



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

# Skredet i Vagnhärad

Teknisk/vetenskaplig utredning  
om skredets orsaker

HJÖRDIS ANDERSSON  
PER-EVERT BENGTTSSON  
CHRISTINA BERGLUND  
ROLF LARSSON  
GÖRAN SÄLLFORS  
ANNA-LENA ÖBERG-HÖGSTA

Rapport 56

LINKÖPING 1998





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

**Rapport** No 56  
**Report**

**Skredet i Vagnhärad**  
**Teknisk/vetenskaplig utredning**  
**om skredets orsaker**

HJÖRDIS ANDERSSON  
PER-EVERT BENGTTSSON  
CHRISTINA BERGLUND  
ROLF LARSSON  
GÖRAN SÄLLFORS  
ANNA-LENA ÖBERG-HÖGSTA

<b>Rapport</b>	Statens geotekniska institut 581 93 Linköping
Beställning	Litteraturtjänsten, SGI Tel: 013-20 18 04 Fax: 013-20 19 09 E-post: E-post: <a href="mailto:info@geotek.se">info@geotek.se</a> Internet: <a href="http://www.sgi.geotek.se">http://www.sgi.geotek.se</a>
ISSN	0348-0755
ISRN	SGI-R--98/56--SE
SGI projekt nr	19709434
Upplaga	500
Tryckeri	Roland Offset AB, Linköping, november 1998

# Förord

Skredet i Ödesby, Vagnhärad, inträffade den 23 maj 1997, klockan 00:59.

Från samhällelig och kunskapsmässig synpunkt är det av största vikt att all ny erfarenhet från inträffade skred tas till vara och dokumenteras på bästa sätt. Utvärdering och analys av ett inträffat skred ger också geoteknikerna en bra möjlighet att kalibrera och utvärdera sina undersöknings- och beräkningsmetoder.

Syftet med denna teknisk/vetenskapliga utredningen har varit att klarlägga förhållandena vid skredtillfället, skredorsak och skredförlopp, vilka är nödvändiga förutsättningar för att erfarenheterna skall kunna utnyttjas vid framtida bedömningar av skredrisker i liknande områden.

Denna utredning har utförts i samarbete mellan, och finansierats av Chalmers tekniska högskola och SGI. Utredningen har genomförts av en arbetsgrupp bestående av Göran Sällfors och Anna-Lena Öberg-Högsta från CTH, och Per-Evert Bengtsson, Christina Berglund, Rolf Larsson och Hjördis Andersson (projektledare) från SGI. Parallellt med detta arbete har geotekniska undersökningar och dimensionering av erforderliga förstärkningsåtgärder i området pågått.

Utredningen har kunnat genomföras tack vare värdefulla insatser och underlag från flera håll. De hydrogeologiska bedömningarna bygger bland annat på en utredning som genomförts av VBB VIAK. Detta företag har också bistått med ett omfattande underlag i form av resultat från geotekniska undersökningar, portrycksmätningar och grundvattenobservationer m.m. Andra tekniska uppgifter har erhållits från Trosa kommun. Geologikapitlet har utarbetats av Chester Svensson, Institutionen för Geologi, Chalmers tekniska högskola. Kompletterande fältundersökningar har utförts av SGI, laboratorieundersökningarna har utförts av CTH och SGI, vattenanalyserna har utförts av KM LAB AB och Jan Lindgren, SGI, har svarat för slutlig redigering och layout av rapporten.

En särskild utredning har samtidigt bedrivits av Statens haverikommission beträffande olika myndigheters hantering av planfrågor och byggnadslov, hur olika utredningar och beslut ledde fram till områdets exploatering och hur olika riskbedömningar senare handlagts, samt analys av skredorsak. Syftet med haverikommissionens utredning har uteslutande varit att förebygga framtida olyckor och tillbud.

Värdefulla synpunkter har under utredningens gång inhämtats från en referensgrupp bestående av:

Ulf Bergdahl	SGI
Leif Eriksson	SGI
Elvin Ottosson	SGI
Marius Tremblay	SGI

Författarna vill framföra sitt varma tack till alla personer och organisationer som bidragit till denna rapport.

Linköping och Göteborg oktober 1998

Författarna

# Innehåll

## Förord

<b>Om innehållet</b> .....	8
<b>Summary and recommendations</b> .....	11
<b>Sammanfattning och rekommendationer</b> .....	17
<b>1. Beskrivning av skreden</b> .....	23
1.1 Inledning .....	23
1.2 Skredförlopp och omfattning .....	25
1.3 Observationer inom området .....	27
1.4 Tidigare skred .....	28
1.5 Insatser från olika instanser .....	30
1.6 Åtgärder .....	31
<b>2. Skredområdets utbyggnad</b> .....	33
2.1 Inledning .....	33
2.2 Utbyggnad av området .....	33
<b>3. Geologi</b> .....	35
3.1 Inledning .....	35
3.2 Topografi .....	36
3.3 Berggrund .....	36
3.4 Kvartergeologisk utveckling .....	37
3.5 Jordlagrens bildning .....	38
<b>4. Geotekniska undersökningar</b> .....	42
4.1 Tidigare utförda undersökningar .....	42
4.2 Undersökningar utförda i samband med och efter skredet 1997 ...	44
4.3 Kompletterande undersökningar .....	45

<b>5.</b>	<b>Geotekniska förhållanden</b> .....	46
5.1	Topografi .....	46
5.2	Jordlagerförhållanden .....	47
5.3	Spänningshistoria och överkonsolidering .....	49
5.4	Skjuvhållfasthet .....	53
	- Odränerad skjuvhållfasthet	
	- Dränerad skjuvhållfasthet	
<b>6.</b>	<b>Hydrogeologiska förhållanden</b> .....	60
6.1	Inledning .....	60
6.2	Lokal geologi .....	61
6.3	Grundvattenbildning och grundvattenströmning .....	62
6.4	Hydrologiska förhållanden .....	63
6.5	Infiltration från läckande vattenledning .....	64
6.6	Portrycksnivåer i området .....	65
6.7	Modellering av portrycksförhållanden i en sektion .....	70
	- Geometri och strömningsegenskaper	
	- Permeabilitet	
	- Randvillkor	
	- Beräkningsmodeller	
	- Resultat av beräkningar	
	- Simulering av vattenläcka	
6.8	Kommentarer till modelleringarna .....	77
<b>7.</b>	<b>Stabilitetsberäkningar</b> .....	79
7.1	Beräkningsförutsättningar .....	79
	- Geometri	
	- Jordlagerförhållanden	
	- Skjuvhållfasthet	
	- Vattennivåer och portryck	
	- Laster	
7.2	Beräkningsmetod .....	84
7.3	Resultat av beräkningar .....	85
	- Initialskred	
	- Konsekvenser av initialskred	
	- Kvarstående partier av slänten öster om skredet	
7.4	Jämförelser med observerat skredförlopp .....	91

<b>8. Slutsatser och rekommendationer</b> .....	93
8.1 Diskussion kring skredets orsaker .....	93
- Förutsättningar för skred	
- Tidigare observationer	
- Geologisk och hydrogeologisk modellering	
- Bestämning av hållfasthetsegenskaper	
- Grundvattentryck	
- Beräknad stabilitet	
8.2 Slutsatser .....	97
- Orsaker till skredet	
- Att tänka på vid analys av stabilitet i lerområden av denna karaktär	
8.3 Rekommendationer .....	99
- Allmänt	
- Kontroll/översyn av tidigare stabilitetsutredningar	
- Kompetensutveckling	
 <b>Referenser</b> .....	 103
 <b>Bilaga 1</b> Plan .....	 107
<b>Bilaga 2</b> Sektion 11 .....	108
<b>Bilaga 3</b> Exempel på resultat från CPT-sondering och laboratorieundersökning .....	110
<b>Bilaga 4</b> Resultat från tryckhöjdsberäkningarna med SEEP/W .....	112
<b>Bilaga 5</b> Resultat från beräkningarna med SEEP/W av inverkan av en vattenläcka .....	115
<b>Bilaga 6</b> Strömningsmodell för ett friktionslager med förhindrad strömning ur lagret .....	117
<b>Bilaga 7</b> Strömningsmodell för en ideal punktkälla (Fullkomlig brunn) ...	120
<b>Bilaga 8</b> Beräkning enligt Skredkommissionens anvisningar .....	122

# Om innehållet

## **Vilket är syftet med rapporten?**

I denna rapport redovisas den teknisk/vetenskapliga utredning som gjordes av det skred som inträffade den 23 maj 1997 i en bebyggd lerslänt i Ödesby, Vagnhärad. Syftet har varit att klarlägga förhållandena vid skredtillfället, skredorsaker och skredförlopp, samt ta tillvara ny kunskap som kan erhållas genom analys av skredet. Detta är nödvändiga förutsättningar för att bättre tekniska värderingar och riskbedömningar ska kunna göras i framtiden.

## **Vem vänder den sig till?**

Rapporten riktar sig främst till yrkesverksamma geotekniker som genomför stabilitetsutredningar i sitt dagliga arbete. Rapporten är också av intresse för myndigheter som planerar för byggnadsområden och kommunikationsleder, samt för dem som ansvarar för förebyggande åtgärder mot naturolyckor.

## **Vad innehåller rapporten?**

I rapporten beskrivs först skredförloppet och vilken omfattning skredet fick. En sammanfattning görs av de observationer med anknytning till markrörelser, som gjorts under åren. Rapporten beskriver de insatser som gjordes av olika instanser i samband med skredet och de förstärkningsåtgärder som utfördes efteråt för att återställa skredområdet.

Därefter redovisas i detalj de geotekniska och hydrogeologiska förhållandena som rådde i skredområdet. Jordlagerförhållanden, jordens spänningshistoria och hållfasthet analyseras, liksom hydrologi och grundvattenbildning. För att få en kvalitativ bild av strömningsförhållanden och portrycksnivåer i området, görs en modellering av portrycksförhållandena i en sektion. En övergripande geologisk beskrivning, vilken täcker stora delar av Södermanland, innefattas också. Baserat på analysen av förhållandena i området vid skredtillfället, görs beräkningar av släntens stabilitet. För att jämföra de delar av slänten som följde med

skredet och de som står kvar, görs beräkningar i den sektion initialskredet gick, i en sektion genom huvudskredet och i en sektion utanför skredet.

### **Vad ger rapporten för rekommendationer?**

Rapporten avslutas med slutsatser om skredets orsaker och vad man bör tänka på vid analys av stabilitet i områden av liknande karaktär. Resultatet av utredningen har bl a lett till rekommendationer avseende kontroll och översyn av tidigare utförda utredningar liksom krav på kompetensutveckling.



Foto: SGI / Jan Lindgren

# Summary and recommendations

## The landslide at Vagnhärad, Sweden

At 00:59 on May 23, 1997, a large landslide occurred in a built-up area in Ödesby, Vagnhärad, about 70 km south-west of Stockholm. The slide took place in a clay slope and finally encompassed a 200 m long stretch along a small river, Trosaån, reaching about 60 m up the slope. During the slide, seven one-family houses were destroyed or undermined. A combined footpath and cycleway with a bridge across the river was also destroyed, and the river bed was displaced about 15 meters. The large slide had been preceded by observed slide movements within a smaller area at the toe of the slope. The area was therefore being kept under observation and a few houses had been evacuated. No-one was seriously injured in spite of the fact that several of the houses involved in the slide were occupied at the time. However, as an ultimate consequence of the slide, a total of 29 detached and semi-detached houses had to be abandoned and demolished. Comprehensive stabilising measures had to be taken to secure the remaining buildings. The main part of the area was then transformed into an open space.

### **Earlier slides and ground movements**

In earlier times, local erosion and slides have occurred in the banks of the river. A large slide occurred in 1982 after development of the area and, following stabilisation of the part of the slope involved in this slide, other observations of the development of cracks and movements have been made in adjacent parts. On some occasions, geotechnical engineers have been called in, and it has then been established that local erosion and sliding have occurred in the river banks and that the observations indicated movements further up in the slope. Control programmes have been designed and proposed, but no such programme has been implemented. More comprehensive controls and investigations were not started until just before the large slide occurred, when it was clearly established that large ground movements were taking place.

## **Topography and soil conditions**

The slide area consists of a long and fairly steep slope leading towards a watercourse. The soil in the slope consists mainly of clay. South of the clay covered slope, there are areas with bare rock or a covering of moraine at higher elevations, which constituted catchment areas for infiltration by the precipitation.

The total difference in elevation from the crest to the ground level at the toe of the slope was about 15 m and the eroded watercourse of the river increased this difference by about another 2 m. The inclination of the slope varied and was about 1:5 in the steepest part, where the slide occurred. The thickness of the clay layers in the slope varied from one or two metres at the top of the slope to 10 - 14 m in the lowest lying parts. Below the dry crust, the clay was soft and high-plastic. It was varved and contained thin layers of silt. The silt layers increased with depth and the soil gradually transformed into clay intermixed with silt, silt with clay layers and silt.

The geotechnical and hydrogeological investigations showed that below the clay and silt, there was a layer of coarser soil, moraine, which constituted a closed aquifer. Water infiltrated into this layer from the higher ground areas, which were not covered by clay. In the slide area and the adjacent areas, the clay acted as an almost impervious lid on top of the coarse soil, and this created conditions for high water pressures in the coarse bottom layers. In the lower parts of the slope, the water pressures were artesian.

The slope has been created by a geological process, in which loose sediments have been deposited on a sloping firm bottom during periods when the area, or parts of it, have been submerged below sea level. The area at the bottom of the slope can be assumed to have been almost level at the time it rose above sea level because of the land heave. The gradual erosion in and at the sides of the river, together with slides in the river banks, has then decreased the thickness of the clay and increased the inclination within this part of the slope. The significance of the artesian water pressures in the coarser bottom layers has thereby simultaneously increased. The ongoing geological process has thus brought a gradual worsening of the stability situation for the slope. The development of the area in the middle of the 1970's also involved effects from human interference in the situation, such as load from fills, changes in the geo-hydrological conditions caused by various pipes and trenches, etc.

## Shear strength and ground water pressures

The undrained shear strength in the clay layers varies according to the soil composition and the geological history of the area, i.e. according to the empirical experience of what can be expected in a clay with the particular consistency limits and loading history. Because of the soil conditions with numerous silt layers embedded in the clay, relatively comprehensive investigations have been required to clarify these variations. The investigations, which have been made with different methods, and the comparison with empirical experience, illustrate the importance of an evaluation of the applicability of the various methods to the particular type of soil and the relevance of the various measured values. The field vane test, which is normally used in soft clays, can yield highly variable results in silt-layered soils. Excessively high values may then be obtained when there are numerous silt layers, whereas too low values may be obtained when a small number of silt layers cause excessive disturbance of the clay at insertion of the vane. The fall cone test, which is also commonly used in clay, is not reliable in this type of soil. In this particular soil, the fall cone test generally yielded excessively low values because the soil samples were more disturbed than what is normal for homogeneous clay. A few too high values were also obtained in tests where the cone penetration reached firmer silt layers. Before a clear picture of the shear strength and its variation could be obtained, it was therefore necessary to perform supplementary investigations with CRS oedometer tests and direct simple shear tests, and to make a comparison of what could be expected with respect to the geological history of the area. This picture was also supported and supplemented by results from CPT tests performed with the highest accuracy. The effective shear strength parameters were obtained from empirical experience after being verified by a limited number of triaxial tests.

The hydrological situation at the time of the slide was not obviously extreme. However, during the week prior to the observation of the ground movements which preceded the slide, there was an unusually high rainfall for the season. The ground water level was somewhat higher than normal for the season, which in this region is the time of the year when the highest ground water levels occur. In normal conditions, the ground water levels should start to fall in May, but this year they remained high and even increased somewhat. The pore pressure measurements performed in the area indicated artesian water pressures in the coarse bottom layers in the area down by the river. Measurements indicate that the pressure head there was about 2 m above ground level. In the upper part of the slope, the aquifer was probably filled up and brimming over, with a ground water level just below the ground surface. It is more difficult to judge whether

this was a normal condition in periods with a large water supply in the form of precipitation and melting snow and if this was the sole cause for the condition at the time for the slide event. An extra water supply in the form of a leaking water pipe may also have contributed. However, the ground water pressures in the upper part of the slope had a limited influence on the pore pressures in the lower part of the slope where the slide started and on the subsequent slide events.

The results of the investigation illustrate the importance of creating reliable models both of the geological development of a slope and related stress history, and also of the hydrogeological conditions so that the results from the investigations and observations can be utilised in the best way. The first model is required for an understanding of the shear strength properties in the different soil types and the way in which they vary between different parts of the slope. The second model is required for an understanding of how the ground water pressures in different aquifers are created and how they vary with different conditions.

### **Calculated stability**

Previous stability calculations in the area had mainly been made using undrained analyses. This was more or less the standard procedure for estimating the stability in clay areas in Sweden until 1995, when the new recommendations of the Commission on Slope Stability within the Royal Academy of Engineering Sciences were produced. Various analyses of the stability of the present slide area had been made in connection with the development of the area and new analyses had been made as supplements to the investigation of the first large slide thereafter in 1982. These analyses were based on the results from a limited number of field vane tests evaluated according to practice at that time, and yielded safety factors of about 1.5, which was regarded as satisfactory. The present investigation shows that calculations based on the shear strengths obtained after compilation and evaluation of all data according to the new recommendations yield safety factors in undrained analyses of  $F_c \approx 1.3$  for both the section in which the initial slide occurred and for the remaining section east thereof. This result, when based on an extensive investigation, is already on the lower boundary for what can be accepted for a built-up area. An acceptance of such a low factor of safety would furthermore require that also the demands in a combined analysis were fulfilled, and that restrictions on the use of the land in the area were imposed.

The undrained analysis does not consider the pore pressure conditions and must therefore be supplemented with a combined analysis, which takes these into account. Combined analyses yield safety factors,  $F_{comb}$ , between 0.9 and 1.1 in the section for the initial slide. The pore pressure distribution is then modelled for an artesian water pressure in the coarse bottom layers with a pressure head about 2 m above the ground close to the river and using support from other existing pore pressure observations. The calculated probable slip surfaces coincide well with the observed initial slide.

It is also a difference in pore pressure conditions that mainly separates the part of the slope where the initial slide occurred from the remaining parts east thereof. The somewhat lower pore pressures in the latter parts entail that the safety factor calculated by combined analyses here becomes about  $F_{comb} \approx 1.2$  as a minimum.

The calculations have shown that the pore pressure situation down by the river was decisive for the stability of the slope. Other factors, such as possible fluctuations of the water level in the river, possible erosion and a minor slide at the river bank or changes in the water pressures in the upper part of the slope, could also have had a limited influence. Manmade changes in the loading situation in the slope in terms of fills and roads are estimated to have had an only marginal influence.

The stability of the soil masses in the upper part of a slope is dependent on the support given by the soil masses in the lower parts. Schematic calculations have been performed of the effect of an initial slide of the observed extent occurring at the toe of the slope. They show that only a small reduction is required in the ability of the masses involved in the initial slide to support the forces from the soil above for the slide to be able to retrogress and reach its final extent.

## **Conclusions**

The careful investigation and modelling of the geotechnical conditions in the area, such as soil stratigraphy, shear strengths and pore water and ground water pressures, have yielded calculated safety factors close to unity for the slide area. It can thus be established that the main cause for the slide was that the slope, which was a relatively steep clay slope with low shear strength and high artesian water pressures, had poor stability and that only minor changes in the conditions were sufficient to cause its failure.

The possible factors, which may have caused failure on this particular occasion, are that unusually heavy rains for the season, possibly in combination with a leaking water pipe, increased the pore water pressures, that erosion and minor local slides occurred in the river banks, that large and recurrent movements in the soil masses in the slope brought a reduction in the shear strength, and that the water level in the river was low during a period of time. The most probable cause for the initiation of the slide is a combination of two or more of these factors.

## **Recommendations**

The investigation shows that permission to build on the slope would not have been given if the present recommendations from the Commission on Slope Stability had been available and followed at the time when development of the area was planned. However, the recommendations of the Commission on Slope Stability did not appear until 1995 and it is not even certain that they have been followed in all investigations since then. Several of the developments on clay slopes in Sweden have therefore been based on geotechnical investigations which do not correspond to the demands on quality and extent presented by the Commission on Slope Stability. There is thus a considerable risk that there are other built-up slopes, which based on previous practice and according to present experience in many respects inadequate investigations, have been considered as safe, which in reality may have unsatisfactory stability. Consequently, these investigations must be re-examined and supplemented. This mainly involves:

- comparison of evaluated shear strength parameters with existing empirical knowledge
- control of possible high pore pressures and artesian ground water pressures
- calculation of stability with combined analysis

in addition to ensuring that all further requirements in the recommendations of the Commission on Slope Stability are fulfilled.

At the same time, more attention should be paid to observations in connection with slopes, which may indicate instability or beginning ground movements, and investigation of these according to the recommendations mentioned above.

# Sammanfattning och rekommendationer

Den 23 maj 1997 inträffade ett större skred i en bebyggd lerslännt i Ödesby, Vagnhärad. Skredet kom att omfatta en ca 200 m lång sträcka längs Trosaån och sträckte sig ca 60 m upp i slänten. Vid skredet totalförstördes eller underminerades sju villor, en gång- och cykelväg med tillhörande bro över ån och åfåran försköts ca 15 m. Det större skredet hade föregåtts av ett mindre skred inom ett begränsat område vid slänthöden. Området stod under observation och några hus hade utrymmts. Trots att människor vistades i flera av de berörda husen inträffade inga allvarigare personskador. Som en slutlig konsekvens av skredet kom totalt 29 villor och radhus inom området att rivas. Omfattande förstärkningsåtgärder utfördes för kvarvarande bebyggelse och huvuddelen av området gjordes om till parkmark.



Foto: SGI / Jan Lindgren

## **Tidigare skred och markrörelser**

Under tidigare perioder har lokala erosiosskred inträffat vid åkanten. Ett större skred efter att området bebyggts inträffade år 1982 och efter att det parti av slänten som då involverades hade stabiliserats, har observationer av rörelser och sprickbildningar gjorts i angränsande partier. Vid ett par tillfällen har geotekniker tillkallats och det har då konstaterats att lokala erosionsskred skett vid åkanten och att observationerna indikerade rörelser i slänten. Förslag till kontrollprogram har upprättats, men något sådant har dock inte genomförts. Först vid den tidpunkt strax före skredet, då det klart kunde konstateras att stora markrörelser pågick, påbörjades mer omfattande kontroller och undersökningar.

## **Topografi och jordlagerförhållanden**

Skredområdet utgjordes av en långsträckt slänt med lös lera och med en relativt brant lutning, som sluttade mot ett vattendrag. Söder om de lertäckta partierna fanns topografiskt högre belägna partier av berg och morän som utgjorde infiltrationsområden.

Den totala höjdskillnaden mellan släntkrönet och markytan vid släntfot var ca 15 m och djupet till Trosaåns botten ökade på denna skillnad med ytterligare ca 2 m. Släntlutningen varierade och var ca 1:5 inom det brantare partiet, där skredet gick. Leran i slänten hade en mäktighet som varierade mellan någon meter i släntens övre del och upp till 10 à 14 m i de lägst liggande partierna. Under torrskorpan var leran lös och högplastisk. Den var varvig och innehöll tunna siltskikt. Mot djupet blev den alltmer siltskiktad och övergick successivt till växellagrad lera och silt, silt med lerskikt och silt.

De geotekniska och hydrogeologiska undersökningarna visade att leran och silten i slänten underlagrades av ett friktionsjordlager, som utgjorde ett slutet grundvattenmagasin. Till detta magasin infiltrerades vatten från de högre markpartier som inte var täckta av lera. I skredområdet och närmast kringliggande områden låg leran som ett tätt lock ovanpå friktionsjorden vilket skapade höga vattentryck i friktionsjorden. I släntens nedre delar var vattentrycken artesiska.

Slänten har skapats genom en geologisk process där lösa sediment avsatts på den sluttande bergytan under den tid området eller delar därav befann sig under havsytans nivå. Området vid släntens nedre del kan antas ha varit i det närmaste plant vid den tidpunkt då denna del på grund av landhöjningen kom över havsytan. Den successiva erosionen i och vid Trosaån och småskred i åkanterna har sedan minskat lermäktigheten och ökat släntlutningen inom detta parti. Inverkan

av de artesiska trycken i bottenlagren med friktionsjord har därmed också ökat. Den pågående geologiska processen har således medfört att stabiliteten för området långsamt försämrats. I samband med att området exploaterades i mitten av 1970-talet har dessutom effekter från mänskliga ingrepp som belastningar från uppfyllnader, inverkan på de hydrologiska förutsättningarna från ledningar och ledningsgravar m.m tillkommit.

### **Hållfasthetsegenskaper och grundvattentryck**

Jordens hållfasthetsegenskaper varierar i enlighet med den empiriska erfarenheten av hur dessa normalt varierar med jordens sammansättning och områdets geologiska historia, dvs enligt vad som erfarenhetsmässigt kan förväntas i lera med motsvarande belastningshistoria och konsistensgränser. På grund av jordlagerförhållandena med talrika siltskikt inbäddade i leran har det dock fordrats relativt omfattande undersökningar för att helt klarlägga dessa hållfasthetsvariationer. De bestämningar av skjuvhållfastheten med olika metoder och den jämförelse med empirisk erfarenhet som gjorts visar på betydelsen av att en värdering görs av de olika metodernas lämplighet i den aktuella jorden och de olika mätvärdenas relevans. Det i lera normalt använda vingförsöket kan ge mycket varierande resultat i siltskiktad jord, varvid alltför höga hållfasthetsvärden ofta kan erhållas då andelen siltskikt är hög, medan endast enstaka och lösa siltskikt ofta kan medföra för låga värden på grund av störningseffekter. Det också vanligen använda fallkonförsöket är inte tillförlitligt i denna typ av jord. I detta fall gav fallkonförsöket generellt lägre värden på grund av att de upptagna jordproverna var mer störda än vad som är normalt för homogen lera, men enstaka för höga värden erhöles också på grund av att provningen kom att utföras i fastare siltskikt. Det fordrades därför att en jämförelse gjordes med vad som empiriskt kunde förväntas utifrån områdets geologiska historia och att kompletterande provningar utfördes med främst CRS-försök och direkta skjuvförsök, för att en klar och tillförlitlig bild av skjuvhållfastheten och dess variation skulle erhållas. Denna bild kunde också styrkas och kompletteras med hjälp av resultaten från CPT-sonderingar som utförts med högsta möjliga noggrannhetsklass. De effektiva skjuvhållfasthetsparametrarna kunde väljas ur empirisk erfarenhet efter att dessa värden verifierats genom ett mindre antal triaxialförsök.

Den hydrologiska situationen då skredet inträffade var inte uppenbart extrem, men under veckan innan de jordrörelser som utgjorde initialskredet observerades, föll en för årstiden ovanligt kraftig nederbörd. Grundvattennivån var något högre än normalt för den aktuella perioden, som i denna region är den tid på året då de högsta grundvattennivåerna inträffar. Under normala förhållanden

skulle grundvattennivåerna i området börja sjunka under maj månad, men detta år låg de kvar på höga värden och ökade till och med något. De mätningar som utförts tyder på att artesiska vattentryck med en trycknivå ca 2 m över markytan rådde i den underliggande friktionsjorden nere vid ån. I släntens övre del har grundvattenmagasinet sannolikt fyllts på och bräddat med en nivå strax under markytan. Om detta varit normalt för perioder med kraftig vattentillförsel i form av nederbörd och snösmältning och vid skredtillfället till fullo berott på detta, eller om en extra vattentillförsel som skett i form av inläckande ledningsvatten också bidragit, är svårare att bedöma. Grundvattentrycken i släntens övre del har dock begränsad betydelse för portrycken i släntens nedre del, där skredet startade, liksom för den efterföljande skredutvecklingen.

Den nu gjorda utredningen visar på betydelsen av att skapa bra modeller för dels en slänts geologiska utveckling och spänningshistoria, dels dess hydrogeologiska förhållanden, så att resultat från mätningar och observationer kan utnyttjas på bästa sätt. Den första modellen behövs för förståelsen av de hållfasthetsegenskaper som de olika jordmaterialen uppvisar och hur dessa varierar inom olika partier av slänten. Den senare modellen behövs för att man skall kunna förstå hur grundvattentrycken i olika akvifärer skapas och varierar under olika förhållanden.

### **Beräknad stabilitet**

Tidigare stabilitetsberäkningar inom området har i huvudsak utförts som odränerade analyser, vilket i stort sett var praxis för bedömning av stabilitet inom lerområden i Sverige fram till 1995 då IVA Skredkommissionens anvisningar gavs ut. För det aktuella skredområdet har analys av stabiliteten främst utförts efter exploateringen som ett komplement till utredningen av det skred som inträffade 1982. Dessa beräkningar baserades på resultat från ett begränsat antal vingförsök utvärderade enligt dåtidens praxis och gav en säkerhetsfaktor av ca 1,5, vilket bedömdes som tillfredsställande. De stabilitetsberäkningar som nu utförts visar att med de hållfasthetsegenskaper som erhållits efter att de utförda undersökningarna sammanställts och värderats enligt dagens metoder, erhålls vid odränerad analys en säkerhetsfaktor av  $F_c = 1,3$  såväl i sektionen för initialskredet som i den kvarstående sektionen närmast öster därom. Redan detta är på undre gränsen till vad som kan accepteras inom ett bebyggt område efter att en fördjupad utredning genomförts. Ett accepterande av en så låg säkerhetsfaktor skulle också förutsätta att villkoren för kombinerad analys samtidigt var uppfyllda, samt att restriktioner infördes för markens nyttjande.

Den odränerade analysen tar ingen hänsyn till portrycksförhållandena och därför måste också analyser utföras, som beaktar dessa. Kombinerade analyser gav säkerhetsfaktorer,  $F_k$ , mellan 0,9 och 1,1 i sektionen för initialscredet för de portrycksfördelningar som erhålls med antagande av ett par meters artesiskt tryck i den underliggande friktionsjorden och med stöd av övriga portrycksobservationer och modelleringar. Med de grundvattentryck som sannolikt rådde nere vid Trosaån under perioder med höga grundvattentryck blir säkerhetsfaktorn således nära 1,0 och marginalen mot brott är liten. De beräknade farligaste glidyterna sammanfaller väl med det observerade initialscredet.

Det är också skillnader i portryckssituationen som främst skiljer det parti i slänten där initialscredet gick, från de kvarstående partierna öster härom. De något lägre portrycken i de kvarstående partierna medför, att den beräknade säkerhetsfaktorn med kombinerad analys här som lägst blir  $F_k = 1,2$ .

Beräkningarna har visat att portryckssituationen nere vid ån var avgörande för släntens stabilitet. Andra faktorer, som möjliga vattenståndsförändringar i ån och eventuell erosion eller mindre skred i åkanten samt förändringar av vattentrycken i det övre grundvattenmagasinet, skulle också kunna ha haft en viss begränsad inverkan.

Stabiliteten hos jordmassorna i de övre partierna av en slänt är beroende av det stöd de får av jordmassorna i de lägre liggande partierna. Utförda överslagsberäkningar visar att när det initiella skredet inträffade vid släntfoten, så räckte det med en mindre reduktion av förmågan hos skredmassorna att hålla emot påhängskrafterna från de ovanliggande jordmassorna, för att skredet skulle kunna fortsätta och utbreda sig till den omfattning som slutligen blev fallet.

## **Slutsatser**

Den noggranna genomgången och kartläggningen av områdets geotekniska egenskaper såsom, jordlagerföljd, hållfastheter och por- och grundvattentryck, har lett till beräkningar av säkerhetsfaktorer nära 1,0 för delar av det aktuella området. Det kan därmed konstateras att huvudorsaken till skredet var att slänten, som var en brant lerslänt med relativt låg hållfasthet och artesiska portryck, var hårt ansträngd och att även mycket små förändringar av förutsättningarna kunde medföra att slänten rasade.

De möjliga utlösande faktorerna, som medförde att skredet inträffade vid just detta tillfälle, kan ha varit att för årstiden kraftiga regn, eventuellt i kombination med vattenläcka, höjde portrycken; erosion och små lokala skred som uppstod vid åkanten; stora och återkommande markrörelser som reducerade hållfastheten eller att vattenståndet i Trosaån var lågt under en period. Det mest troliga är att en kombination av två eller flera av dessa möjliga faktorer utlöste skredet.

## **Rekommendationer**

Den gjorda utredningen visar att om Skredkommissionens anvisningar funnits och följts vid den tid då exploateringen av området planerades hade slänten inte upplåtits för bebyggelse utan förstärkning. Skredkommissionens anvisningar kom dock först år 1995 och inte ens därefter är det säkert att de har tillämpats fullt ut i alla utredningar. Flertalet av de utbyggnader i sluttande lerterräng som utförts i Sverige har således gjorts med beslutsunderlag i form av geotekniska utredningar som inte uppfyller Skredkommissionens kvalitetskrav. En betydande risk föreligger därför att det finns ytterligare bebyggda slänter som, baserat på tidigare och med dagens mått i många avseenden otillräckliga undersökningar, klassats som tillfredsställande stabila men som i verkligheten kan ha en klart otillfredsställande stabilitet. Konsekvenserna av detta leder till att dessa undersökningar måste ses över och kompletteras, främst genom att:

- jämföra valda hållfastheter med befintlig empiri
- kontrollera eventuella höga portryck och artesiska grundvattentryck
- beräkna stabiliteten med kombinerad analys

samt att i övrigt tillse att kraven i Skredkommissionens anvisningar är uppfyllda.

Dessutom bör man alltid lägga stor vikt vid observationer i anslutning till slänter, som skulle kunna vara indikationer på instabilitet och begynnande skredrörelser, och utreda dessa enligt ovan nämnda anvisningar.

## Kapitel I.

# Beskrivning av skreden

### **I.1 INLEDNING**

Fredagen den 23 maj 1997 inträffade ett större jordskred i Ödesby, Vagnhärad. Skredet, som är det största inom ett bebyggt område sedan Tuve 1977, omfattade en ca 200 m lång sträcka längs Trosaån och sträckte sig ca 60 m upp i slänten från ån. Med i skredmassorna följde tre villor, en gång- och cykelväg samt en gång- och cykelbro. Ytterligare två villor bröts itu och två villor underminerades. Ingen människa skadades allvarligt. Skredet hade föregåtts av ett mindre skred, vilket omfattade ängsmark och en sträcka av gång- och cykelvägen.

Tätorten Vagnhärad tillhör Trosa kommun och ligger ca 70 km sydväst om Stockholm. Småhusområdet Ödesby är beläget söder om Trosaån och ca 350 m från Vagnhärad centrum. De centrala delarna av Ödesby utgörs av ett höjddparti, som sluttar dels mot en dalgång i söder och dels mot Trosaån i norr. Bebyggelsen i området består av fristående villor och radhus. Skredområdet är beläget på norrsluttningen mot Trosaån. Den naturliga jorden inom området består av ett upp till 14 m tjockt lager lera på friktionsjord.

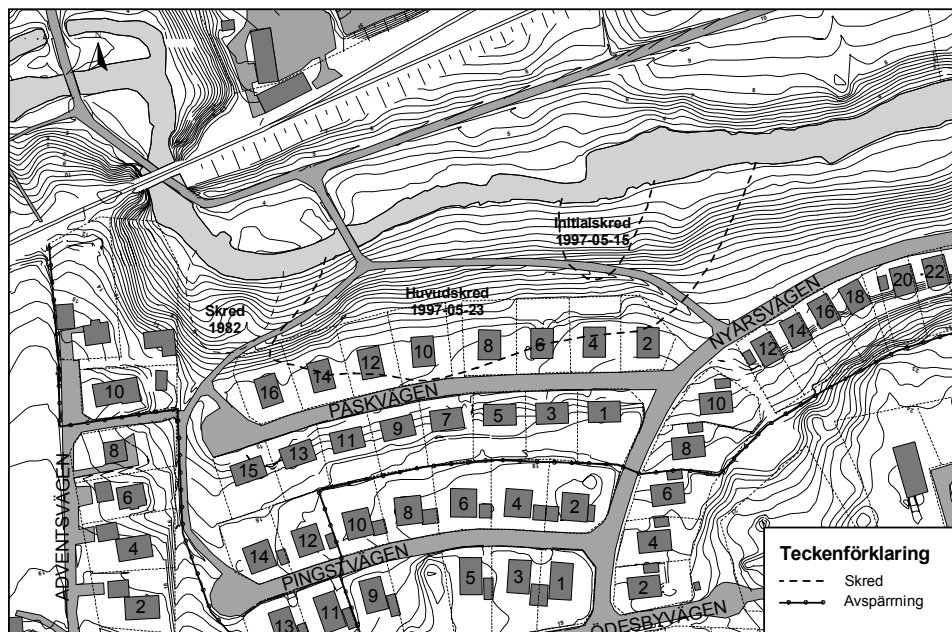
För att klarlägga orsaker till skredet samt skredförloppet och ta tillvara ny kunskap som kan erhållas genom analys av skredet, har Statens geotekniska institut (SGI) och Chalmers tekniska högskola (CTH) genomfört en teknisk/vetenskaplig utredning av skredet. Det är av största vikt att den nya erfarenhet och kunskap, som kan erhållas genom analys av inträffade skred, tillvaratas, dokumenteras och förs ut på ett bra sätt. Härigenom ökar möjligheten för bättre tekniska värderingar och riskbedömningar i framtiden. Resultatet av utredningen redovisas i denna rapport, vilken främst riktar sig till yrkesverksamma geotekniker som genomför stabilitetsutredningar i sitt dagliga arbete. Rapporten är också av intresse för myndigheter som planerar för byggnadsområden och kommunikationsleder, samt för dem som ansvarar för förebyggande åtgärder mot naturolyckor.



**Figur 1.1. Foto över skredområdet. Foto Pressens Bild/Jack Mikrut.**

## 1.2 SKREDFÖRLOPP OCH OMFATTNING

Det skred som inträffade natten den 23 maj 1997 föregicks av markrörelser i ett område nedanför bebyggelsen, vilka efter några dagar kunde konstateras vara ett mindre skred. Skredområdet och omfattningen av skreden redovisas i *Figur 1.2*.



**Figur 1.2. Plan över Ödesby med skreden 1997 och 1982 markerade.**

Det observerade händelseförloppet inleddes måndagen den 12 maj, då boende underrättade kommunen om att två tvärgående sprickor upptäckts i asfalten på gång- och cykelvägen norr om fastigheten Påskvägen 4. Kommunens tjänstemän bedömde sprickorna som tjälspäckor, men beslöt att följa eventuella förändringar. Rörelserna fortsatte och den 14 maj kallades geotekniker till platsen. Stora markrörelser konstaterades pågå inom ett område nedanför bebyggelsen. Enkla kontrollpunkter upprättades för att mäta om, och med vilken hastighet, rörelserna fortgick. Rörelser på ca 2 cm per timme uppmättes och efter ytterligare någon dag kunde det konstateras att rörelserna utgjorde ett pågående skred. Kommunens räddningstjänst tillkallades, varefter ett hus omedelbart utrymdes. I samråd mellan räddningstjänsten och geotekniker utrymdes därefter ytterligare två hus. I dessa fick de boende dock vistas under dagtid. Detta första observerade skred inträffade i slätens nedre del närmast Trosaån och omfattade en yta av ca 50 m x 35 m, bestående av ängsmark samt en cykelväg.

Torsdagen den 15 maj, då rörelserna konstaterats utgöra ett mindre skred, påbörjades geotekniska fältarbeten samt kartering av området för att klarlägga orsak och konsekvenser samt för att följa utvecklingen. Sonderingar utfördes i skredområdet, syftlinjer med stakkäppar sattes ut för att kontrollera rörelser och två stationer för mätning av porvattentryck installerades bakom och vid sidan av skredet. Där artesiskt grundvatten påträffades punkterades leran med öppna rör och det uppströmmande vattnet avleddes ner till ån.

De följande dagarna avlästes portrycken i de två portrycksmätstationerna med regelbundna intervall och en ökning av trycken med tiden kunde konstateras i stationen bakom skredet. På basis av erhållna resultat från fältundersökningarna och uppmätta portryck utfördes inledande stabilitetsberäkningar. Den 21 maj presenterades resultaten för kommunens räddningstjänst. Med uppmätta portryck erhöles enligt dessa preliminära beräkningar en lägsta säkerhetsfaktor något större än 1,0, dvs ett stabilt tillstånd för den kvarstående slänten. Om portrycken höjdes motsvarande 1 m vattenpelare i släntens nedre skulle den dock beräkningsmässigt gå till brott. Samtidigt konstaterades att rörelserna fortsatte i det utbildade skredet samt att rörelser pågick mellan skredet och husen på Påskvägen. Portrycken i mätarna bakom skredet fortsatte att stiga. Det beslutades då att en djupbrunn skulle föras ned till friktionsjorden och att vatten skulle pumpas upp och avledas för att sänka trycknivån. Pumpningen påbörjades den 22 maj kl 16.00, men vattentillrinningen var liten, varför installation av ytterligare djupbrunnar/grundvattenrör påbörjades.

Fredag den 23 maj klockan 00:59 kom ett larm till Larmcentralen om att ytterligare ett skred inträffat i Ödesby. Detta skred omfattade ett ca 200 m x 60 m stort område inklusive det område som omfattades av det första skredet. Vid skredet följde tre villor på Påskvägen 8, 10 och 12 med helt, och kom efter skredet att ligga i stort sett intakta på en lägre nivå. En gång- och cykelväg parallell med Trosaån följde med i skredet liksom en gång- och cykelbro över Trosaån. Ytterligare två villor på Påskvägen 6 och 14 bröts mitt itu varvid ena halvan av villorna följde med skredet. Två andra villor på Påskvägen 2 och 4 underminerades delvis.

Den västra skredkanten gick norr om fastigheterna Påskvägen 14 och 16 och gränsade till den förstärkning som gjorts efter ett tidigare skred som inträffade 1982 (se Kapitel 1.4). I söder gränsade skredets bakkant till Påskvägen och i öster gick gränsen i grässlänten nedanför Nyårsvägen (se Figur 1.2). Vid skredet sänktes marken 5 à 6 m i dess bakkant vid Påskvägen och vid Trosaån höjdes marken ca 2 m. De villor på Påskvägen 8, 10 och 12 som följde med i skre-

det, flyttades av skredmassorna 5-8 m norrut. Gång- och cykelvägen samt Trosaån flyttades ca 20 m norrut.

Efter detta huvudskred inträffade endast ett par mindre släpp i den östra skredkanten vid gång- och cykelvägen under den närmaste tiden efteråt.

### **1.3 OBSERVATIONER INOM OMRÅDET**

Under åren har de boende i området gjort ett flertal observationer med anknytning till markrörelser. Ett större skred inträffade 1982 och under 1995 besiktigade geotekniker området på uppdrag av kommunen.

Efter skredet 1997 utformades genom kommunens försorg ett frågeformulär, där de boende fick svara på frågor och redovisa de observationer som gjorts under åren. Resultatet av denna enkät visade att det hade funnits problem med ytvatten och fuktig mark i området, i vissa fall även lång tid efter regn. Det hade ofta tagit lång tid innan marken torkade upp efter regn och snösmältning. Längs Nyårsvägen hade ytvatten varit ett problem på baksidan av husen och även på Påskvägen och inom fastigheter med udda nummer på Pingstvägen hade man haft problem med fuktig mark.

De boende i området hade observerat att lyktstolpar vid gång- och cykelvägen lutat och att rörelser (sättningar) inträffat vid bl a buskar, staket och garageuppfarter. Flera av de boende på Nyårsvägen tyckte att slänten ner mot Trosaån genom åren blivit brantare samtidigt som det flackare området närmast ån blivit mer utbrett. Hur denna förändring skett angavs inte, men en möjlig förklaring kan vara erosion i släntens nedre del vid Trosaån vid högvattenstånd. De flesta hade upplevt att markvibrationerna var påtagliga när godståg passerade på järnvägen på andra sidan ån. Många hade också uppmärksammat sprickor i gräsmattorna, gatan eller fasaderna.

Under hösten 1995 upptäcktes marksprickor vid gång- och cykelvägen och geotekniker besiktigade området vid ett par tillfällen. Geoteknikerna konstaterade att rörelser förekommit och att ett par mindre erosionskred skett vid åkanten, samt att sprickbildningar uppträtt mellan åkanten och gång- och cykelvägen. Man observerade även att en belyningsstolpe vid gång- och cykelvägen indikerade rörelser i marken. Då geoteknikerna inte kunde avgöra om rörelserna härrörde från tendenser till skred eller hade andra orsaker, föreslog man ett kontrollprogram för bedömning av storleken på rörelserna. Man påpekade också att det var av stor vikt att detta utfördes. Något sådant kontrollprogram genomfördes dock inte.

Hösten 1996 och våren 1997 upptäcktes relativt stora sprickor inom fastigheterna Nyårsvägen 14 och 22. Våren 1997 upptäcktes en spricka med ett större hål på gång- och cykelvägen norr om fastigheten Påskvägen 14. Hålet fylldes igen. 14 dagar senare, den 11 maj, upptäcktes nya sprickor på gång- och cykelvägen norr om fastigheten Påskvägen 4. Påföljande dag rapporterades dessa sprickor till kommunen, vilket markerade inledningen till det observerade händelseförlopp som ledde fram till skredet den 23 maj 1997.

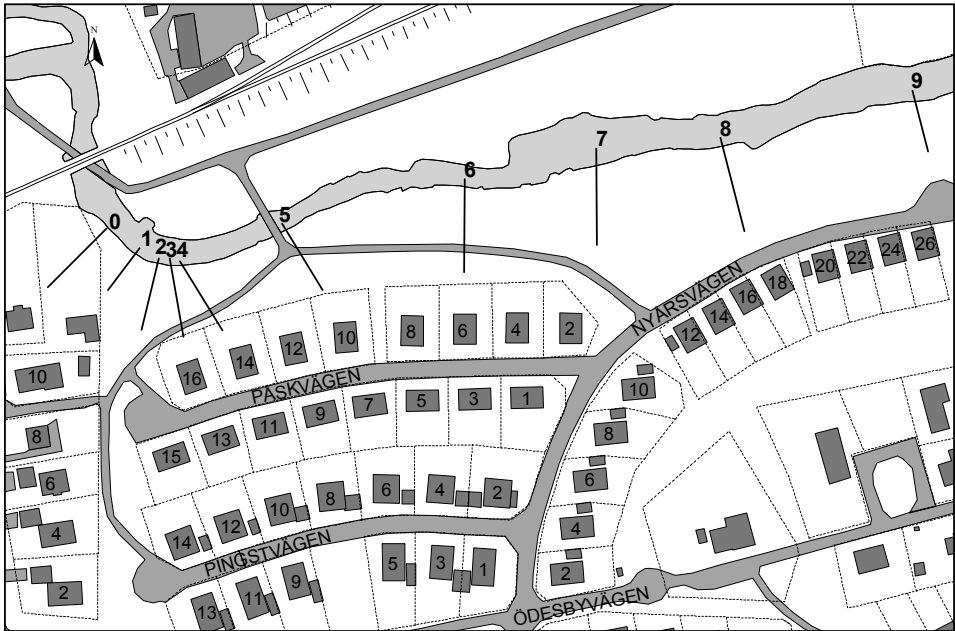
#### **1.4 TIDIGARE SKRED**

Skred har inträffat tidigare i Ödesby. Geologiskt kan Trosaåns åfåra och slänten ner mot denna antas ha utbildats genom en kombination av erosion och skred. I modern tid inträffade den 12 april 1982 ett skred mot Trosaån i den västra delen av Ödesby, norr och nordväst om fastigheten Påskvägen 16. Skredet omfattade ca 800 m<sup>2</sup> av den naturliga slänten mot ån. Skredområdet utgjordes av allmän parkmark och ingen bebyggelse påverkades direkt av skredet. Tre närliggande fastigheter utrymdes dock av säkerhetsskäl. Delar av den befintliga gång- och cykelvägen, som ligger i den naturliga slänten parallellt med Trosaån, följde med i skredmassorna. Skredet bedömdes ha gått ned i leran till 5-6 m djup. Trosaåns botten trycktes upp ca 2 m.

Nyköpings kommun gav efter skredet VIAK AB uppdraget att utföra geotekniska undersökningar i området samt att föreslå åtgärder för att säkerställa stabiliteten i skredområdet. Vidare uppdrogs åt VIAK AB att kontrollera stabiliteten längs Trosaån öster om skredområdet (VIAK AB, 1982, litt. 6216.1604).

De undersökningar som utfördes 1982 är främst lokaliserade i och i närheten av det dåvarande skredområdet i Ödesbys västra del, se *Figur 1.3*. Undersökningarna omfattade vikt- och slagsonderingar, vingförsök, störd och ostörd provtagning samt mätning av grundvatten- och portrycksnivåer med öppna rör respektive portryckspetsar. Dagarna efter skredet 1982 uppmättes höga portryck i det underliggande friktionsjordslagret. Öppna grundvattenrör indikerade ett artesiskt portryck motsvarande en grundvattennivå av +7 till +7,30. Detta innebar att portrycksnivån i bottenlagren närmast Trosaån stod ca 2,5 m över befintlig markyta efter skredet.

Stabiliteten beräknades för 9 sektioner längs ån. Både dränerad och odränerad analys utfördes. Mot bakgrund av dessa beräkningar bedömde man att stabiliteten var tillfredsställande i ett område som sträckte sig från fastigheten Påskvägen 6 bort mot Nyårsvägen, dvs lerslänten öster om skredområdet. Området



**Figur 1.3. Plan över området med undersökta sektioner efter skredet 1982.**

kring Adventsvägen och bort mot fastigheten Påskvägen 6 bedömdes ha en otillfredsställande stabilitet (lägre säkerhetsfaktor än 1,5), dvs det dåvarande skredområdet samt sektionerna närmast väster och öster därom.

För att öka totalstabiliteten i det skredade området och för att sänka portrycken installerades kalkpelare inom skredområdet. Man beslutade att även installera kalkpelare utefter en ca 80 m lång sträcka längs Trosaån öster om skredområdet, där stabiliteten bedömts vara otillfredsställande. Kalkpelarinstallationerna öster om skredområdet fick dock avbrytas eftersom sättningar inträffade inom fastigheterna vid Påskvägen. Istället installerades vertikaldräner, vilka sattes till 7 m djup under markytan. Dräneringsledningar lades ned för avledning av det uppströmmande grundvattnet. Väster om området installerades två djupbrunnar som fördes ner till det underliggande friktionsjordslagret. Dessa försågs med bräddavlopp under markytan. Åfåran grävdes om i begränsad omfattning och för att förhindra erosion i åkanten lades ett erosionskydd av sprängsten ut vid skredområdet. Den beräknade säkerhetsfaktorn mot skred blev efter de utförda åtgärderna 1,5.

## 1.5 INSATSER FRÅN OLIKA INSTANSER

Efter att tillkallade geotekniker, i maj 1997, konstaterat att de stora markrörelser som pågick inom ett område nedanför bebyggelsen var ett pågående skred, vidtogs en rad åtgärder:

- Kommunens räddningstjänst tillkallades.
- Fastigheterna Påskvägen 2, 4 och 6 utrymdes.
- Geotekniska fältundersökningar påbörjades.

Efter huvudskredet, som inträffade på natten till den 23 maj 1997, vidtogs följande åtgärder:

- Kommunens räddningstjänst, polismyndigheten, Trosa kommun och SGI larmades.
- Räddningstjänsten och polisen påbörjade kontroller av området.
- Ytterligare 26 hus utrymdes under natten till den 23 maj (fastigheterna Påskvägen 1, 3, 5 och 7-16, Adventsvägen 10, 12 och 14 samt Nyårsvägen 8-26 (jämma nummer)).
- Området spärrades av och sattes under bevakning.
- Järnvägen på andra sidan Trosaån stängdes av för trafik.
- Närboende informerades.

Under förmiddagen den 23 maj inspekterades området och skadornas omfattning dokumenterades. Ett samrådsmöte hölls med inblandade myndigheter och geotekniker för värdering av situationen. Nya geotekniska undersökningar påbörjades för att fastställa risker och riskområdets storlek, samt för att komplettera den geotekniska bilden av området. Under dagen utrymdes ytterligare fyra hus, och riskområdet utökades således till att omfatta även fastigheterna Pingstvägen 11-14. Därmed omfattade det bedömda riskområdet i detta skede samtliga hus i området med lös lera (se Figur 1.2).

Dagarna efter skredet påbörjades arbetet med att tömma de utrymda husen. Till att börja med fick de boende i viss utsträckning själva hämta sina tillhörigheter, men för att effektivisera arbetet togs senare hjälp av militär personal. Den 26 maj placerades en pump i en brunn nedanför Nyårsvägen för att om möjligt sänka grundvattentrycket. En riskanalys och stabilitetsberäkningar utfördes för att bedöma om några av husen kunde tas ur riskområdet, vilket dock inte blev fallet.

Undersökningar av järnvägsbankens stabilitet påbörjades i Banverkets regi. Efter några dagar, då vibrationsmätningar visat att järnvägstrafiken inte genere-

rade skadliga vibrationer i skredområdet och att stabilitetsförhållandena för järnvägen preliminärt bedömts vara acceptabla, släpptes trafiken fram med reducerad fart på det spår som låg längst ifrån skredområdet. Därmed avfördes järnvägsområdet också från det allmänna riskområdet och den vidare utredningen av järnvägsbankens stabilitet och bedömningen av trafikrestriktionernas varaktighet överfördes till Banverkets ansvarsområde.

Den 27 maj rapporterade fastighetsägaren på Pingstvägen 4 en trolig vattenläcka till Trosa kommun. Vattentrycket i fastigheten hade då sjunkit märkbart. Kommunens VA-enhet kom till platsen och stängde av vattnet kl 13.00. Läckan lokaliserades till en kopplingskarv, vilken var ingjuten i husets bottenplatta. Den trasiga kopplingen togs loss, omhändertogs och provtrycktes senare av kommunens tekniska kontor.

Veckorna efter skredet påbörjade SGI i samarbete med VBB VIAK en utredning för att ge förslag på åtgärder för området. Det presenterades flera möjliga alternativ; dels förstärkningsåtgärder så att i stort sett all bebyggelse (med undantag av hus direkt vid skredkanten eller av skredet förstörda hus) skulle kunna vara kvar, dels åtgärder som innebar att ett större antal hus måste rivas. Vid värdering av de olika alternativen togs hänsyn till såväl geotekniska, plantekniska som ekonomiska aspekter. SGIs myndighetsfunktion fungerade som råd och stöd åt Räddningstjänsten vad gällde värdering av risker, riskområde, bedömning av geotekniska insatser och hur räddningsarbetet inom skredområdet kunde bedrivas.

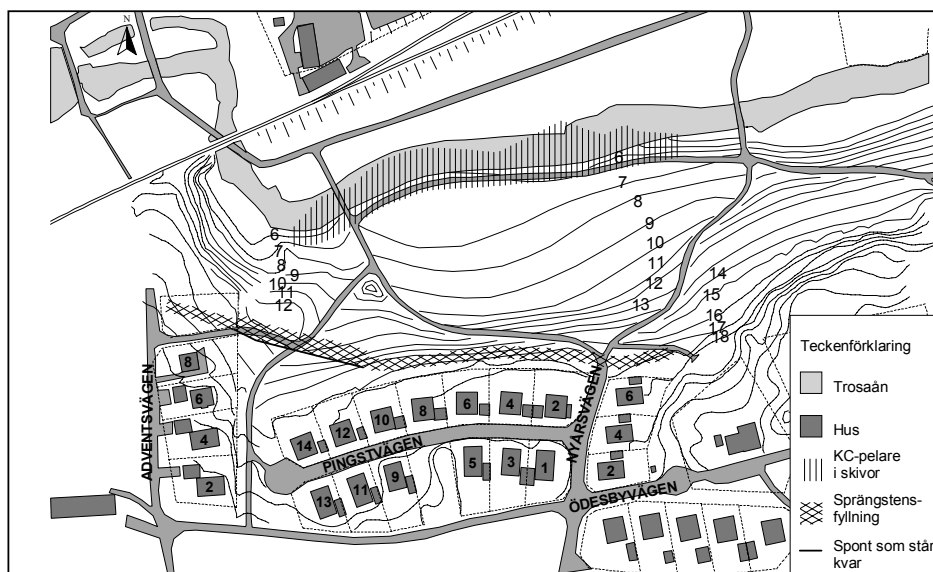
Någon månad efter skredet bistod SGIs myndighetsfunktion Trosa kommun och Länsstyrelsen i Södermanlands län med granskning av handlingar vid framtagande av ny detaljplan för området och med att bestämma säkerhetsnivå och förstärkningsåtgärdernas omfattning för skredområdet.

## **1.6 ÅTGÄRDER**

På basis av de framtagna åtgärdsförslagen fattade Samhällsbyggnadsnämnden i Trosa kommun den 3 juli 1997 ett beslut om att 28 fastigheter inom riskområdet skulle rivas, och att förstärkning skulle utföras till erforderlig säkerhet. Detta innebar att fem hus inom riskområdet kunde stå kvar, fastigheterna Pingstvägen 11-14 samt Adventsvägen 10, och att återflyttning till dessa kunde ske efter förstärkning av området. En kompletterande utredning under oktober 1997 visade dock att lermäktigheten norr och öster om fastigheten på Adventsvägen 10 var större än vad tidigare undersökningar visat, varför det inte längre var ekono-

miskt försvarbart att förstärka denna. Detta innebar rivning av 29 hus inom riskområdet och förstärkning och efterföljande återflyttning till de fyra fastigheterna på Pingstvägen 11-14.

Det beslutades också att en ny detaljplan för området skulle upprättas. Denna innebar att Trosaån skulle flyttas tillbaka ca 15 m söderut mot skredområdet till sitt ursprungliga läge och att skredområdet skulle göras om till ett naturområde. Stabiliteten ner mot ån skulle säkerställas genom förstärkning av området vid ån med kalkcementpelare placerade intill varandra i skivor. En sprängstensfyllning skulle schaktas ned genom leran till det underliggande friktionsjordslagret norr om husen på Pingstvägen. Avsikten med denna sprängstensskärm var att genom bräddavlopp hålla grundvattennivån söder om skärmen på en jämn och låg nivå, motsvarande medelnivån före skredet, och undvika artesiska vattentryck i skredområdet norr därom. Sprängstensskärmen skulle förlängas över Nyårsvägen förbi och norr om det sista kvarstående huset på denna väg, fastighet nummer 6. Nedanför de fyra husen på Pingstvägen, där leran är som mäktigast, skulle en spont slås för att leran skulle kunna schaktas bort. Sponten på den södra sidan av sprängstensfyllningen skulle sedan stå kvar efter att man fyllt igen schakten med sprängsten. Spont och sprängstensskärm skulle här också utgöra en barriär för att omöjliggöra framtida bakåtgripande skred. Dessa åtgärder har nu genomförts. Bebyggelsen i området efter förstärkning samt vidtagna förstärkningsåtgärder framgår av *Figur 1.4*.



**Figur 1.4. Principskiss över bebyggelsen i Ödesby idag, samt vidtagna åtgärder för att säkerställa området.**

## Kapitel 2.

# Skredområdet utbyggnad

### 2.1 INLEDNING

I början av 1970-talet slogs de tre kommunerna Nyköping, Trosa och Vagnhärad samman till en storkommun, Nyköpings kommun. Före sammanslagningen beslöt Vagnhärads kommun att köpa in mark för bebyggelse i bl.a. Ödesby. Anledningen var en förväntad utveckling av tätorten med ett fortsatt ökat bostadsbyggande i enlighet med kommunplanen.

1992 ändrades kommunindelningen igen och Trosa kommun bildades. Vagnhärad hör idag till Trosa kommun.

### 2.2 UTBYGGNAD AV OMRÅDET

Den 13 november 1973 togs beslut om ändring och utvidgning av byggnadsplanen för den del av Vagnhärad som omfattade Ödesby. Denna utvidgning av byggnadsplanen, vilken följdes vid utbyggnaden av Vagnhärad, följde intentionerna i markdispositionsskissen för tätorten, som för området söder om Trosaän rekommenderade småhusbebyggelse. Till utvidgningsförslaget upprättades en karta med beskrivning av planerna för utbyggnaden av området.

I byggnadsplanen föreslogs att området skulle bebyggas med ca 45 småhus, dels friliggande och dels kopplade hus. Husen i området fick enligt planen endast byggas som envåningshus. Området längs Påskvägen och Pingstvägen skulle bebyggas med fristående hus och längst i öster invid Nyårsvägen skulle det byggas radhus. Det fanns även restriktioner avseende byggnadernas höjd, bostadsyta och antal huvud- och uthusbyggnader. Mellan nuvarande Nyårsvägen och Ödesbyvägen fanns ett område avsatt för byggnation av lekskola eller barnstuga. De första tomterna i Ödesby bebyggdes 1975.

De villor som uppfördes var 1-plans eller 1½-plans hus. Längs Påskvägen och Pingstvägen byggdes 29 villor och längs Nyårsvägen 5 villor och 8 radhus. Husen längs Påskvägen och delar av Nyårsvägen grundlades på stödpålar slagna

till berg, medan övriga hus grundlades med plattor och/eller plintar på fast lera, morän eller berg. Ett antal hus byggdes med källare. I västra Ödesby, vid Adventsvägen, där 3 villor fanns sedan tidigare, uppfördes ytterligare 4 villor.

Ödesbyvägen och Högtidsvägen var infartsleder till området och är så fortfarande. I slutningen ner mot Trosaån löpte en gång- och cykelväg parallellt med ån. Denna anslöt till en bro över Trosaån i områdets västra del och gick vidare under järnvägen och väg E4 och sammanlänkade Ödesby med Vagnhärads centrum.

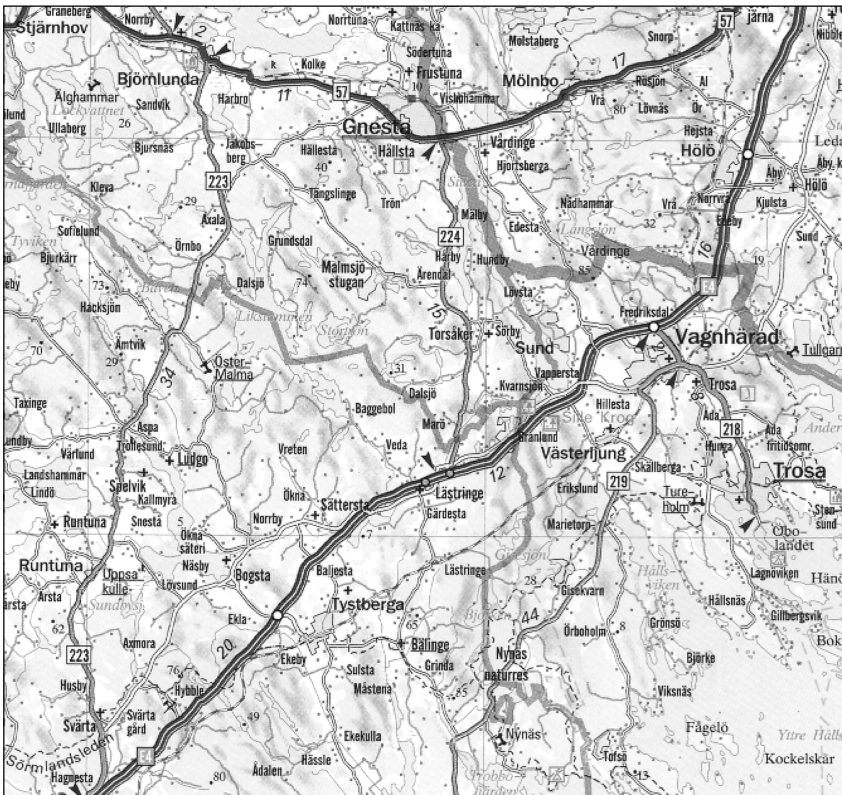
Vatten- och avloppsledningarna i området var lagda i Pingstvägen, Påskvägen och Nyårsvägen. En ledningssträckning kom från östra delen av Ödesbyvägen, fortsatte i Nyårsvägen och leddes därifrån österut till avloppsreningsverket. Från Pingstvägen 5 och 6 gick en ledningssträckning österut, vilken anslöt till ledningarna i Nyårsvägen. Åt andra hållet var ledningarna dragna från Pingstvägen 8 och västerut. Vid vändplanen gick de norrut och följde sedan Påskvägen och anslöt till ledningarna i Nyårsvägen. Även husen på Adventsvägen var anslutna till denna ledning. I Pingstvägen mellan husen på nummer 5 - 6 och 8 fanns enbart en vattenledning.

# Kapitel 3.

# Geologi

## 3.1 INLEDNING

Vid sökandet av orsaker till skred är de geologiska förhållandena av stor betydelse eftersom kunskap om jordlagren och deras bildningssätt ger ökad förståelse för de faktorer som kan inverka. Den geologiska beskrivningen nedan är inte enbart begränsad till Ödesby och Vagnhärad utan omfattar ett större område som täcker stora delar av Södermanland. Området som beskrivningen avser är markerat i *Figur 3.1*.



**Figur 3.1.** Området som innefattas av den geologiska beskrivningen.

I kapitel 5 och 6 finns en mer detaljerad beskrivning av skredområdets lokala geologi och topografi.

### **3.2 TOPOGRAFI**

Södermanland har en flack småkuperad berggrund med ursprung i ett förhöjt prekambriskt peneplan. Urberget är genomkorsat av smärre sprickzoner vilka givit vittring och erosion något större möjligheter att påverka bergmassan lokalt. Detta har skapat ett oregelbundet landskap med enstaka markerade dalgångar. Mindre och kortare dalgångar och sänkor i berggrunden är vanliga.

Vagnhäradområdet ligger mellan två av de större dalgångarna - de i stort sett nord-sydliga Mörköfjärden och Sillen-Klämningendalen. Däremellan går ett par flackare dalgångar i ost-västlig riktning, vilka i sin tur förbinds av nord-sydliga sänkor. Mellanliggande bergpartier är relativt små och oftast flacka. Tydligast är den oregelbundna bergsrygg som kan följas från Sillens södra ände till Tullgarnsviken. Denna bergsrygg utgör södra sidan av Vagnhäradssänkan med den genomflytande Trosaån. Norra sidan av denna sänka är flackare. Höjdskillnaden är drygt 50 meter mellan Trosaån och bergkullarna runtom. Dalarna och sänkorna är till viss del fyllda med sediment. På enstaka ställen är jordlagren drygt 20 m mäktiga, men oftast betydligt tunnare, varför den totala reliefen uppgår till ca 80 m.

### **3.3 BERGGRUND**

Berggrunden i området består av kristallina mer eller mindre metamorfoserade bergarter - gnejser - av hög ålder (> 2000 milj år). Smala diabasgångar förekommer här och var. Någon enstaka sådan kan eventuellt gå fram under Vagnhärad, men de är dåligt dokumenterade på grund av jordtäckets mäktighet. Lokalt finns norr om Vagnhärad inslag av sedimentbergarter, som nu är omvandlade till marmor och leptit.

Berggrundens gnejs innehåller normal förekomst av sprickor, vilka bildats för mycket länge sedan. De uthålligaste sprickorna har NV-NNV-lig riktning medan de O-V-liga är något kortare. Mindre sprickor förekommer ofta i NO-liga orienteringar. Välutvecklade sprickor i denna riktning saknas dock.

I området för Vagnhärad tätort har ganska få markanta sprickzoner dokumenterats. Den närmaste och största går i NV-lig riktning öster om Trosa kyrka och öster om samhället. En smal sprickzon framträder i nära NNO-lig riktning strax



- — — Sprickzon, framträdande
- Sprickzon, smal

Figur 3.2. Tektonisk karta över Vagnhäradområdet (Stålhös, 1975)

väster om Trosa kyrka upp till ovanstående sprickzon. I övrigt har inga sprickzoner framkommit i samhället vid kartläggningen (Stålhös, 1975).

### 3.4 KVARTÄRGEOLOGISK UTVECKLING

Vagnhäradområdet är beläget under högsta kustlinjen i ett område med små till måttliga jorddjup. Området ligger i den mellansvenska israndzonen vilket medför att morän- och isälvsavlagringar kan förväntas vara komplext uppbyggda. Berggrunden är mer eller mindre blottad på de flesta höjdparter på grund av svallning under landhöjningen. Jordlagerföljden är normalt den typiska för områden under HK (högsta kustlinjen), dvs det finns ett moräntäcke närmast berget och i sänkor är leror avlagrade - i sött eller salt vatten. Slutningarna innehåller svallsediment, som är mer eller mindre välsorterade (ensgraderade). Lågparter i terrängen innehåller ofta sankmarker med organiska jordarter.

### 3.5 JORDLAGRENS BILDNING

Den äldsta jordarten i området är en ganska normal morän, dvs normalblockig siltig sandig morän, som avsattes under istiden eller under isavsmältningen. Den är således en osorterad friktionsjordart vars egenskaper domineras av mängden sand. Finjordshalten (silt+ler) i moränen är måttlig och domineras av silt. Moräntäckets utbredning och mäktighet i sänkor och dalgångar är föga känt men det förefaller som om det är ganska tunt och osammanhängande. Detta antyds också av att det är gott om berg i dagen, vilket antingen är en effekt av brist på moräntäcke vid isavsmältningen eller bortsvallning av ett tunt moränlager under landhöjningen. Lokalt är moränen 5-7 m mäktig och har då ofta egenformer.

Vid isens avsmältning transporterades det i isen infrusna materialet med smältvattnet ut till någon sedimentationsplats. Under transporten tvättades och slipades materialet och vid avsättningen sorterades materialet alltefter rådande vattenhastighetsförhållanden. Det grövre materialet kom att avsättas i närheten av iskanten i isälvsavlagringar, vilka mestadels är uppbyggda av ganska välsorterade lager av sand, grus och sten, medan finmaterialet fördes ut i havsbassängen. Isälvsavlagringar är sparsamt förekommande i Vagnhäradområdet, men det finns dock en mindre grusförekomst norr om samhället.

Landisen smälte ganska långsamt vid den tid då Vagnhäradområdet frilades från isen, vilket hände för ca 10 800 år sedan (Brunnberg, 1995). Detta innebar att det bildades relativt lite sediment vid denna tid.

Det uttransporterade finmaterialet - silt och lerfraktioner - sedimenterade när vattenförhållandena blev gynnsamma. Östersjösänkan har under och efter isavsmältningsperioden förändrats åtskilligt genom landhöjning, vattennivåförändringar och successivt ökad vattenutbredning mot norr. Tidvis har sänkan innehållit sötvatten och tidvis saltvatten. Detta innebär också att de jordarter som ingår i en lagerföljd successivt förändras från söder mot norr (Ignatius et al., 1981).

I det första skedet, när isen fanns i området, innehöll Östersjösänkan smältvattnet från landisen, dvs vattnets salthalt var mycket låg och de sediment som avsattes präglas av detta förhållande. I detta sötvatten med ganska stor vattenomsättning och tidvis stor oro i vattnet avsattes stor, och med årstiden starkt varierande, mängd finpartiklar till olika sediment sommar och vinter. Under sommaren tillförde isälvarna ständigt nytt material till bassängen och vattenströmmar förde finmaterialet lång väg. Endast de största partiklarna gavs tillfälle att sjun-

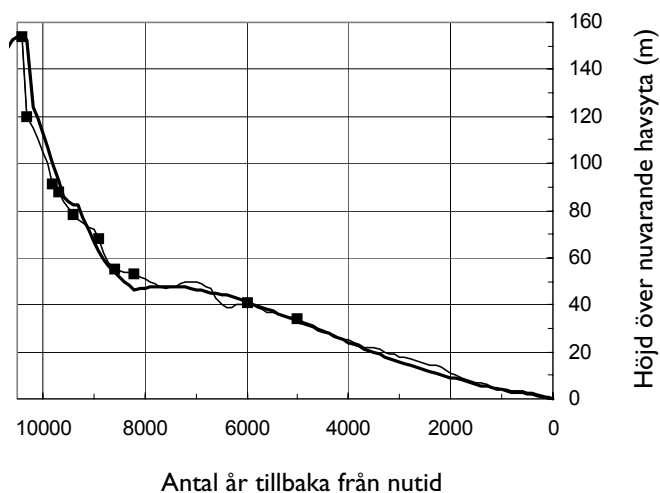
ka till botten sommartid. Det bildades välsorterade lager av silt (ibland sandiga) som normalt är mycket ljusa till färgen på grund av att de flesta mineralkornen är av kvarts och ljus fältspat. Under en sommar avsattes lager av silt med tjockleken några cm till enstaka mm beroende på avståndet från iskanten och vattenomsättningen på platsen. På hösten sinade isälvarna och vattenomsättningen i bassängen sjönk radikalt, vilket medförde att de finare partiklarna kunde sedimentera. Vintertid avsattes således lerpartiklar och eventuellt organiskt material tillsammans med eventuella utfällningar av järn. Dessa lager är också mycket välsorterade men vanligen mörka till färgen. Ett år gav två olikfärgade tunna skikt som tillsammans kallas ett varv. Genom regelbundet återkommande likartade sedimentationsförhållanden bildades successivt den så kallade varviga leran.

De undre delarna av den varviga leran i Vagnhäradsområdet består således av tunna lerrika skikt mellanlagrade av tunna, mer eller mindre siltrika skikt. Fördelningen ler-silt kan variera ganska mycket mellan olika varv beroende på den för tillfället rådande avsättningsmiljön (sedimenttillförsel, vattendjup och vattenströmmar). Allteftersom iskanten retirerade blev avsättningsmiljön lugnare och silttillförseln minskade och därmed blev leran mer och mer homogen.

Den varviga leran har stor utbredning i området. Den kallas glacial lera eftersom den avsattes under isavsmältningsskedet.

Högsta kustlinjen i området ligger ca 154 m.ö.h. (Persson, 1979). Under landhöjningen efter isens avsmältning kom landet att svallas mer eller mindre (mest av vindar och vågor från öster). Svallningen av området har dock varit ganska måttlig och man har inte funnit anledning att särskilja osvallad morän och morän med svallat ytskikt vid jordartskartering, *Figur 3.3* (Persson, 1975).

Friläggningen av Vagnhäradsområdet inträffade mindre än 100 år innan Baltiska issjön omvandlades till Yoldiahavet. Det dröjde dock ytterligare flera tiotals år innan salt vatten kunde börja strömma in från väster över Mellansvenska sänkan. Yoldiahavet var ett brackvattenhav med salt vatten i botten och sött vatten i ytan på samma sätt som i nutiden. Den salta perioden varade blott 120 år, ty landhöjningen medförde att utloppet över Mellansvenska sänkan grundades upp och Östersjösänkan blev ånyo dominerad av smältvatten från isen - Ancylussjön. De geologiska undersökningarna av lerlagerföljder i Södermanland är inte fullständiga och man kan inte avgöra om Ancylussjöns sediment ingår i lagerföljden. På andra ställen är Ancylussjöns leror ganska sulfidrika, men sådana leror har inte dokumenterats här.



**Figur 3.3. Strandförskjutningskurva för södra Södermanland. Tunna linjen= data från Persson, 1979. Tjocka linjen= enligt matematisk modell av Påsse. (Påsse, 1997).**

I saltvatten uppför sig finpartiklarna annorlunda jämfört med i sötvatten. Natriumkloriden hjälper till att fästa ler- och siltpartiklarna till varandra medan de ännu svävar fritt i vattnet och det bildas sk aggregat. Dessa aggregat uppträder därefter som om de vore större partiklar, dvs de sedimenterar fortare än rent ler. Aggregaten får normalt en grå färg (färgblandning) och den växlande sedimentationen sommar/vinter märks på sin höjd som färgvariationer. I vattnet förekommande järnföreningar kan också fällas ut och sedimentera tillsammans med lermaterialet. Den uppkomna leran är således tämligen homogen och normalt grå till färgen. Den är avsatt långt från isen och i princip efter det att isen slutat att påverka området och kallas därför postglacial lera. Avsättningsmiljön var således lugnt och troligen salt vatten med relativt liten tillförsel av finmaterial.

Glaciala och postglaciala finsediment täcker en stor areal i Vagnhäradområdet och utgörs således av silt- och lerjordar av olika typer och ålder (Persson, 1975).

Finsedimenten är i dalgångarna 5-15 m mäktiga (beroende på ifrågavarande berggrundsvackas djup). Av detta utgörs huvuddelen av den varviga leran. Den varviga leran har rikligt med siltskikt i botten. Siltskiktens tjocklek avtar successivt uppåt och lerans övre delar innehåller blott enstaka tunna siltskikt. På några ställen har man i det område som omfattas av topografiska kartbladet Nyköping NO (25 x 25 km) påträffat enstaka finsandlager i den glaciala leran.

Man är osäker om hur dessa friktionsjordlager bildats - undervattensskred och/ eller tillfälliga starkare vattenströmmar är möjliga orsaker.

Strandförskjutningen medförde att Vagnhäradsområdets högst belägna delar - bergspartierna - började sticka upp ur havet för ca 8 300 år sedan (Persson, 1979; Påsse, 1997). Detta inträffade i övergångsskedet mellan Ancylus- och Litorinastadierna. Svallningen av de uppstickande bergkullarnas jordlager gav upphov till svallsand. Det därvid lossgjorda finsand/grovsiltmaterialet bör kunna återfinnas som tunna skikt i lerlagren i områdets lägre belägna partier.

Under den efterföljande tiden avsattes nya lerlager. Det är dock osäkert om gränsen mellan glacial och postglacial lera i området sammanfaller med Litorinagränsen. Den postglaciala lerans undre delar kan vara äldre och definieras i området efter utseende och egenskaper. De postglaciala sedimenten förekommer i de lågt belägna delarna av större sänkor och dalgångar ovanpå den glaciala leran och består ofta av styv lera (lerhalt 35-55 %). Denna lera är oftast grå med bruna fläckar av rostutfällningar. I en del områden når den ganska högt upp på sluttningarna, vilket är fallet vid Vagnhärad.

Ännu senare, när området grundats upp ytterligare, avsattes alltmer organiskt material i lugna vikar eller sjöar. De därvid bildade gyttjelerorna eller lergyttjorna återfinns i de lägsta partierna i terrängen, dock inte i nämnvärda mängder i Vagnhäradsområdet.

En normal jordlagerföljd för Vagnhäradsområdet skulle således vara uppbyggd som i *Figur 3.4*.

**Figur 3.4. Generaliserad jordlagerföljd för Vagnhäradsområdet. Den glaciala varviga lerans undre delar domineras av siltskikt vilka uppåt successivt avtar i tjocklek. De övre delarna av denna lera är tämligen homogena med blott enstaka siltskikt. Här och var kan enstaka sandlager påträffas i lerpacken, vilka troligen orsakats av tillfälliga strömmar eller undervattensskred.**



## Kapitel 4.

# Geotekniska undersökningar

### 4.1 TIDIGARE UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR

Ett flertal geotekniska undersökningar har tidigare utförts i området. Nedan redovisas i stora drag de rekommendationer som gavs i några av dessa undersökningar.

En översiktlig geoteknisk undersökning utfördes 1972 inom Ödesby 1:2, 1:3 mfl (K-Konsult, 1972, litt. 85198 028 230). I undersökningen gavs översiktliga rekommendationer för grundläggning inom olika delområden. För området vid Påskvägen och del av Nyårsvägen rekommenderades grundläggning med hel armerad bottenplatta. Vidare angavs att utfyllnader borde undvikas inom detta område eller läggas ut till högst 0,5 m höjd. Förekomst av äldre skredärr konstaterades i området.

En översiktlig geoteknisk undersökning utfördes inom fastigheterna Kroka, Husby södra och Ödesby 1973 (K-Konsult, 1973, litt. 27053 126 23). I denna utredning konstateras att jorden i det undersökta området utgjordes av kohesionära jordar, som är mycket sättning känsliga för ökade belastningar, och att skredrisk förelåg redan vid relativt små belastningar. Man bedömde att de partier med lerdjup större än 5 à 10 m var mindre lämpliga för bebyggelse, då grundförstärkningsåtgärder erfordrades, att pålning erfordrades för större delen av bebyggelsen och att fyllningar borde undvikas. Kompletterande detaljerade undersökningar rekommenderades vid planering av bebyggelse inom aktuellt område.

En geoteknisk undersökning för planerad gång- och cykelbro, vägar och byggnader inom Ödesby etapp I, utfördes 1974 (K-Konsult, 1974, litt. 85198 039 23). I utredningen rekommenderades byggnaderna grundläggas med pålar eller plintar nedförda till fast botten. I anslutning till byggnaderna i norr (norr om Påskvägen) fick inte uppfyllnader högre än 0,5 m läggas närmast släntkrönet mot Trosaån, med hänsyn till stabiliteten. Vägarna inom området bedömdes

kunna fyllas upp till angivna nivåer. Däremot fick utfyllnad närmare Trosaån än 5 m inte göras, och på 10 m avstånd fick en utfyllnad på högst 1 m med lutning 1:6 mot höjdpartiet utföras, med hänsyn till stabiliteten. För brons landfästen rekommenderades pålgrundläggning och för uppbyggnad av den norra tillfartsbanken lätt fyllning.

Med anledning av det inträffade skredet 1982 utfördes en geoteknisk undersökning för att klarlägga stabilitetsförhållandena vid Trosaån (VIAK AB, 1982, litt. 6216.1604). Med denna som underlag utfördes en separat utredning för bedömning av troliga orsaker till skredet (VIAK AB, 1982, litt. 4916.4118) (se även Kapitel 1.4). För bedömning av stabiliteten inom och utanför det dåvarande skredområdet utfördes stabilitetsberäkningar för 9 sektioner längs ån. Både dränerad och odränerad analys utfördes. I det dåvarande skredområdet erhöles otillfredsställande stabilitet efter skredet, med en beräknad säkerhet av  $F_c = 1,1 - 1,4$  med odränerad analys och  $F_{c\phi} = 1,1 - 1,2$  med dränerad analys. Otillfredsställande stabilitet (lägre säkerhetsfaktor än 1,5) erhöles också i en sektion närmast väster om skredet ( $F_c = 3,2$  och  $F_{c\phi} = 0,6$  för plana glidytor) och öster om skredet ( $F_c = 1,58$  och  $F_{c\phi} = 1,4$ ). För övriga sektioner erhöles beräknade säkerhetsfaktorer större än 1,5 och säkerheten mot skred bedömdes därmed vara tillfredsställande. Man bedömde således att stabiliteten var tillfredsställande i ett område som sträckte sig från fastigheten Påskvägen 6 bort mot Nyårsvägen, dvs lerslätten öster om skredområdet. Området kring Adventsvägen och bort mot fastigheten Påskvägen 6 bedömdes ha otillfredsställande stabilitet. Vidare gavs i den första utredningen förslag till förstärkningsåtgärder för området där skredet gick. I utredningen rekommenderades kalkpelarförstärkning, sänkning av grundvattentrycken med djupbrunnar och erosionsskydd i vattenlinjen. Dessutom rekommenderades oförändrad omfattning av pågående portryck- och grundvattennivåmätningar tills rekommenderade åtgärder genomförts. Därefter borde mätningarna fortsättas i mindre omfattning, för kontroll av att kalkpelarna dränerade i avsedd grad samt att brunnarnas kapacitet var tillräcklig för att begränsa grundvattentrycknivån till en acceptabel nivå. I den andra utredningen bedömdes de utlösande orsakerna till skredet vara höga portryck i silt/sandskikt nära botten i kombination med erosion.

En inventering av stabilitetsförhållandena utmed Trosaån i Vagnhärad utfördes 1988 (VIAK AB, 1988, litt. 6216.86.2003). Syftet var att göra en bedömning av på vilka sträckor ingen eller mycket liten sannolikhet för skred förelåg, visa var uppmärksamhet på skredrisk borde iaktas och klarlägga skredrisken på vissa särskilt angivna delsträckor. Eftersom skredområdet i Ödesby vid utredningen 1982 bedömts ha tillfredsställande säkerhet gjordes ingen ny utvärdering i den-

na utredning och området markerades med gul färg, dvs stabilt lerområde, mycket liten sannolikhet för skred.

## **4.2 UNDERSÖKNINGAR UTFÖRDA I SAMBAND MED OCH EFTER SKREDET 1997**

Efter initialskedet den 15 maj 1997 installerades portrycksmätare och grundvattenrör i området. Det installerades även en djupbrunn i friktionsjorden under leran för att, som en akut räddningsåtgärd, pumpa ut vatten och försöka sänka grundvattentrycken i området. Efter huvudskredet den 23 maj utfördes ett stort antal undersökningar med olika metoder för att bestämma riskområdets utbredning, bedöma skredorsak samt för bedömning av omfattning och kostnad av lämpliga förstärkningsåtgärder. Fältundersökningarna utfördes av VBB VIAK och SGI och omfattade:

- Viktsondering och motorslagssondering i ett stort antal undersökningspunkter.
- CPT-sondering klass 1 och 2 i fyra punkter utanför och två punkter inom skredområdet.
- CPT-sondering klass 3 i fyra punkter utanför och fyra punkter inom skredområdet.
- Vingförsök i 20 punkter.
- Störd provtagning med skruvprovtagare i 17 punkter.
- Ostörd provtagning med kolvprovtagare i 10 punkter.
- Grundvattennivåobservationer i 11 öppna rör med filterspets, varav fyra vid åkanten och sju i slänten.
- Mätning av grundvattennivå och portryck i två stationer väster om skredet och två stationer öster om skredet. I varje station installerades tre portrycksmätare på olika nivåer i leran och ett öppet rör med filterspets i friktionsjorden.
- Mätning av Trosaåns vattennivå uppströms och nedströms skredet.
- Lodning av Trosaån i tre sektioner.

I sex av undersökningspunkterna utanför skredområdet utfördes såväl CPT-sondering (klass 2 eller 3) som kolvprovtagning och vingförsök. Utförda undersökningar visas också på plan i *Bilaga 1*. Undersökningar utförda i sektionen för initialskedet visas i sektion i *Bilaga 2*.

Störda prover undersöktes på laboratorium med avseende på jordart och vattenkvot och ostörda prover undersöktes med avseende på konflytgräns, densitet, konskjuvhållfasthet och sensitivitet. För kompletterande utvärdering av hållfasthetsegenskaper utanför och inom skredområdet utfördes dessutom 8 odränerade direkta skjuvförsök, 2 dränerade och 4 odränerade aktiva triaxialförsök samt totalt 43 ödometerförsök (CRS) på ostörda prover från 9 borrhål. För dimensionering av förstärkningsåtgärder utfördes 6 försök med inblandning av kalk och cement i leran.

### **4.3 KOMPLETTERANDE UNDERSÖKNINGAR**

Vid denna teknisk/vetenskapliga utredningen av skredet som startades något senare kompletterades de geotekniska undersökningarna i området av SGI. I två undersökningspunkter vid Trosaån, något öster om skredområdet, utfördes CPT-sondering klass 3, ostörd provtagning med kolvprovtagare samt vingförsök. I en av dessa punkter installerades också en porttrycksmätare typ BAT och ett öppet rör med filterspets. För undersökning av mäktigheten av friktionsjordslaget utfördes hejarsonderingar (HfA) i sex punkter, varav tre i sektionen för initialskredet och tre i sektionen strax öster om skredet. Permeabilitetsmätning i friktionsjorden utfördes genom utströmningsförsök i fem grundvattenrör med filterspets. Vidare utfördes provtagning på grundvattnet i fyra punkter och lodning av ån i två sektioner.

De upptagna ostörda proverna undersöktes på SGIs och CTHs laboratorier. På samtliga prover utfördes rutinundersökning (dvs benämning och bestämning av vattenkvot, konflytgräns, densitet, konskjuvhållfasthet och sensitivitet). Dessutom utfördes ödometerförsök (CRS-försök), direkta skjuvförsök samt odränerade och dränerade triaxialförsök på leran och dränerade triaxialförsök på silten.

För bedömning av eventuell förorening av grundvattnet, som i sin tur skulle ha kunnat påverka lerans hållfasthetsegenskaper, utfördes undersökning av BOD (biokemisk syreförbrukning), COD (kemisk syreförbrukning), kväve, fosfor, pH (surhetsgrad) och konduktivitet (elektrisk ledningsförmåga) på grundvattenproverna. Dessa undersökningar utfördes av KM LAB AB. Resultaten visade att de erhållna värdena var normala för icke förorenade grundvattenförhållanden.

## Kapitel 5.

# Geotekniska förhållanden

### 5.1 TOPOGRAFI

Skredet inträffade i en sluttning med villabebyggelse i dess övre del (se Figur 1.1 och 1.2, Kapitel 1). Sluttningen begränsas i söder av en höjdrygg med berg i dagen. Från höjdpunkt på nivån ca +19 m sluttar marken norrut mot Trosaån med en varierande lutning. Markytan närmast ån ligger på nivån ca +3,5 m. Det översta bebyggda området var relativt flackt med en lutning av ca 1:15. Norr om husen på Påskvägen (ca 40 m från ån) och ner mot ån ökade markens lutning och var där ca 1:5. Längre västerut, vid Adventsvägen var lutningen närmast ån ca 1:4 på ett avstånd upp till 30 m från ån. Området däremellan, strax öster om Adventsvägen och norr om två av husen på Påskvägen (nr 14 och 16), förstärktes närmast Trosaån efter skredet 1982.

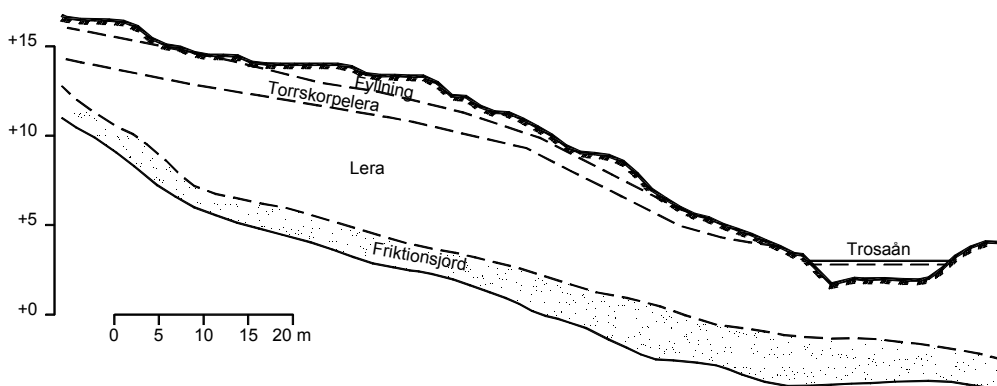
Marken var uppfylld med grövre material i Pingstvägen och Påskvägen. Inom de bebyggda tomterna hade terrassering utförts, varför marken även här delvis var uppfylld. Fyllningens tjocklek varierade mellan 0,5 m och 1,5 m. Husen på Påskvägens norra sida var grundlagda på stödpålar och på den södra sidan var husen källarförsedda och grundlagda med hel grundplatta på mark. Området mellan husen på Påskvägen och Trosaån bestod av ängsmark och en cykelväg gick genom området. Från cykelvägen fanns en gång- och cykelbro över ån i områdets västra del. Även denna väg och dess tillfartsbank till bron utgjordes av fyllnadsmassor.

Det har varit svårt att bestämma åns bottengeometri före skredet, eftersom lodning tidigare endast utförts i läget för det skred som inträffade 1982 samt i en sektion vid gång- och cykelbron. I denna sektion sluttade åns botten ca 1:3 tvärs ån till en lägsta nivå på ca +1,5 m. Efter skredet har lodningar utförts på båda sidor om skredområdet. Även i sektionen öster om skredet låg åns botten med en lutning av 1:3 tvärs ån till en lägsta nivå av ca +1,5. Vattenståndet i Trosaån strax nedströms skredet uppmättes dagarna efter skredet till nivån ca +2,8. Uppgifter om karakteristiska vattenstånd vid skredområdet har inte funnits att tillgå.

Vid en bro över Trosaån ca 400 m nedströms skredområdet har karakteristiska vattennivåer bestämts till: högsta högvattenstånd (HHW) +3,88 m, medelvattenstånd (MW) +2,80 m och lägsta lågvattenstånd (LLW) +2,25 m.

## 5.2 JORDLAGERFÖRHÅLLANDEN

Den naturliga jorden i slänten mot Trosaån består av ett upp till 14 m tjockt lager av lera med siltskikt som vilar på friktionsjord. Lerans mäktighet är minst, ca 1 m, i släntens övre delar i sydväst och ökar till 10 à 14 m i dess nederdel vid ån i norr, se *Figur 5.1*.

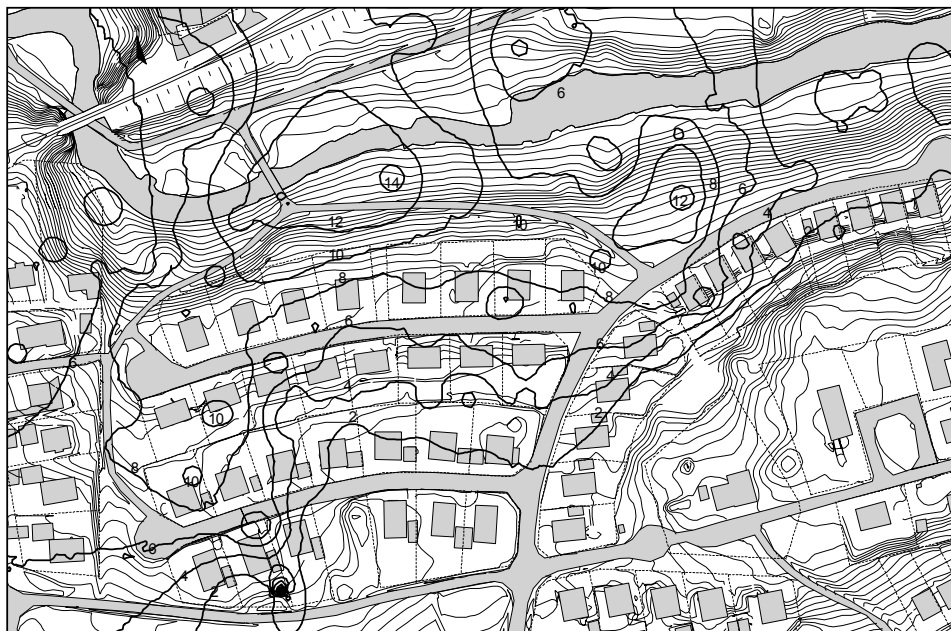


**Figur 5.1. Typsektion över jordlagren i området.**

Längst i väster vid Adventsvägen, är lerans mäktighet 3 à 4 m på avstånd mellan 50 och 120 m från Trosaån. Närmast ån, där markens lutning är ca 1:4, är lerans mäktighet 2 à 4 m längst i väster och 5 à 6 m något längre österut, där det tidigare skredet 1982 inträffade och leran sedan stabiliserats.

Området bakom slänten, dvs söder om Pingstvägen, delas av en bergklack, vilken bedöms fortsätta som en höjdrygg åt nordväst mot Påskvägen. Närmast väster om denna höjdrygg är lermäktigheten ca 10 m vid Pingstvägen, 8 à 9 m vid Påskvägen och 8 à 12 m vid ån och lokalt upp till 14 m. Partiet närmast ån, i nordväst, omfattas av den kalkpelarförstärkning som utförts efter skredet 1982. I området öster om bergklacken är lerlagrets tjocklek 1 à 2 m vid Pingstvägen, för att öka till 6 à 8 m vid Påskvägen där huvuddelen av det inträffade skredet gick. Mellan Påskvägen och Trosaån var lermäktigheten 10 à 12 m i väster (norr om husen på Påskvägen 6, 8 och 10) och i öster (norr om husen på Påskvägen 2 och 4) var den ca 10 m strax norr om husen och 5 till 7 m närmast ån.

Längst österut, inom det område vid Nyårsvägen som inte omfattades av skredet, går berget i dagen längst i söder 80 till 100 m från ån. Vid husen i väster (Nyårsvägen 12 och 14) är lermäktigheten 6 till 9 m och nere vid ån 10 till 12 m. Lerlagrets tjocklek avtar längre österut och är ca 3 m i läget för husen på Nyårsvägen 16 och 18 och ca 6 m vid ån. Leran blir här också mer siltskiktad. Längst österut är lermäktigheten endast 1 à 2 m i slänten och i områdets östra gräns, där lerdjupen är ringa, bedöms inget lerlager förekomma mellan Trosa-åns botten och friktionsjordslagret. Lermäktigheten inom området redovisas i *Figur 5.2*.



**Figur 5.2. Lermäktigheten inom skredområdet.**

Leran blir mot djupet mer siltskiktad och övergår successivt i friktionsjord/morän. Gränsen mellan silt och grövre friktionsjord liksom tjockleken på friktionsjordslagret är därför svår att avgöra. På basis av de CPT-, vikt- och hejarsonde-ringar som utförts bedöms friktionsjordslagrets tjocklek vara omkring 1 à 2 m inom större delen av området.

Leran i slänten består överst av ca 1 m torrskorpelera, som i högt liggande delområden med begränsad lermäktighet kan vara tjockare, ca 2 m. Under torrskorpeleran består leran av grå/brungrå högplastisk varvig lera med, mestadels tunna, siltskikt. Mot djupet ökar andelen silt, och leran övergår i varvig lera och

silt till silt med lerskikt. Leran är mellansensitiv med sensitivitetvärden som huvudsakligen är mellan 15 och 25. Enstaka högre värden har dock påträffats. Värdet på konflytgränsen varierar mellan 50 och 80 %, med huvuddelen av värdena mellan 65 och 75 %. Den siltskiktade lerans densitet varierar något beroende på andelen silt, men ligger huvudsakligen kring  $1,6 \text{ t/m}^3$ . Mot djupet, där jordlagren består av varvig lera och silt/silt med lerskikt ligger densiteten kring  $1,8 \text{ t/m}^3$ . Lerans permeabilitet har uppmätts till  $2 \cdot 10^{-10}$  à  $5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ .

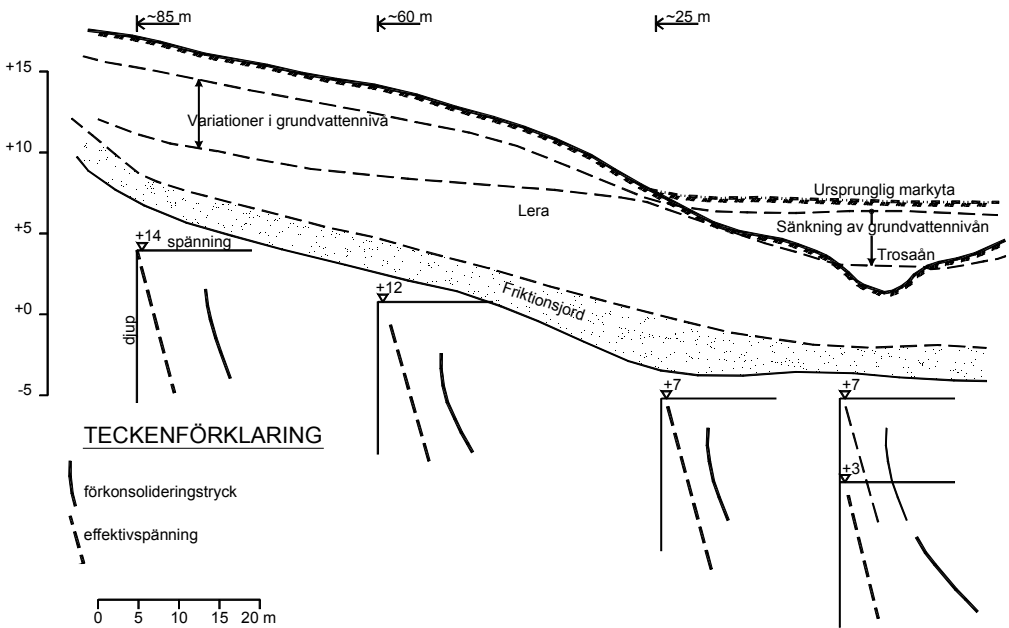
Lerans spänningshistoria och överkonsolidering redovisas separat i Kapitel 5.3 och dess hållfasthetsegenskaper i Kapitel 5.4. Ett exempel på skikt av lera och silt bedömd med CPT-sondering, samt resultat av provtagning redovisas i *Bilaga 3*.

Den provtagning som utförts i ett par punkter i friktionsjorden/moränen tyder på att denna består av grusig sandig silt/grusig siltig sand. Permeabilitetsbestämningar i friktionsjorden har givit värden mellan  $3 \cdot 10^{-7}$  och  $8 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ .

### **5.3 SPÄNNINGSHISTORIA OCH ÖVERKONSOLIDERING**

Lerlagren i dalgången har avsatts successivt under lång tid. De har huvudsakligen avsatts som glacial varvig brun lera och ovanpå denna kan yngre finsediment av lera förekomma, se även Kapitel 3. Samtidigt har landet stigit och så småningom har området höjts upp ovan vattenytan. Området kan då antas ha varit relativt plant längst ner i dalgången och högre upp kan leran antas ha haft en lutning något flackare än bergets. Ån har därefter bildats och genom erosion och skred har material förts bort. Ån har på så sätt eroderat ned i dalgångens plana del och en jämnare sluttning har bildats.

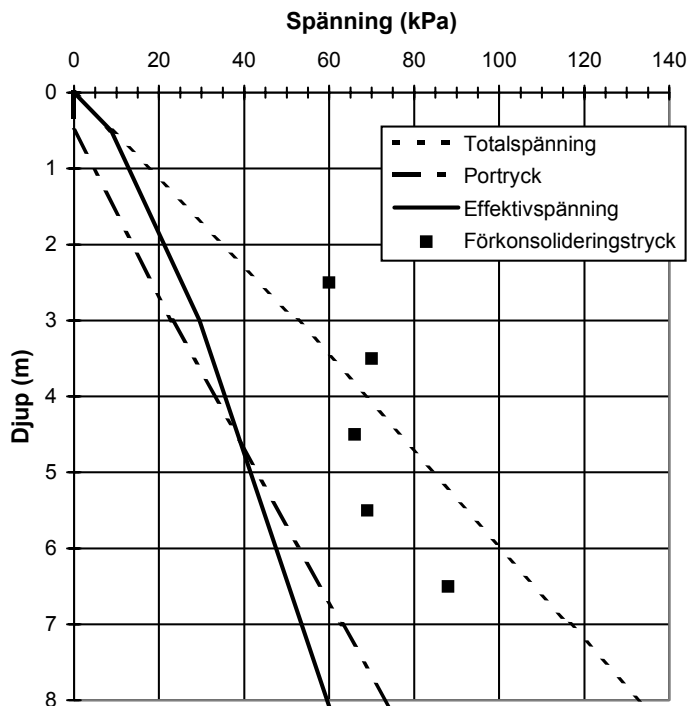
Denna utveckling innebär att i den eroderade nedre delen av dalgången har den kvarvarande jorden tidigare varit utsatt för högre laster än de som råder idag. Leran kan förväntas ha konsoliderat för då rådande spänningar och, beroende på den tid som förflutit sedan lerans avsättning, även uppvisa förkonsolideringstryck som på grund av tidseffekter är något högre än dessa spänningar. I de högre belägna delarna av slänten har leran däremot inte utsatts för högre laster på grund av erosion. Däremot kan den förväntas vara överkonsoliderad beroende på såväl tidseffekter som de variationer i grundvattennivå och portryck som inträffat under tiden sedan området höjdes över vattenytan. Den sannolika spänningshistorien i dalgången redovisas principiellt i *Figur 5.3*.



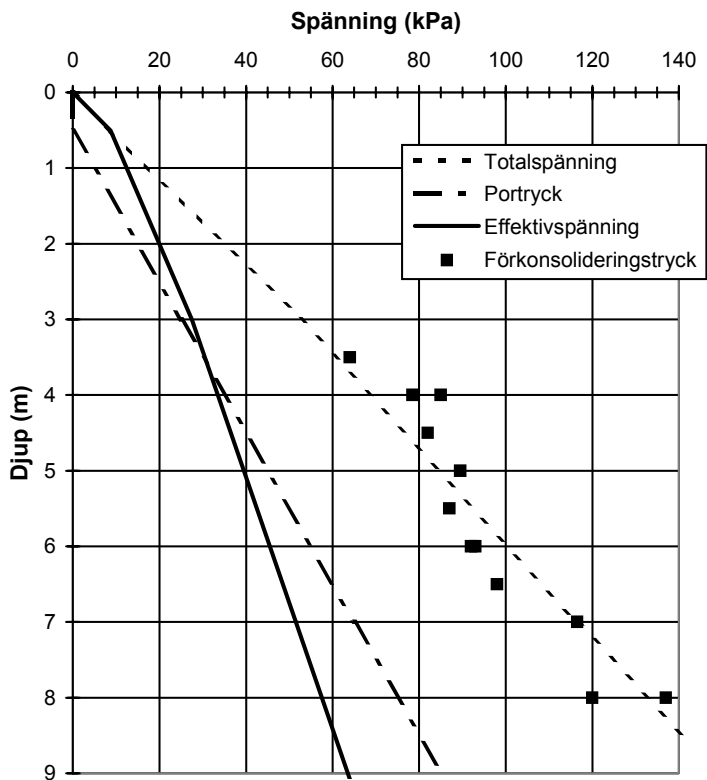
**Figur 5.3. Sannolik spänningshistoria i Trosaåns dalgång vid skredområdet.**

Ostörda prover har huvudsakligen tagits öster om skredet, men även i några punkter sydost och väster därom. Förkonsolideringstrycken har bestämts genom ödometerförsök (CRS-försök).

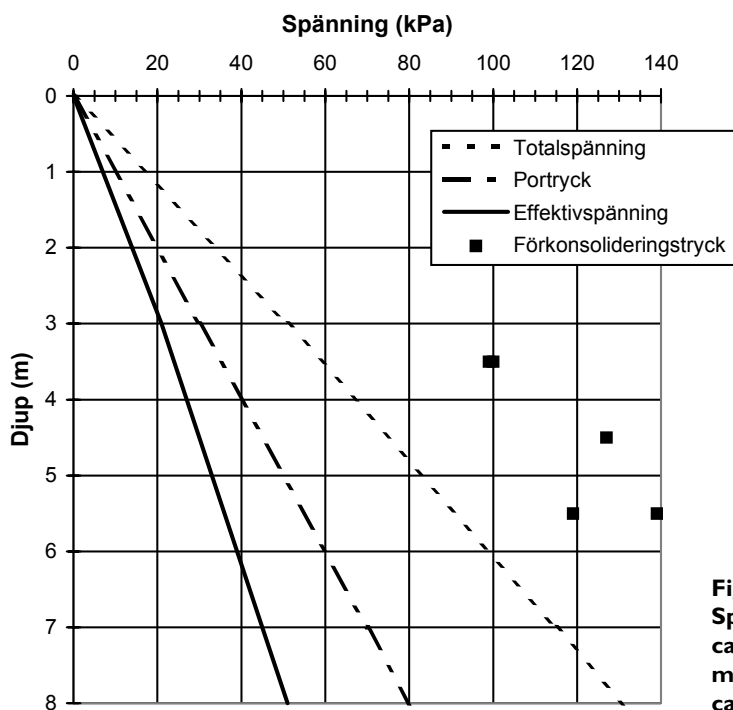
Resultaten från ödometerförsöken visar att vid rådande portrycksförhållanden (bedömda utifrån portrycksmätningarna) varierar lerans förkonsolidering i olika delar av slänten enligt den ovan beskrivna avsättnings- och belastningshistorien. Nere vid Trosaån, där marknivån var ca +3,0 m (före skredet) och den största avlastningen på grund av erosion inträffat, är leran överkonsoliderad med 70 till 140 kPa över de rådande effektivtrycken på djup mellan 2 och 6 m, vilket motsvarar en överkonsolideringsgrad (OCR) på 4,5 – 5,2. Något högre upp i slänten, vid ett avstånd till ån på ca 25 m och en marknivå på ca +7 m (före skredet) och där avlastningen är mindre, minskar överkonsolideringsgraden. Leran är här överkonsoliderad med 30 till 40 kPa över rådande effektivtryck på 2 – 6 m djup (OCR = 1,6 – 2,1) (se *Figur 5.4*). På större avstånd från ån, ca 60 m, där marknivån är ca +12 m, är lerans överkonsolidering åter högre, med förkonsolideringstryck på 50 till 70 kPa över rådande effektivtryck på 4 - 8 m djup (OCR = 2,0 – 2,6) (se *Figur 5.5*). Detta på grund av de större grundvattenvariationerna inom detta parti. Strax söder om skredkanten, på ca 85 m avstånd från Trosaån



**Figur 5.4.**  
**Spänningsituation**  
 ca 25 m från Trosaån,  
 markytans nivå  
 ca +7 m.



**Figur 5.5.**  
**Spänningsituation**  
 ca 60 m från Trosaån,  
 markytans nivå  
 ca +12 m.



**Figur 5.6.**  
**Spänningssituation**  
 ca 85 m från Trosaån,  
 markytans nivå  
 ca +14 m.

med marknivån ca +14 m, är förkonsolideringstrycket 80 till 100 kPa över rådande effektivtryck på 4 – 6 m djup ( $OCR = 3,5 - 4,0$ ) (se *Figur 5.6*).

Med hänsyn tagen till åldring och uppskattad variation i grundvattennivåer och portryck sedan området höjdes över vattenytan, antyder de utvärderade förkonsolideringstrycken att en erosion på 4 – 5 m (från nivån +7 à +8 m) skett i dalgångens lägst belägna delar, förutom i åfåran där erosionen varit större. Om grundvattennivåer och portryck i dalgångens nedre delar i tidigare skeden varit högre än vad som här antagits (motsvarande en högre marknivå) kan en erosion på ca 7 m (från nivån ca +10) ha skett. Att leran inom de partier av slänten där markytan ligger ovan dessa nivåer också är överkonsoliderad, med större överkonsolidering högre upp i slänten, beror som ovan nämnts sannolikt på åldring och de förändringar i grundvattennivåer som inträffat sedan området höjdes ovan vattenytan.

## 5.4 SKJUVHÅLLFASTHET

### Odränerad skjuvhållfasthet

Den odränerade skjuvhållfastheten har bestämts med vingförsök och CPT-sonderingar i fält samt fallkonförsök och skjuvförsök på laboratorium. Utvärdering av skjuvhållfastheten ur CPT-sonderingar har gjorts med datorprogrammet CONRAD. Valda värden på konflytgränsen för korrigering av hållfasthetsvärden har bestämts ur laboratorieresultat från närmast liggande provtagningspunkt.

De jordlagerförhållanden med siltskiktad lera som råder i området inverkar på olika sätt vid utvärdering av skjuvhållfastheten för respektive försökstyp. Vid bedömning av hållfasthetsvärdena har hänsyn tagits till dessa förhållanden. Fallkonförsöken är känsliga för den störning av proverna som sker vid upptagning och transport, och kan ge låga värden om provet störs. Låga värden på hållfastheten har också erhållits vid ett flertal av de utförda fallkonförsöken. Å andra sidan kan även höga värden erhållas om befintliga siltskikt inverkar vid försökets utförande. Vid vingförsöken provas ett 130 mm långt avsnitt av leran i djupled. Enstaka siltskikt kan medföra störning av leran och ge för låga hållfasthetsvärden. Är å andra sidan andelen siltskikt stor och silten fast på en viss nivå, kan ett för högt värde på hållfastheten erhållas. Resultaten av de vingförsök som utförts nere vid ån i öster, där andelen siltskikt är stor, visar också stor spridning, med ett flertal höga värden. Även resultaten från CPT-sonderingarna visar här stor spridning.

För att värdera rimligheten i utvärderade skjuvhållfastheter har dessa jämförts med den hållfasthet som erfarenhetsmässigt kan förväntas i lera med motsvarande belastningshistoria och konsistensgränser. Denna empiriska skjuvhållfasthet har bedömts med ledning av förkonsolideringstryck, överkonsolideringsgrad och flytgräns i enlighet med vad som anges i SGI Information 3 och IVA Skredkommissionens rapport 3:95 ”Anvisningar för släntstabilitetsutredningar”.

På grund av den varierande belastningshistorien inom släntens olika delar har ett flertal sammanställningar gjorts vid utvärdering av skjuvhållfastheten. Dels har en sammanställning gjorts av samtliga hållfasthetsbestämningar i slänten vid skredområdet respektive vid ån. Utförda hållfasthetsbestämningar på skredade massor har dock inte medtagits. Hållfasthetsbestämningarna har sammanställts såväl djuprelaterat som nivårelaterat. Dels har en uppdelning gjorts med hänsyn till marknivå och avstånd från Trosaån. Lokalt, där hållfastheten bestämts med samtliga ovan nämnda metoder, har dessa sammanställts och skjuvhållfastheten har också bedömts empiriskt. Dessa sammanställningar har gjorts i grupper

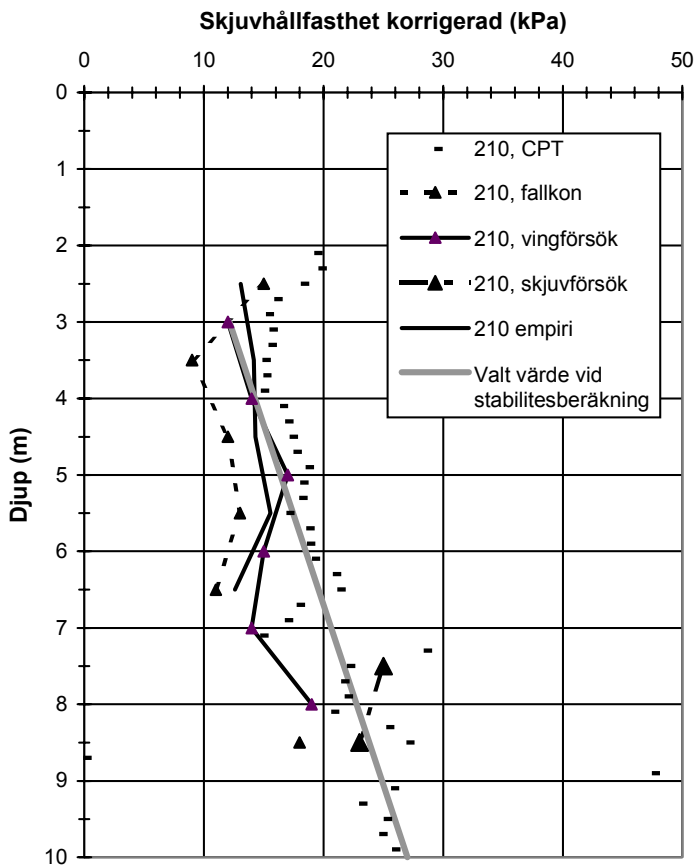
enligt följande: på ca 85 m avstånd från ån och med marknivå ca +14 m, ca 60 m från ån och marknivån ca +12 m, ca 25 m från ån och marknivån ca +7 m samt vid Trosaån med en marknivå på ca +3 m. Övriga hållfasthetsbestämningar utförda i närheten och med ungefär samma marknivå, har sammanställts för sig och sedan jämförts med dessa sammanställningar.

Vid en första jämförelse av samtliga hållfasthetsbestämningar i slänten, både djup- och nivårelaterade, erhöles bäst överensstämmelse då resultaten sammanställts djuprelaterat. Då huvuddelen av undersökningarna utförts i den icke eroderade delen av slänten, stämmer detta väl med att leran avsatts längs bergets sluttning och att ingen efterföljande erosion skett här. Även vid en djuprelaterad sammanställning av hållfastheterna kan dock en spridning i resultaten konstateras. Störst spridning i resultaten återfinns i den övre delen av leran närmast under torrskorpan, vilken är påverkad till större djup högre upp i slänten än närmare Trosaån. Även mot djupet, där leran blir mer siltskiktad kan en större spridning i resultaten konstateras.

Vid en uppdelning av hållfasthetsbestämningarna enligt ovan och en jämförelse av resultaten från CPT-sondering, vingförsök, skjuvförsök och fallkonförsök, visar de tre förstnämnda en relativt god överensstämmelse. Skjuvhållfastheten bestämd med fallkonförsök ligger däremot i de flesta fall betydligt lägre än övriga hållfasthetsbestämningar i samma punkt, vilket är förklarligt då dessa försök är mycket känsliga för provernas kvalitet (jfr ovan). Resultaten från fallkonförsöken kan därför inte tillmätas någon större betydelse.

En jämförelse av hållfastheten i olika delar av slänten visar också på en god överensstämmelse mellan utvärderad skjuvhållfasthet och bedömd spänningshistoria. Värdet på skjuvhållfastheten ligger genomsnittligt något lägre, än genomsnittet för hela området, på 25 m avstånd från ån där överkonsolideringen är lägre (OCR = 1,6 – 2,1) än på 60 m avstånd (OCR = 2,0 – 2,6) (se *Figur 5.7 & 5.8*). Söder om skredkanten, ca 85 m från ån, där överkonsolideringen är större än på 60 m avstånd (OCR = 3,5 – 3,9) är hållfastheten också motsvarande högre (se *Figur 5.8 & 5.9*). Det finns också en antydning till att hållfastheten generellt är något högre i den västra delen av skredområdet, mellan Påskvägen 13 – 14, Adventsvägen 10 och Trosaån, än i den östra.

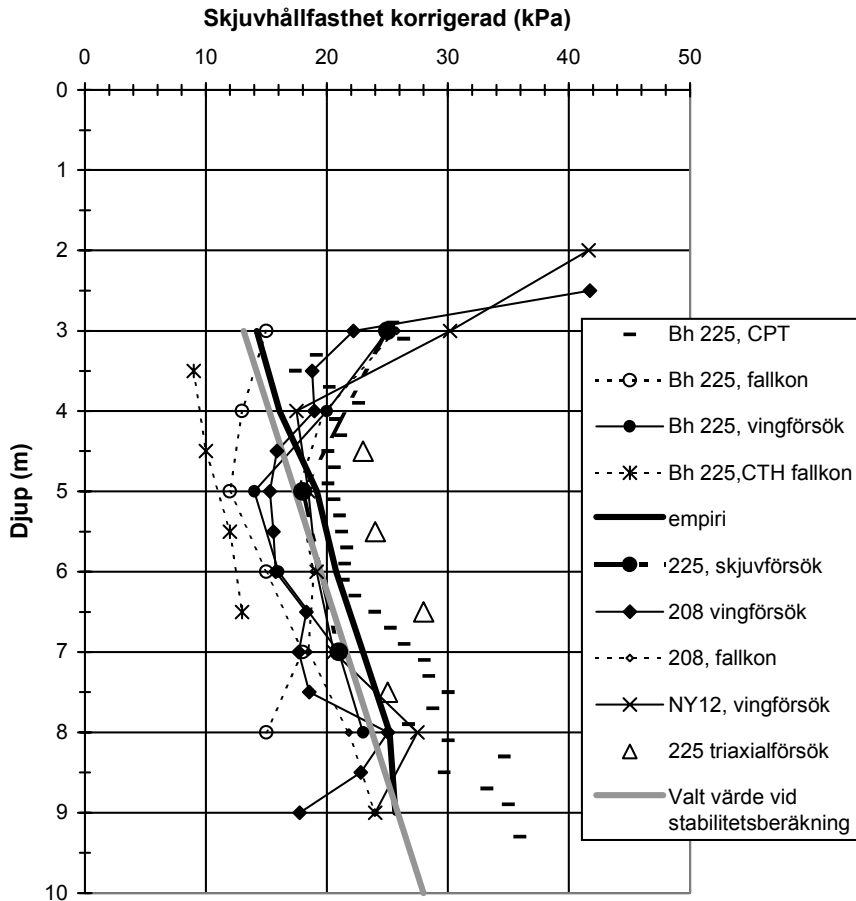
Överensstämmelsen mellan skjuvhållfasthetsbestämningarna och den antagna spänningshistorien kan också illustreras med en jämförelse mellan skjuvhållfasthet uppmätt med vingförsök (korrigerade värden) i de enskilda punkterna och motsvarande värden utvärderade ur uppmätt förkonsolideringstryck och de



**Figur 5.7. Odränerad skjuvhållfasthet (korrigerad) ca 25 m från Trosaån, markyta ca +7.**

empiriska relationerna för hur dessa normalt varierar med flytgräns och överkonsolideringsgrad. Denna visar att värdena från vingförsöken som förväntat sprider kring den empiriska relationen för direkt skjuvning, se *Figur 5.10*.

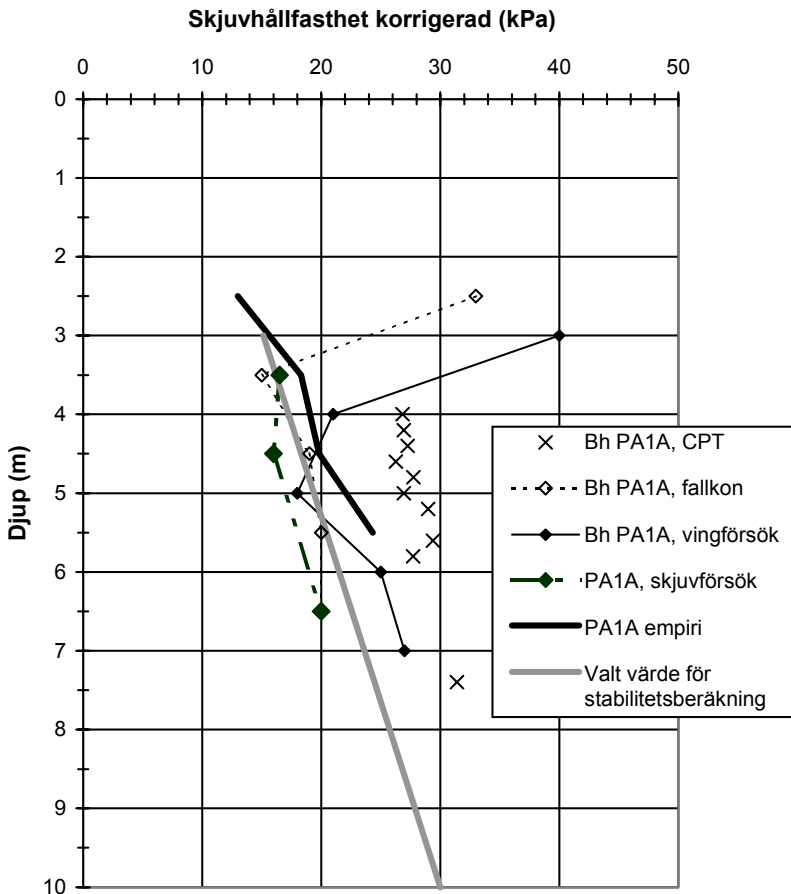
De hållfasthetsbestämningar som utförts intill Trosaån, har huvudsakligen gjorts efter skredet i området närmast öster om skredet. Leran är inom denna del mer siltskiktad och hållfasthetsvärdena från vingförsök, CPT-sondering och fallkonförsök visar stor spridning. Dessa resultat har kompletterats med resultat från direkta skjutförsök. Vid utförandet av direkta skjutförsök konsolideras provet först för spänningar nära förkonsolideringstrycket och avlastas därefter till in



**Figur 5.8. Odränerad skjuvhållfasthet (korrigerad) ca 60 m från Trosaån, markyta ca +12.**

situ-spänningarna. Först därefter utförs skjuvförsöket. Detta förfarande innebär att inverkan av provets kvalitet på resultatet blir mindre än vid fallkonförsöken. Såväl vingförsök, CPT-sondering och fallkonförsök har huvudsakligen gett högre hållfasthetsvärden än skjuvförsök och empiri. Enstaka lägre värden förekommer dock också. En god överensstämmelse erhålls mellan hållfastheten bestämd med skjuvförsök och den empiriskt bestämda hållfastheten. Bedöms hållfastheten vid ån huvudsakligen med stöd av skjuvförsöken samt den empiriskt bestämda hållfastheten överensstämmer dessa väl med de övriga i slänten utvärderade skjuvhållfastheterna.

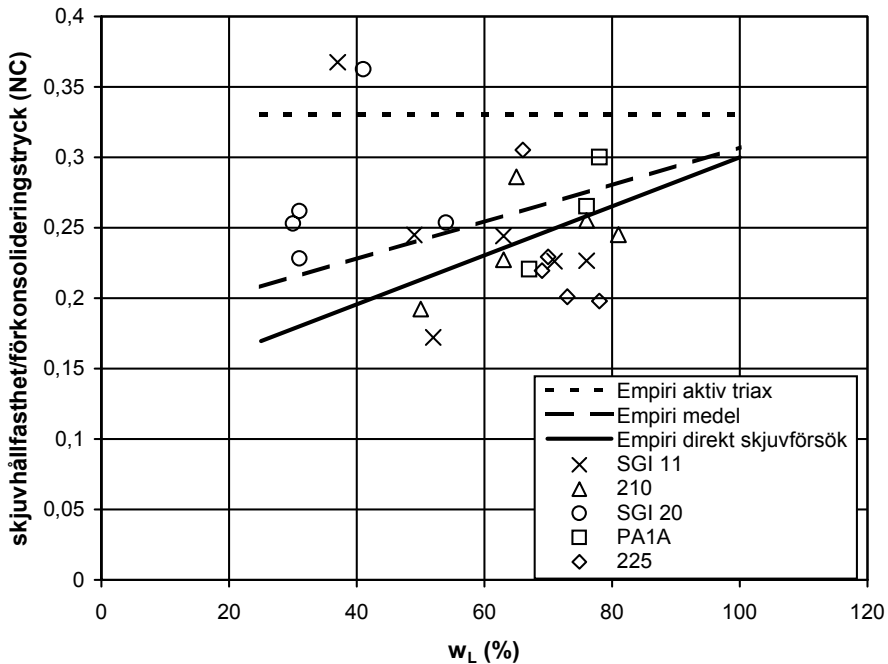
Om man försöker få en mer översiktlig bild av skjuvhållfastheten i själva skredområdet, och därmed bortser från de variationer i skjuvhållfasthet som beror av



**Figur 5.9. Odränerad skjuvhållfasthet (korrigerad) ca 85 m från Trosaån, markyta ca +14.**

spänningshistorien, kan lerans odränerade skjuvhållfasthet under den torrskorpepåverkade övre delen i stort uttryckas som en linjär ökning från 11 kPa på 2 m djup till 28 kPa på 10 m djup, dvs en ökning med ca 2,1 kPa/m.

Anisotropieffekter hos skjuvhållfastheten kan ha en relativt stor betydelse i branta slänter där aktivzonen är mycket större än passivzonen. Dessa effekter är störst i normalkonsoliderade lågplastiska leror. I det aktuella området med högplastisk överkonsoliderad lera och en moderat släntlutning bedöms dessa effekter vara av mindre betydelse, speciellt som den dränerade hållfastheten blir dimensionerande i större delen av såväl aktiv- som passivzonerna. De odränerade triaxialförsök som utförts visar att den aktiva skjuvhållfastheten i denna lera är ca 30 % högre än hållfastheten vid direkt skjuvning.



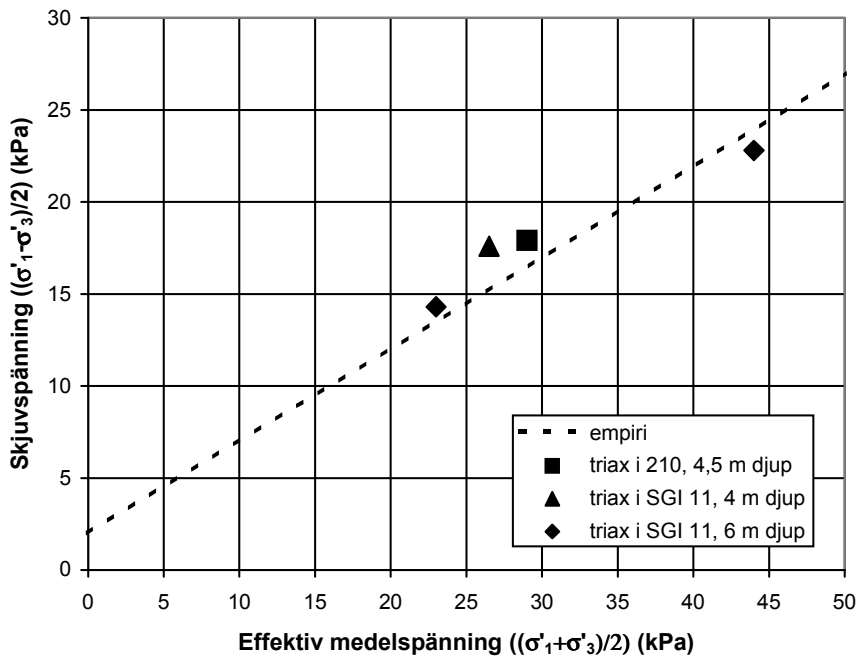
**Figur 5.10. Jämförelse mellan skjuvhållfasthet uppmätt med vingförsök (korrigerade värden) i de enskilda punkterna och motsvarande värden utvärderade ur uppmätt förkonsolideringstryck och de empiriska relationerna för hur detta normalt varierar med flytgräns och överkonsolideringsgrad. De uppmätta värdena har korrigerats för överkonsolidering enligt  $(\tau_{fu}/\sigma'_{c})_{NC} = (\tau_{fu}/\sigma'_{c})_{OC} \cdot OCR^{0,25}$ .**

### Dränerad skjuvhållfasthet

Empiriskt kan man i lera räkna med de dränerade hållfasthetsparametrarna  $\phi' = 30^\circ$  och  $c' = 0,1\tau_{fu}$  (alternativt  $c' = 0,03\sigma'_c$ ). Det empiriska värdet  $0,1\tau_{fu}$  skulle, med den i Kapitel 5.4 beskrivna odränerade skjuvhållfastheten, innebära ett värde på  $c'$  på 1,5 à 2 kPa. Eftersom de odränerade hållfasthetsparametrarna stämmer väl överens med den empiriska erfarenheten kan ingen större skillnad förväntas mellan verklig och empiriskt bestämd dränerad hållfasthet. Lerans dränerade hållfasthetsparametrar har bestämts med dränerade triaxialförsök på prover från ett borrhål på djupen 4 m och 6 m (två prov) samt i ett borrhål på djupet 4,5 m. Resultaten sprider något, vilket bland annat kan relateras till varierande siltinnehåll. En utvärdering av de sammanställda resultaten ger som medelvärde friktionsvinkeln  $\phi' \approx 31^\circ$  och  $c' \approx 3$  kPa. Detta stämmer väl med de empiriska parametrarna för lera, även om försöksresultaten ger marginellt högre

värden. Eftersom brottplanen i jorden kan antas följa de lerigare skikten har de något lägre empiriska hållfasthetsparametrarna  $\phi' = 30$  och  $c' = 1,5$  à  $2$  kPa använts vid beräkningarna (se Kapitel 7).

På basis av utförda triaxialförsök i tre punkter på 5 – 8,5 m djup har siltens inre friktionsvinkel bedömts vara  $\phi' = 34^\circ$  och eventuell kohesionsandel av hållfastheten har bedömts vara försumbar ( $c' \approx 0$ ).



**Figur 5.11. Resultatet av dränerade triaxialförsök på lera jämfört med antagna hållfasthetsparametrar enligt empiri.**

## Kapitel 6.

# Hydrogeologiska förhållanden

### 6.1 INLEDNING

Lokala faktorer som geologi, topografi samt berggrunds- och jordlagerförhållanden är av stor betydelse för grundvattenströmning och portrycksförhållanden inom ett område. I en stabilitetsutredning börjar man normalt med att göra mycket försiktiga antaganden om portryckssituationen, dvs man utgår från de högsta portryck som rimligen kan tänkas uppstå. Om slänten då befinner sig vara stabil, eller det visar sig att det är den odränerade hållfastheten som styr, behöver portrycken inte utredas vidare. I det fall stabilitetsberäkningarna visar att området inte är tillfredsställande stabilt för dessa antaganden utförs portrycksmätningar, företrädesvis under en längre tidsperiod. På basis av dessa och en hydrogeologisk modell för området görs sedan en prognos för den högsta portryckssituation som kan förväntas uppstå, varpå en ny analys av stabilitetsförhållandena utförs.

I slänten i Ödesby hade portrycksmätningar tidigare i huvudsak endast utförts efter skredet 1982 och då främst i den västliga delen av området som berördes av detta skred. I samband med initialscredet 1997 installerades nya grundvattenrör. Dessa installerades i närheten av initialscredet och efter att detta hade startat. Innan huvudskredet inträffade erhöles endast ett fåtal avläsningar. Huvuddelen av avläsningarna har således skett efter att skredet inträffat och de topografiska förutsättningarna ändrats. Att prognosticera hur portryckssituationen var före skredet har därför till viss del fått göras utan stöd av tillförlitliga portrycksobservationer. Detta gäller främst det övre grundvattenmagasinet bakom slänten. Den vidare analysen av möjliga portrycksvariationer och hur dessa påverkar stabiliteten i släntens nedre del där skredet startade visar dock att denna osäkerhet har en begränsad betydelse.

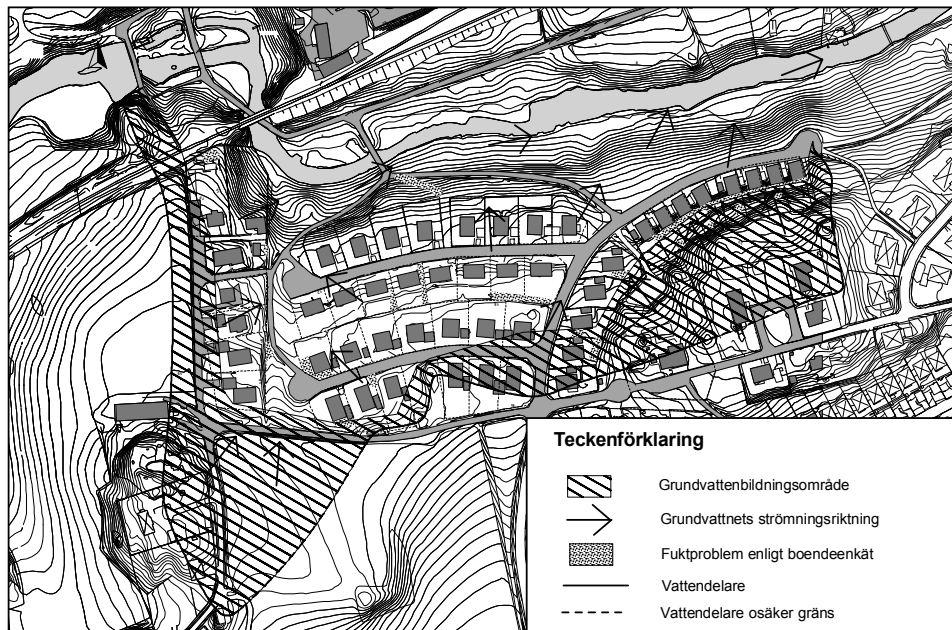
Nedan följer en beskrivning av det aktuella skredområdets lokala geologi samt dess grundvatten- och portrycksförhållanden så som de har bedömts och modellerats utifrån befintligt underlag. Dessutom diskuteras och värderas resul-

tat från överslagsberäkningar av inverkan av olika antaganden om portryckssituationen i grundvattenmagasinen vid släntens övre och nedre delar.

## 6.2 LOKAL GEOLOGI

Geologin i området kännetecknas av dalgångar mellan ryggar av berg i dagen, se *Figur 6.1*. I dalgångarna finns glaciala och postglaciala avlagringar av fin-korniga sediment av varierande mäktighet, som mest uppemot 14 m. Områdets södra del begränsas av en bergsrygg med marknivån +19 till +25 m, medan dalgångens lägsta marknivå ligger på nivån ca +3,5 m, med Trosaåns vattenyta ytterligare någon meter lägre. Vattendjupet i ån är ca 1-1,5 m. Sedimenten i dalgången består underst av friktionsjord med varierande tjocklek, följt av glaciärra med inlagrade siltskikt med varierande tjocklek. Ovanpå detta finns glaciärra, postglacial lera och överst en torrskorpa. Torrskorpan har en mäktighet av någon meter i dalgångens mitt, för att successivt öka högre upp i slänten, och kan på sina håll vara ett par meter tjock. I anslutning till de partier där berget går i dagen finns på de flesta ställen morän i markytan.

Berggrunden består av sedimentgnejs som är genomskuren av diabasgångar. Den går i dagen i områdets södra del och är lätt ondulerad. På två ställen finns



**Figur 6.1. Topografisk karta över skredområdet med grundvattenbildningsområdet markerat (VBB VIAK, 1997).**

lägre stråk som troligen är orsakade av sprickzoner i sydväst-nordostlig riktning vilket stämmer väl med de stora sprickzoner som finns öster om Vagnhärad.

### **6.3 GRUNDVATTENBILDNING OCH GRUNDVATTENSTRÖMNING**

Grundvattenbildningen i området sker sannolikt där berget går i dagen, där moräntäcket är ytligt samt där lerlagret är tunt och uppsprucket. De partier som påverkar grundvattenbildningen i området är således begränsade. De har karterats utifrån topografien och finns redovisade i *Figur 6.1*. Storleken på infiltrationsområdet har bedömts vara ca 4 ha (VBB VIAK, 1997, litt. 11997034) och med en korrigerad årsmedelnederbörd på 665 mm har grundvattenbildningen uppskattats till 3 700 m<sup>3</sup>/år, vilket motsvarar ca 7 l/min i genomsnitt.

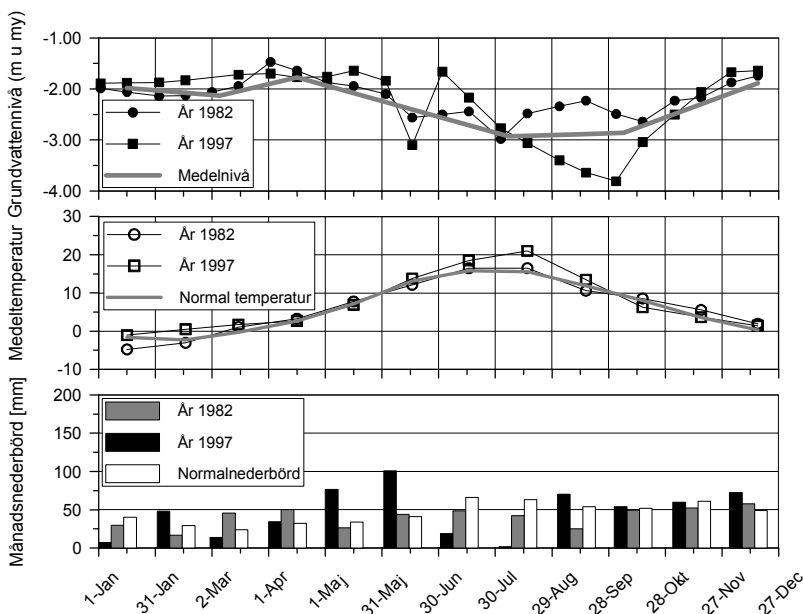
Grundvattenbildningen sker främst genom att vatten infiltrerar ner i friktionsjorden/moränen längs randen mellan sediment och berg i dagen. Det infiltrerade vattnet strömmar i den ovanpå berget liggande friktionsjorden mot dalgångens mitt för att sedan följa dalgången österut. I de fall de i leran inlagrade siltskikten är kontinuerliga och har en tillräcklig utsträckning sker också där en viss vattenströmning. Det är troligt att vattenströmningen i slänten koncentreras till två tvärgående svackor i bergytan på ömse sidor om en tvärgående rygg i denna. Denna rygg sammanfaller i stort med det område som separerar de två skredområdena från 1982 respektive 1997. Strömningen innebär att trycknivån i absoluta tal sjunker ner mot dalgångens mitt, även om nivån relativt markytan sannolikt stiger så att trycken blir artesiska i släntens nedre del. Under de perioder då ingen påfyllning sker, minskar trycken i akvifären successivt för att åter stiga när nederbörden ökar. Läckaget upp genom leran kan antas vara försumbart. Dock kan akvifären vara punkterad där lerdjupen är så små att erosionen i åfåran ätit sig igenom hela lerlagret. Dessa genombrott är i så fall styrande för grundvattentrycken i friktionsjorden under ån. Strömningsbilden inom området kan också påverkas av om berget är uppsprucket så att den slutna akvifären fylls på underifrån i anslutning till eventuella sprickor eller krosszoner. I vilken omfattning berget kan vara uppsprucket i området är dock inte känt.

I VBB VIAKs utredning framhålls att ”den relativt låga vattengenomsläppligheten, den begränsade vattenhållande förmågan i den omättade zonen i grundvattenbildningsområdena och förhållandet att grundvattenmagasinet är slutet medför att relativt stora och snabba förändringar i grundvattnets trycknivå kan förväntas”.

## 6.4 HYDROLOGISKA FÖRHÅLLANDEN

För att bedöma de hydrologiska förhållandena inom skredområdet har data inhämtats från SMHI och SGU. Relevanta nederbördsdata har erhållits från Åda väderstation som är belägen 3 km söder om Vagnhärad strax norr om Trosa. Då ingen registrering av temperatur sker vid Åda har temperaturdata erhållits från Landsort väderstation som ligger ute i kustbandet 30 km sydost om Vagnhärad. Grundvattennivådata har erhållits från de två närmast belägna stationerna i SGUs grundvattennät, Haninge, område 56, station 3 och 4. Grundvattenrören i dessa stationer är belägna i morän som överlagras av lera. Portrycksnivåer och hydrologiska förhållanden diskuterades även efter skredet 1982 och de grundvattennivåmätningar som då gjordes utgör den enda längre observationsserie som utförts i området före skredet 1997. De förhållanden som rådde 1982 har därför tagits med i jämförelsen. I *Figur 6.2* redovisas en jämförelse av de hydrologiska förhållandena under ett normalår samt åren 1982 och 1997.

En jämförelse med normalåret visar att den ackumulerade nederbörden under perioden 1 januari 1997 till 31 maj 1997 var 180 mm mot normalårets 159 mm. Under maj månad föll 77 mm regn mot normala 34 mm. Under perioden 4-9 maj regnade det kraftigt och det föll 60 mm, varav 35 mm under ett dygn den



**Figur 6.2.** Nederbörds- och temperaturförhållanden samt grundvattennivåobservationer i Haninge, område 56, station 4 under 1982 och 1997.

9 maj. En så kraftig nederbörd har stor betydelse för portryckssituationen i slänten under denna tid på året då magasinen i regionen normalt är välfyllda och grundvattennivåerna höga. Under våren 1982 var situationen liknande med kraftig nederbörd och under våren, 1 januari-31 maj och främst under mars-april, föll sammanlagt 168 mm jämfört med normala 159 mm.

De temperaturförhållanden som registrerades vid Landsort avviker inte påtagligt från normaltemperaturen, se *Figur 6.2*. Några slutsatser om onormala snösmältnings- och tjällossningsförhållanden som påverkat uppfyllnaden av magasin och grundvattennivåer kan därför inte dras.

Under perioden från februari till mitten av april visar grundvattenobservationerna i Haninge att grundvattennivån där var ca 0,25 m högre än normalt både under år 1997 och år 1982. Under den senare delen av april 1997 närmade de sig en normal nivå för att under maj månad återigen stiga till ca 0,25 m över normal nivå, se *Figur 6.2*. Under 1982 var grundvattennivåerna under samma period något lägre än normalt, vilket kan förklaras av att nederbörden under maj månad 1982 också var något lägre än normalt. Vid båda skredtillfällena var grundvattentrycken höga. Några mer detaljerade jämförelser låter sig inte göras eftersom lokala variationer kan förekomma och förutsättningarna för utlösande av skred skapas av en kombination av många bidragande orsaker som är unik för varje tillfälle.

## **6.5 INFILTRATION FRÅN LÄCKANDE VATTENLEDNING**

Fyra dagar efter skredet upptäcktes en läcka på en vattenledning i en fastighet på Pingstvägen 4, som ligger på fast mark ovanför skredet. De närmaste dagarna efter att denna stängts av sjönk trycken i de närmaste observationspunkterna påtagligt och det har i olika sammanhang diskuterats om och i vad mån denna vattenläcka kan ha bidragit till skredutvecklingen.

Vattenläckan upptäcktes genom att vattentrycket i fastigheten hade sjunkit märkbart och då personal från kommunens VA-enhet kom till platsen var läckaget klart hörbart. Läckan lokaliserades till en kopplingsskarv som var ingjuten i husets bottenplatta. I samband med att kopplingen grävdes och bilades fram gjordes enkla mätningar på plats av läckagets storlek. Detta uppskattades grovt till 1 à 2 liter per minut och det utläckande vattnet rann ut i ledningsgraven som var nedsprängd i berget. Efter att kopplingsskarven frilagts och rengjorts från betong provtrycktes den på kommunens tekniska kontor. Vid ett maximalt ledningstryck av 500 kPa, dvs normalt tryck i den aktuella ledningen, uppmättes

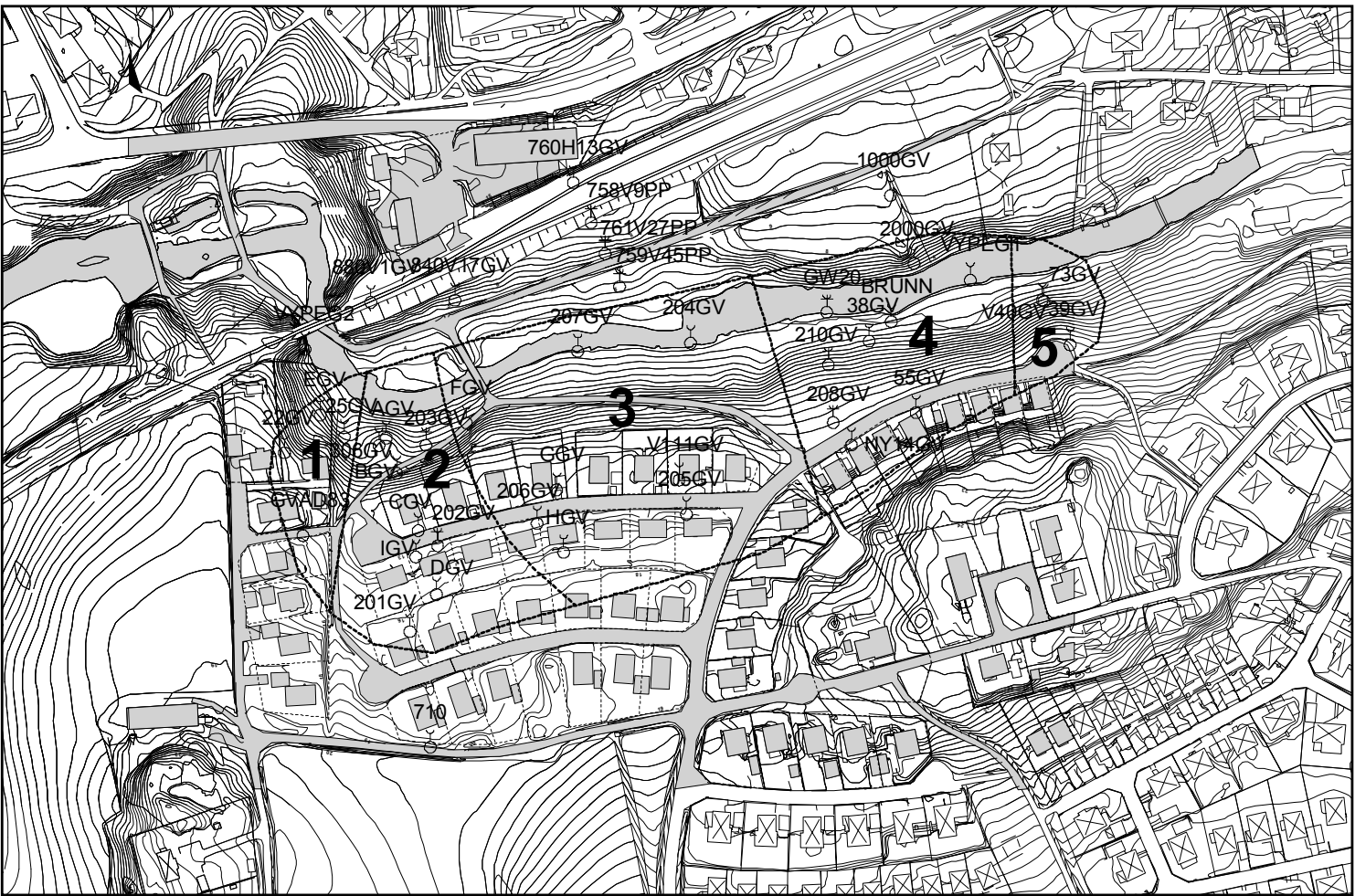
den då utläckande vattenmängden till 32 liter per minut. Med tanke på omständigheterna vid provtryckningen konstaterades att det verkliga läckaget då skarven var på plats och ingjuten i betong måste varit avsevärt lägre. Vidare konstaterades att skarvens kondition visade att en läcka av denna omfattning inte kunde ha existerat under någon längre tid, vilket också styrks av att den inte observerats tidigare. Dessutom gav den sig mycket påtagligt tillkänna då den upptäcktes. Man kan därför anta att vattenläckan hade sitt maximum strax före sin avstängning, att den dessförinnan varit betydligt mindre och att den uppstått relativt kort tid före upptäckt. Huruvida någon vattenläcka existerade före skredet är inte klarlagt. Det kan inte heller uteslutas att ett läckage med en viss omfattning pågått en tid dessförinnan.

## 6.6 PORTRYCKSNIVÅER I OMRÅDET

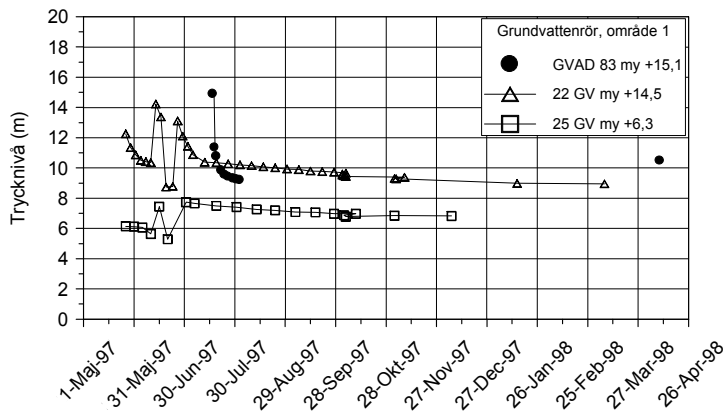
Topografi och jordlagerföljd är som nämnts väsentliga grundförutsättningar för grundvattentrycken i en slutna akvifär. Nederbörden och dess mängd och fördelning i tiden spelar också en stor roll. Andra randvillkor av stor betydelse, som kan förändras med tiden, är till exempel en eventuell punktering av den slutna akvifären. De portrycksförhållanden som diskuteras och analyseras nedan har till största delen uppmätts efter skredet 1997 och är således beroende av de förhållanden som rådde efter skredet. Vad som konstaterat skedde i samband med skredet och vad som möjligen kan ha skett och ha påverkat portrycken är främst att markytan i passivzonen har höjts liksom botten på Trosaån, respektive att sammanhängande lager av silt eller friktionsjord kan ha brutits eller att den slutna akvifären kan ha punkterats i någon eller några punkter. Diskussionerna nedan bygger därför i vissa avseenden på ett osäkert underlag som ger utrymme för en viss spännvidd i tolkningarna. Den analys som gjorts bedöms dock utgöra en god grund för en sammanfattande bedömning av områdets hydrogeologiska förhållanden före och efter skredet.

Bilden av trycknivåerna i den slutna akvifären i området är komplex, bland annat på grund av att den inom slänten mot Trosaån delas av en bergrygg. För att underlätta beskrivningen och förståelsen har området med avseende på portrycksbilden delats in i fem områden med inbördes någorlunda enhetliga tryckförhållanden, se *Figur 6.3*.

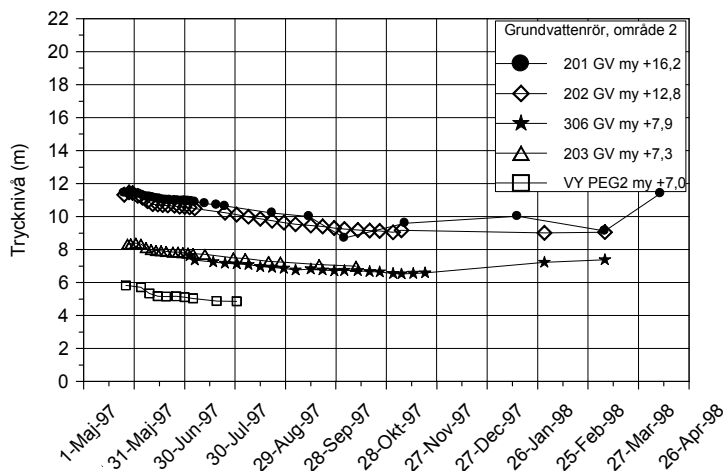
Område 1 och 2 ligger längst västerut i anslutning till det gamla skredområdet och uppvisar i stort sett likartade förhållanden se *Figur 6.4* och *6.5*.



Figur 6.3. Plan över delområden inom vilka portrycksbilden bedömts vara likartad.



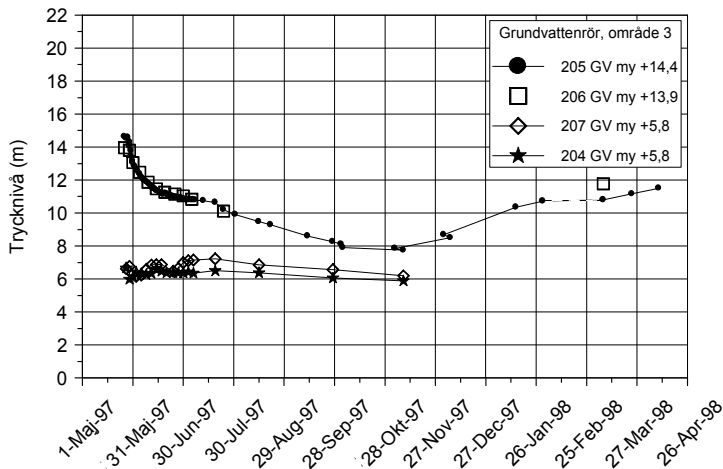
**Figur 6.4. Uppmätta portryck inom område 1 under perioden maj 1997 - mars 1998.**



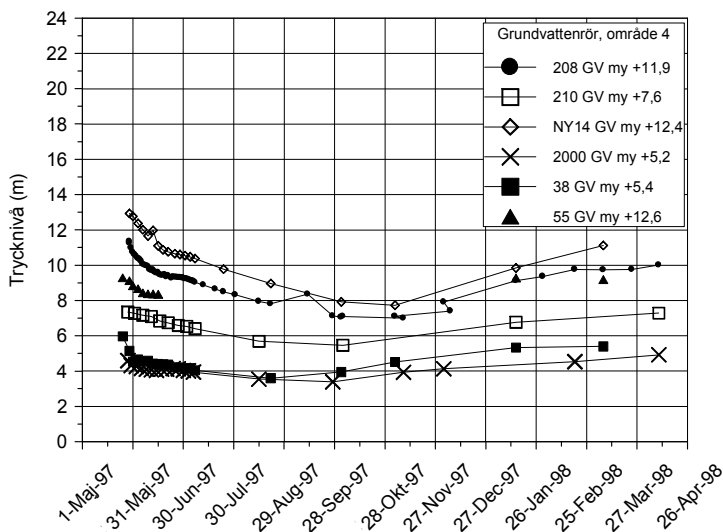
**Figur 6.5. Uppmätta portryck inom område 2 under perioden maj 1997- mars 1998.**

Vattenytan i Trosaån låg i slutet av maj 1997 på nivån ca +5,8 m, och sjönk under perioden september - oktober 1997 som lägst till +4,7 m. Grundvattennivån i område 2 ökar något ju längre upp i slänten man kommer, men ligger i huvudsak långt under markytan, i vissa fall så mycket som 4 m. Vid mätningar efter skredet var det artesiska trycket 1 till 2 m över markytan nere vid Trosaån. Mätningar som utfördes efter skredet 1982, men före åtgärderna efter detta, visade också då på några meter artesiskt tryck nere vid ån (VIAK, 1982, litt. 6216.1604).

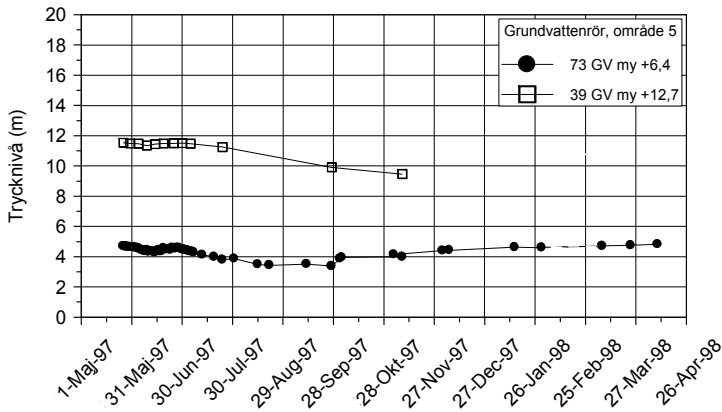
I områdena 3 och 4, och i viss mån även i område 5, är trycknivåerna för porttrycken i den underliggande friktionsjorden betydligt högre i de övre delarna av slänten och ligger här i närheten av markytan, se *Figur 6.6 – 6.8*. Även i dessa områden återfinns ett artesiskt tryck på några meter nere i dalgångens mitt, vilket även detta stämmer med de observationer som gjordes i samband med mätningar efter skredet 1982.



**Figur 6.6. Uppmätta porttryck inom område 3 under perioden maj 1997- mars 1998.**



**Figur 6.7. Uppmätta porttryck inom område 4 under perioden maj 1997- mars 1998.**



**Figur 6.8. Uppmätta portryck inom område 5 under perioden maj 1997- mars 1998.**

Att olika tryckförhållanden råder mellan områdena 2 och 3 kan förklaras av den bergsrygg som löper mellan dessa två delområden. Denna delar grundvattenområdet hydrauliskt i två olika områden, vilket också påpekats i VBB VIAKs utredning. Den konstaterade vattenläckan i fastigheten på Pingstvägen 4 lokaliserades som tidigare nämnts till en kopplingskarv, vilken var ingjuten i husets bottenplatta. Ledningsgraven var under huset nedsprängd i berg men går från Pingstvägen 12 till en bit in på Nyårsvägen i friktionsjord. Vattnet från läckan kan därmed ha bidragit till att fylla ledningsgraven och genom kontakt med den underliggande friktionsjorden lokalt förorsaka ett högre portryck inom delar av område 3. Rapporter från boende i området har dock visat att det varit problem med vattensjuka partier inom detta område under flera år. Dessa partier finns markerade i Figur 6.1. Områden som är viktiga för grundvattenbildningen och som sammanfaller med vattensjuka partier, är den grundare delen av dalgången längst västerut som tvärrar över bergryggen samt området i anslutning till berg i dagen i öster bakom Nyårsvägen. Vattensjuka partier återfinns dessutom invid fastigheterna på Påskvägen 11, 9 och 3. Observationerna om ytligt stående vatten är gjorda under flera år, främst vid snösmältning och regn.

Skredet kan ha inneburit att det slutna magasinet i viss mån öppnades upp i dess nederdel, varför trycken i de övre delarna av slänten successivt sjönk. Denna avsänkning fördröjdes något i område 3, troligen på grund av vatteninflöde från vattenläckan i fastigheten på Pingstvägen 4, men blev tydlig då läckan stängts av.

I område 4 och 5, som inte kan ha påverkats av vattenläckan och som inte heller torde ha påverkats av skredet låg de höga grundvattentrycken längre upp i slänten kvar och började inte minska påtagligt förrän i juli månad 1997, vilket i stort överensstämmer med den normala årstidsvariationen.

Portrycken i leran styrs av grundvattentrycket i friktionsjorden, men också av grundvattenytan i det övre öppna magasinet, dvs den övre grundvattenytan. I de flesta fall råder i stort sett hydrostatiska förhållanden i de övre 2-4 metrarna. Portrycken i leran anpassar sig nästan momentant, eller åtminstone inom några dagar till förhållandena i ränderna beroende på dels att leran är överkonsoliderad, dels att tryckändringarna är begränsade till 10 à 20 kPa. De moduler som styr volymändringarna är i sådana fall mycket höga och medför, trots den begränsade permeabiliteten, att tillhörande konsolideringskoefficienter är förhållandevis höga, varför anpassningen sker snabbt.

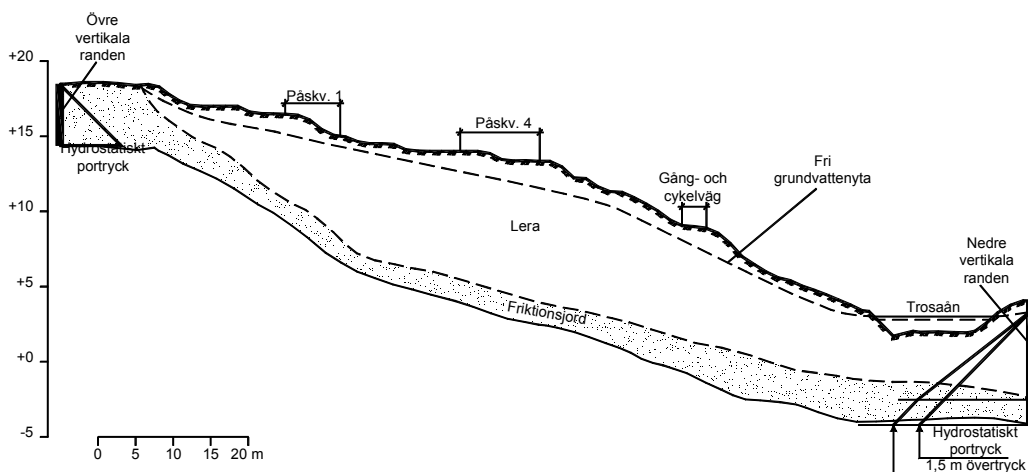
Sammanfattningsvis tyder de mätningar som gjorts efter skredet 1997 på att grundvattentrycken i området före skredet var artesiska vid Trosaån i dalgångens mitt, där två till tre meters övertryck, dvs trycknivåer över ursprunglig markyta, senare har uppmätts. Grundvattenmagasinet har fyllts på främst från söder i släntens överdel, vilket resulterat i en högre grundvattennivå i släntens överdel. Den så uppkomna tryckskillnaden har resulterat i en svagt sluttande trycklinje ner utefter slänten. Hur stort vattentrycket i släntens övre del varit under tidigare vårar med höga grundvattentryck är svårare att fastställa. För situationen före skredet är det rimligt att anta att det undre grundvattenmagasinet vid den kraftiga nederbörden under maj månad, eventuellt med bidrag från en vattenläcka, fyllts på och i princip blivit bräddfullt med en grundvattennivå strax under markytan i den övre delen. Det går inte att klart påvisa detta med stöd av de sparsamt förekommande mätningarna, men det är det ingenjörsmässigt logiska antagande som ligger närmast till hands. Observationer av vattensjuka partier i den övre delen av området indikerar också att hela jordvolymen varit vattenmättad och att portrycken genomgående varit höga.

## **6.7 MODELLERING AV PORTRYCKSFÖRHÅLLANDEN I EN SEKTION**

### **Geometri och strömningsegenskaper**

För att få en kvalitativ bild av strömningsförhållanden och portrycksnivåer i området har jämförande beräkningar utförts i en sektion. De beräkningsmodeller som använts, en överslagsmetod och en FEM-metod (beräkningsprogrammet SEEP/W), har baserats på antaganden om en 2-dimensionell geometri, vilket är

en förenkling av den verkliga geometrin, men modellerna kan ändå förväntas avspegla de verkliga förhållandena relativt väl. Beräkningarna har utförts med sektion 11, den sektion där initialskredet gick, som utgångspunkt, se Bilaga 1 och 2. Dess geometri visas i *Figur 6.9*.



**Figur 6.9. Geometri i sektionen för initialskredet (sektion 11) med randvillkor använda vid beräkningar.**

Underst i sektionen återfinns friktionsjord med relativt hög permeabilitet. Den ovanliggande leran har betraktats som homogen och överlagras i sin tur av torrskorpan. Ett stort antal sonderingar har använts som underlag för att bedöma jordlagrens tjocklek, bl a har hejarsonderingar utförts för att bestämma utbredning och tjocklek på friktionsjorden under leran. I den förenklade modellen har endast hänsyn tagits till friktionsjordslagrets geometri, vilken framgår av *Figur 6.9*. Det råder, trots det omfattande underlaget, viss osäkerhet om framförallt utsträckningen och kontinuiteten hos friktionsjorden.

## Permeabilitet

Den intakta lerans permeabilitet har bestämts på ett flertal nivåer genom CRS-försök. Resultaten visar en permeabilitet hos leran som varierar mellan  $2 \cdot 10^{-10}$  och  $5 \cdot 10^{-10}$  m/s. Permeabiliteten för friktionsjorden har bedömts i fält genom utströmningsförsök i grundvattenrören 202 gv, 205 gv (två försök), 206 gv, 208 gv (två försök) samt 210 gv, se *Figur 6.3*. Resultaten från dessa försök gav permeabiliteter mellan  $3 \cdot 10^{-7}$  och  $8 \cdot 10^{-7}$  m/s, vilket innebär att friktionsjordens

permeabilitet är i storleksordningen 1000 gånger högre jämförd med lerans permeabilitet.

Det inbördes förhållandet mellan lerans och friktionsjordens permeabiliteter styr i stor utsträckning tryckförhållandena. Detta förhållande har ansatts till 1000 och för enkelhetens skull har lerans permeabilitet i strömningsberäkningarna valts till  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s och friktionsjordens permeabilitet till  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s. Dessutom har några olika permeabilitetsförhållanden ansatts och en parameterstudie genomförts i detta avseende. Då torrskorpans geometri inte har kunnat bestämmas med någon större noggrannhet och eftersom dess permeabilitet inte i någon större grad påverkar tryckfördelningen längre ner i lerprofilen, har den antagits vara densamma som lerans.

### **Randvillkor**

En rad olika randvillkor och antaganden om strömningen har använts i syfte att förstå och tillsammans med gjorda portrycksobservationer skapa en modell för hur sektionen fungerar hydrauliskt, samt för att kartlägga i vilken omfattning olika faktorer inverkar. I beräkningarna har berget normalt antagits vara impermeabelt. I något fall har dock en lokal höjning av trycket i en punkt på bergytan beaktats för att simulera en eventuell påfyllning av magasinet underifrån genom sprickor i berget.

Den nedre vertikala randen, som har förlagts i dalgångens mitt på andra sidan om Trosaån, har antagits ha ett porvattentryck som varierar rätlinjigt med djupet. Portrycket har antagits variera från hydrostatiskt portryck (10 kPa/m) genom hela jordprofilen upp till ett artesiskt tryck i friktionsjordslagret på 1,5 m. Det artesiska trycket har i friktionsjordslagret antagits vara hydrostatiskt för att sedan (i beräkningarna med SEEP/W) klinga av i den överliggande leran mot en grundvattenyta ca 1 m under markytan, se *Figur 6.9*. Detta är ett förenklat sätt att beakta det 3-dimensionella läckaget vinkelrätt slänten. Den horisontella randen under friktionsmaterialet har antagits vara impermeabel.

Som randvillkor i släntens övre del, där den vertikala randen är förlagd bakom släntkrönet, har i flertalet beräkningar använts ett hydrostatiskt tryck (ökning med 10 kPa/m) med ett högsta värde motsvarande markytan. Beräkningar har också utförts för att studera inverkan av grundvattentrycken i släntens övre del på tryckfördelningen och trycknivåerna längre ned i slänten.

Ett fall med en läckande vattenledning i släntens övre del, som fyller på magasinet inne i friktionsjordslagret, har också förenklat modellerats.

## Beräkningsmodeller

### ■ *Förenklad beräkningsmodell*

Vid användande av komplicerade beräkningsprogram kan numeriska svårigheter uppstå och resultaten blir då inte särskilt relevanta. Detta skulle i det aktuella fallet kunna inträffa vid vissa kombinationer av randvillkor, geometrier och nederbördsmängder. För att kontrollera resultaten från FEM-beräkningarna har därför motsvarande analyser utförts med en förenklad modell. Denna har också använts för att få en uppfattning av storleksordningen på inverkan av de olika parametrarna. Den förenklade modellen bygger på Darcys lag och beräkningarna har utförts i kalkylprogrammet Excel.

I modellen försummas de ut- och inläckage av vatten som man får från den överliggande leran och det underliggande berget. Modellen innebär således att man har ett rör med friktionslagrets geometri som följer släntens lutning. Modellen har längst upp i slänten i detta fall givits en trycknivå på +16,8 m och vid Trosaån en trycknivå på +4,0 m.

Modellen innebär att variationen i trycknivå mellan den övre och nedre delen av slänten helt styrs av friktionsjordslagrets geometri och permeabilitet (variation utefter slänten).

För att få relevanta resultat med den förenklade modellen krävs att skillnaden mellan den lösa lerans permeabilitet och den underliggande friktionsjordens är större än 100 gånger. Detta villkor är uppfyllt och därmed kan överslagsberäkningar göras med denna modell, som är avsevärt enklare än den som har utnyttjats i FEM-beräkningarna.

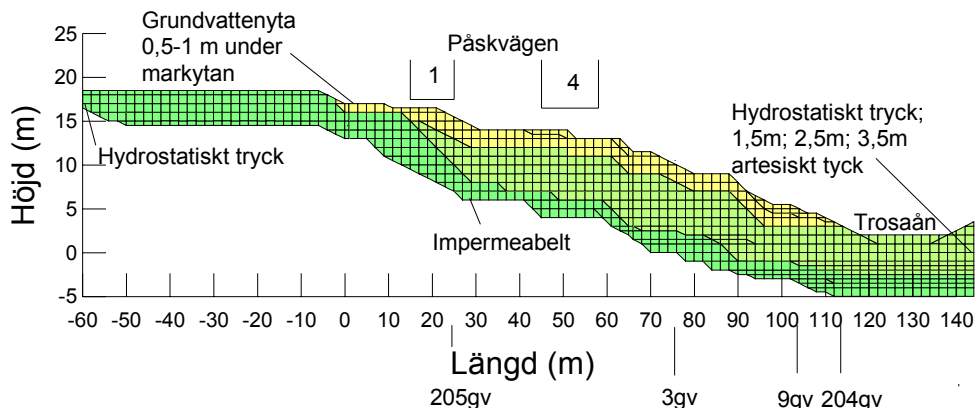
Modellen redovisas utförligare i *Bilaga 6*.

### ■ *Avancerad beräkningsmodell (FEM-SEEP/W)*

Också FEM-analyserna bygger på Darcys lag och de indata som krävs för att utföra beräkningarna är permeabilitet, portryck i ränderna samt, vid transienta analyser, jordens vattenbindningskurva.

Ett stort antal beräkningar har genomförts för att i görligaste mån utreda hur den aktuella slänten fungerat hydrauliskt och i vilken omfattning antaganden om olika parametrar inverkar på de beräknade portrycken. Merparten av simuleringarna har utgått från en standardprofil, som i stora drag överensstämmer med resultaten från de geotekniska sonderingarna. Geometri, elementindelning

och randvillkor framgår av *Figur 6.10*. Grundvattenrör och porttrycksstationer i den aktuella sektionen är också markerade.



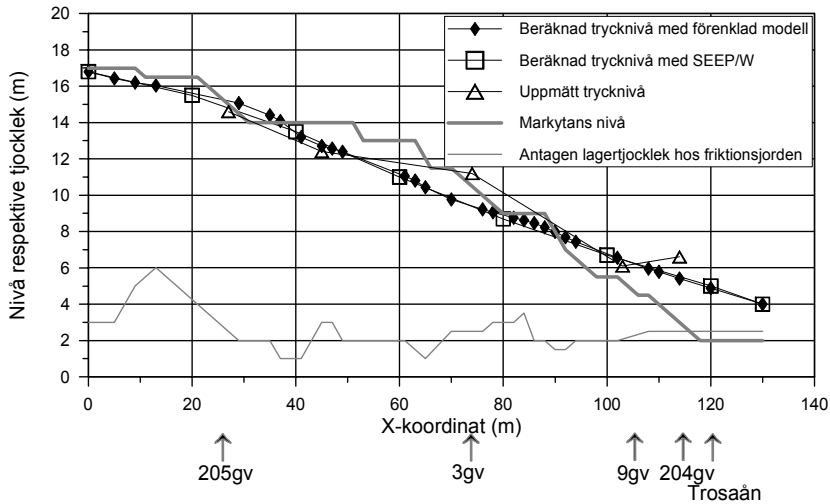
**Figur 6.10. Elementnät använt i SEEP/W-beräkningarna.**

## Resultat av beräkningar

Beräkningar har utförts med varierande randvillkor som tidigare beskrivits. I den förenklade modellen är det trycken i ränderna som blir styrande eftersom denna endast beskrivs av friktionslagrets geometri. Även resultaten från SEEP/W beräkningarna styrs av de valda randvillkoren, men dessutom av de inbördes förhållandena mellan friktionsjordens och lerans permeabiliteter. Friktionsjordens permeabilitet har antagits vara densamma utefter hela släntens längd.

I *Figur 6.11* redovisas en jämförelse av beräkningarna i SEEP/W och den förenklade modellen under antagande om hydrostatiskt tryck i både leran och den underlagrande friktionsjorden vid ränderna. Jämförelsen visar på en mycket god överensstämmelse mellan de båda modellerna.

Dessa beräkningsresultat visar på artesiska tryck i friktionsjordslagret motsvarande en tryckhöjd 2,2 m över ursprunglig markyta 6 m upp i slänten från Trosaån (vid 204 gv) och 1 m över ursprunglig markyta 15 m från ån (vid 9 gv). Längre upp i slänten, ca 40 m från ån (vid 3 gv) visar beräkningsresultaten på en trycknivå motsvarande en grundvattenyta 1,2 m under ursprunglig markyta. Beräkningsresultaten avviker delvis från de strax efter skredet uppmätta porttrycken, vilka var ännu högre. En anledning till detta kan vara att porttrycksmä-



**Figur 6.11. Jämförelse mellan trycknivåer beräknade med SEEP/W respektive den förenklade modellen.**

tarna installerades efter initialscredet och inte hade hunnit stabiliseras vid mät-tillfället. Initialscredet kan också ha orsakat förändringar och till och med ha skurit av naturliga dräneringsvägar med en portrycksupbyggnad som följd. Som tidigare nämnts styrs portrycken i friktionsjordslagret av dess geometri och permeabilitet. För att studera om en förändring i dräneringsförhållanden kan bygga upp portryck som motsvarar de som uppmätts strax efter initialscredet har en beräkning utförts med den förenklade modellen. I denna beräkning har fördelningen av friktionsjordslagrets tjocklek längs slänten ändrats något och därmed också dess lokala vattenföringskapacitet. Resultaten från denna analys ger en god överensstämmelse med de uppmätta höga portrycken och visar att lokala variationer i friktionsjordslagrets vattenförande egenskaper kan ha en viss betydelse för tryckvariationen längs slänten.

Beräkningarna har som väntat visat att ju högre portryck som antas vid den nedre vertikala randen på andra sidan av Trosaån, desto högre portrycksnivåer erhålls också längre upp i slänten. Resultaten från beräkningarna redovisas mer detaljerat i *Bilaga 4*.

### Simulering av vattenläcka

De följder som under ogynnsamma förhållanden skulle kunna uppstå vid en vattenläcka är av stort intresse, inte minst ur principiell synpunkt. Ett försök har

därför gjorts att simulera en vattenläcka i huset på Pingstvägen 4 och därmed studera vilken inverkan en sådan skulle kunna ha haft. Som en första ansats har läckan antagits som en linjekälla i beräkningarna med SEEP/W och som en punktkälla i den förenklade modellen. Vid modellering av en läcka som en linjekälla kommer antagandet om källans flöde att vara beroende av antagen längd hos källan. Detta innebär att om man använder en liten längd kommer man att överskatta inverkan av källan på stort avstånd från denna. Beräkningarna med både SEEP/W och den förenklade modellen har visat att friktionsjordslagrets permeabilitet är för låg för att kunna ta emot även ett litet vattenflöde från en källa av det antagna slaget. Detta innebär att portrycken beräkningsmässigt stiger till orimliga nivåer och en hydraulisk uppspräckning (piping) borde ske, vilket också beräkningsresultaten med SEEP/W tyder på. Detta beräkningsresultat beror på att läckans inverkan på detta vis enbart modelleras i en riktning och flödet per breddmeter därmed blir för stort.

Ett annat sätt att modellera en läcka, som blir mer verklighetsnära genom att en horisontell vattenströmning i två riktningar beaktas, är att utnyttja lösningen för en fullkomlig brunn, dvs en brunn som går helt igenom ett vattenförande lager med konstant tjocklek och permeabilitet. Det vattenförande lagret är på över- och undersidan omgivet av impermeabelt material. Lösningen till ekvationen redovisas i *Bilaga 7*.

Utgående från en lokal grundvattenyta lägre än 2 m under markytan visar beräkningsresultaten från denna modell på att man i närområdet till en stor läcka motsvarande 32 l/min skulle kunna få en portrycksökning motsvarande en höjning av trycknivån av 1-2 m inom 5 m avstånd, medan man på ett avstånd av 50 m skulle få en mer begränsad påverkan med ca 0,3 m trycknivåhöjning. Vid mindre vattenflöden blir de beräknade portrycksändringarna mindre. En ökande permeabilitet i friktionsjorden ger också mindre portrycksökningar. En ökande styvhet hos jorden ger större tryckändringar på stora avstånd från läckan och vid ökande tjocklek hos friktionsjorden fås mindre påverkan i läckans närområde men ungefär samma tryckökning på stort avstånd.

Mätningar som utfördes av VBB VIAK visade att grundvattenytan, som enligt de inledande mätningarna efter skredet legat kvar strax under markytan, sjönk i de närmaste grundvattenrören efter att vattenläckan på Pingstvägen hade åtgärdats. En vecka efter avstängningen av läckan hade portrycksnivåerna i rören 205 gv och 206 gv sjunkit ca 2 m och i V111 gv hade de sjunkit ca 1,5m. För att simulera detta har både stationära och transienta beräkningar utförts med SEEP/W-programmet, se *Bilaga 5*. Om grundvattenytan i den övre randen an-

sätts ca 3,5 m under markytan, vilket stämmer relativt väl med de förhållanden som i senare skeden efter skredet uppmätts i detta område, kan den avsänkning av portrycken som uppmätts simuleras relativt väl.

Omvänt innebär detta att en motsvarande höjning av portrycken i detta område på grund av att en vattenläcka uppstått skulle kunna simuleras på detta vis. Samma modell kan användas för att simulera att en vattenläcka, som uppkommit i samband med skredet, skulle kunna hålla upp de vattentryck som redan fanns, även om förändringar i dräneringsvägarna på grund av skredet annars skulle ha medfört att grundvattentrycken sänkts av mer direkt. Andra kombinationer av mer begränsade vattenläckor, som ökat efter skredet, och naturliga grundvattenytor före skredet med nivåer mellan markytan och ca 3,5 m under densamma kan också simuleras.

Resultaten från försöken att modellera en vattenläcka visar också att de höga portrycken i släntens nedre delar, där skredet startade och huvuddelen av de efterföljande skredmassorna var belägna, svårligen i någon högre grad skulle kunna vara orsakade av en vattenläcka i en fastighet belägen en bit ovan och bakom skredet, även om detta vatten skulle infiltreras direkt in i friktionslagret. Under förutsättning av att det övre grundvattenmagasinet inte redan var fyllt, skulle dock en stor vattenläcka kunna ge ett bidrag till dessa höga portryck. Om man på grund av olyckliga omständigheter skulle haft direktkommunikation mellan vattenläckan och det undre friktionslagret i skredområdet genom ett permeabelt slag i berget, så skulle ett samspel mellan en vattenläcka och höga grundvattentryck i detta område kunna föreligga. Inga observationer finns som tyder på sådana sprickor och samstämmigheten mellan uppmätta och beräknade portrycksfördelningar med antagande av en tät berggrund medför också att sannolikheten för förekomst av inverkan spricksystem i berget är liten.

## **6.8 KOMMENTARER TILL MODELLERINGARNA**

De modelleringar som gjorts är förenklade och syftar främst till att ge en kvalitativ bild av portrycksförhållandena i slänten. Därtill kommer att delar av de mätningar som genomförts har gjorts efter skredet och stora förändringar kan således ha skett i strömningsförhållandena jämfört med hur det förhöll sig innan skredet.

Från de uppmätta portrycken och modelleringarna har en trovärdig bild erhållits av portrycken i den underliggande friktionsjorden längs slänten. Vid modelleringen styr olika antaganden om randvillkoren och friktionsjordslagrets geometri

den beräknade portrycksfördelningen mycket påtagligt. När man jämför med de artesiska tryck som uppmätts dels i skredområdet under och efter skredet, dels i efterföljande undersökningar längre nedströms vid samma åfåra samt de som tidigare rapporterats (1982), synes den tryckfördelning som beräknas med antagande av 2 à 3 m artesiskt tryck i släntens nedre del vara rimligast. Hur hög grundvattennivån i den övre delen av slänten, bakom skredet 1997, kan ha varit under perioder med höga grundvattentryck före skredet är svårare att fastslå. Det är troligt att nivån här säsongsvist kan ha varierat en hel del och de observationer av utläckande grundvatten och vattensjuka partier som gjorts under åren tyder på att jorden åtminstone periodvis varit helt vattenmättad. Beräkningar har utförts med olika antaganden om den övre grundvattenytans nivå, allt ifrån någon meter under markytan till 3 à 4 m under densamma. De visar att detta antagande också påverkar de beräknade grundvattentrycken längre ner i slänten. Inverkan på trycken avtar dock gradvis och nere vid ån och i anslutning till initialskredet är den begränsad.

Beträffande möjlig inverkan av vattenläckan kan konstateras att det är oklart i vad mån den existerade före skredet och att flödet i vilket fall torde ha varit avsevärt lägre än det maximala värde som använts vid beräkningarna. Randvillkorens inverkan vid beräkningarna är i denna fråga mångdubbelt större än i övriga beräkningar. Hur återfyllningsmaterial, dräneringsledning och andra av människan skapade strömningsvägar kan ha tagit hand om och påverkat ett eventuellt vattenflöde och därmed trycken är oklart, men i beräkningarna har det värsta scenariot att hela vattenmängden infiltrerats direkt in i friktionsjorden använts. Trots detta är den beräknade inverkan på portryckssituationen i de delar av slänten som är av primärt intresse för skredet begränsad.

# Kapitel 7.

## Stabilitetsberäkningar

### 7.1 BERÄKNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR

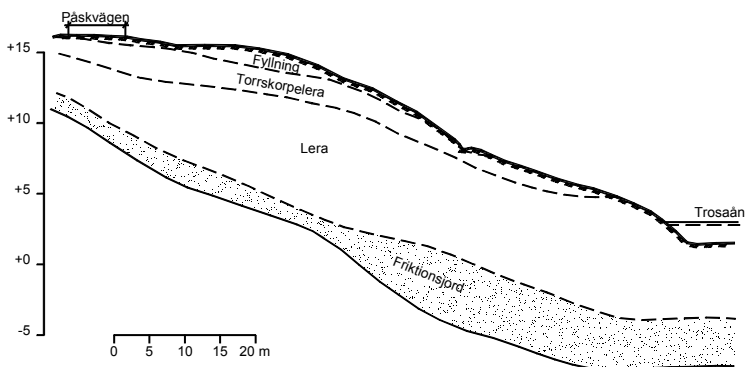
Beräkningarna har främst koncentrerats till den sektion där initialscredet gick (sektion 11). Som komplement har beräkningar även utförts för en sektion mitt igenom huvudskredet (sektion 8-9). För att få en jämförelse med de delar av slänten som inte följde med i skredet, har även stabiliteten för en sektion något öster om skredet beräknats (sektion 14). Sektionernas lägen redovisas i *Bilaga 1*. Området väster om skredet förstärktes efter skredet 1982, varför en motsvarande jämförelse inte kunnat göras här. De geotekniska förhållandena inom hela skredområdet har redovisats i detalj i Kapitel 5 och de hydrogeologiska förhållandena redovisas i detalj i Kapitel 6. Val av de parametrar som använts vid analysen redovisas nedan.

#### **Geometri**

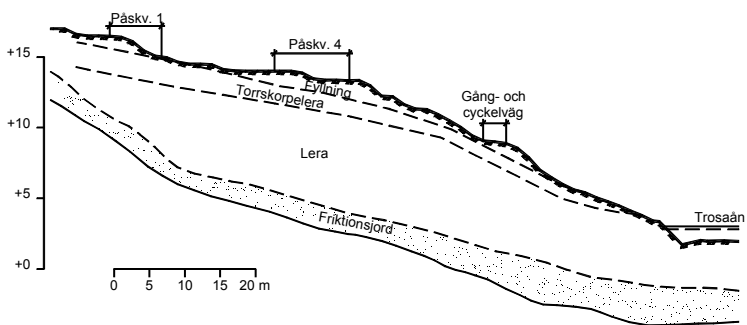
Trosa kommuns primärkarta (1997) har använts som underlag för bestämning av markytans geometri inom skredområdet före skredet (men efter utbyggnaden av området). För bedömning av marknivåer innan området bebyggdes, dvs fyllningens underkant i beräkningarna, har nivålinjer digitaliserats från ett förslag till ändring av byggnadsplanen upprättat av K-Konsult 1972. I bedömningen har hänsyn tagits till att K-Konsults förslag 1972 och Trosa kommuns primärkarta 1997 är upprättade i olika höjdsystem. Geometrin för slänten i sektionen för initialscredet, genom centrum på huvudskredet och för sektionen något öster om skredområdet visas i *Figur 7.1*.

#### **Jordlagerförhållanden**

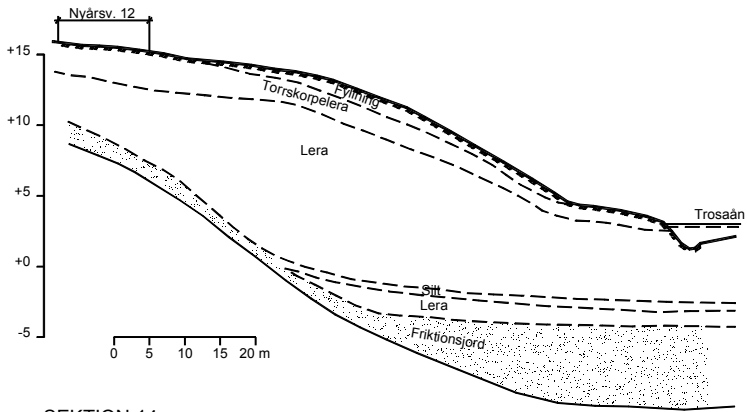
Som närmare beskrivits i Kapitel 5.2 består jorden av lera som mot djupet blir mer siltskiktad och successivt övergår i friktionsjord/morän. Gränsen mellan lera och silt är svår att avgöra. Bedömning av denna gräns i respektive beräkningssektion har främst gjorts utifrån utförda kolvprovtagningar och CPT-son-



SEKTION 8-9



SEKTION 11



SEKTION 14

Figur 7.1. Antagna geometrier och jordlagerförhållanden i de tre beräkningssektionerna.

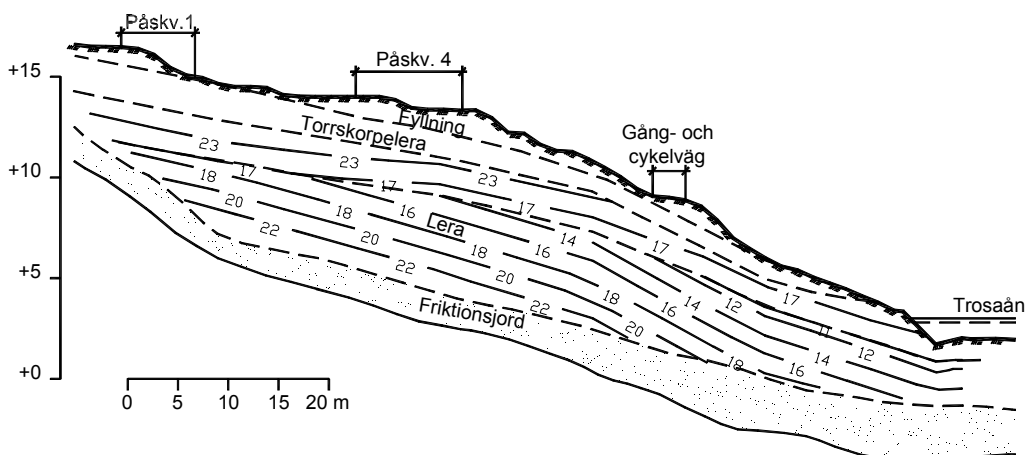
deringar. I sektionen mitt igenom huvudskredet har inga sonderingar utförts, varför gränsen enbart kunnat bedömas grovt utifrån resultatet av de viktsonderingar som gjorts i angränsande sektioner. Bedömd gräns mellan lera och silt i respektive beräkningssektion framgår av *Figur 7.1*.

Baserat på utförda densitetsbestämningar har lerans tunghet valts till  $16 \text{ kN/m}^3$  och siltens tunghet har valts till  $17,5 \text{ kN/m}^3$ .

### Skjuvhållfasthet

Den odränerade skjuvhållfastheten har valts i enlighet med den utvärdering av belastningshistoriens inverkan som gjorts i Kapitel 5.4. Skjuvhållfastheten har således bedömts vara något lägre än det utvärderade genomsnittet för leran i slänten på 15-35 m avstånd från Trosaån, där överkonsolideringen är lägst, och högre än genomsnittet på stora avstånd ( $>75 \text{ m}$ ) från ån, där överkonsolideringen är högst, se *Figur 5.7 – 5.9* i Kapitel 5. Leran har bedömts påverkad av torrskorpeeffekter ned till ca 3,5 à 4 m djup på större avstånd från ån och 2,0 à 2,5 m djup närmare ån. Den odränerade skjuvhållfasthet som använts i stabilitetsberäkningarna för sektionen genom initialskredet visas i *Figur 7.2*.

Lerans dränerade hållfasthet har valts enligt empiri till  $\phi' = 30^\circ$  och  $c' = 1,5 - 2 \text{ kPa}$  (dvs  $c' \approx 0,1\tau_{fu}$ ), vilket stöds av utförda dränerade triaxialförsök. Siltens inre friktionsvinkel har valts till  $\phi' = 34^\circ$  på basis av utförda triaxialförsök.

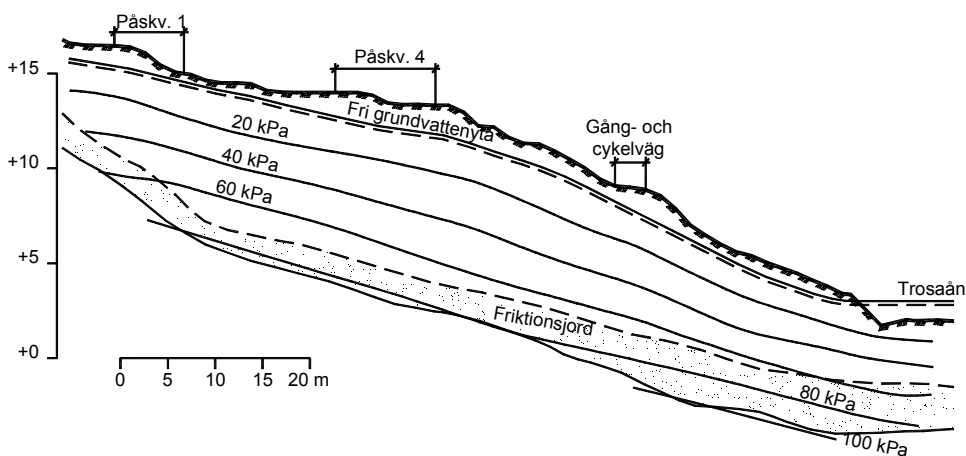


**Figur 7.2. Antagen odränerad skjuvhållfasthet i beräkningssektionen för initialskredet (sektion II).**

## Vattennivåer och portryck

Vattennivån i Trosaån har valts till +3 m utifrån de mätningar som utförts efter skredet, samt mätningar som utfördes efter skredet 1982. Eftersom vattennivån efter skredet sannolikt är något hög, har en känslighetsanalys för lägre vattennivåer utförts. Portrycksförhållandena i de tre beräkningssektionerna har valts i enlighet med resultaten av den modellering baserad på mätningar, beräkningar och analyser som redovisats i Kapitel 6.

För stabilitetsberäkningarna i sektionen för initialskredet (sektion 11) har använts den portrycksfördelning som modellerats med stöd av uppskattade portryck, baserade på mätningar och med beaktande av eventuella effekter av installation och portrycksgenerering pga det pågående initialskredet, samt beräkningar med programmet SEEP/W som överensstämmer med dessa. I denna modell är grundvattentrycken i friktionsjordslagret artesiska nere vid åkanten med en trycknivå 2 m över ursprunglig markyta och motsvarande trycknivå i den övre akvifären ligger 0,5 – 1 m under markytan. Dessa portrycksförhållanden visas i *Figur 7.3*. I jämförande beräkningar har portrycken höjts upp så att de i lägena för grundvattenrören 3 gv och 9 gv direkt motsvarar de portryck som uppmättes i dessa rör strax efter initialskredet. Dessa tryck bedöms dock som inte helt rättvisande på grund av ovannämnda orsaker. En beräkning har också utförts med antagande av artesiska portryck vid slänttån motsvarande en trycknivå 3 m över ursprunglig markyta och tillhörande modellerade portrycksfördelning i slänten.



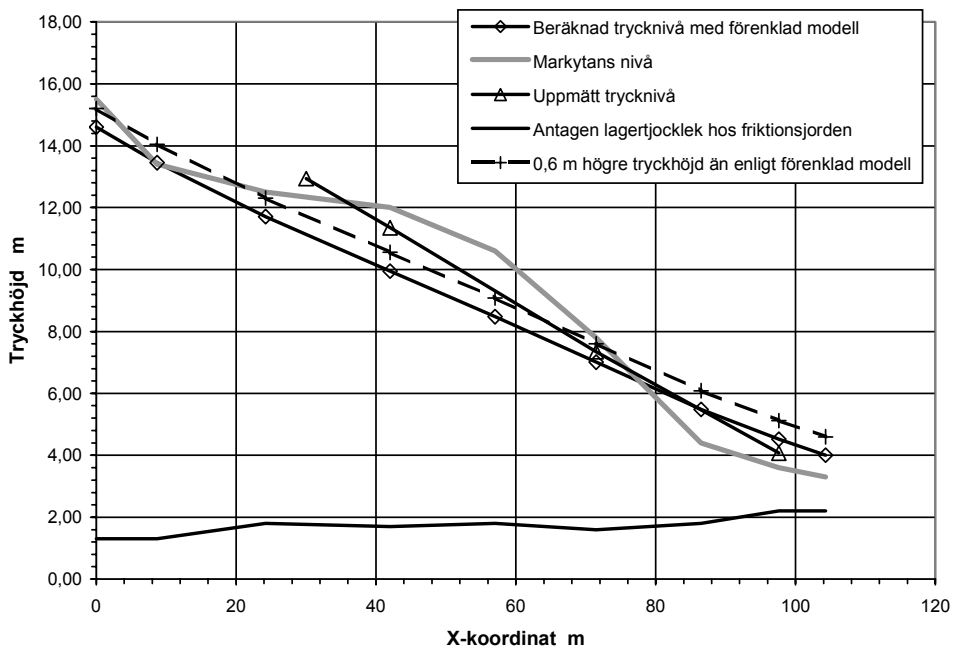
**Figur 7.3.** Antagna portrycksförhållanden i beräkningssektionen för initialskredet.

En studie har dessutom utförts av inverkan av grundvattentrycken i den övre akvifären, så att grundvattenytan i denna har varierats mellan 0,5 och 3,5 m under markytan och stabiliteten har beräknats med tillhörande modellerade portrycksfördelningar i slänten.

För stabilitetsanalyserna i de två andra beräkningssektionerna har portrycksförhållandena bedömts och modellerats på motsvarande sätt. I sektionen genom centrum av huvudskredet finns dock inga portrycksobservationer inom själva skredområdet att korrelera modellen till. I båda sektionerna har flera analyser med alternativa portrycksfördelningar utförts för att studera inverkan av portrycksmodellen på den beräknade stabiliteten.

I sektionen utanför skredområdet (Sektion 14) har beräkningen utförts med tre alternativa portrycksfördelningar. Den första fördelningen baseras på ett antagande av att trycket i friktionsjorden vid slänttån kan interpoleras mellan uppskattad tryckhöjd i skredområdet och den hydrostatiska tryckhöjden från vattenytan i det område nedströms där grundvattnet bedöms läcka ut i ån genom direktkontakt mellan friktionsjorden och vattnet i ån. I släntens övre del har grundvattenytan antagits motsvara markytans nivå. Denna portrycksfördelning ger ungefär samma portryck som de uppmätta i släntens undre del, men något lägre tryck i dess övre del. I den andra fördelningen har trycken i friktionsjorden antagits vara genomgående 6 kPa högre. Portrycken blir då högre än uppmätta i släntens undre del men fortfarande något lägre i dess övre del. Höjningen med 6 kPa motsvarar ungefär halva skillnaden mellan grundvattentrycken i det första alternativet och bedömda grundvattentryck i sektionen för initialscredet. Slutligen har en fördelning som direkt motsvarar de uppmätta portrycken använts. Grundvattentryckets fördelning i friktionsjorden i de tre alternativen visas i *Fig. 7.4*.

I sektionen mitt igenom huvudskredet, (sektion 8-9) har det varit mycket svårt att avgöra var gränsen mellan lera och silt gick, och därmed också friktionsjordslagrets tjocklek. Inledande överslagsberäkningar gav som resultat lägre portryck i släntens övre del än vad som ansågs troligt och direkta mätningar att korrelera modellen till saknas. Vid beräkningarna har därför använts samma portrycksfördelning som i sektionen för initialscredet.



**Figur 7.4. Antagna grundvattentryck i friktionsjordslagret i beräkningssektionen utanför skredområdet.**

## Laster

De byggnader som är av intresse för stabilitetsberäkningarna är huvudsakligen den norra husraden på Påskvägen. Eftersom dessa byggnader varit grundlagda på pålar har de inte antagits belasta marken.

De uppfyllnader som gjorts inom området har vid beräkningarna antagits bestå av material med en friktionsvinkel på  $30^\circ$  och en tunghet på  $18 \text{ kN/m}^3$ .

## 7.2 BERÄKNINGSMETOD

Beräkningarna har utförts enligt Skredkommissionens anvisningar.

Vid analyserna har vanliga så kallade klassiska beräkningsmetoder använts. Stabilitetsberäkningarna har utförts för cirkulärcylindriska och sammansatta, delvis plana glidytor med Morgenstern-Price's metod, vilken är en sk rigorös metod som beaktar alla krafter och uppfyller alla jämviktsvillkor. Datorprogrammet SLOPE/W har utnyttjats för dessa beräkningar. Den efterföljande studien av följderna av ett initialscred har gjorts med Janbus lamellmetod, som är en motsvarande rigorös metod och med vilken det är enklare att modellera ovanliga problemställningar.

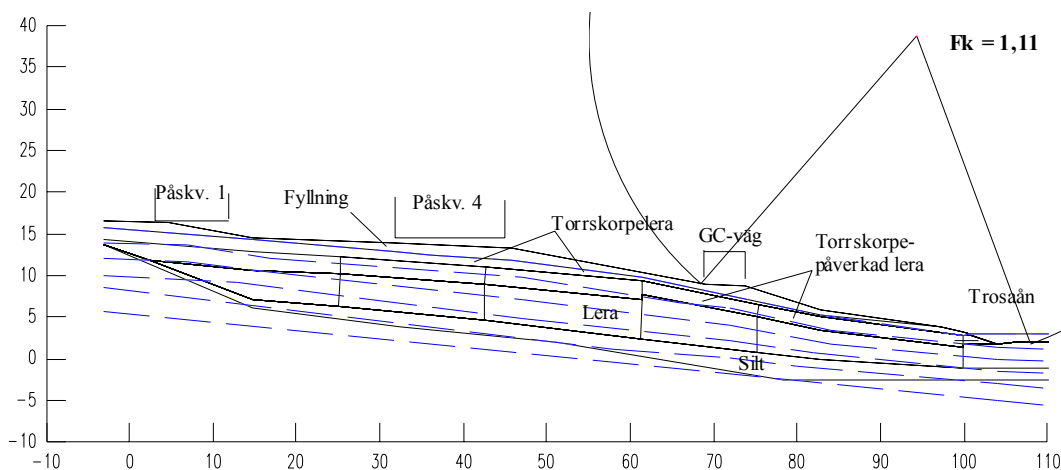
## 7.3 RESULTAT AV BERÄKNINGAR

### Initialskred

Beräkningarna i sektionen för initialskredet (sektion 11) har i ett utgångsalternativ utförts med cirkulär cylindriska glidytor och enligt de beräkningsförutsättningar som angivits i Kapitel 7.1. För den kombinerade analysen har i detta utgångsalternativ använts portryck motsvarande knappt 2 m artesiskt övertryck vid Trosaån. I utgångsalternativet har vidare värdet  $c' = 2$  kPa använts för den effektiva kohesionen, och inga sprickor har antagits i torrskorpan. Med dessa förutsättningar erhöles vid beräkning med odränerad analys en säkerhetsfaktor  $F_c = 1,28$  och med kombinerad analys en säkerhetsfaktor  $F_k = 1,11$ , se *Figur 7.5*.

Brottet för den för utgångsalternativet beräknade farligaste glidyten sker i stort som ett dränerat brott. Endast längs ca 15 % av glidyten blir den odränerade hållfastheten styrande. Den beräknade farligaste glidyten med kombinerad analys sträcker sig ca 30 m bakåt från Trosaån, vilket ungefär motsvarar cykelvägens södra kant. En beräkning med en plan glidyta gav ungefär samma resultat som beräkningen med cirkulär cylindrisk glidyta, dvs  $F_k = 1,12$  då  $c' = 2$ .

Analys har utförts för att bedöma vilken inverkan variationer i vissa förutsättningar, som portrycksfördelning, vattennivå och dränerade hållfasthetsparametrar, har på stabiliteten. En sammanställning av resultaten från dessa analyser redovisas, tillsammans med beräkningsresultaten från utgångsalternativet, i *Tabell 7.1*.



**Figur 7.5.** Beräknad farligaste glidyta i sektionen för initialskredet för utgångsalternativet (kombinerad analys).

**Tabell 7.1. Sammanställning av resultat från stabilitetsberäkningarna.**

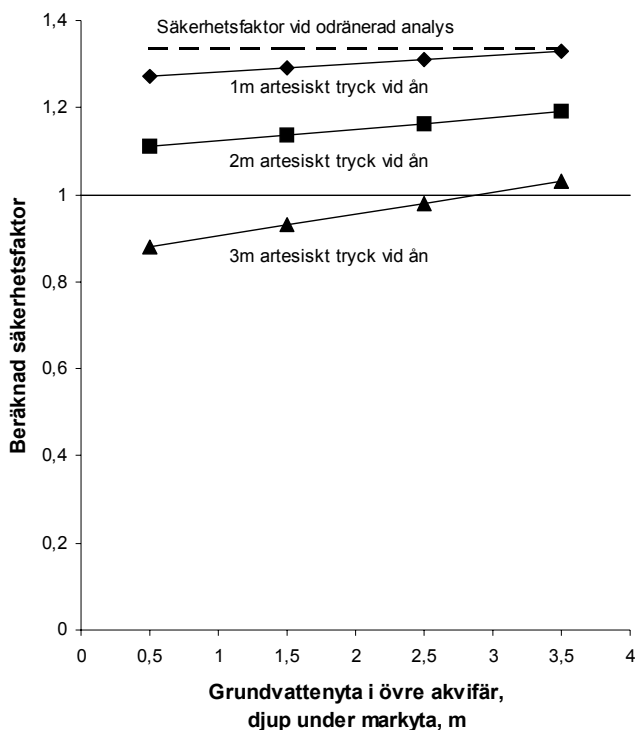
Indata	Typ av analys	F
<i>Utgångsalternativ:</i> Ursprunglig slänt, knappt 2 m artesiskt tryck vid ån, $c'=2$ , Inga torrskorpesprickor. Cirkulär glidyta.	Odränerad	1,28
	Kombinerad	1,11
<i>Ändring i förhållande till utgångsalternativet:</i>		
Plan glidyta	Kombinerad	1,12
Med ej vattenfyllda torrskorpesprickor genom torrskorpeleran	Odränerad	1,28
	Kombinerad	1,11
Dränerad skjuvhållfasthet $c'=1,5$ kPa (isf $c'=2$ kPa)	Kombinerad	1,07
Portryck motsvarande knappt 3 m övertryck vid ån	Kombinerad	0,90
Uppmätt portryck efter skred i 3 gv och 9 gv	Kombinerad	0,86
Lokal erosion vid ån; 2,5 m borteroderat vid åns botten och 0,5 m vid åbrinken	Kombinerad	1,08
Sänkt vattennivå i ån från +3 m till +2,5 m	Kombinerad	1,03
Sänkt portryck i släntens övre del; 2 m sänkning norr om Påskvägen 4, men fortfarande 2 m artesiskt tryck vid Trosaån	Kombinerad	1,15
Fyllningsmaterial borttaget ("före utbyggnad")	Kombinerad	1,10
Fyllningsmaterial borttaget, sänkta portryck i övre delen av lerlagret	Kombinerad	1,15

Som framgår av tabellen erhöles i princip samma säkerhetsfaktor vid beräkning med och utan torrskorpesprickor. Med ett antagande av  $c' = 1,5$  kPa sjönk säkerhetsfaktorn vid kombinerad analys från  $F_k = 1,11$  till  $F_k = 1,07$ .

En stabilitetsberäkning med de något högre portrycken (knappt 3 m artesiskt övertryck vid Trosaån) gav en säkerhetsfaktor vid kombinerad analys av  $F_k = 0,90$ . Vid en höjning av portrycken i lägena för grundvattenrören gv3 och gv9, till motsvarande uppmätta portryck efter initialscredet, sjönk säkerhetsfaktorn vid kombinerad analys från  $F_k = 1,11$  till  $F_k = 0,86$ . Sänks vattenståndet i Trosaån från +3 m till +2,5 m sjunker säkerhetsfaktorn från  $F_k = 1,11$  till  $F_k = 1,03$  och vid beräkning med lokal erosion vid Trosaån erhålls säkerhetsfaktorn  $F_k = 1,08$ .

En variation av grundvattenytan i den övre akvifären som medför en sänkning av den antagna grundvattenytan i detta område från den antagna 0,5-1 m under markytan till 3,5 m under markytan ger, med tillhörande förändringar i porttrycksfördelningen längs slänten, en gradvis förhöjning av säkerhetsfaktorn för initialscredet från ca 1,1 till ca 1,2 om trycken i friktionsjorden vid Trosaån fortfarande antas vara artesiska med en grundvattenyta 2 m över ursprunglig markyta, *Figur 7.6*. Om dessa antas vara lägre, minskar inverkan av trycken i den övre akvifären, eftersom den odränerade skjuvhållfastheten blir styrande i högre grad. Ökas de artesiska trycken, blir inverkan motsvarande högre på den beräknade säkerhetsfaktorn, men vid 3 m artesiskt tryck befinner sig slänten beräkningsmässigt nästan i brottillstånd även för det lägsta antagandet av grundvattenyta i den övre akvifären.

En bedömning av säkerheten vid de förhållanden som rådde innan området byggdes, dvs innan uppfyllning, är svår att utföra då porttrycksförhållandena innan uppfyllning är okända. Vid beräkningar med borttagen fyllning, men med porttrycksförhållanden motsvarande dem efter utbyggnad, erhöles säkerhetsfaktorn  $F_k = 1,10$ . Sänks porttrycken i lerlagrets övre del motsvarande fyllningslagrets tjocklek erhålls säkerhetsfaktorn  $F_k = 1,15$ .

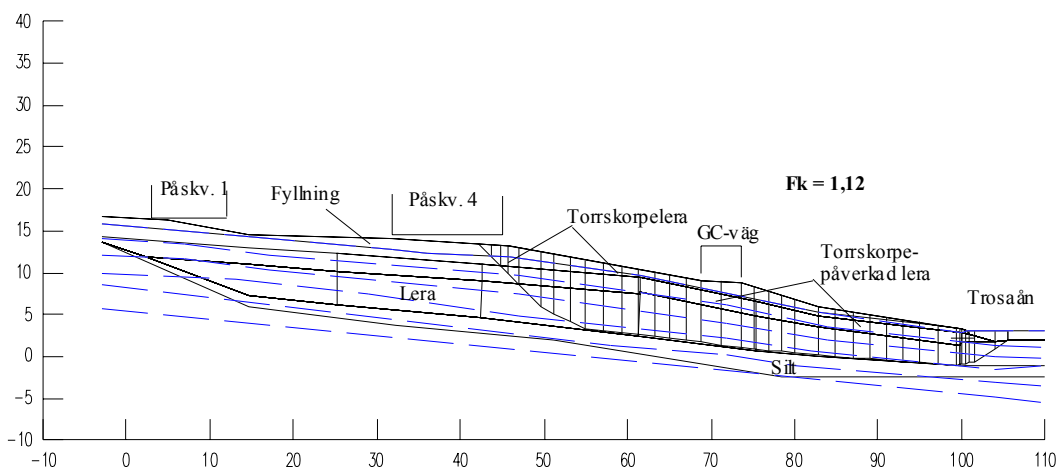


**Figur 7.6.**  
Variation i säkerhetsfaktor med antagna grundvatten-tryck i släntens övre del och dess beroende av vad som antas om det artesiska trycket vid Trosaån.

Den analys som utförts visar att beräkningsresultaten är mycket känsliga för antaganden om främst de artesiska trycken vid Trosaån, men även för antaganden om åns vattenyta, den effektiva kohesionen samt erosion vid ån. Beräkningsresultaten är mindre känsliga för förändringar av portrycken högre upp i slänten, även om dessa också har en inverkan. Det behövs endast marginella förändringar i förhållande till utgångsalternativet för att säkerhetsfaktorn för initialskredet beräkningsmässigt skall bli 1,0, och slänten beräkningsmässigt gå till brott.

### Konsekvenser av initialscred

Beräkningar för en långsträckt, i huvudsak plan glidyta i sektionen för initialskredet som sträcker sig upp till huvudskredets bakkant ger med kombinerad analys och beräkningsförutsättningar motsvarande ovannämnda utgångsalternativ en säkerhetsfaktor  $F_k = 1,12$ , se *Figur 7.7*. Den odränerade skjuvhållfastheten blir i detta fall dimensionerande i de övre delarna bakom initialskredet vilka utgör huvuddelen av denna potentiella glidyta och stabiliteten för denna långa glidyta är inte alls lika känslig för förändringar i portryckssituationen som glidytan för initialskredet. Höjs portrycken i läget för gv 3 och gv 9 till motsvarande uppmätta tryck efter initialskredet sjunker säkerhetsfaktorn för denna långa glidyta till strax över 1,0 ( $F_k = 1,01$ ). I detta fall blir också de dränerade hållfasthetsparametrarna dimensionerande utefter en större del av den potentiella glidytan.



**Figur 7.7. Beräknad farligaste långsträckt plan glidyta med portryck enligt utgångsalternativet i denna sektion (sektion II), se Figur 7.3.**

Resultatet av motsvarande beräkningar för en sektion mitt igenom skredet (sektion 8-9) bedöms som mycket osäkra då det, som tidigare nämnts, inte funnits några sonderingar eller provtagningar i denna sektion. Det har därmed varit svårt att bedöma såväl friktionsjordens tjocklek och tillhörande portrycksförhållanden som lerlagrets tjocklek. De beräkningar, som utförts med samma portrycksförhållanden som i utgångsalternativet i sektionen för initialscredet, har givit en säkerhetsfaktor för den långa glidyten av  $F_c \approx 1,4$  vid odränerad analys och  $F_k = 1,1 - 1,2$  vid kombinerad analys, beroende på vad som antas om jordlagrens tjocklek.

I båda dessa beräkningsfall har geometrier och hållfasthetsegenskaper antagits vara som före initialscredet.

I en långsträckt slänt är stabiliteten för jordmassorna i släntens övre del beroende av det stöd de genom samverkan och kraftöverföring får från jordmassorna i släntens undre delar. Också samverkan och kraftöverföring till bredvid liggande jordmassor inverkar. När ett initialscred inträffar i släntens nederdel försvinner detta stöd helt eller delvis och stabiliteten för de ovanliggande massorna försämras. I de fall detta sker hastigt uppstår plötsligt nya topografiska förhållanden där initialscredet lämnar en brant skredkant med inget eller ett kraftigt reducerat stöd för bakomliggande massor. I områden med lös lera brukar detta medföra att nya skred efter en viss fördröjning uppstår i bakkanten och åt sidorna. Beroende på jordens egenskaper och topografin kan skredet sedan ofta successivt, eller i ett enda följskred, äta sig ända bak till fastmarkspartierna.

I det aktuella fallet skedde den inledande utvecklingen mer gradvis. Initialscredet utvecklades långsamt under i huvudsak dränerade förhållanden. De mothållande krafterna reducerades således successivt utan några större topografiska förändringar, men möjligheten att ta upp krafter från ovanliggande partier måste ändå gradvis ha försvunnit allteftersom skredet utvecklats, och massorna kommit i rörelse bort från ovanliggande partier. Detta innebar att hållfastheten i de ovanliggande jordmassorna alltmer måste tagits i anspråk, vilket i sin tur borde resulterat i vissa rörelser och portrycksökningar. Då hållfastheten i ovanliggande jordmassor på detta sätt kommit att överskridas grep skredet bakåt och även de bakom och vid sidan liggande jordmassorna involverades.

Ovanstående utveckling kan schematiskt simuleras genom en beräkning med lamellmetoden. I denna delas den långa glidyten in i ett antal lameller med en lamellgräns i läget för initialscredets bakkant. Kraftjämvikten i jordmassan beräknas sedan varvid också skjuv- och normalkrafter i lamellgränserna erhålls.

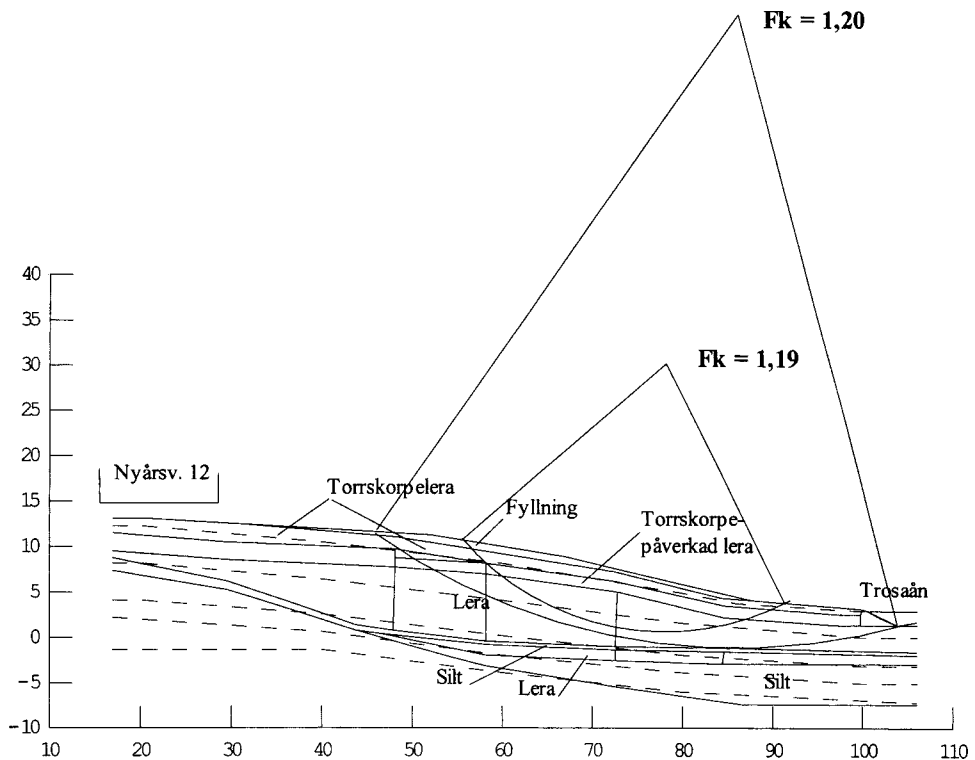
Effekterna av ett långsamt initialscred kan sedan studeras i en ny beräkning där de lameller som ingår i initialscredet tas bort och i den nedre lamellgränsen ersätts med de normal- och skjuvkrafter som framräknats i den tidigare beräkningen. Krafterna i den nedre lamellgränsen kan nu successivt reduceras och det resulterande kraftspelet och stabiliteten för de kvarvarande lamellerna studeras. I denna process kan också inverkan av ett samtidigt stigande portryck modelleras.

För den aktuella slänten visar det sig att en reduktion av krafterna i lamellgränsen med ca 30 % leder till ett följdskred i den ovanliggande jordmassan. Detta sker i huvudsak som ett odränerat brott även om mindre partier kan uppträda dränerat, beroende på vad som antas om portrycksutveckling och dräneringsförhållanden. Det senare påverkar dock inte den erforderliga reduktionen i någon högre grad. Beräkningarna bygger på ett antagande av att skjuvhållfastheten mobiliseras i lika hög grad i alla delar av slänten. Detta påverkar det framräknade initiala spänningstillståndet och därmed den erforderliga reduktionen, men effekten av de ingående mekanismerna kan likväl studeras.

När ett större följdskred på detta vis utlöses under odränerade förhållanden medför detta att hållfastheten utefter glidytan kraftigt reduceras. Eftersom massorna i initialscredet inte kan ta upp några ytterligare krafter kommer de övre massorna att röra sig nedåt med en accelererande rörelse och jorden i partierna nedanför själva skredområdet kommer att få ta upp den samlade energin hos såväl initialscred som följdskred och bromsa upp dessa jordrörelser. Detta medför att såväl jorden i initialscredet som nedanförliggande jordmassor kommer att tryckas ihop och förskjutas. En beräkning av detta förlopp är också möjlig men innefattar så många osäkerheter och antaganden att den inte är meningsfull, och har därför inte utförts här.

### **Kvarstående partier av slänten öster om skredet**

De beräkningar med cirkulärcylindriska glidytor som utförts i en sektion öster om skredet (sektion 14) ger med odränerad analys en säkerhetsfaktor av  $F_c = 1,31$ . Vid beräkningarna med kombinerad analys och en portrycksfördelning enligt Figur 7.4 erhålls en säkerhetsfaktor  $F_k = 1,19$  (Figur 7.8). Denna glidyta är begränsad till en ca 35 m lång sträcka mitt i slänten och slår inte upp i Trosaån. En lång glidyta, ca 55 m, som slår upp i ån har en marginellt högre säkerhetsfaktor ( $F_k = 1,20$ ). Den odränerade hållfastheten är dimensionerande utefter huvuddelen av denna glidyta. Längs ca 15 m närmast ån blir dock den dränerade hållfastheten dimensionerande.



**Figur 7.8. Beräknade farligaste glidytor för sektionen öster om skredet.**

Höjs grundvattentrycken i friktionsjorden generellt med 6 kPa i hela slänten sjunker säkerhetsfaktorn med kombinerad analys till  $F_k = 1,14$ . Lägst säkerhetsfaktor erhålls då för glidytor som slår upp i Trosaån.

Vid beräkning med uppmätta portryck efter skredet, vilka var högre än beräknat i den övre delen av slänten och lägre vid Trosaån, höjs säkerhetsfaktorn för glidytor som slår upp i ån marginellt ( $F_k = 1,23$ ).

## 7.4 JÄMFÖRELSE MED OBSERVERAT SKREDFÖRLOPP

Den 12 maj upptäckte boende sprickor i asfalten i gång- och cykelvägen söder om Trosaån och den 14 maj kunde man konstatera att ett begränsat skred var under utveckling. Detta initialskred omfattade ängsmarken närmast Trosaån samt en gång- och cykelväg och sträckte sig 30 à 35 m uppåt slänten från ån. Följdskedret inträffade natten till den 23 maj. Detta skred sträckte sig 50-70 m från ån och tre hus på Påskvägen följde med i skredmassorna och två bröts mitt itu.

De stabilitetsberäkningar med cirkulärcylindriska glidytor som utförts i sektionen för initialscredet med viss variation i antagen portrycksfördelning, vattennivå i Trosaån och dränerad hållfasthet ger samtliga en beräknad farligaste glidyta som sträcker sig 30 - 35 m från ån, och slår upp i cykelvägen eller strax söder om denna. Detta stämmer väl med det inträffade initialscredet. Det långsamma skredförloppet för initialscredet tyder på att detta skett som ett i huvudsak dränerat brott. Detta styrks också av beräkningarna, vilka visar att brottet för den beräknade farligaste glidytan i stort borde ske dränerat.

Dagarna efter initialscredet observerades att rörelserna i skredet fortsatte och att rörelser pågick mellan skredets bakkant och Påskvägen 4. Dessutom konstaterades att portrycken ökade bakom initialscredet.

De beräkningar av långa glidytor som utförts visar att säkerhetsfaktorn för dessa var högre än för glidytan i initialscredet och att den inte var lika känslig för förändringar i portryck och vattenstånd. Beräkningarna visar också att de farligaste långa glidytorerna slår upp vid villorna på Påskvägen vilket motsvarar följdskredets utveckling. Erfarenheten från fall där ett initialscred inträffar i den nedre delen av en långsträckt slänt med lös lera visar att detta ofta resulterar i bakåt- och sidogripande följdskred som sträcker sig bort mot partier med fastmark. Så skedde också i detta fall, även om det långsamma och till synes dränerade initialscredet gav en ovanligt lång förvarning om att något var på väg att hända. Den bakåtgröpande följdskredprocessen är förklarlig och kan i princip beräknas genom en enkel modellering med Janbus lamellmetod. Följdskredet torde i huvudsak ha inträffat under odränerade förhållanden, även om en viss portrycksgenerering vid spänningsomlagring och begynnande kryprörelser, samt möjligen också förändringar i dräneringsförhållandena, kan ha spelat en viss roll. Detta förklarar att det senare skredförloppet blev desto hastigare och att skredmassorna fick en sådan fart att de passiva massorna vid släntfoten förskjöts en relativt lång sträcka innan skredet bromsades upp.

## Kapitel 8.

# Slutsatser och rekommendationer

### 8.1 DISKUSSION KRING SKREDETS ORSAKER

#### Förutsättningar för skred

Skredområdet i Vagnhärad utgjordes av en långsträckt slänt med lös lera och med en relativt brant lutning, (ca 1:5), som sluttade mot ett vattendrag. Bakom de lertäckta partierna fanns topografiskt högre belägna partier som utgjorde infiltrationsområden. Flera av de kriterier som var för sig, och speciellt i kombination, utgör indikationer på förutsättningar för skred fanns således.

De geotekniska och hydrogeologiska undersökningarna visade att leran i slänten underlagrades av ett friktionsjordlager, som utgjorde ett slutet grundvattenmagasin. Till detta magasin infiltrerades vatten från de högre markpartier som inte var täckta av lera. Vattnet strömmade genom friktionsjorden ned mot dalgångens mitt och följde sedan dalgången nedströms tills det nådde ett område där leran ovanpå friktionsjorden eroderats bort i åfåran och kontakt nåddes med vattnet i ån. I skredområdet och närmast kringliggande områden låg leran, bortsett från höjdpartierna, som ett tätt lock ovanpå friktionsjorden. Detta skapade höga vattentryck i friktionsjorden, och i släntens nedre delar var vattentrycken artesiska.

Slänten har skapats genom en geologisk process där lösa sediment avsatts på den sluttande bergytan under den tid området eller delar därav befann sig under havsytans nivå. Området vid släntens nedre del kan antas ha varit i det närmaste plant vid den tidpunkt då denna del på grund av landhöjningen kom över havsytan. Den successiva erosionen i och vid Trosaån och småskred i åkanterna har sedan minskat lermäktigheten och ökat släntlutningen inom detta parti. Inverkan av de artesiska trycken i bottenlagren med friktionsjord har därmed också ökat. Den pågående geologiska processen har således medfört att stabiliteten för området långsamt försämrats. På senare tid har dessutom mindre effekter från mänskliga ingrepp som belastningar från uppfyllnader, inverkan på de hydrologiska förutsättningarna från ledningar och ledningsgravar m.m tillkommit.

## **Tidigare observationer**

Som ovan nämnts torde ett flertal lokala småskred ha inträffat vid åkanten under tidigare perioder. Efter att området bebyggs har ett större skred inträffat 1982 och efter att det parti av slänten som då involverades hade stabiliserats har observationer av rörelser och sprickbildningar gjorts i angränsande partier. Vid ett par tillfällen har geotekniker tillkallats och det har då konstaterats att observationerna tytt på pågående rörelser och förslag till kontrollprogram har upprättats. Något sådant har dock inte genomförts. Först vid den tidpunkt strax före skredet, då det klart kunde konstateras att stora markrörelser pågick, påbörjades mer omfattande observationer och undersökningar.

## **Geologisk och hydrogeologisk modellering**

Den nu gjorda utredningen visar på betydelsen av att skapa goda modeller för, dels en slänts geologiska utveckling och spänningshistoria, dels dess geohydrologiska förhållanden så att resultaten från de gjorda mätningarna och observationerna kan utnyttjas på bästa sätt. Den första modellen behövs för förståelsen av de hållfasthetsegenskaper som de olika jordmaterialen uppvisar och hur dessa varierar inom olika partier av slänten och den senare modellen behövs för att man skall kunna förstå hur grundvattentrycken i olika akvifärer skapas och varierar under olika förhållanden.

## **Bestämning av hållfasthetsegenskaper**

De bestämningar av skjuvhållfastheten med olika metoder och den jämförelse med empirisk erfarenhet som gjorts, visar på betydelsen av att en värdering görs av de olika metodernas tillämplighet i den aktuella jorden och de olika mätvärdenas relevans. Det i lös lera normalt använda vingförsöket kan ge varierande resultat i siltskiktad jord, varvid allför höga hållfasthetsvärden ofta kan erhållas då andelen siltskikt är hög, medan endast enstaka och lösa siltskikt på grund av störningseffekter ofta kan medföra för låga värden. Det också vanligen använda fallkonförsöket är inte tillförlitligt i denna typ av jord. I detta fall gav försöket generellt lägre värden på grund av att de upptagna jordproverna var mer störda än vad som är normalt för homogen lera. Enstaka för höga värden på grund av att provningen kom att utföras i fastare siltskikt erhöles också. Det fordrades således att kompletterande provningar utfördes med CRS-försök och direkta skjuförsök och att en jämförelse gjordes med vad som empiriskt kunde förväntas utifrån områdets geologiska historia, för att en klar och tillförlitlig bild av skjuvhållfastheten och dess variation skulle erhållas. Denna bild kunde också styrkas och kompletteras med hjälp av resultaten från CPT-sonderingar som

utförts med högsta möjliga noggrannhetsklass. De dränerade skjuvhållfasthetsparametrarna kunde väljas ur empirisk erfarenhet efter att dessa värden verifierats genom ett mindre antal triaxialförsök. Lerans anisotropa hållfasthetsegenskaper kunde också bestämmas genom triaxialförsök, men var i detta fall av underordnad betydelse.

## Grundvattentryck

De mätningar som gjorts efter skredet tyder på artesiska grundvattentryck i friktionsjorden med en trycknivå som ligger 2-3 m över ursprunglig markyta nere vid ån. Liknande resultat erhöles vid mätningar efter skredet 1982 och motsvarande tryck har också uppmätts i de undersökningar av stabiliteten längre ned i Trosaåns dalgång som startades en tid efter det senast inträffade skredet. Hur höga portrycken kan ha varit i släntens övre del under tidigare perioder med höga vattentryck är svårare att fastställa eftersom inga mätningar utförts här före skredet. Innan några mätningar utförts, utgår man i områden med motsvarande topografi och jordlagerförhållanden normalt från ett antagande om att grundvattenmagasinen i den underliggande friktionsjorden vid tidpunkter för kraftig vattentillförsel, i form av nederbörd eller snösmältning, fylls på och bräddar med en nivå strax under markytan i den övre delen av slänten. Efterföljande mätningar kan sedan modifiera detta, men de prognosticerade högsta portrycken ligger ofta i samma nivå.

Om grundvattenmagasinen i släntens överdel varit helt fyllda av naturliga orsaker vid tidpunkten för skredet är osäkert. Den hydrologiska situationen var då inte uppenbart extrem men under maj månad föll under en kortare period en kraftig nederbörd på 60 mm, vilket är ovanligt under denna tid på året. Grundvattennivån var högre än normalt för den aktuella perioden, som i denna region är den tid på året då de högsta grundvattennivåerna inträffar. Under normala förhållanden skulle grundvattennivåerna i området börja sjunka under maj månad, men detta år låg de kvar på höga värden och en mindre ökning kunde registreras. En ytterligare ökning eller sänkning under kort tid kan ha missats eftersom registreringen av grundvattennivåerna i SGU:s grundvattennät endast görs var 14:e dag.

Några dagar efter skredet upptäcktes en vattenläcka i en fastighet belägen inom området bakom skredet. Om och i vilken omfattning denna läcka existerat före skredet är inte klarlagt. En möjlig inverkan av en sådan vattenläcka är av stort principiellt intresse och har därför studerats och simulerats med olika metoder. Resultaten från modelleringarna av ett eventuellt lokalt vatteninflöde i området

bakom skredet visade att de höga vattentrycken i släntens nedre delar inte i någon större grad skulle kunna ha orsakats av detta. Under förutsättning av att det övre grundvattenmagasinet inte redan var helt fyllt skulle dock en stor sådan vattenläcka kunna orsaka en höjning av vattentrycken, främst lokalt runt läckan och i släntens övre delar. Beräkningar har också utförts för ett värsta scenario med antagande av direkt kommunikation mellan en vattenläcka och en punkt i det undre friktionsjordslagret längre ner i slänten genom ett permeabelt slag i berggrunden. Under dessa förhållanden skulle en stor vattenläcka kunna orsaka påtagligt förhöjda grundvattentryck också i släntens nedre delar. Det finns dock inga observationer inom området som tyder på att sådana sprickor skulle förekomma.

Resultaten från de utförda portrycksobservationerna tyder inte heller på att någon sådan förbindelse skulle existera och visar sammantaget med modelleringarna på att en eventuell vattenläcka endast i begränsad omfattning kan ha påverkat portryckssituationen i de delar av slänten som är av primärt intresse för skredutvecklingen. Existensen av en vattenläcka har i det aktuella fallet därför främst betydelse för frågan om varför skredet gick just vid det aktuella tillfället och i mindre grad för de allmänna stabilitetsförhållandena. Denna slutsats kan dock inte tillämpas generellt på alla slänter, såvida inte de antaganden om högsta grundvattentryck som gjorts ger marginaler för extratillskott av detta slag.

### **Beräknad stabilitet**

Stabilitetsberäkningarna visar att med de valda hållfasthetsvärden som erhållits efter att de utförda undersökningarna sammanställts och värderats erhålls vid odränerad analys en säkerhetsfaktor av  $F_c = 1,3$  såväl i sektionen för initialskredet som i den kvarstående sektionen närmast öster därom. Redan detta är på undre gränsen till vad som kan accepteras inom ett bebyggt område. Den odränerade analysen tar ingen hänsyn till portrycksförhållandena. Kombinerade analyser, som beaktar dessa, ger säkerhetsfaktorer  $F_k$  mellan 0,9 och 1,1 i sektionen för initialskredet när de portrycksfördelningar som modelleras med antagande av artesiska tryck av 2-3 m i den underliggande friktionsjorden och med stöd av övriga portrycksobservationer antas. Med de grundvattentryck som sannolikt rådde nere vid Trosaån under perioder med höga grundvattentryck blir säkerhetsfaktorn således nära 1,0 och marginalen mot brott är liten. De beräknade farligaste glidytorerna sammanfaller väl med det observerade initialskredets omfattning.

Det är också skillnader i portryckssituationen som främst skiljer det parti i slänten där initialskredet gick från de kvarstående partierna öster därom. De något lägre portrycken i de kvarstående partierna medför att den beräknade säkerhetsfaktorn med kombinerad analys här som lägst blir  $F_k = 1,2$ .

Beräkningarna har också visat att portryckssituationen nere vid ån är avgörande för släntens stabilitet. En höjning av grundvattennivån i den underliggande friktionsjorden under ån med ytterligare 1 meter sänker den beräknade säkerhetsfaktorn med ca 20 %. Däremot är porvattentrycken i den översta delen av slänten inte alls lika avgörande. En höjning av grundvattennivån i friktionsjorden i detta parti med 1 meter ger endast ca 2 % lägre säkerhetsfaktor. Andra faktorer som möjliga vattenståndsförändringar i ån och eventuell erosion eller mindre skred i åkanten skulle ha en större inverkan. En sänkning av vattenytan i ån med 0,5 meter ger ca 10 % lägre säkerhetsfaktor och en mindre erosion kan reducera den ytterligare några procent.

De fyllningar som utförts i släntens nedre del, norr om Påskvägen, behöver däremot inte medföra mer än marginellt lägre stabilitet. Detta beror dock främst på om de medfört någon förändring i portrycksnivåerna eller ej.

Stabiliteten hos jordmassorna i de övre partierna av en slänt är beroende av det stöd de får av jordmassorna i de lägre liggande partierna. De utförda beräkningarna visar att när det initiella skredet inträffade vid släntfoten, så räckte det med en mindre reduktion av förmågan hos skredmassorna att hålla emot påhängskrafterna från de ovanliggande jordmassorna, för att skredet skulle kunna fortsätta och utbreda sig till den omfattning som slutligen blev fallet.

## **8.2 SLUTSATSER**

Utredningen av orsakerna till skredet i Ödesby, Vagnhärad, har lett till två viktiga slutsatser. Den ena rör de geotekniska orsakerna till skredet och den andra handlar om i viss mån relativt nyvunnen kunskap, som måste beaktas vid stabilitetsutredningar i denna typ av leror. Dessa slutsatser behandlas var för sig nedan.

### **Orsaker till skredet**

Den noggranna genomgången och kartläggningen av områdets geotekniska egenskaper såsom, jordlagerföljd, hållfastheter och por- och grundvattentryck, har lett till beräkningsresultat med säkerhetsfaktorer nära 1,0 för delar av det

aktuella området. Då har särskilt hållfastheterna och portrycken studerats i detalj och beräkningar har utförts med kombinerad analys. Ett flertal olika metoder för bestämning av hållfastheten har använts och stor möda har ägnats åt att förstå hur dalgången bildats och hur lerans belastningshistoria ser ut. Beträffande portrycken har de uppmätta artesiska trycken i dalgångens mitt, tillsammans med antaganden om relativt välfyllda slutna grundvattenmagasin, resulterat i en bild av grundvattensituationen som stämmer relativt väl med de tryck som uppmätts.

Därmed kan det fastslås att slänten var hårt ansträngd och att även mycket små förändringar av förutsättningarna kunde medföra att slänten skredade. Med hänsyn till ovanstående kan således följande konstateras:

Huvudorsaken till skredet var att slänten, som var en brant lerslänt med ganska låg hållfasthet och artesiska portryck, hade en säkerhetsfaktor nära 1,0. De möjliga utlösande faktorerna, som medförde att skredet inträffade vid just detta tillfälle, kan ha varit att:

- för årstiden kraftiga regn höjde portrycken
- erosion och små lokala skred skedde vid åkanten
- stora och återkommande markrörelser reducerade hållfastheten
- vattenståndet i Trosaån var lågt under en period
- kraftiga regn i kombination med vattenläcka höjde portrycken

Det troliga är att en kombination av två eller flera av ovanstående möjliga faktorer utlöste skredet.

Det centrala i sammanhanget är dock inte de eventuella utlösande faktorerna, utan att en slänt med så låg säkerhetsfaktor var bebyggd, och varför detta inte upptäckts tidigare. Det är då viktigt att beakta att relativt omfattande forskning och utveckling bedrivits inom området släntstabilitet under de senaste decennierna, vilket bl a lett till nya analysmetoder. Dessutom har metodiken för och kraven på stabilitetsutredningar påtagligt förbättrats och skärpts. Detta finns utförligt redovisat i IVA Skredkommissionens rapport 3:95 ”Anvisningar för släntstabilitetsutredningar”. Hade dessa anvisningar funnits då utbyggnaden projekterats och man följt dem, hade slänten inte upplåtits för bebyggelse, jämför *Bilaga 8*.

## **Att tänka på vid analys av stabilitet i lerområden av denna karaktär**

### **■ Hållfasthet**

Det som är speciellt med denna och många liknande dalgångar i östra Sverige är den varviga leran, där silt/sandskikt finns inbäddade mellan varv av lera med lågt siltinnehåll. Detta ställer stora krav vid bestämningen av lerans hållfasthet, där vissa metoder kan ge vilseledande resultat. Hållfastheten bör därför utvärderas med för jordarten lämpliga metoder och tillgänglig empiri för lerans odränerade hållfasthet bör utnyttjas. Det är således mycket viktigt att lerans spänningshistoria kartläggs och att dalgångens bildningssätt utreds.

Ofta erhålls relativt stor spridning vid hållfasthetsbestämning med vingförsök, vilket kan orsakas av andelen mer eller mindre fasta lager av silt/sand. Denna spridning speglar normalt inte lerans hållfasthetsegenskaper, varför försöken bör kompletteras med direkta skjuvförsök och eventuellt med triaxialförsök. Konförsöken i laboratoriet ger ofta låga resultat, beroende på störning vid provtagningen. Alla dessa olika resultat bör sammanställas och efter viktning och tillsammans med den empiriska erfarenheten utgöra underlag för val av den karakteristiska hållfastheten, som skall användas vid beräkningarna. Hållfasthetsbilden bör också kompletteras med resultat från tolkade CPT-sonderingar med högsta möjliga noggrannhetsklass.

### **■ Portryck**

Om beräkningarna visar att den dränerande hållfastheten helt eller delvis kan vara dimensionerande, är det viktigt att göra mätningar av framförallt grundvattentrycken i de slutna grundvattenmagasinen, samt att göra prognoser för vad de rimligen kan ha för högsta värden då grundvattenmagasinen fylls. Dessa värden skall sedan utgöra grunden för beräkning/bedömning av portryckfördelningen i jordprofilen i övrigt.

### **■ Beräkningar**

Beräkningar skall genomföras med såväl odränerad som kombinerad analys.

## **8.3 REKOMMENDATIONER**

### **Allmänt**

De senaste decenniernas utveckling inom området släntstabilitetsanalys har medfört större möjligheter att identifiera de slänter där stabiliteten är otillfredsställande. Det är också författarnas bestämda uppfattning att om stabilitetsutredningar utförs i enlighet med Skredkommissionens anvisningar så kommer slän-

ter med otillfredsställande stabilitet för exploatering att identifieras. Samtidigt kommer slänter inte heller att klassas som olämpliga att bebygga ur stabilitets-synpunkt om så inte är fallet.

Det skall också påpekas att grundtanken i Skredkommissionens anvisningar är att, med så små insatser som möjligt sortera undan de slänter som har tillfredsställande stabilitet och att identifiera de slänter som inte har det. I det senare fallet intensifieras undersökningarna och ett underlag som leder till ett tekniskt och ekonomiskt riktigt beslut tas fram.

Skredkommissionens anvisningar kom dock först år 1995 och inte ens därefter är det säkert att de har tillämpats fullt ut i alla utredningar. Flertalet av de utbyggnader i sluttande lerterräng som utförts i Sverige bygger således på beslutsunderlag i form av geotekniska utredningar som inte uppfyller Skredkommissionens kvalitetskrav. Konsekvenserna av detta bör leda till:

- Kontroll/översyn av tidigare utförda utredningar.
- Krav på kompetensutveckling.

### **Kontroll/översyn av tidigare stabilitetsutredningar**

En betydande risk föreligger således att det finns andra bebyggda slänter som, baserat på tidigare och med dagens mått i många avseenden otillräckliga undersökningar, klassats som tillfredsställande stabila men som i verkligheten kan ha en klart otillfredsställande stabilitet. Det finns därför anledning att se över och komplettera dessa undersökningar, främst genom att:

- Jämföra valda hållfastheter med befintlig empiri.
- Kontrollera eventuella höga portryck och artesiska grundvattentryck.
- Beräkna stabiliteten med kombinerad analys.

Dessutom bör man, speciellt innan denna översyn hunnit göras, lägga större vikt vid observationer i anslutning till slänter, som skulle kunna vara indikationer på begynnande rörelser.

En översiktlig kartering av stabilitetsförhållandena i bebyggda områden inom landet, med syfte att identifiera områden där stabiliteten inte är tillräckligt utredd, pågår i Räddningsverkets regi. Karteringen utförs kommunvis och överlämnas sedan av Räddningsverket till den berörda kommunen. Det är av största vikt att stabilitetsutredningar skyndsamt genomförs inom sådana områden för

att i detalj klarlägga förhållandena och att vid behov vidta erforderliga förebyggande åtgärder.

### **Kompetensutveckling**

Behovet av en kompetensutveckling gäller såväl beställare som utförare. Förutsättningarna för att kunna genomföra en sådan är mycket goda, eftersom i princip all nödvändig information finns sammanställd i IVA Skredkommissionens anvisningar. Det är dock nödvändigt att beställare av stabilitetsutredningar med skärpa kräver och följer upp att dessa anvisningar följs. Samtidigt måste utförarna/konsulterna se till att all involverad personal har den kunskap och de insikter som krävs för att kunna genomföra en utredning i enlighet med de steg och med den kvalitet som anvisningarna föreskriver. Upphandling av denna typ av utredningar måste ske mer med tonvikt på kvalitet och kompetens än med hänsyn till kostnader.



# Referenser

- Brunnberg, L, (1995).** Clay-varve chronology and deglaciation during the Younger Dryas and Preboreal in the easternmost part of the Middle Swedish Ice Marginal Zone. Quaternaria Ser.A, No.2. Department of Quaternary Research, Stockholm University. Stockholm.
- Geo-Slope International Ltd. (1994).** SEEP/W for finite element seepage analysis, version 3. Calagary, Canada.
- Geo-Slope International Ltd. (1995).** SLOPE/W for slope stability analysis, version 3. Calgary, Canada.
- Ignatius, H, Axberg, S, Niemistö, L & Winterhater, B, (1981).** Quaternary history of the Baltic Sea. I Voipio, A: The Baltic Sea. Elsevier Oceanography Series, vol 30, pp 54-105. Elsevier, Amsterdam.
- IVA Skredkommissionen (1995).** Anvisningar för släntstabilitetsutredningar. Rapport 3:95. Linköping.
- K-Konsult, (1972-12-08)** litt. 85198 028 230, Redogörelse för översiktlig geoteknisk undersökning för bebyggelse inom fastigheten Ödesby 1:2, 1:3, m fl, Vagnhärad, Södermanlands län.
- K-Konsult, (1973-06-14)** litt. 27 053126 23, Redogörelse för översiktlig geoteknisk undersökning inom fastigheterna Kroka, Husby södra, Ödesby m fl, Vagnhärad kommun.
- K-Konsult, (1974-05-29)** litt. 85 198 039 23, Redogörelse över geoteknisk undersökning för planerad gång- och cykelbro, vägar och byggnader inom område Ödesby Etapp I i Vagnhärad, Nyköpings kommun.
- Larsson, R., Bergdahl, U. och Eriksson, L. (1984).** Utvärdering av skjuvhållfasthet i kohesionsjord. Statens geotekniska institut. Information 3. Linköping.
- Persson, C, (1975).** Beskrivning till jordartskartan Nyköping NO. Sveriges geologiska undersökning, Ae 21. Stockholm.

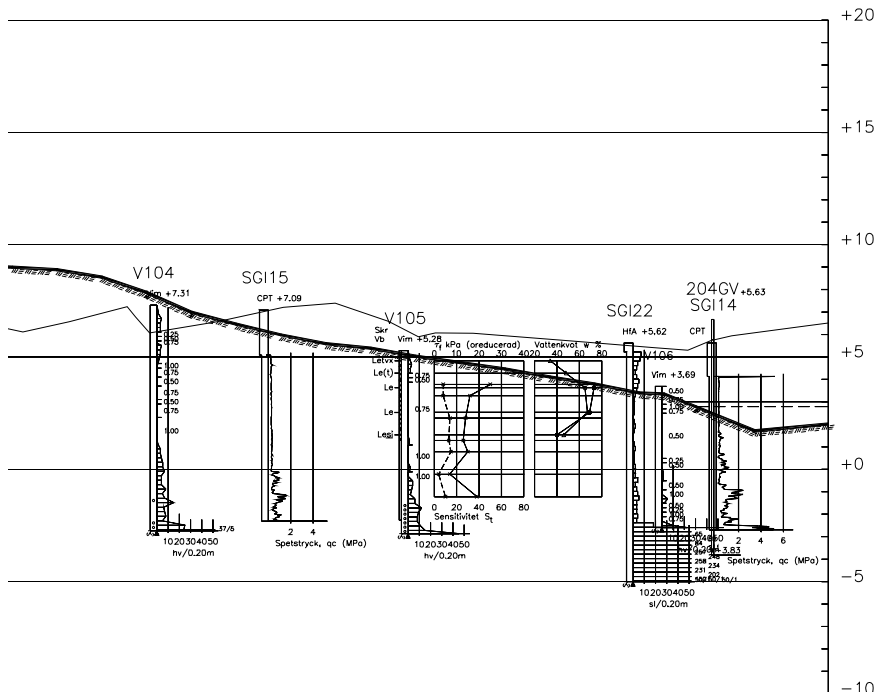
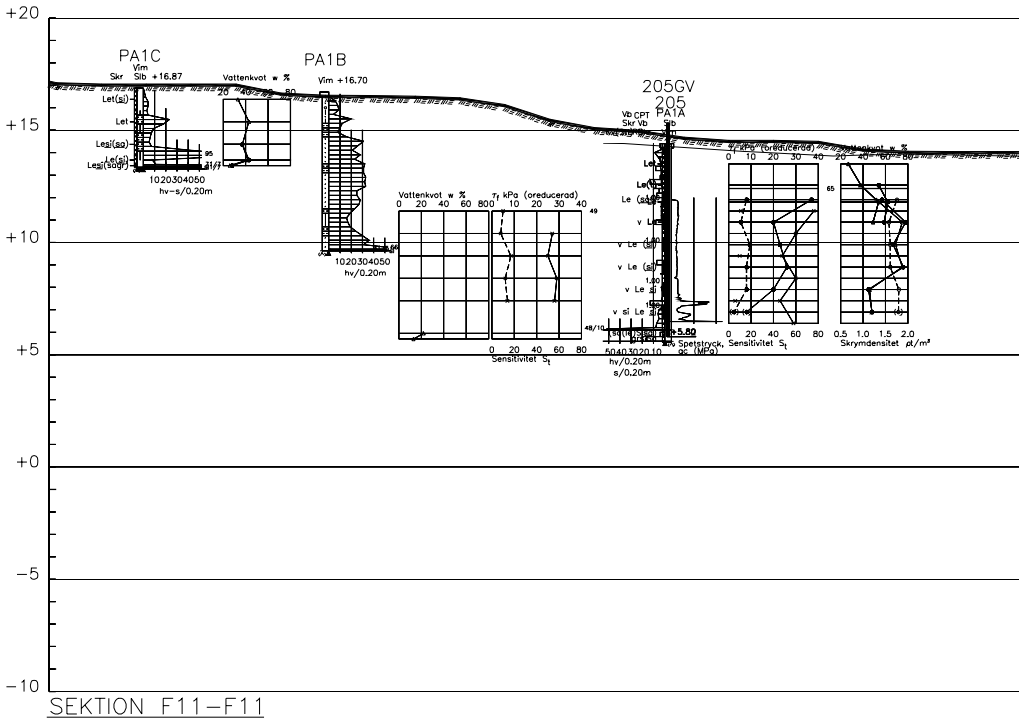
- Persson, C, (1979).** Shore displacement during Ancylus time in the Rejmyra area, south central Sweden. Sveriges geologiska undersökning, C 755. Uppsala.
- Påsse, T, (1997)-** A mathematical model of past, present and future shore level displacement in Fennoscandia. SKB Technical report 97-28. Stockholm.
- Statens geotekniska institut, (1997-08-18)** litt. 2-9705-268. Trosa kommun, Skredet i Ödesby Vagnhärad, Sammanställning av enkätsvar.
- Statens haverikommission, (1988).** Rapport O 1998:1. Jordskred den 23 maj 1997 i Vagnhärad, D län. Ärende O-05/97.
- Stålhös, G, (1975)** Beskrivning till berggrundskartan Nyköping NO. Sveriges geologiska undersökning, Af 115. Stockholm.
- VBB VIAK, (1997-06-25)** litt. 11997034, Trosa kommun, Vagnhärad – Ödesby, Översiktlig bedömning av grundvattenförhållandena.
- VIAK AB, (1982-06-22)** litt. 6216.1604, Nyköpings kommun, Vagnhärad, Skredet i Ödesby, Stabilitetsundersökning.
- VIAK AB, (1982-09-28)** litt. 4916.4118, Skredet i Ödesby, Skredorsaker, Vagnhärad,.
- VIAK AB, (1988-05-02)** litt. 6216.86.2003, Inventering av stabilitetsförhållandena utmed Trosån i Vagnhärad, Nyköping kommun.

# Bilagor





# BILAGA 2 - Sektion 11

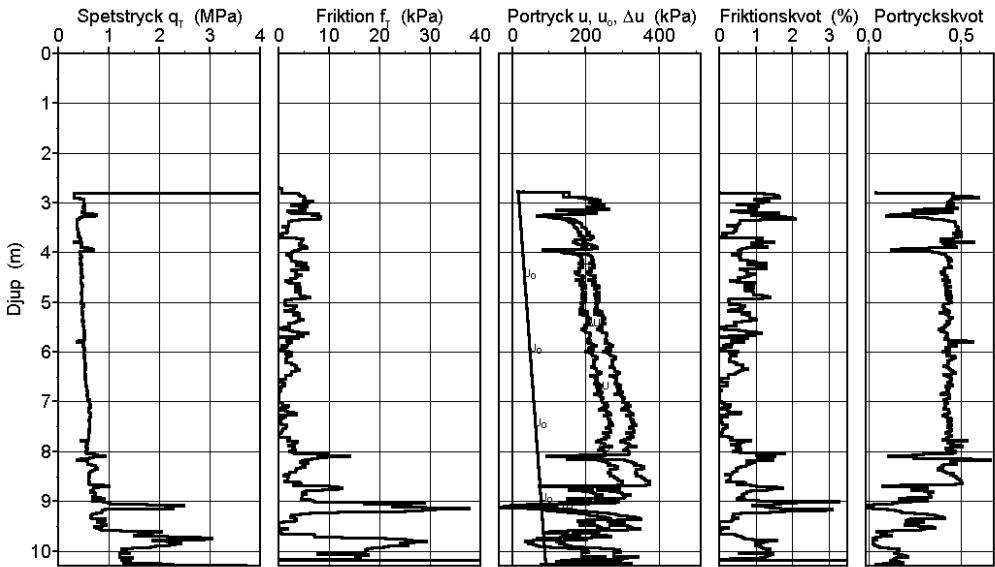




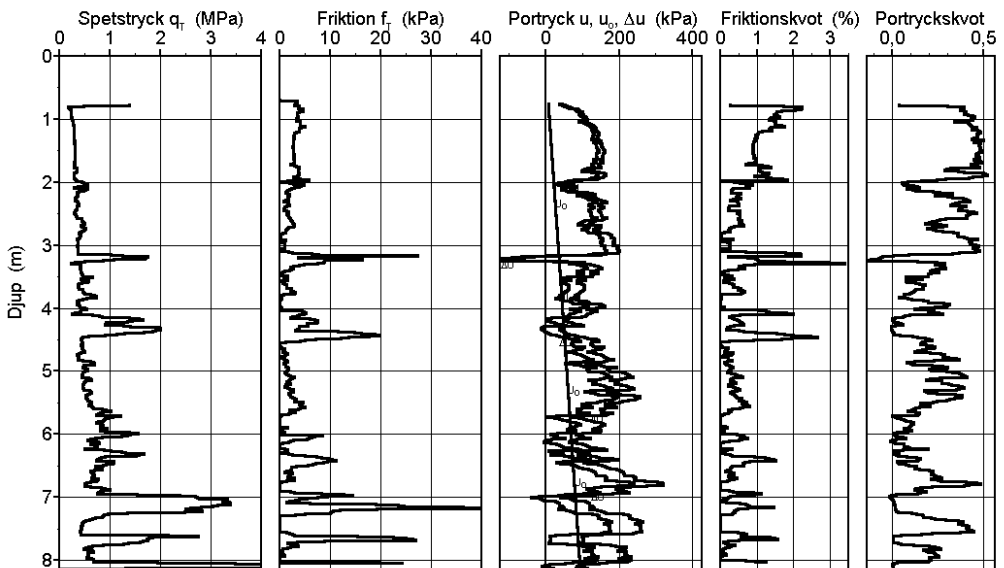
### BILAGA 3

Exempel på resultat från CPT-sondering. Överst en sondering (225) med relativt homogen lera ner till 8 m djup och därunder skiktad (lera/silt). Nederst en sondering (SGI 21) där jorden är mer skiktad.

#### Punkt 225



#### Punkt SGI 21



Resultat av laboratorieundersökningar, utförda av SGI, i punkterna 225 och SGI 21.

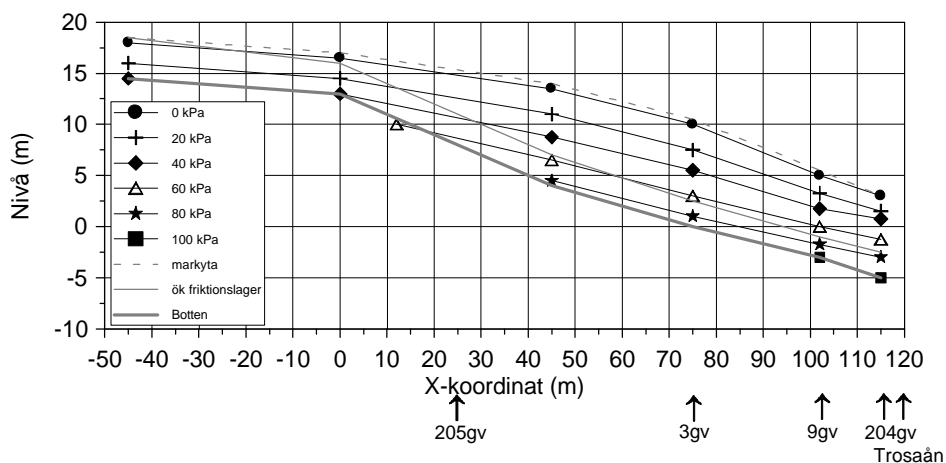
Borr hål/ Djup	Benämning enligt 1981 års system	Densitet $\rho$ t/m <sup>3</sup>	Vatten- kvot w %	Kon- flyt- gräns w <sub>L</sub> %	Sen- siti- vit S <sub>t</sub>	Skjuv- håll- fasthet $\tau$ kPa	Jordarts- benämning
<b>225</b>							
2	Brungrå torrskorpelera, rostfläckig	1,86	38	54	-	(115)*	Let *)Stor spridning
3	Brungrå lera, rostfläckig	1,71	51	49	14	16	Le
4	Grå lera med tunna silt- och finsandskikt	1,67	60	58	13	15	Le (si) (saf)
5	Grå, varvig lera med enstaka, tunna siltskikt	1,58	76	70	18	15	v Le (si)
6	Grå varvig lera med tunna siltskikt	1,59	76	71	19	19	v Le (si)
7	Grå varvig lera med tunna siltskikt	1,61	60	55	21	20	v Le (si)
8	Grå, varvig lera och silt	1,83	40	38	22	14	v Le Si
9	(Grå, varvig silt med ler- och finsandskikt)	1,92	(31)*	27	(27)	(15)*	(v Si le saf) *)Liten prov- mängd, stor sprid- ning, stört prov
<b>SGI 21</b>							
3	Grå, siltig lera med tunna siltskikt	1,73	35	30	(10)	(5,2)	si Le (si) Fritt vatten, stört prov
4	Grå, varvig lera med täta siltskikt	1,76	52	44	(46)	(23)	v Le si
5	Grå, varvig lerig silt och silt med lerskikt och grusinslag	1,93	37	28	(40)	(16)	v le Si, Si le
6	Grå, varvig silt med täta lerskikt och ett finsandskikt	1,90	47	45	(26)	(15)	v Si le saf
7	Grå, varvig silt med täta lerskikt och finsandskikt	1,97	30	27	(42)	(20)	v Si le saf Fritt vatten, stört prov

## BILAGA 4

### Resultat från tryckhöjdsberäkningarna med SEEP/W

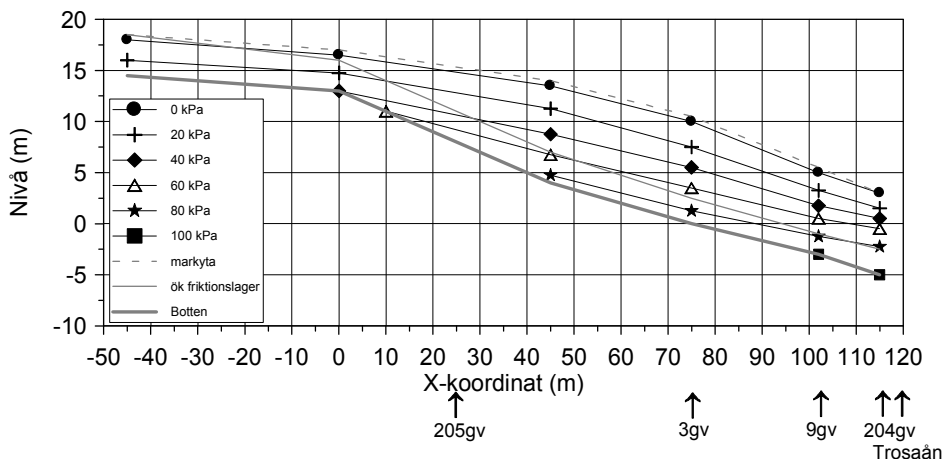
Beräkningarna har som tidigare beskrivits utförts med antagande om hydrostatiska förhållanden i den övre vertikala randen med grundvattenytan belägen 0,5-1 m under markytan. I den vertikala randen norr om Trosaån har portrycket varierats mellan hydrostatiskt till artesiska tryck på 0,5 m och 1,5 m på djupet 8,5 m under markytan. I den horisontella randen längs markytan har en grundvattenyta lagts in 0,5-1 m under markytan.

Då ett hydrostatiskt tryck har antagits vid den nedre randen visar beräkningsresultaten på ett artesiskt tryck i friktionsjordslagret motsvarande en tryckhöjd 2,2 m respektive 1 m över markytan på avstånden 6 m (204 gv) respektive 15 m (9 gv) upp i slänten från åkanten. Vid 3 gv 40 m från åkanten motsvarar det beräknade trycket i friktionsjorden en grundvattenyta 1,2 m under markytan, se *Figur B4:1*.



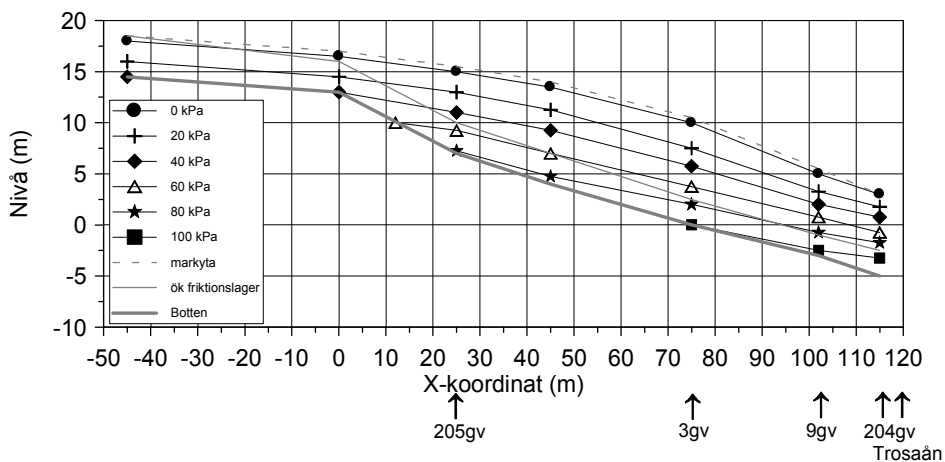
**Figur B4:1. Resultat från beräkning med antagande av hydrostatiskt tryck i friktionsjordslagret vid den nedre randen.**

Då ett artesiskt tryck på 0,5 m har antagits vid den nedre randen har portrycksnivåerna i friktionsjordslagret höjts till ca 2,5 m respektive ca 1,5 m över markytan på avstånden 6 m respektive 15 m upp i slänten från åkanten. Vid 3 gv 40 m från åkanten har portrycket i friktionsjordslagret höjts till att motsvara en grundvattenyta 1 m under markytan, se *Figur B4:2*.



**Figur B4:2. Resultat från beräkning med antagande av artesiskt tryck på 0,5 m i friktionsjordslagret vid den nedre randen.**

Då ett artesiskt tryck på 1,5 m har antagits vid den nedre randen har portrycksnivåerna i friktionsjordslagret höjts till ca 3,5 m respektive ca 2 m över markytan på avstånden 6 m respektive 15 m upp i slänten från åkanten. Vid 3 gv 40 m från åkanten har portrycket i friktionsjordslagret höjts till att motsvara en grundvattenyta 0,5 m under markytan, se *Figur B4:3*.



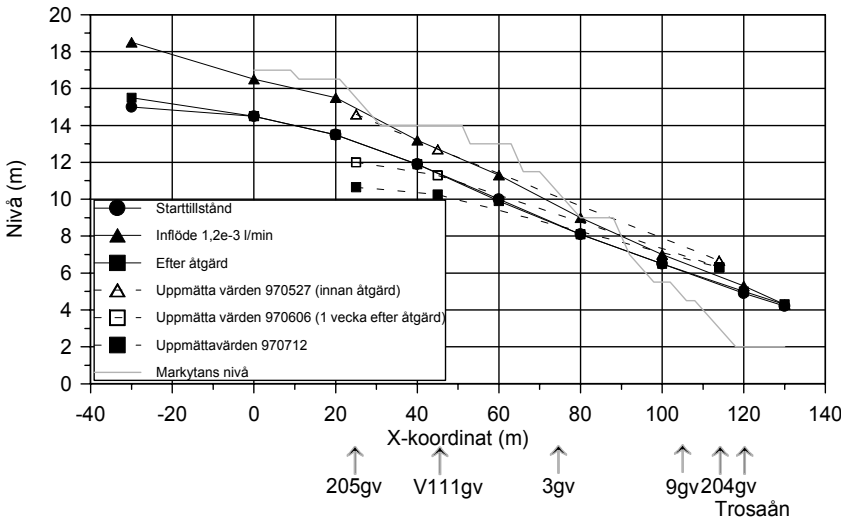
**Figur B4:3. Resultat från beräkning med antagande av artesiskt tryck på 1,5 m i friktionsjordslagret vid den nedre randen.**

För att studera effekterna av olika permeabilitet och därmed indirekt olika tjocklek hos friktionsjordslagret har beräkningar utförts med permeabiliteten  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s som grundvärde och därefter har permeabiliteten ökats 100 gånger till  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s. Beräkningar har utförts med antaganden om hydrostatiska förhållanden i ränderna. Resultatet visar att portrycksnivåerna närmast Trosaån höjs med 0,3 m jämfört med grundberäkningen som redovisas i *Figur B4:1*. Motsvarande beräkningar har också utförts med antagande om ett artesiskt tryck på 1,5 m i den nedre randen. Resultatet blir även då en portryckshöjning närmast Trosaån på ca 0,3 m jämfört med grundberäkningen som visas i *Figur B4:3*. Detta tyder på att friktionsjordslagrets tjocklek, som varit svårt att få ett exakt mått på, har en begränsad inverkan på beräkningsresultaten.

## BILAGA 5

### Resultat från beräkningarna med SEEP/W av inverkan av en vattenläcka

SEEP/W-beräkningar av inverkan av en vattenläcka har utförts under antagandena att portrycken maximalt kan stiga till en nivå som motsvarar markytan och att jorden är helt styv, dvs med en magasinskoefficient lika med noll. I de stationära beräkningarna har antagits att grundvattenytan låg ca 3,5 m respektive 2 m under markytan i infiltrationsområdet, dvs grundvattenmagasinet antogs vara långt ifrån fyllt i sin övre del. Beräkningarna har utförts med antagande av ett hydrostatiskt tryck i den nedre randen. Vid ett flöde i en punkt motsvarande  $2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$  per m eller  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ l}/\text{min}$  per m steg grundvattenytan till markytan i de semi-transienta beräkningarna, och ytterligare vattentillförsel skulle avgå som ytavrinning. Vid en grundvattenyta i infiltrationsområdet 3,5 m under markytan påverkar en sådan läcka enligt beräkningarna portrycksnivåerna i en punkt belägen vid 3 gv (40 m från Trosaån) med ca 1 m. Vid 9 gv har portrycksökningen klingat av till mindre än 0,5 m. Dessa beräkningar, med antagande om endimensionellt flöde, tyder på att en påtaglig påverkan på portrycksnivåerna av en vattenläcka skulle kunna nå ca 80 m i horisontalled se *Figur B5:1*. Vid en ursprunglig grundvattenyta 2 m under markytan i infiltrationsområdet erhålls en betydligt mindre påverkan.



**Figur B5:1. Resultat från stationära och transienta analyser av en vattenläcka med grundvattenytan 3,5 m under markytan som starttillstånd och ett hydrostatiskt tryck i friktionslagret vid den nedre vertikala randen.**

Mätningar som utfördes av VBB VIAK efter att vattenläckan på Pingstvägen hade åtgärdats visade att portrycken sjönk i de närmaste grundvattenrören (205 gv, 206 gv och V111 gv).

För att simulera en avstängning av ett pågående läckage har SEEP/W-beräkningar utförts med antagande av grundvattenytan 3,5 m respektive 2 m under markytan i infiltrationsområdet. Därefter har en läcka, som medfört att grundvattenytan stigit till markytan vid läckagepunkten, simulerats på samma sätt som beskrivits ovan. Dessa beräkningar har också utförts med antagande av ett hydrostatiskt tryck i friktionsjordslagret vid den nedre vertikala randen. Slutligen har avstängningen simulerats genom att randvillkoret som representerade en läcka förändrats till ett försumbart flöde och beräkningarna har fortsatt tills dess att ingen ytterligare avsänkning av portrycken har noterats, dvs tills dess att ett stationärt tillstånd har uppnåtts.

I *Figur B5:1* kan man se att den avsänkning som erhöles vid beräkningarna för en grundvattenyta i släntens övre del belägen 3,5 m under markytan stämmer relativt väl överens med de observationer som gjordes på platsen strax efter det att läckan hade åtgärdats. Enligt observationerna hade portrycksnivåerna efter en vecka sjunkit ca 2 m i 205 gv och 206 gv och i V111 gv hade de sjunkit något mindre, ca 1,5 m. Beräkningarna ger en avsänkning i motsvarande punkter på 2 m, 2 m respektive 1,4 m. Beräkningen visar att påverkan vid 3 gv är ca 1 m och vid 9 gv och 204 gv är den mindre än 0,5 m.

Beräkningen med en grundvattenyta 2 m under markytan som starttillstånd ger en något mindre avsänkning. I de punkter som motsvarar 205 gv, 206 gv och V111 gv fås en avsänkning på 1 m. Längre ner i slänten, vid 3 gv, 9 gv och 204 gv, fås vid denna beräkning en avsänkning mindre än 0,3 m vid avstängningen.

## BILAGA 6

### Strömningsmodell för ett friktionslager med förhindrad strömning ur lagret

Beteckningar:

L = längdkoordinat utefter släntens längd. (L = 0 vid övre magasinet)

B = ”rörets” bredd (Normalt 1,0 m)

H(L) = friktionslagrets tjocklek (höjd) utefter slänten

h(L) = trycknivån (tryckhöjd)

k(L) = permeabiliteten hos friktionslagret

v(L) = vattenhastighet

q(L) = vattenflöde

Darcys lag ger

$$v(L) = k(L) \cdot \frac{dh(L)}{dL}$$

Som ger vattenflödet

$$q(L) = v(L) \cdot A = k(L) \cdot \frac{dh(L)}{dL} \cdot B \cdot H(L)$$

Eller

$$\frac{dh(L)}{dL} = \frac{q(L)}{k(L) \cdot B \cdot H(L)}$$

Integration över släntens längd ger

$$\Delta h = h_{\text{övre}} - h_{\text{undre}} = \int_{L=0}^{L=L_{\text{slänt}}} \frac{q(L)}{k(L) \cdot B \cdot H(L)} \cdot dL$$

I detta fall antas att friktionslagrets permeabilitet är konstant utefter släntens längd.

Antagande om att inget läckage sker från och till omgivningen (överliggande lera och underliggande berg) utefter ”rörets” längd ger att vattenflödet  $q(L)$  är konstant utefter rörets längd.

Sätt  $k(L) = k$  och  $q(L) = q$

Detta innebär att

$$h_{\text{övre}} - h_{\text{undre}} = \frac{q}{k \cdot B} \int_{L=0}^{L=L_{\text{slänt}}} \frac{1}{H(L)} \cdot dL$$

Eller

$$q = \frac{k \cdot B \cdot (h_{\text{övre}} - h_{\text{undre}})}{\int_{L=0}^{L=L_{\text{slänt}}} \frac{1}{H(L)} \cdot dL}$$

Integration har i detta fall genomförts som en enkel summering av dellängder och genom att anta att friktionslagrets geometri (tjocklek) anges som linjärt varierande mellan punkter (inom dellängden).

Del av integralen under bråkstrecket om tjockleken är konstant blir

$$\int_{L=L_i}^{L=L_{i+1}} \frac{1}{H(L)} \cdot dL = \frac{(L_{i+1} - L_i)}{H_{i+1}}$$

Del av integralen under bråkstrecket om tjockleken mellan två punkter är linjärt variabel blir

$$\int_{L=L_i}^{L=L_{i+1}} \frac{1}{H(L)} \cdot dL = \frac{(L_{i+1} - L_i)}{(H_{i+1} - H_i)} \cdot (\ln(H_{i+1}) - \ln(H_i))$$

Modellen kan enkelt utökas med att ta med inverkan av inflöde och utflöde utefter rörets längd. För ett inflöde/utflöde av  $dq$  i någon punkt  $L = L_1$  utefter rörets längd blir lösningen

$$q = \frac{k \cdot B \cdot (h_{\text{övre}} - h_{\text{undre}}) - \Delta q \cdot \int_{L=L_1}^{L=L_{\text{slänt}}} \frac{1}{H(L)} \cdot dL}{\int_{L=0}^{L=L_{\text{slänt}}} \frac{1}{H(L)} \cdot dL}$$

Modellen kan enkelt utvidgas till att omfatta flera ut- och inflöden utefter rörets längd.

Beräkningarna har genomförts med hjälp av kalkylprogrammet EXCEL.

## BILAGA 7

### Strömningsmodell för en ideal punktkälla (Fullkomlig brunn)

Beteckningar:

- s = avsänkning
- k = friktionslagrets permabilitet
- B = friktionslagrets tjocklek
- T = friktionslagrets transmissivitet  $T = k \cdot B$
- S = friktionslagrets magasinskoefficient
- Q = vattenflödet i brunnen
- t = tiden

Lösningen till ovanstående problem har fått namnet Theis brunnsfunktion.

Avsänkningen blir

$$s = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u)$$

där

$$W(u) = \int_{x=u}^{x=\infty} \frac{e^{-x}}{x} \cdot dx$$

$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t}$$

Brunnsfunktionen har en lösning i form av serieutvecklingen

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \dots$$

Normalt kan man nöja sej med att använda de första sju till åtta termerna i serieutvecklingen.

I detta fall har för fallet  $u < 2$  använts de åtta första termerna och för fallet  $u > 2$  använts en annan närmelösning

$$W(u) = \frac{e^{-u}}{u} \cdot \left( 1 - \frac{0,75}{u} + \frac{0,833}{u^2} - \frac{1,125}{u^3} + \frac{1,7}{u^4} \right)$$

Beräkningarna har genomförts med hjälp av kalyprogrammet EXCEL.

## BILAGA 8

### Beräkning enligt Skredkommissionens anvisningar

Med den skredade slänten i Ödesby som exempel, har Skredkommissionens anvisningar följts för att belysa anvisningarnas tillämpbarhet.

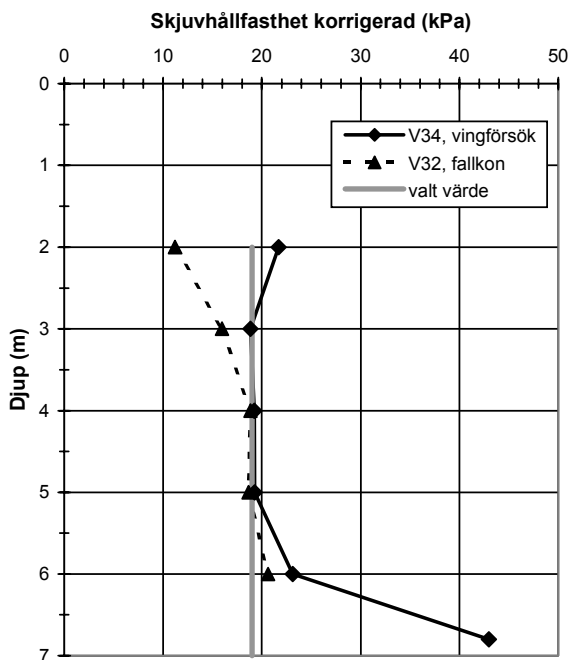
Beräkning av släntens stabilitet i sektionen för initialscredet har därför utförts i ett första steg som en *Överslagsberäkning* baserad på tidigare undersökningar i området närmast initialscredet. Portrycksförhållandena har bedömts utifrån topografiska förhållanden, då inga tidigare mätningar funnits i närheten. I ett andra steg har beräkningar utförts motsvarande en *Detaljerad utredning*. Vid dessa beräkningar har även resultaten från de sonderingar som utfördes 1997 i området närmast initialscredet medtagits, men enbart hållfasthetsbestämningar från fallkonförsök och vingförsök har beaktats. Portrycksförhållandena har bedömts utifrån uppmätta por- och grundvattentryck. Den utredning av stabiliteten som utförts i samband med den tekniskt/vetenskapliga utredningen, där även skjuvförsök och CRS-försök utförts, hänsyn tagits till belastningshistorien och en fördjupad analys utförts av de hydrogeologiska förhållandena, bedöms motsvara det tredje steget, en *Fördjupad utredning*. Släntens och jordlagrens geometri har i samtliga fall antagits i enlighet med de som använts i den tekniskt/vetenskapliga utredningen.

#### Steg I: Överslagsberäkningar

Baserat på undersökningar gjorda 1982 har nedanstående värden använts vid beräkningarna:

- Tunghet;  $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ .
- Odränerad skjuvhållfasthet;  $\tau = 19 \text{ kPa}$ , enligt *Figur B8:1*.
- Dränerad skjuvhållfasthet;  $c' = 1,5 \text{ kPa}$ ,  $\phi' = 30^\circ$  baserat på empiri.
- Ej vattenfyllda sprickor genom fyllning och torrskorpelera.

Vattenståndet i Trosaån har, enligt tidigare mätningar bedömts till +3,0 m. Baserat på områdets topografi har grundvattentrycket bedömts vara artesiskt vid Trosaån motsvarande ca 1 m över markytan. Ovan släntrön (vid Påskvägen) har grundvattentrycket bedömts vara hydrostatiskt med en grundvattenyta ca 1 m under markytan.



**Figur B8:1. Vald skjuvhållfasthet för överslagsberäkningar utifrån tidigare undersökningar.**

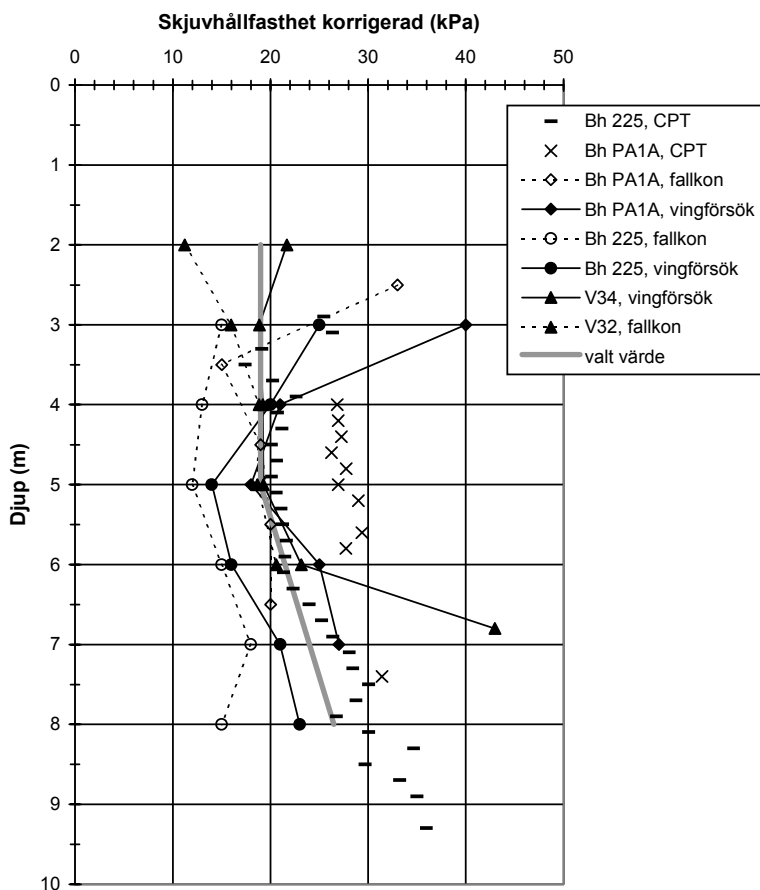
Med dessa värden erhålls en beräknad säkerhetsfaktor med odränerad analys  $F_c \approx 1,3$  och med dränerad analys  $F_{c\phi} \approx 1,3$ . Farligaste glidyta med odränerad analys sträcker sig från Påskvägen 4 och slår upp i slänten strax innan Trosaån och farligaste glidyta med dränerad analys sträcker sig från gång- och cykelvägen och slår upp i Trosaån.

Enligt Skredkommissionens anvisningar är riktvärden för erforderlig säkerhetsfaktor vid överslagsberäkning för befintlig bebyggelse  $F_c > 2$  och samtidigt  $F_{c\phi} > 1,5$ . Den beräknade slänten bedöms således i detta skede ha en otillfredsställande säkerhet. Ytterligare beräkningar erfordras därför, enligt Skredkommissionens anvisningar, för att klarlägga rådande stabilitetsförhållanden. Den dränerade beräkningen visar också att porvattentrycken är av betydelse och att portryckssituationen måste utredas i detalj.

## Steg 2: Detaljerad utredning

Baserat på undersökningar gjorda 1982 och 1997 har nedanstående värden använts vid beräkningarna:

- Tunghet;  $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ .
- Odränerad skjuvhållfasthet;  $\tau = 19 \text{ kPa}$  ner till 5 m under ursprunglig markyta och en ökning med  $2,5 \text{ kPa/m}$  därunder, enligt *Figur B8:2*.
- Dränerad skjuvhållfasthet;  $c' = 2 \text{ kPa}$ ,  $\phi' = 30^\circ$  baserat på empiri.
- Ej vattenfyllda sprickor genom fyllning och torrskorpelera.



**Figur B8:2. Vald skjuvhållfasthet för detaljerad utredning utifrån utförda undersökningar.**

Vattenståndet i Trosaån har, enligt tidigare mätningar, bedömts till +3,0 m. Baserat på utförda grundvatten- och portrycksmätningar har grundvattentrycket bedömts vara artesiskt vid Trosaån motsvarande ca 2 m över markytan. Ovan släntrön (vid Påskvägen) har grundvattentrycket bedömts vara hydrostatiskt med en grundvattenyta ca 1 m under markytan.

Med dessa värden erhålls en beräknad säkerhetsfaktor med odränerad analys  $F_c \approx 1,4$  och med kombinerad analys  $F_{\text{komb}} \approx 1,0$ . Farligaste glidyta med odränerad analys sträcker sig från Påskvägen 4 och slår upp i slänten strax innan Trosaån och farligaste glidyta med kombinerad analys slår upp i Trosaån och sträcker sig ca 15 m bakåt (nedanför cykel- och gångvägen). Glidytor med  $F_{\text{komb}} \approx 1,1$  sträcker sig från gång- och cykelvägen och slår upp i Trosaån.

Enligt Skredkommissionens anvisningar är riktvärden för erforderlig säkerhetsfaktor vid detaljerad utredning för befintlig bebyggelse  $F_c \geq 1,7 - 1,5$  och samtidigt  $F_{\text{komb}} \geq 1,45 - 1,35$ . Den beräknade slänten bedöms således också i detta skede ha en klart otillfredsställande säkerhet och att undersökningarna måste drivas vidare i en fördjupad utredning.

Dessa beräkningar visar att, vid en ny värdering av området vid Ödesby enligt Skredkommissionens anvisningar ger överslagsberäkningar otillfredsställande säkerhet för slänten och att en detaljerad utredning erfordras. Resultatet av den detaljerade utredningen visar sedan fortsatt otillfredsställande säkerhet och att vidare utredning och förstärkningsåtgärder erfordras. Exemplet visar således att beräkningsgång och beräkningssätt enligt Skredkommissionens anvisningar på ett entydigt sätt skulle påvisat otillfredsställande säkerhet för slänten.

The Swedish Geotechnical Institute is a government agency dealing with geotechnical research, information and consultancy.

The purpose of the Institute is to achieve better techniques, safety and economy by the correct application of geotechnical knowledge in the building process.

**Research**

Development of techniques for soil improvement and foundation engineering. Environmental and energy geotechnics. Design and development of field and laboratory equipment.

**Information**

Research reports, brochures, courses. Running the Swedish central geotechnical library with more than 85.000 documents. Computerized retrieval system.

**Consultancy**

Design, advice and recommendations, including site investigations, field and laboratory measurements. Technical expert in the event of disputes.



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)