, vilket skall jämföras med ovan beräknat OCR på 2,0-2,7. Ett brott i direkt samband med en tömning av kanalen skulle dock sannolikt ej ske som ett helt dränerat brott. Hur långt tid som erfordras för att ett brott i slänten ska ske dränerat beror på faktorer som jordens permeabilitet, modul samt släntgeometri.

Vid den beräkning som utförts med kombinerad analys blir den dränerande skjuvhållfastheten dimensionerande. Den beräknade säkerhetsfaktorn för fallet tömd kanal blir, för korta ytliga glidytor, starkt beroende av antagen portrycksfördelning i själva slänten. De portrycksmätare som installerats är placerade ca 4 m bakom släntkrön och återger således ej portrycksfördelningen i yttre delen av slänten. Lägsta säkerhetsfaktor beräknad med kombinerad analys är 1,55 för fallet vattenfylld kanal. För fallet tömd kanal och med en portrycksfördelning motsvarande en grundvattenyta 1-1,5 m under markytan i slänten erhålls en säkerhetsfaktor för korta glidytor av 0,98. För större glidytor, som angriper ca 4 m bakom släntkrön, erhålls en säkerhetsfaktor av 1,10. Sannolikt är dock portrycket i yttre delen av slänten lägre i verkligheten och således är säkerheten högre än beräknad. Beräkningar har också utförts med en portrycksfördelning motsvarande en grundvattenyta 1-3 m under markytan i slänten. I detta fallet erhöles en lägsta beräknad säkerhetsfaktor av 1,13. Resultatet av beräkningarna samt gjorda beräkningsantaganden redovisas i Bilaga 4:3-4:6.

Det begränsade antalet sonderingar har inneburit svårigheter att bedöma lerdjupet i beräkningssektionen. Ytterligare beräkningar har därför utförts med antagandet att fast botten motsvarar installationsnivån för inklinometerröret. Med ett antaget lerdjup av 9,5 m, vilket motsvarar inklinometerrörets installationsdjup, erhålls för fallet tömd kanal, vid odränerad analys en lägsta beräknad säkerhetsfaktor av 1,47, dvs något högre än vid antagandet 11 m lerdjup (Bilaga 4:7). Med kombinerad analys för fallet tömd kanal erhålls samma beräknade säkerhetsfaktor som vid 11 m lerdjup, dvs 0,98, se Bilaga 4:8.

## 5.2 Beräkningar med FLAC

Vid beräkningar med avancerade numeriska metoder kan man åskådliggöra beteenden vid olika typer av ingrepp. Beräkning av säkerhetsnivå eller traditionell mobiliseringsgrad kan indirekt göras genom att beräkningar genomförs med succesiv reduktion av hållfastheten tills stora förskjutningar erhålls i slänten. Reduktionen av hållfastheten vid detta gränstillstånd motsvarar normalt den enligt klassisk analys beräknade säkerhetsfaktorn eller mobiliseringsgraden. Beräkning av stabiliteten enligt detta sätt har för denna slänt genomförts med datorprogrammet FLAC, vilket är baserat på finita differensmetoden. Säkerhetsfaktorn har beräknats genom att successivt reducera hållfasthetsvärdena tills brott beräkningsmässigt uppstått i jordmaterialet. Beräkningarna har utförts för odränerade förhållanden med odränerade hållfasthets- och deformationsparametrar. Beräkningarna för dränerade förhållanden har utförts med dränerade hållfasthetsparametrar och deformationsparametrar ( $\nu=0,3$ ) för en antagen portrycksfördelning i slänten. Denna portrycksfördelning motsvarar en grundvattenyta 1-3 m under markytan i slänten (jfr beräkningarna med SLOPE/W, kap 5.1). Övriga beräkningsförutsättningar har varit följande:

- Den odränerade skjuvhållfastheten i leran har antagits till 50 kPa i torrskorpan, dvs ner till 4,0 m djup. Därunder har en linjär hållfasthetsökning antagits, från 24 kPa på 4,0 m djup till 36,6 på 11,0 m djup.
- Lerans dränerade hållfasthet har bestämts med en inre friktionsvinkel av  $30^\circ$  och ett värde på  $c'$  av 0 kPa i torrskorpan ovan nivån +10,1 m och 5 kPa i torrskorpan under nivån +10,1 m. I underliggande lera har ett värde på  $c'$  av 3 kPa antagits.
- Lerans densitet har antagits till  $1,9 \text{ t/m}^3$  i torrskorpan och  $1,65 \text{ t/m}^3$  därunder.
- Spänningstillståndet in situ har beräknats med stöd av empiri. Det spänningstillstånd som använts vid beräkningarna redovisas i Bilaga 5.1.
- Lerans elasticitetsmodul (E) har beräknats med stöd av empiri. Tryckmodulen (K) och skjuvmodulen (G), vilka används som indata i programmet, har utvärderats ur elasticitetsmodulen och antaget värde på tvärkontraktionstalet,  $\nu$ . I den odränerade analysen har en tryckmodul antagits som ger  $\nu=0,5$ . De vid beräkningarna använda modulerna redovisas i Bilaga 5.2.
- Dragspänningar i jordmaterialet har tillåtits.
- Djupet från släntkrön till fast botten har antagits till 11 m. Fast botten har antagits vara horisontell.

Vid odränerade förhållanden erhöles en indirekt beräknad säkerhetsfaktor vid tömd kanal av 1,55. Vid dränerade förhållanden gav beräkningarna en indirekt beräknad säkerhetsfaktor av 1,15. Resultatet av beräkningarna redovisas i Bilaga 6.1 - 6.2. Beräkning av säkerhetsfaktorn för fallet fylld kanal har ej utförts.

## 6. BERÄKNING AV FÖRSKJUTNINGAR

Beräkning av förskjutningar för olika ingrepp har utförts med datorprogrammet FLAC. Beräkningarna har genomförts för fallen fylld kanal, tömd kanal samt återuppfylld kanal, både för odränerade och för dränerade förhållanden ( $\nu=0,3$ ). För att en direkt jämförelse med de inklinometermätta rörelserna ska kunna göras har fasta botten antagits belägen ca 9,5 m under markytan, dvs vid installationsnivån för inklinometerröret. Övriga beräkningsförutsättningar framgår av kap. 5.2 ovan.

Vid beräkning för fallet tömning av kanalen erhålls vid odränerade förhållanden en beräknad horisontell förskjutning av ca 4,5 mm vid markytan i läget för inklinometerröret. Beräknad förskjutning avtar succesivt mot djupet. Vid beräkning under dränerade förhållanden erhålls ca 8,0 mm horisontell förskjutning vid markytan, succesivt avtagande mot djupet. Beräknade förskjutningar framgår av Figur 4.

Beräkningar för fallet återfyllning av kanalen visar en beräknad återfjädring av 0-1 mm för både odränerade och dränerade förhållanden.

## 7. JÄMFÖRELSER

### 7.1 Stabilitetsberäkningar

Jämförelse mellan utförda stabilitetsberäkningar visar en något högre säkerhetsfaktor beräknad indirekt med FLAC jämfört med klassiska stabilitetsberäkningar med SLOPE/W. För odränerade förhållanden erhöles för fallet tömd kanal säkerhetsfaktorn 1,39 med SLOPE/W och 1,55 med FLAC. Motsvarande värden för dränerade förhållanden, och med ett porttryck motsvarande 1-3 m under markytan i slänten, var 1,13 med SLOPE/W respektive 1,15 med FLAC. Att säkerhetsfaktorn är högre vid beräkningarna med FLAC beror sannolikt på att leran antogs uppsprucken till 1,0 m djup vid de klassiska beräkningarna men ej vid de numeriska beräkningarna.

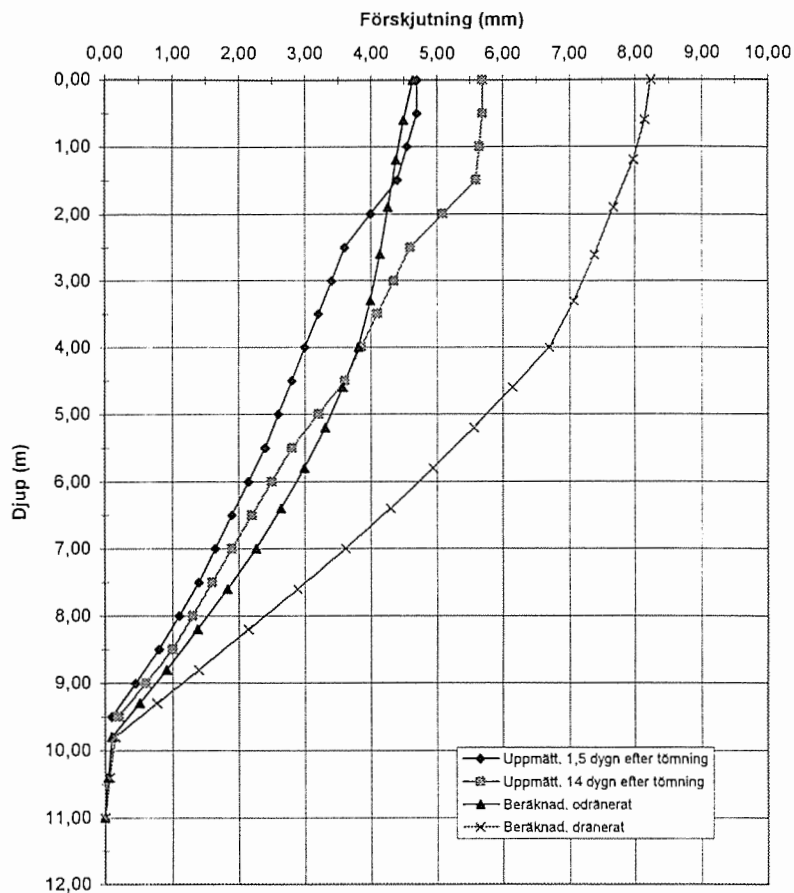
Läge och storlek av den farligaste glidyten beräknad med SLOPE/W stämmer väl överens med brottzonen beräknad med FLAC för odränerade förhållanden. För dränerade förhållanden visar FLAC-beräkningarna på en brottzon vars djup överensstämmer med beräknad farligaste glidyta. Brottzonens utbredning enligt FLAC-beräkningarna får däremot en något större utbredning, angriper på större avstånd bakom slänkrönet, än farligaste glidyten enligt klassiska beräkningar.

### 7.2 Förskjutningar

De förskjutningar som beräknats med FLAC vid odränerade förhållanden är närmast jämförbara med de förskjutningar som uppmätts direkt efter tömning av kanalen. Dessa beräknade förskjutningar stämmer, i läget 4 m bakom slänkrön, väl överens med de som uppmätts direkt efter tömningen av kanalen, se Figur 4. I markytan erhålls i stort sett lika stora beräknade som uppmätta förskjutningar. De uppmätta förskjutningarna avtar linjärt med djupet, medan de beräknade är mer succesivt avtagande.

De beräknade förskjutningarna enligt FLAC vid dränerade förhållanden kan jämföras med de som uppmätts efter en längre tid, under förutsättning att antagna porttrycksförhållanden i slänten motsvarar de verkliga porttrycksförhållandena. Dessa är sålunda mer jämförbara med de förskjutningar som uppmätts lång tid efter tömningen av kanalen. De för dränerade förhållanden beräknade förskjutningarna är ca 1,5 gång så stora som de uppmätta 14 dygn efter tömning. De beräknade förskjutningarna är dock starkt beroende av antagen porttrycksfördelning i slänten.

Vid en återuppfyllning av kanalen visar resultatet av beräkningarna på en liten återfjädring av 0-1 mm vid både odränerade och dränerade förhållanden. Den uppmätta återfjädringen uppgick till ca 3 mm, eller hälften av den totala uppmätta förskjutningen vid tömning.



Figur 4. Med inklinometer uppmätt och med FLAC beräknad förskjutning.

## 8. DISKUSSION OCH ANALYS

### 8.1 Stabilitet

Vid de utförda beräkningarna har vissa antaganden gjorts, som är av avgörande betydelse för resultatet. Portryckssituationen i slänten, vilken är avgörande för den dränerade (effektivspänningsbaserade) analysen, är endast känd i en punkt 4 m bakom släntrönn och återger således ej portrycksfördelningen i yttre delen av slänten. Utifrån denna mätning har samma förhållanden antagits råda i själva slänten, dvs hydrostatiska förhållanden och en grundvattenyta 1-1,5 m under markytan. Vid en hastig sänkning av vattennivån, som vid tömningen av kanalen, borde kvarvarande portryck finnas i friktionslagret under leran, medan portrycket i den yttre delen av slänten borde vara lägre än antaget. Tömningen bör innebära att leran initieellt försöker bibehålla sin effektivspänningsnivå, dvs avlastningen innebär en portrycksminskning. Leran kommer sedan under den fortsatta tömningsperioden succesivt utjäma portrycken med hävning som följd. Tidsförloppet för hävningen beror dels på lerans permeabilitet och kompressionsegenskaper, dels på dräneringsvägarna.

Beräkningsresultatet påverkas av antaganden om djupet till fast botten. De trycksonderingar som finns visar endast djupet till friktionsjord i området ovanför strandlinjen. Inga sonderingar finns som visar lerdjupet i kanalfåran. Lerdjupet kan sålunda både vara större än antaget eller möjligen förekommer endast friktionsjord i kanalfåran. Detta påverkar också vilken portrycksbild som kan uppkomma vid tömning av kanalen.

Med ovan nämnda förhållanden helt klarlagda ökar noggrannheten i stabilitetsberäkningarna. En modellering av portryckssituationen i slänten skulle då också kunna utföras, tex med datorprogrammet SEEP/W, vilket skulle ge en klarare bild av aktuell portrycksfördelning.

Det är svårt att på basis av utförda beräkningar avgöra hur ansträngd slänten var vid tömningen av kanalen. Även om en mer detaljerad undersökning utförs, är det svårt att avgöra om ett brott i samband med en tömning av kanalen i praktiken skulle ske som ett dränerat eller odränerat brott. Hur långt tid som erfordras för att ett brott i slänten ska ske dränerat beror på faktorer som jordens permeabilitet, modul samt släntgeometri.

För att klarlägga ovan nämnda förhållanden bedöms ytterligare sondering i en sektion i läget för inklinometerröret, samt portrycksmätning på olika nivåer i ytterligare en punkt, mitt i slänten erfordras. Vid nästa tillfälle då kanalen töms på vatten kan kompletteringar eventuellt utföras. Mätningar i befintligt inklinometerrör och av befintliga samt nya portrycksmätare skulle då utföras på samma sätt som för denna utredning.

## 8.2 Förskjutningar

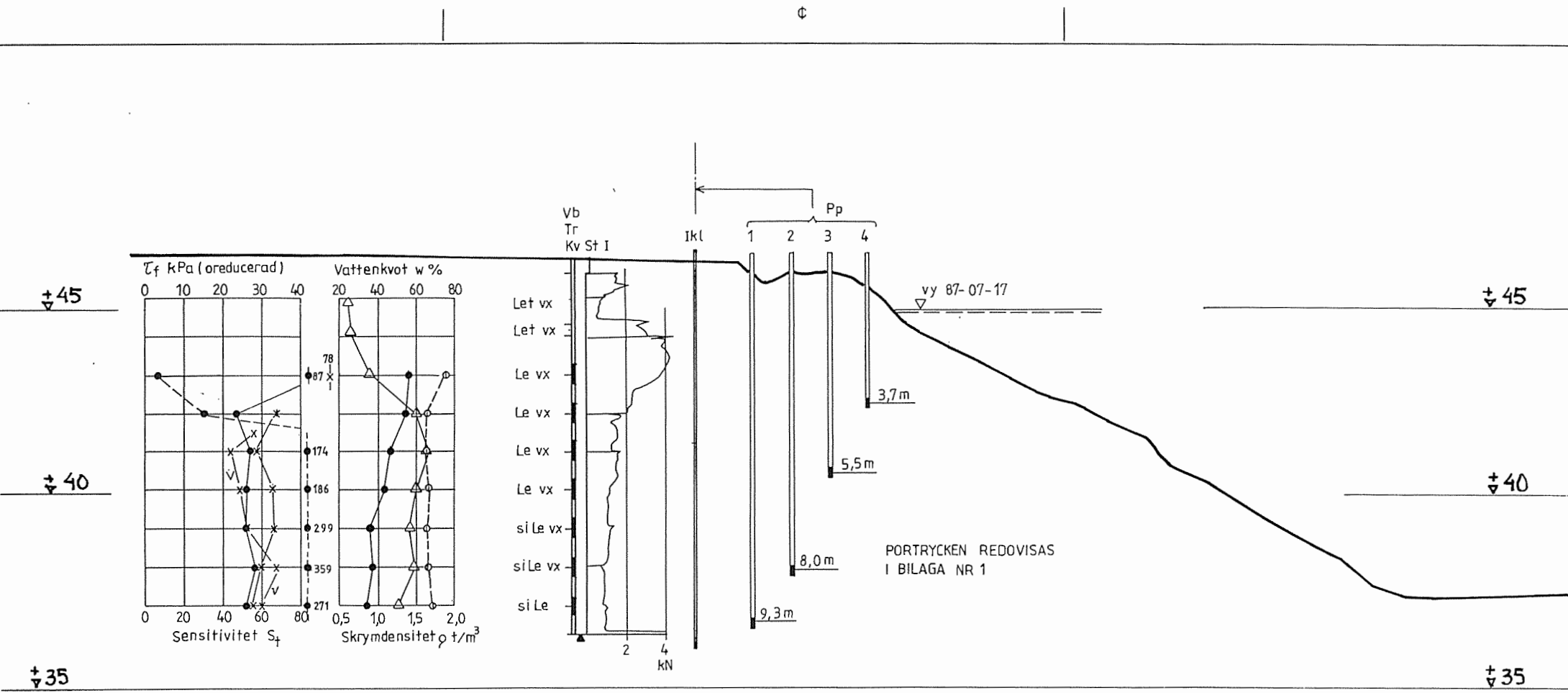
Ej heller vid jämförelse av uppmätta och beräknade förskjutningar är förutsättningarna identiska. I verkligheten har kanalen varit tömd på vatten vid ett flertal tidigare tillfällen. I FLAC-modellen har slänten antagits nederoderad från en horisontell markyta och en konstant vattennivå motsvarande den innan tömning har antagits. Det är tänkbart att de nu uppmätta förskjutningarna är mindre än de som erhöles första gången kanalen tömdes på vatten. En simulering av upprepade tömningar och återuppfyllningar skulle möjligen kunna ge en tydligare bild av detta.

Som nämnts ovan skulle även en tillförlitligare bild av aktuell portrycksfördelning i slänten vid en tömning av kanalen vara önskvärd. Detta för att en bra jämförelse mellan uppmätta förskjutningar efter en längre tid och beräknade sättningar vid dränerade förhållanden skulle kunna erhållas.

## 9. SLUTSATSER

Resultatet av utförda beräkningar visar relativt god överensstämmelse i såväl beräknad säkerhetsfaktor som läge för farligaste glidyta mellan de klassiska beräkningarna med SLOPE/W och indirekt med de numeriska beräkningarna med FLAC.

Jämförelsen mellan uppmätta och beräknade förskjutningar i samband med tömningen av kanalen visar på samma rörelsemönster, men en viss skillnad i storleken på förskjutningarna kan konstateras. Storleken på uppmätt och beräknad återfjädring vid återuppfyllning av kanalen uppvisar större skillnader. De numeriska beräkningarna är dock känsliga för vilka antaganden som görs och uppmätta rörelser är små (några millimeter).



V = VIAK 202

KARLS GRAV  
 GEOTEKNISK UNDERSÖKNING  
 Sektion

Sektion/borrhål Djup/nivå	Benämning	Densitet $\rho$ t/m <sup>3</sup>	Vattenkvot w %	Finlektal w <sub>F</sub> %	Sensitivitet enl. konprov S <sub>t</sub>	Skjuvhållfasthet (oreducerad) $\tau_f$ kPa *)		Övriga undersökningar**)	Anm.					
						Tryckprov	Konprov							
0,4-1,7	Grå torrskorpelera med växtdelar, rostfläckig		24						Let vx					
1,7-2,0	Brungrå torrskorpelera med inslag av mylla, växtdelar, rostfläckig		25						Let vx					
3,0	Grå lera med växtdelar, rostfläckig	1,87	36	56	3,4		87		Levx torrskorpetyp					
4,0	Grå lera med växtdelar	1,62	60	54	30		23		Le vx					
5,0	Grå lera med växtdelar	1,62	66	46	174		27		Le vx					
6,0	Grå lera med växtdelar	1,66	60	43	186		26		Le vx					
7,0	Grå siltig lera med växtdelar	1,65	57	36	299		26		siLe vx					
8,0	Grå siltig lera med växtdelar	1,66	59	37	359		28		siLe vx					
9,0	Grå siltig lera	1,71	51	34	271		26		siLe					
* Korrigeringsrekommenderas enl SGI Info nr 3														
*) Understreckning av värden anger att skjuvhållfastheten bör reduceras. Rekommenderade korrektionsfaktorer anges i lodig kolumn eller i bilaga					Lediga kolumner är avsedda för resultat av specialundersökningar, t. ex. Atterbergs gränsör, glödningsförlust, kapillaritet, tjälfarlighet, permoabilitet.					**) Övriga undersökningar (se bilagor) skj = direkta skjuvförsök      pac = packningsförsök komp = kompressionsförsök korn = kornfördelning				

Företag/institution

STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT

Projekt

KARLS GRAV, VÄNERSBORG

SAMMANSTÄLLNING AV  
LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

PROVTAGNING

datum  
870709

PROVTAGNINGSRÄDSKAP

Skr, Kv St I

LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR

datum  
870820

GODKÄND den

laboratorieförest.

I-MS

Littera, uppdragsnr e. lkn. 5-100/83

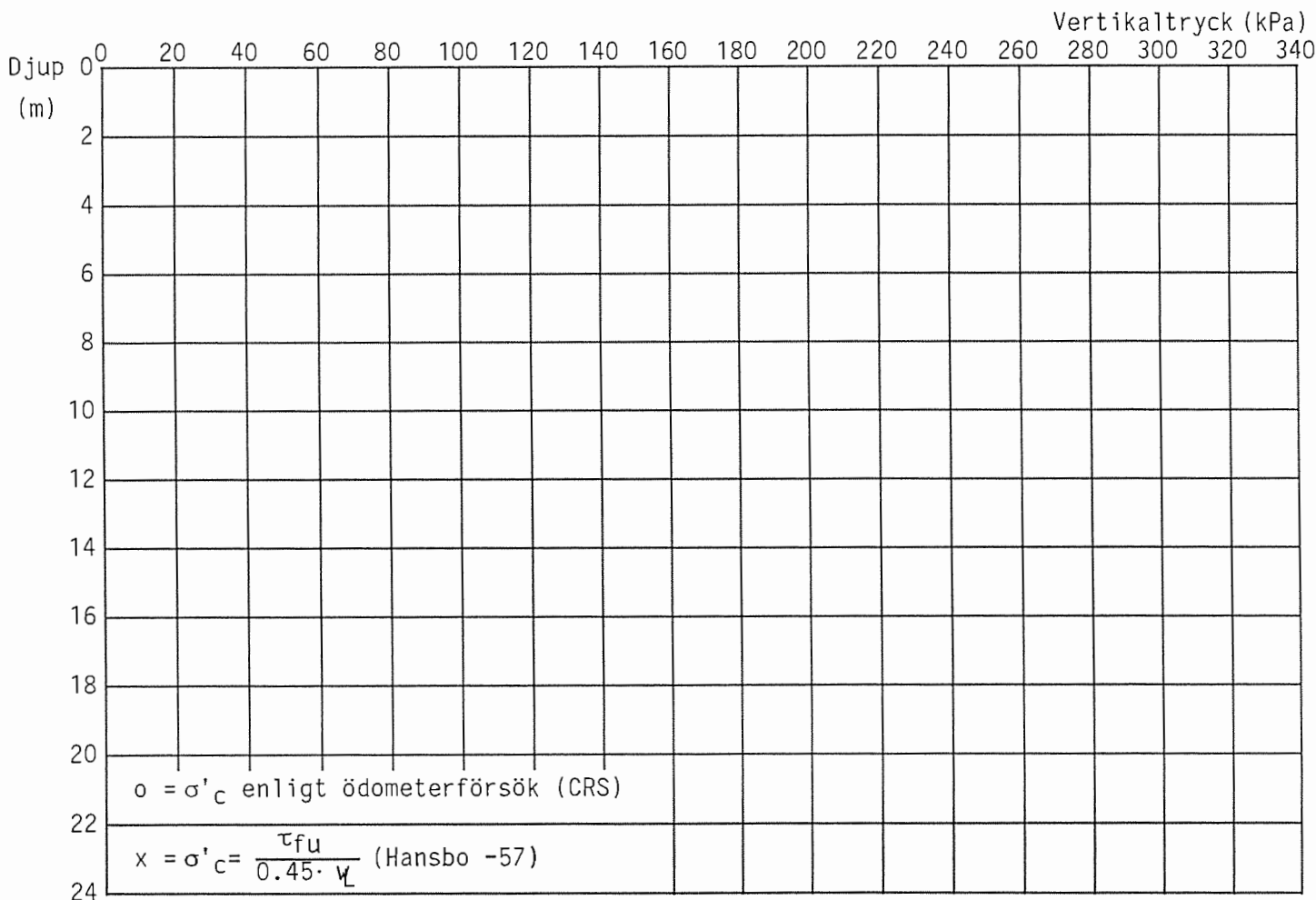
Tabellnr. p

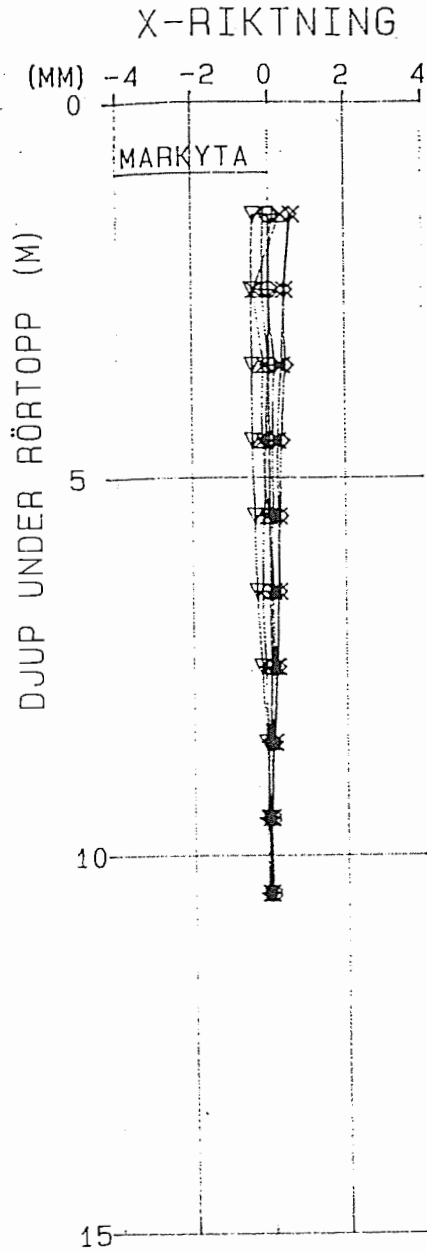
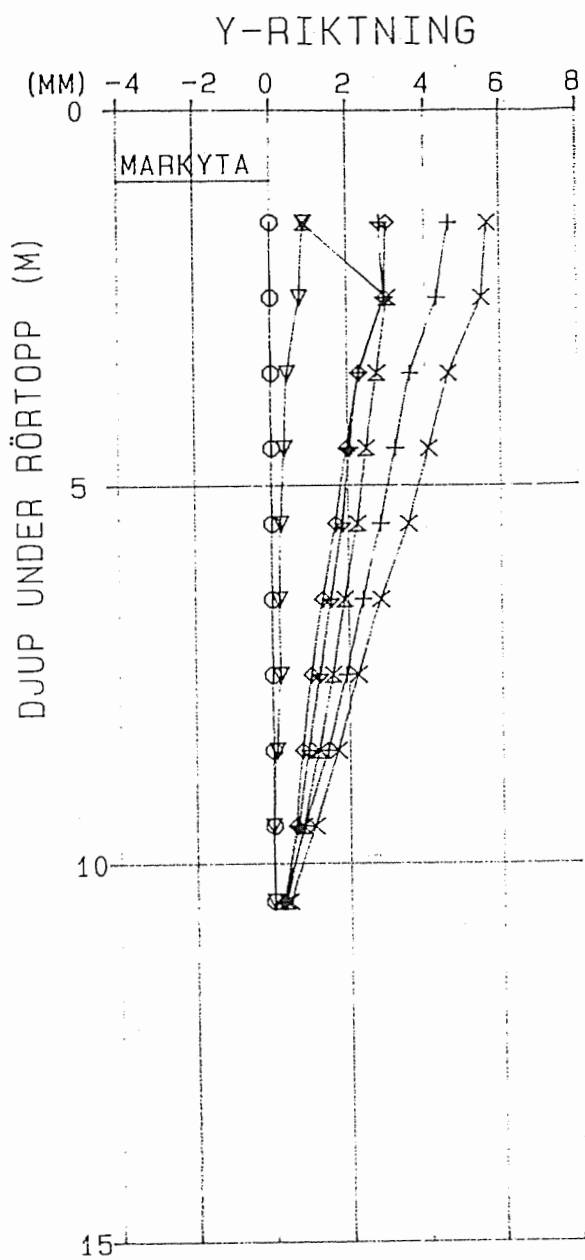
Bilaga 2:1

1 kPa = 1 kN/m<sup>2</sup> ≈ 0,1 Mp/m<sup>2</sup>



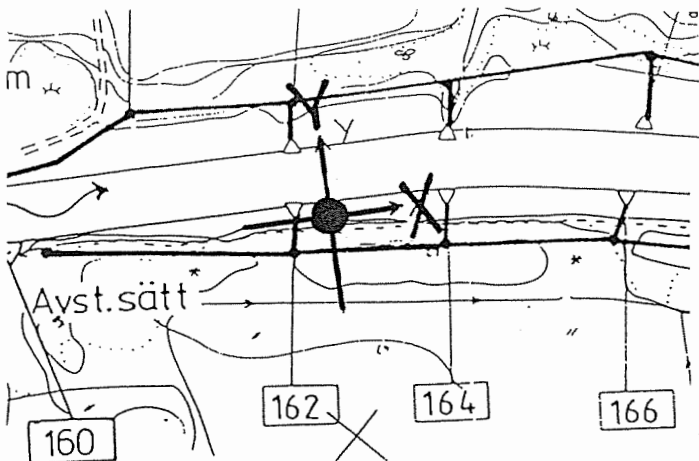
STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT		SAMMANSTÄLLNING AV ÖDOMETERFÖRSÖK (CRS)							
Projekt: VÄNERSBORG							Dnr:		
Borrhål:			Datum: 910726				Sign.: I-M S		
Djup m	Dens. (CRS) t/m <sup>3</sup>	$\sigma'_c$ kPa	$M_L$ kPa	$\sigma'_L$ kPa	$M'$ -	Perm. k m/s	$\beta_k$ -	$c_{vmin}$ m <sup>2</sup> /s	Jordart
3	1.87	(200)	-	-	-	(4·10 <sup>-10</sup> )			Le vx
4	1.64	184	670	227	12.4	9·10 <sup>-10</sup>			Le vx
5	1.64	105	620	152	13.2	(2·10 <sup>-8</sup> )			Le vx
6	1.80	159	1040	223	18.0	(5·10 <sup>-9</sup> )			Le vx
7	1.66	158	620	199	13.1	2·10 <sup>-9</sup>			Le vx
8	1.69	140	920	206	14.6	2·10 <sup>-9</sup>			Le sk
9	1.62	193	210	210	21.3	7·10 <sup>-10</sup>			Le



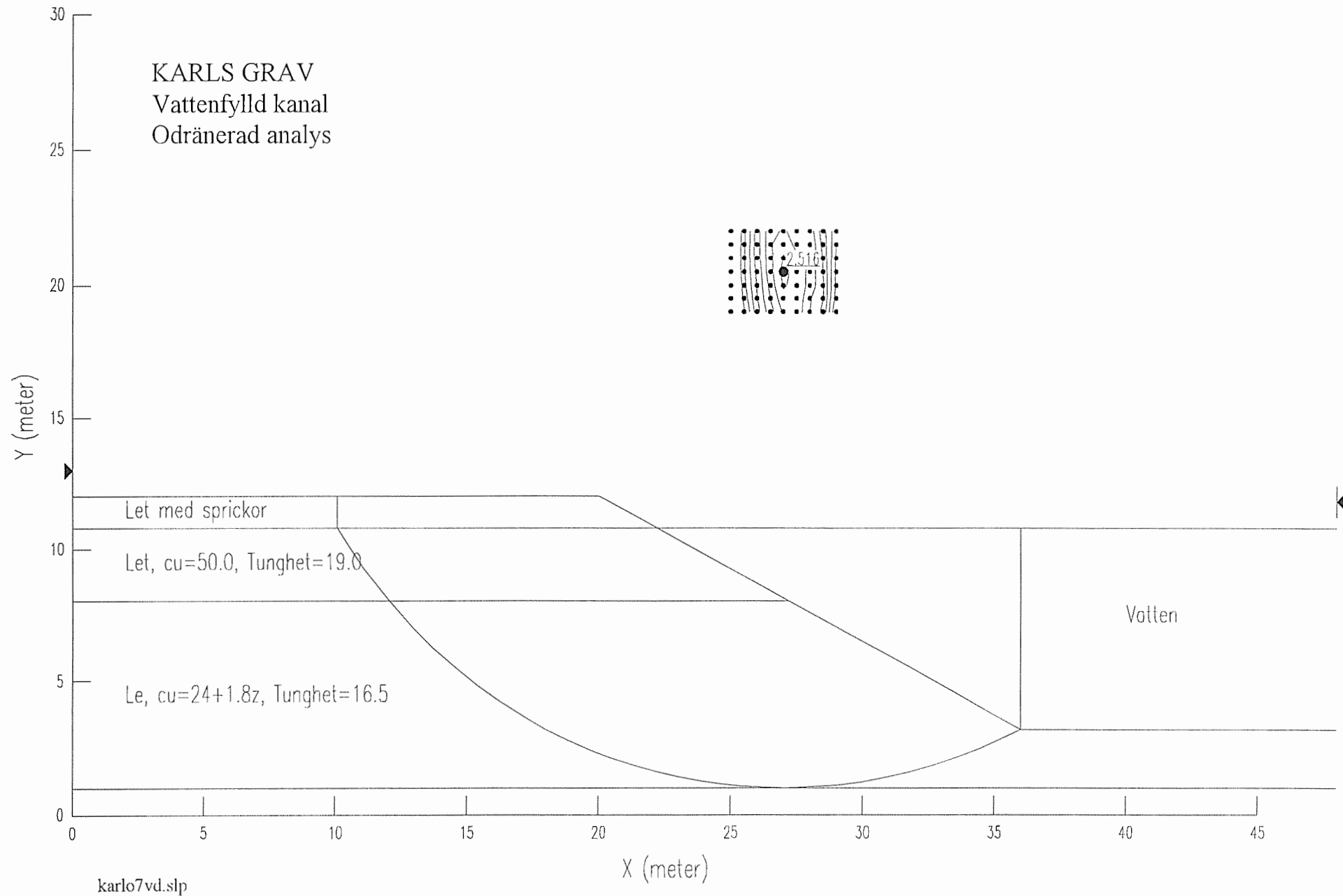


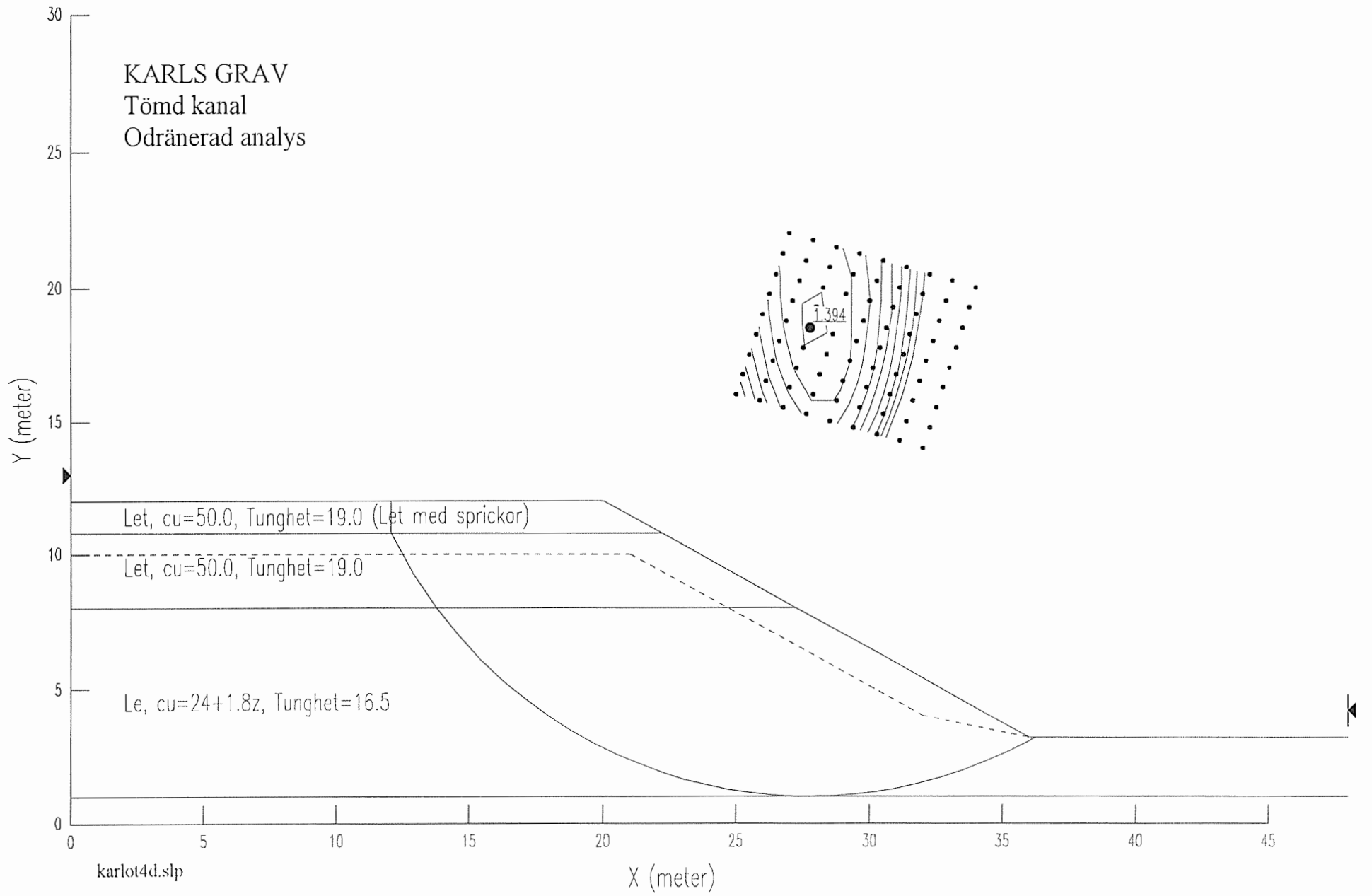
#### TECKENFÖRKLARING

SYMBOL	MÄTOMG	DATUM	DAGAR	KALFAKT	A0	A1	A2	VRIDN	KORR
⊙	0	870717	REF-M	0.000	1.000	0.000	0.00	0.00	1.000
▽	1	870814	28	0.000	1.000	0.000	0.00	0.00	1.000
+	2	870820	34	0.000	1.000	0.000	0.00	0.00	1.000
X	3	870904	49	0.000	1.000	0.000	0.00	0.00	1.000
⊕	4	870907	52	0.000	1.000	0.000	0.00	0.00	1.000
⊕	5	871005	80	0.000	1.000	0.000	-0.20	0.00	1.000
⊗	6	901105	1207	0.000	0.570	0.000	1.00	0.00	1.000

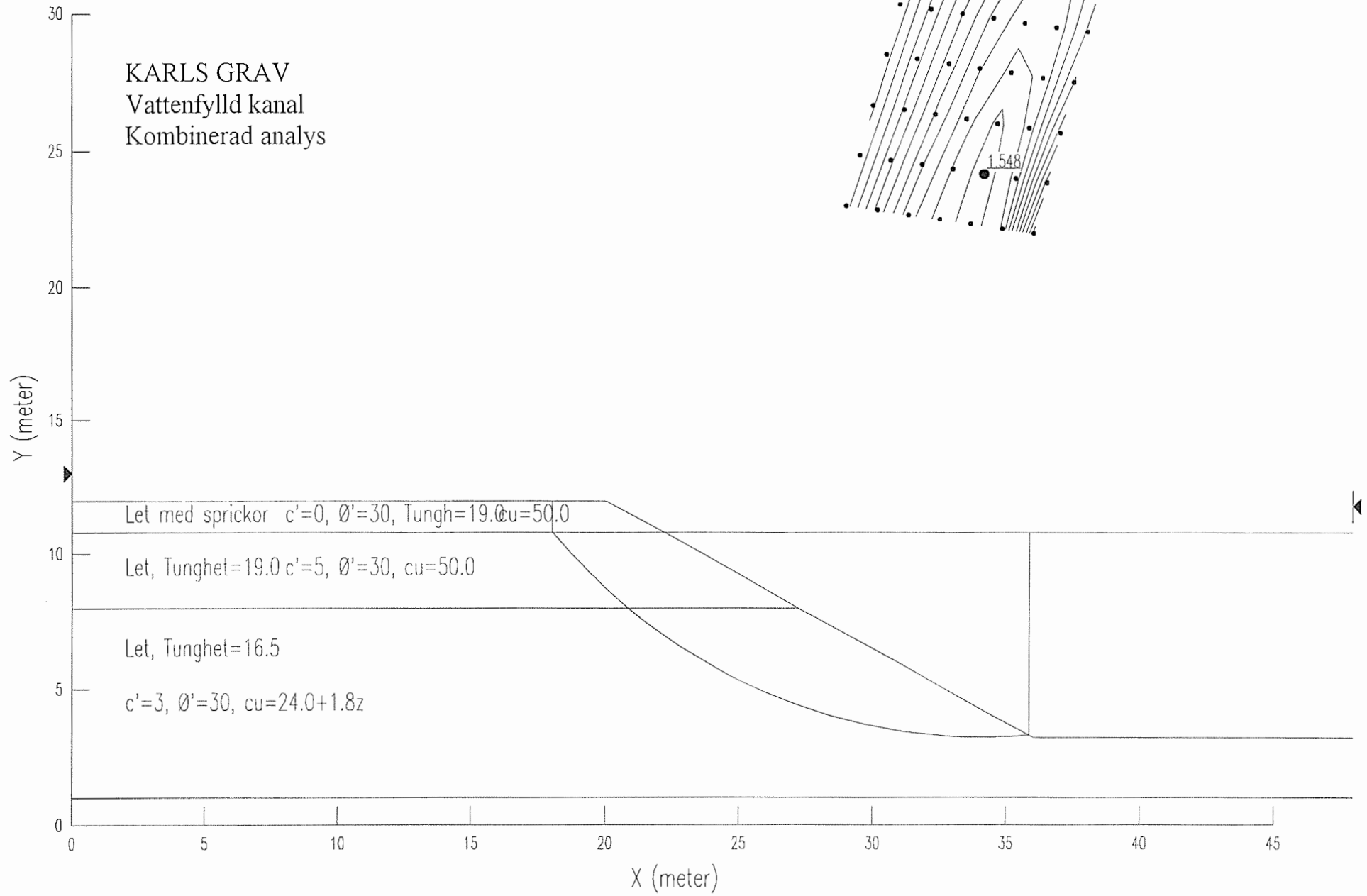


STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT 58101 LINKÖPING	KARLS GRAV VÄNERSBORG INKLINOMETERMÄTNING AV HORISONTELLA JORDRÖRELSER
FÄLTARBETE G LINDQVIST	RÖR NR 1
HANLÄGGARE E OTTOSSON	

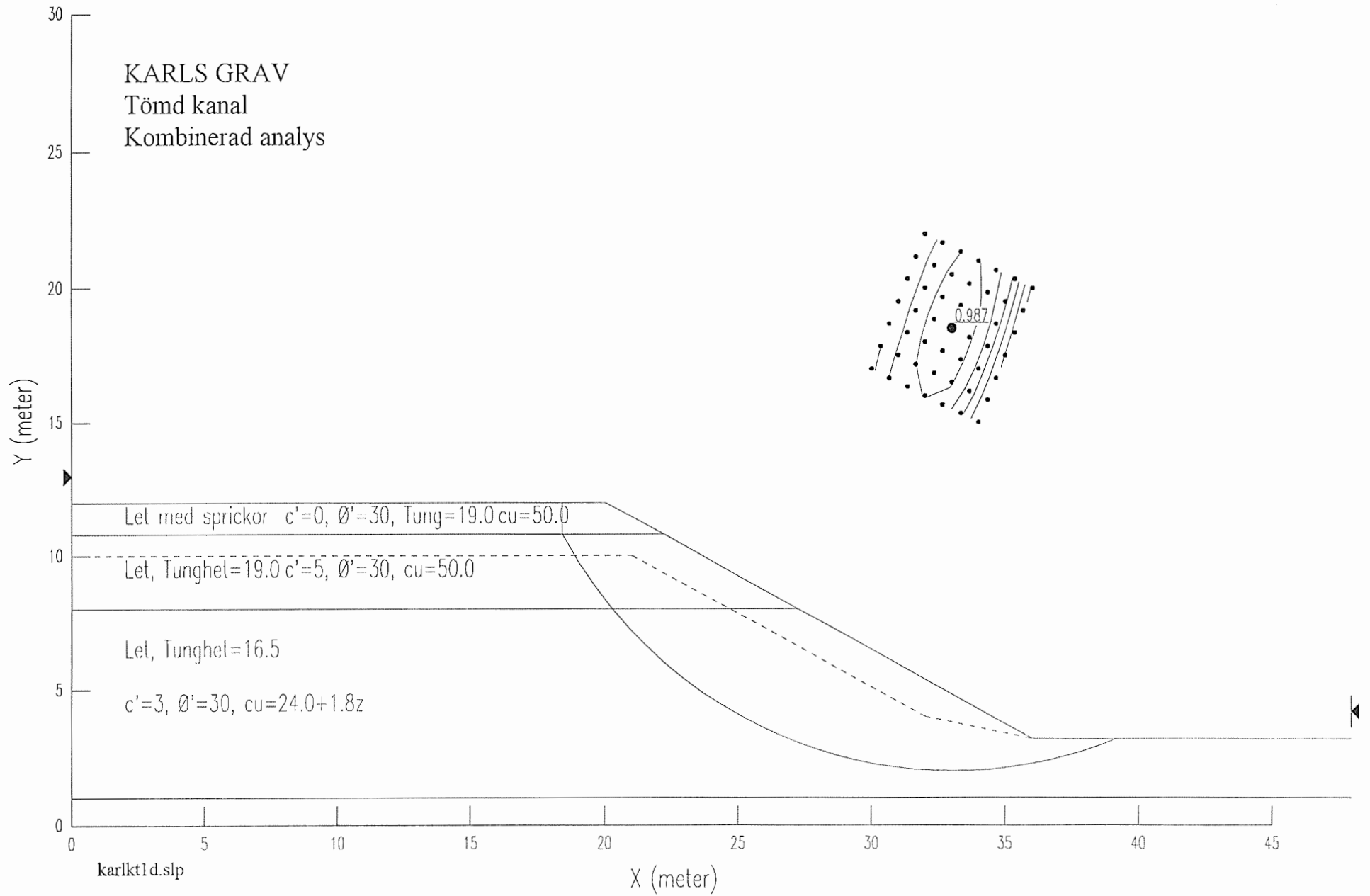


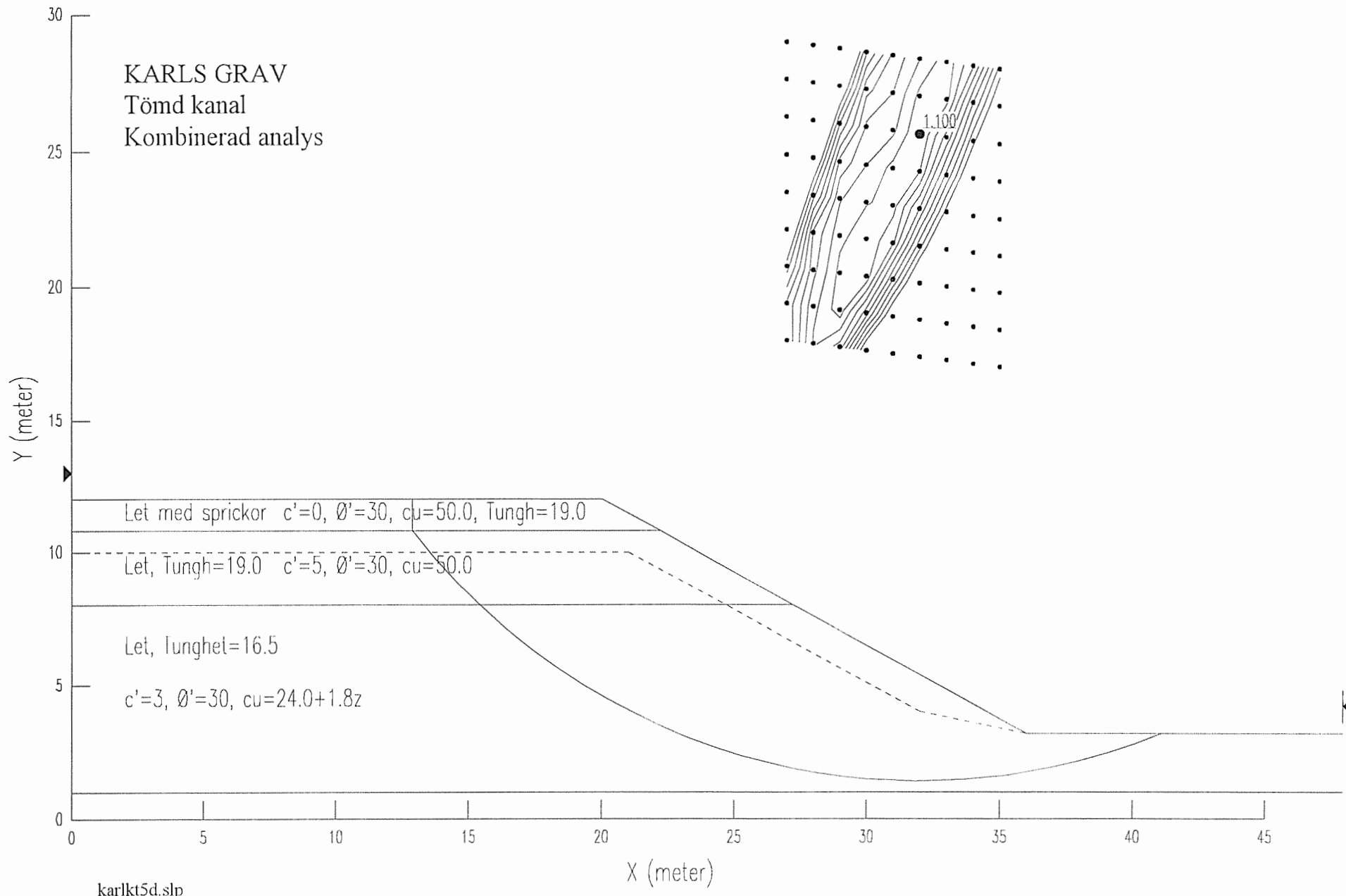


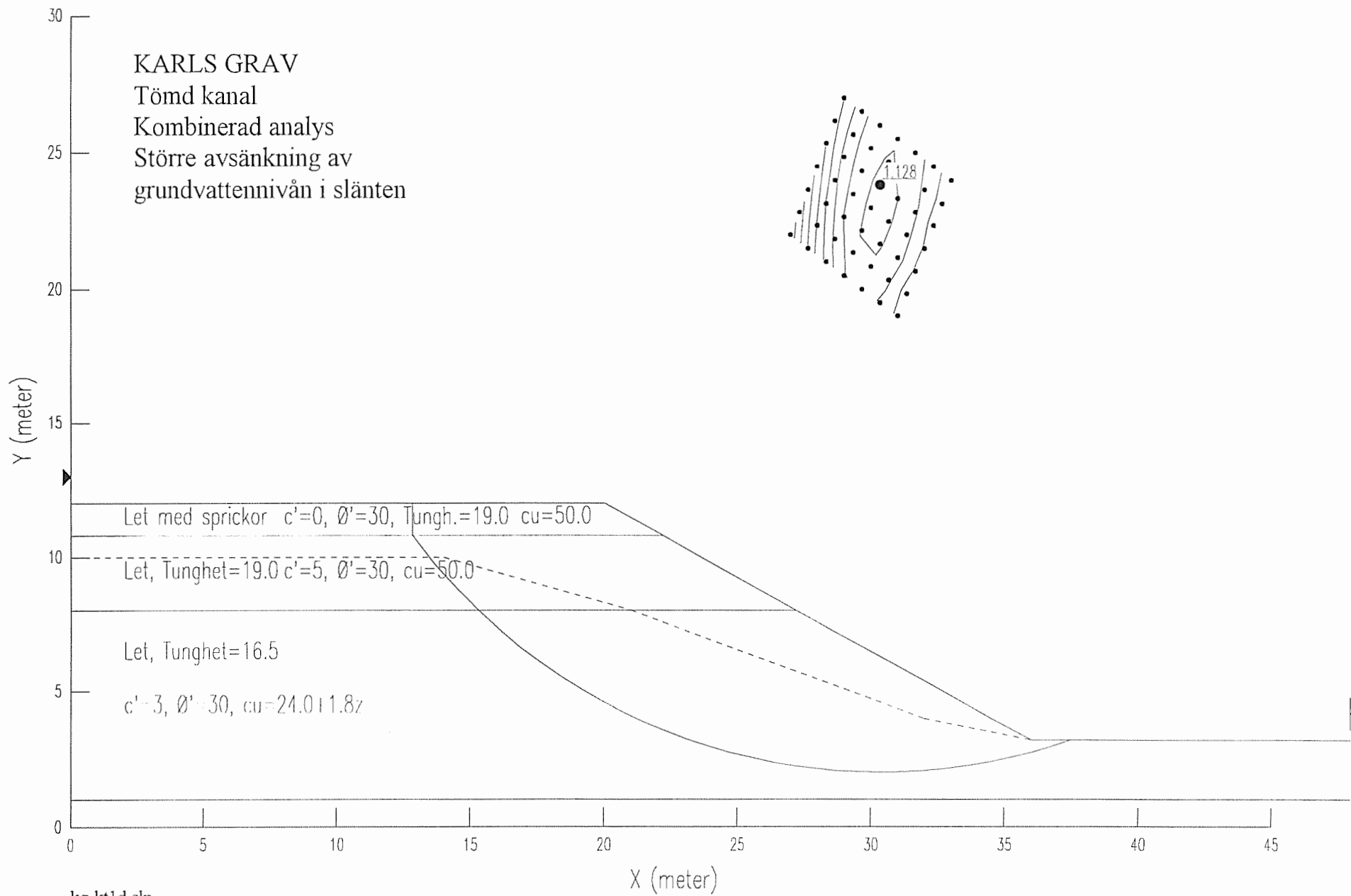
KARLS GRAV  
Vattenfylld kanal  
Kombinerad analys



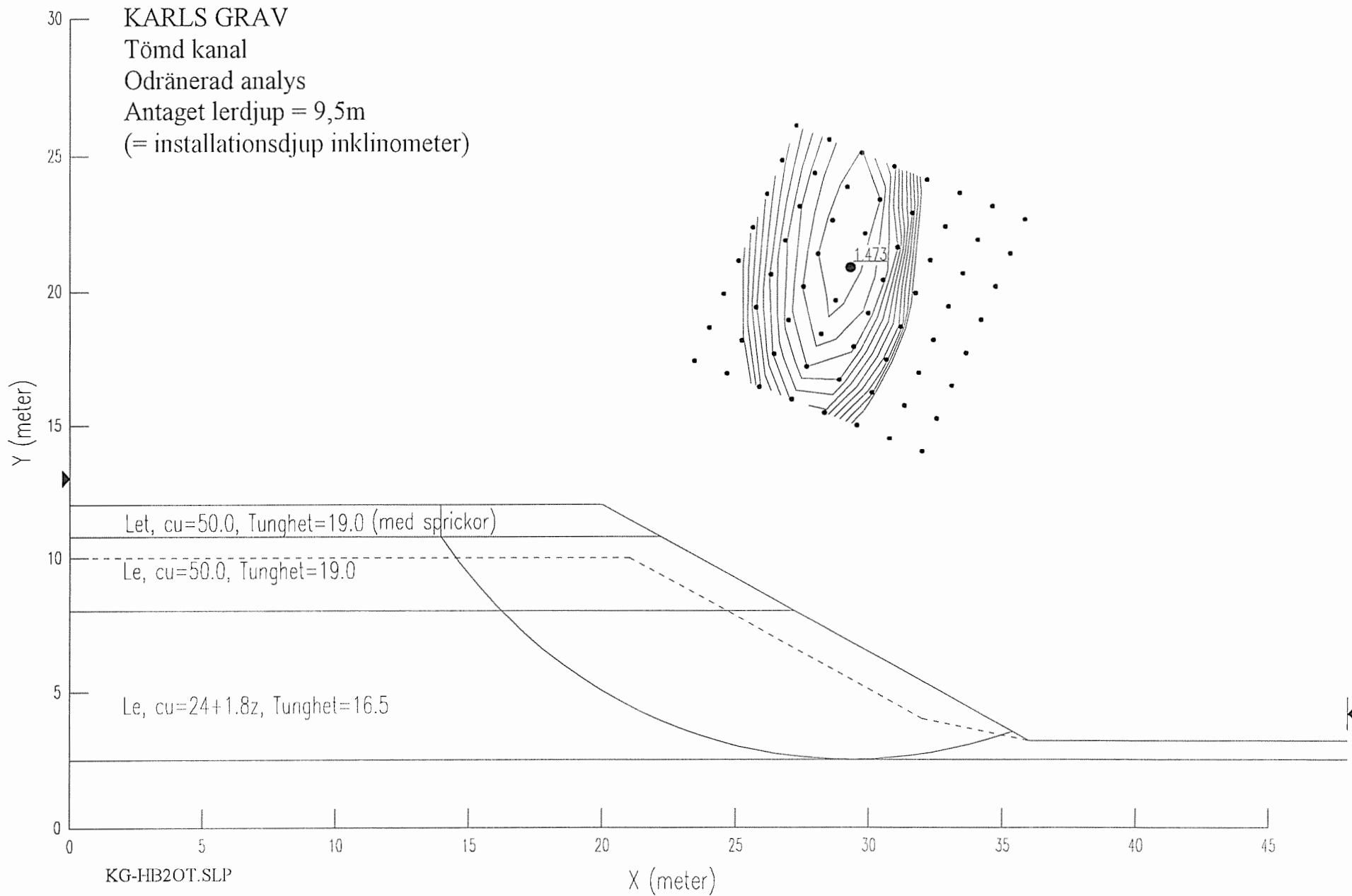
karlkv1.slp



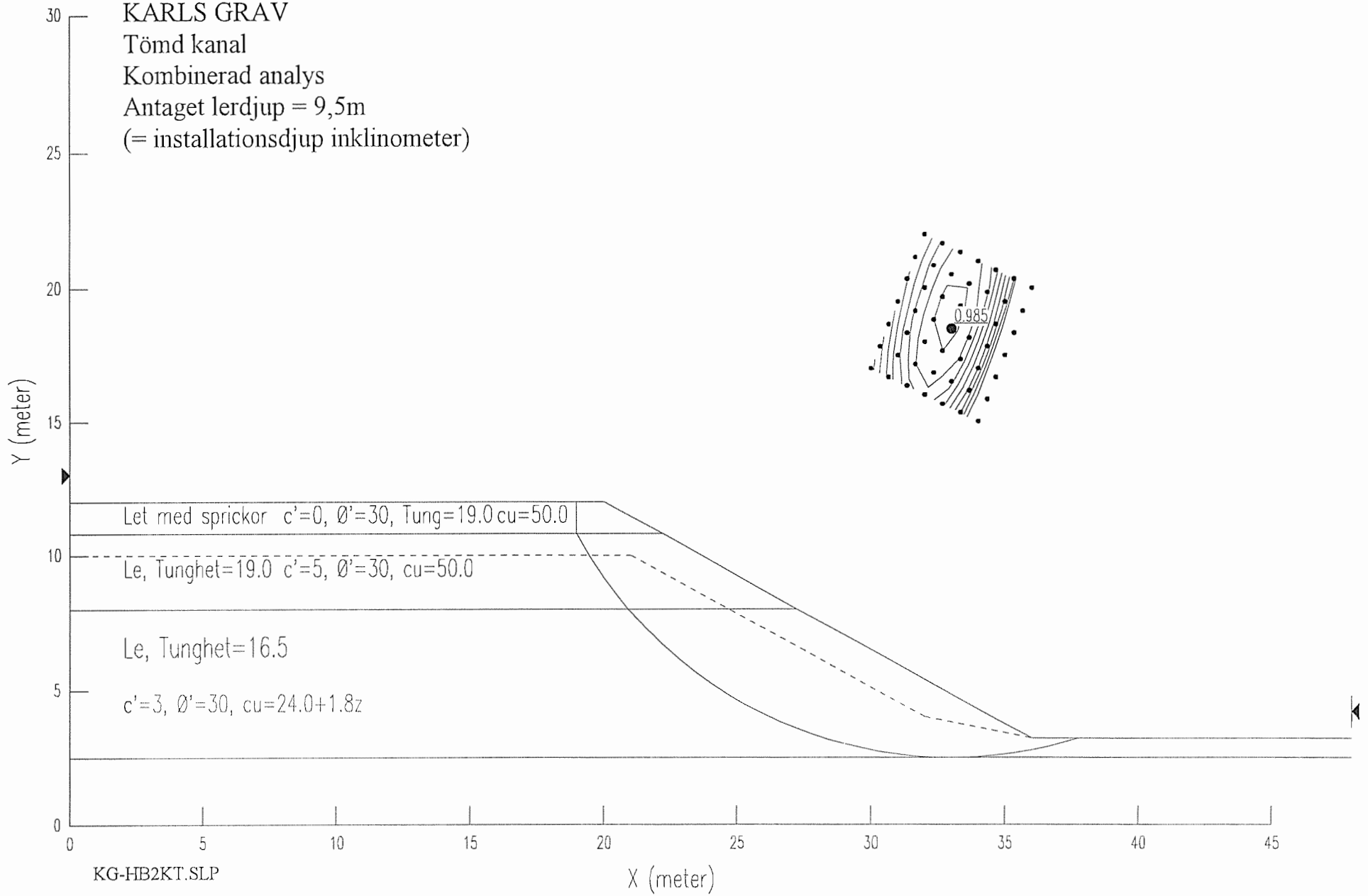






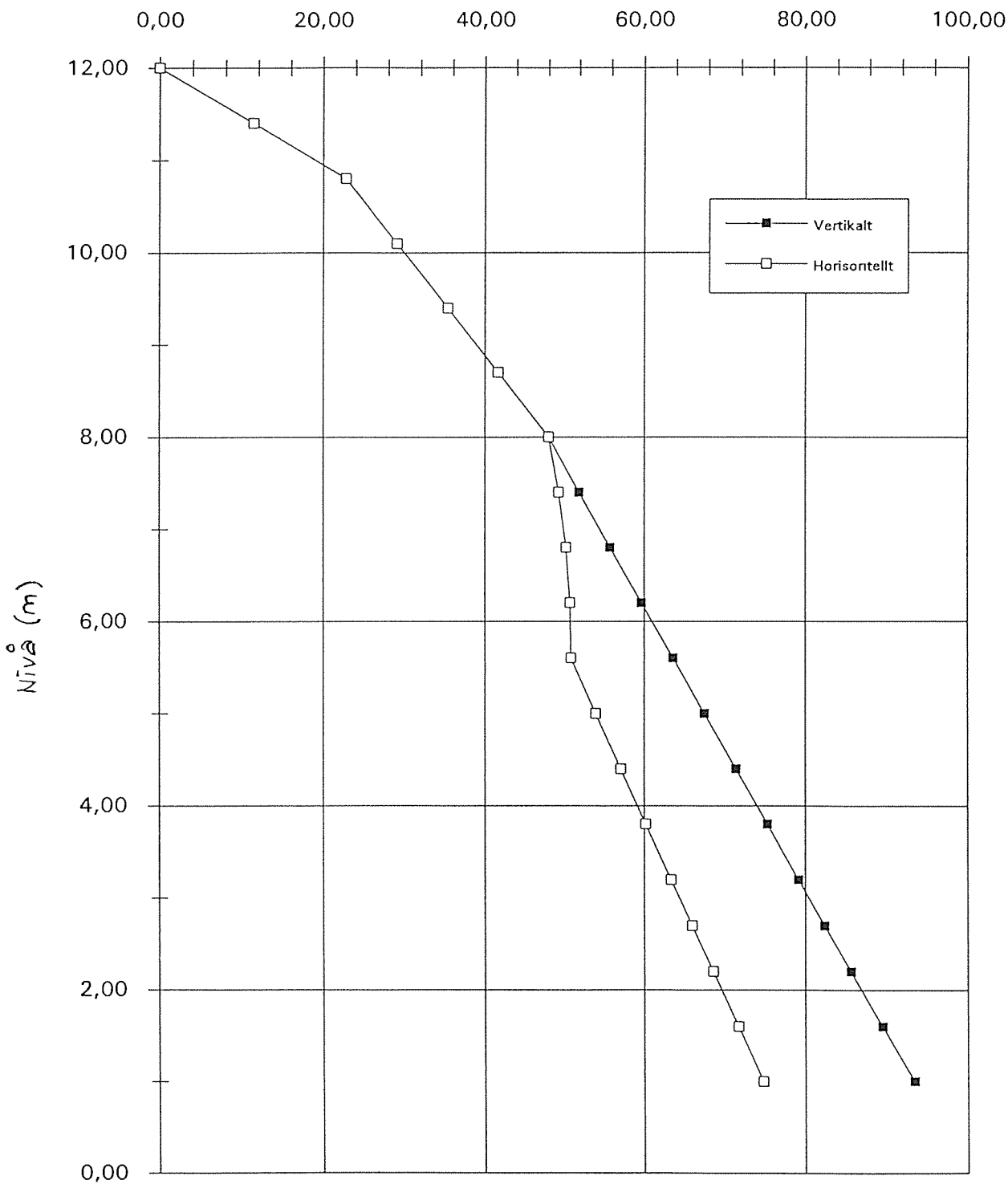


KARLS GRAV  
 Tömd kanal  
 Kombinerad analys  
 Antaget lerdjup = 9,5m  
 (= installationsdjup inklinometer)

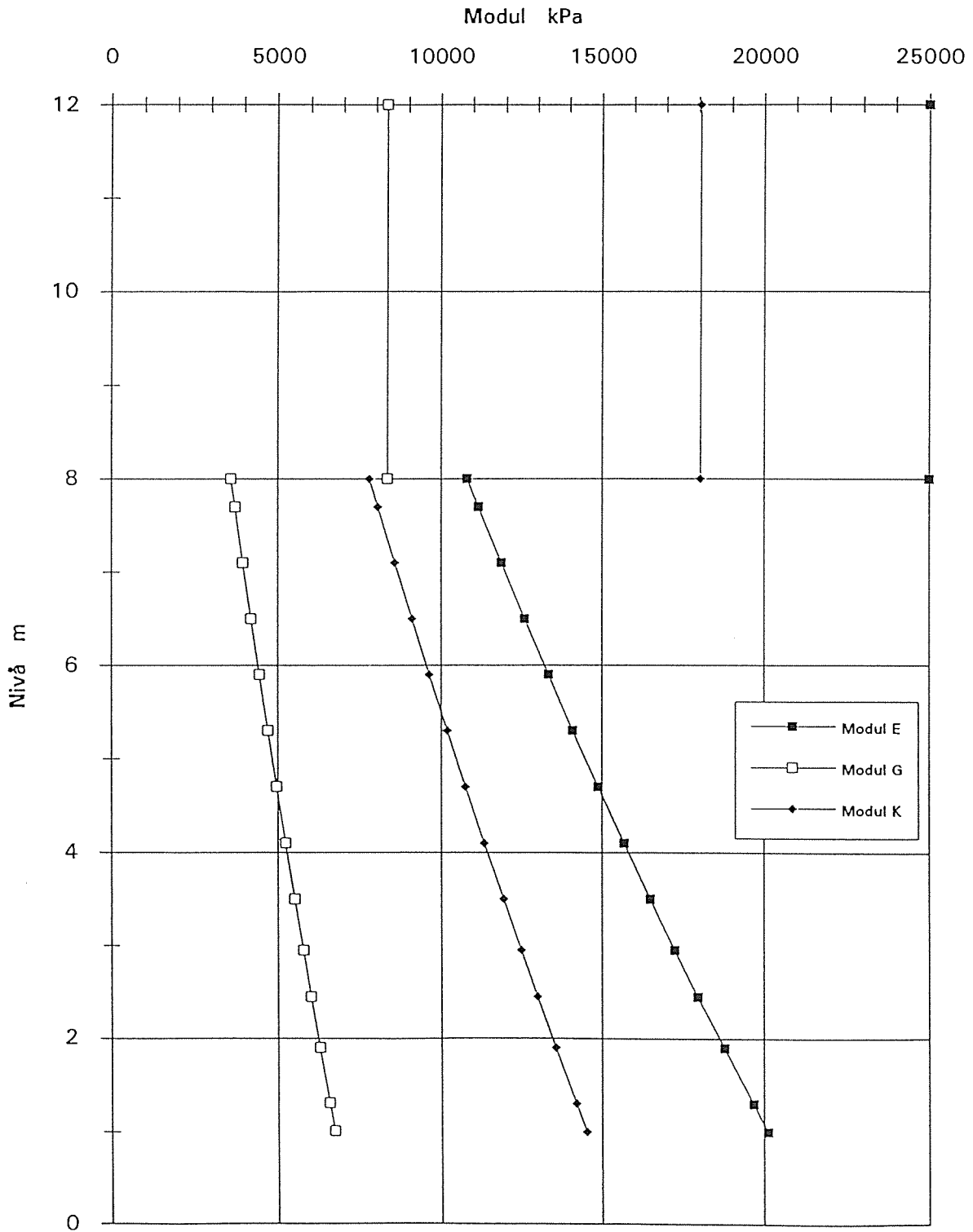


### Karls Grav

Effektivspänning in-situ kPa



Karls Grav

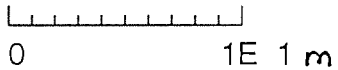


**FLAC (Version 3.23)**

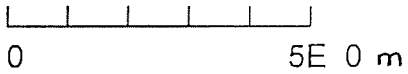
LEGEND

4/18/1996 12:25  
step 142000  
-2.667E+00 <x< 5.067E+01  
-2.017E+01 <y< 3.317E+01

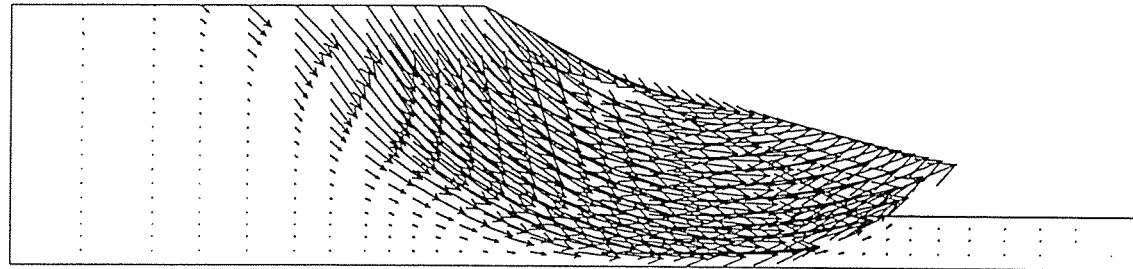
Boundary plot (Gränslinjer, skala:)



Displacement vectors (Förskjutningsvektorer,  
Max Vector = 1.865E+00 skala:)



**KARLS GRAV**  
**Tömd kanal**  
**Odränerad analys, Reduktion med 1,55**  
**Förskjutningar**

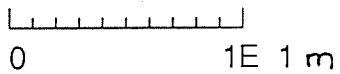


**FLAC (Version 3.23)**

LEGEND

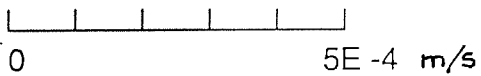
4/18/1996 12:39  
step 142000  
-2.667E+00 <x< 5.067E+01  
-2.017E+01 <y< 3.317E+01

Boundary plot (Gränslinjer, skala:)

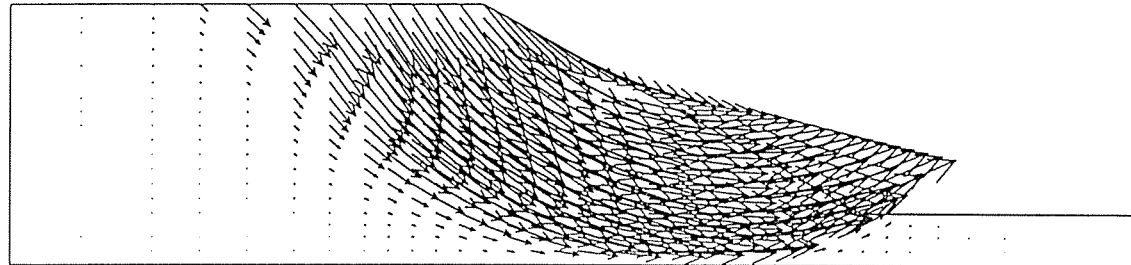


Velocity vectors (Hastighetsvektorer, skala:)

Max Vector = 1.688E-04



<b>KARLS GRAV</b>
<b>Tömd kanal</b>
<b>Odränerad analys, Reduktion med 1,55</b>
<b>Hastighetsvektorer</b>



**FLAC (Version 3.23)**

LEGEND

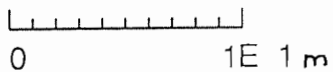
4/18/1996 12:39

step 142000

-2.667E+00 <x< 5.067E+01

-2.017E+01 <y< 3.317E+01

Boundary plot (Gränslinjer, skala:)

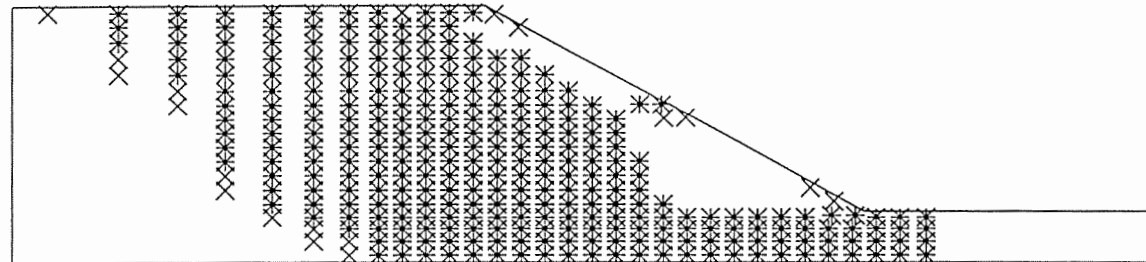


Plasticity Indicator

\* at yield (på väg att plasticeras)

X elastic, at yield in past  
(elastisk, tidigare plasticerat)

<b>KARLS GRAV</b>
<b>Tömd kanal</b>
<b>Odränerad analys, Reduktion med 1,55</b>
<b>Plasticerat område</b>

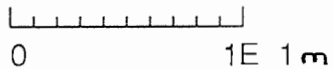


**FLAC (Version 3.23)**

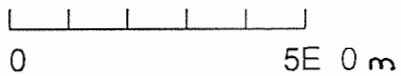
LEGEND

4/18/1996 10:04  
step 27000  
-2.667E+00 <x< 5.067E+01  
-2.017E+01 <y< 3.317E+01

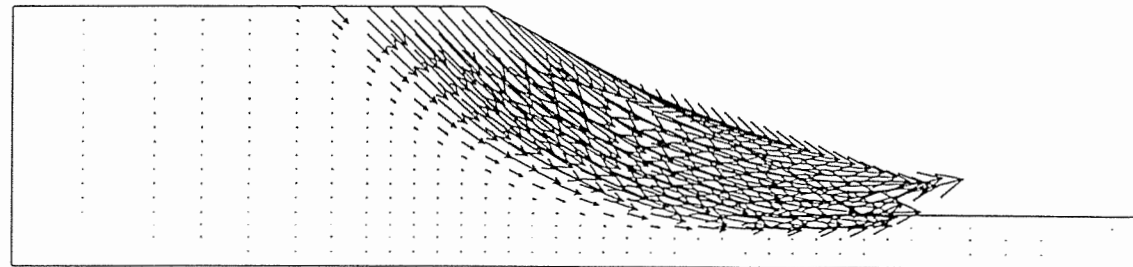
Boundary plot (Gränslinjer, skala:)



Displacement vectors (Förskjutningsvektorer,  
Max Vector = 1.911E+00 skala:)



<b>KARLS GRAV</b>
<b>Tömd kanal</b>
<b>Dränerad analys, Reduktion med 1,15</b>
<b>Förskjutningar</b>





**FLAC (Version 3.23)**

LEGEND

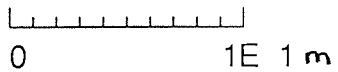
4/18/1996 10:04

step 27000

-2.667E+00 <x< 5.067E+01

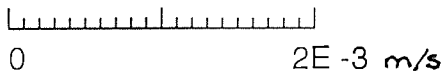
-2.017E+01 <y< 3.317E+01

Boundary plot (Gränslinjer, skala:)

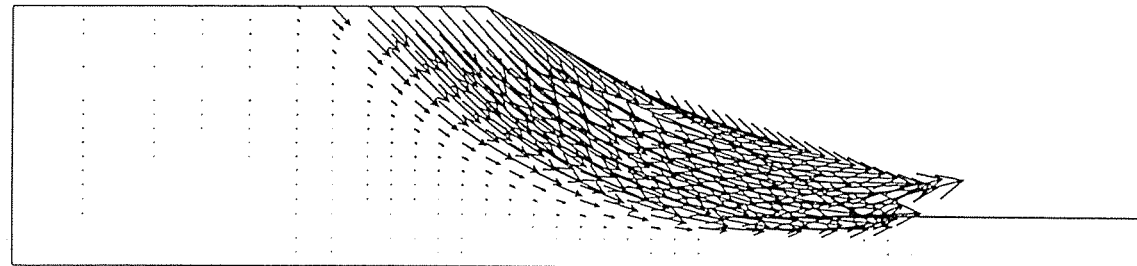


Velocity vectors (Hastighetsvektorer, skala:)

Max Vector = 7.410E-04



<b>KARLS GRAV</b>
<b>Tömd kanal</b>
<b>Dränerad analys, Reduktion med 1,15</b>
<b>Hastighetsvektorer</b>



**FLAC (Version 3.23)**

LEGEND

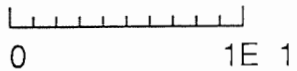
4/18/1996 10:04

step 27000

-2.667E+00 <x< 5.067E+01

-2.017E+01 <y< 3.317E+01

Boundary plot (Gränslinjer, skala:)



Plasticity Indicator

\* at yield (på väg att plasticeras)

X elastic, at yield in past  
(elastisk, tidigare plasticerat)

<b>KARLS GRAV</b>
<b>Tömd kanal</b>
<b>Odränerad analys, Reduktion med 1,15</b>
<b>Plasticerat område</b>

