

# CHALMERS



## Karakterisering av vattenförande sprickor i berg inför injektering under planerad dubbelspöntdamm i Lilla Edet

*Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad*

STEFAN JONSSON  
EMIL LINDQVIST

Institutionen för bygg- och miljöteknik  
*Avdelningarna för Geologi och Geoteknik samt Vatten Miljö Teknik*  
*Forskargrupperna för Teknisk Geologi och Vatten Miljö Teknik*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, 2006  
Examensarbete 2006:7



*EXAMENSARBETE 2006:7*

# Karakterisering av vattenförande sprickor i berg inför injektering under planerad dubbelspöntdamm i Lilla Edet

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

STEFAN JONSSON OCH EMIL LINDQVIST

Institutionen för bygg- och miljöteknik  
*Avdelningarna för Geologi och Geoteknik samt Vatten Miljö Teknik*  
*Forskargrupperna för Teknisk Geologi och Vatten Miljö Teknik*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2006

Karakterisering av vattenförande sprickor i berg inför injektering under planerad dubbelspöntdamm i Lilla Edet

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad  
STEFAN JONSSON OCH EMIL LINDQVIST

© STEFAN JONSSON OCH EMIL LINDQVIST, 2006

Examensarbete 2006:7  
Institutionen för bygg och miljöteknik  
Avdelningarna för Geologi och Geoteknik samt Vatten Miljö Teknik  
Forskargrupperna för Teknisk Geologi och Vatten Miljö Teknik  
Chalmers tekniska högskola  
412 96 Göteborg  
Telefon: 031-772 10 00

Chalmers reproservice / Institutionen för bygg- och miljöteknik  
Göteborg, 2006

Characterization of water transmitting fractures in rock before grouting underneath planned double sheet pile dam in Lilla Edet

Master's Thesis in Civil and Environmental Engineering

STEFAN JONSSON AND EMIL LINDQVIST

Department of Civil and Environmental Engineering

Divisions of Geoenvironment and Water Environment Technology

Researchgroups of Engineering Geology and Water Environment Technology

Chalmers University of Technology

## **Abstract**

The Lilla Edet hydropower plant was built in the 1930's. The rapids on the site had already been exploited by the Inland factory as a water supply as well as a power resource for some time. Therefore, the hydropower plant was built in connection to the factory on the Inlands Island. Through the years, maintenance work has been done to improve safety against dam failure. Recently, problems with the dam's stability have occurred due to water transmitting structures undermining the soil and bedrock of the Island. Vattenfall and Sjöfartsverket, who runs the lock that allows sea traffic past the dam, therefore initiated a project to reinforce the entire dam construction. A double sheet pile wall filled with moraine will create a sealed screen between the factory and the lock, through the layers of soil down to the bedrock. Grouting will seal the bedrock underneath. The aim of this thesis is to map the mineral composition and the crack formation in the bedrock, and also to predict the inflow of water into the excavation during the constructing phase. To be successful with grouting it is important to carefully map the bedrock.

The composition and the fracture pattern in the bedrock was clarified by studying reports from previous jobs in the area, and also by mapping the bedrock surrounding the river as well as studying samples taken from core drilling underneath the hydropower dam. This required advanced studies in geology and rock mechanics. The results of the mapped fractures were put together in the GEORIENT program and presented in stereographic projections along with rose diagram plots. After compiling the material characteristics of both soil and rock, the hydraulic problem could be simulated with calculations in the COMSOL Multiphysics program.

The bedrock underneath the sheet piles consist of fractured gneiss, with cross sections of even more fragmented rock, some of which are filled with clay and sand. Most of the fractures are parallel with the foliation planes in the gneiss. Their strike angle is 184 degrees, and the dip angle varies between 36 and 52 degrees. The closeness of the more flat fractures comes to an average of 6.7 fractures per vertical meter of rock, half of which can be assumed to follow the foliation planes. Along the sheet pile wall, the number of steeper fractures comes to 0.3 per meter. After calculating the water flow the result pointed to variations between 0.4 litres per minute in the deeper parts of the excavation to 0.1 litres per minute in the shallower parts. These flow variations are the result of the fact that the water pressure in the shallow part lies underneath the bottom of the excavation at the downstream side, while it lies above the bottom in the deeper part. At the same time the acting upstream water pressure is lower in the shallow part compared with the pressure in the deeper part.

*Keywords:* Characterization, fracture mapping, grouting, bedrock, mapping, strike, dip, water loss measurement

Karakterisering av vattenförande sprickor i berg inför injektering under planerad dubbelspontdamm i Lilla Edet

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

STEFAN JONSSON OCH EMIL LINDQVIST

Institutionen för bygg- och miljöteknik

Avdelningarna för Geologi och Geoteknik samt Vatten Miljö Teknik

Forskargrupperna för Teknisk Geologi och Vatten Miljö Teknik

Chalmers tekniska högskola

## Sammanfattning

Kraftstationen i Lilla Edet uppfördes på 1930-talet. Forsen på platsen hade redan tidigare utnyttjats av Inlandsfabriken både som råvattentäckt och kraftkälla. Den nya kraftstationen uppfördes därför i anslutning till fabriken på Inlandsön. Under åren har underhållsarbeten utförts för att trygga säkerheten mot dammbrott. På senare tid har stabilitetsproblem uppstått då ön undermineras av vattenförande strukturer i jord och berg. Vattenfall och Sjöfartsverket, som ansvarar för den slussled vilken låter sjötrafiken passera fördämningen, har därför inlett ombyggnadsarbeten av hela dammkonstruktionen. En tätskärm av dubbelspont med fyllning av morän skall anläggas över ön mellan fabriken och slussleden, genom jordlagren ned till berget. Det underliggande berget skall tätas genom injektering. Målet med detta examensarbete är att kartlägga berggrundens sammansättning, sprickbild och inflödet av vatten från schaktbotten till spontgropen under byggskedet. Att noggrant kartlägga berggrunden är en viktig förutsättning för en väl utförd injektering.

För att klargöra berggrundens sammansättning och sprickbild sammanställdes resultatet från dels egen kartering av berghällar kring älven och borrhälsor från berget under kraftverksdammen, men även från utvärderingar av rapporter från tidigare utförda arbeten. Detta krävde en fördjupning i såväl geologi som bergmekanik. Resultatet över de inmätta sprickorna och slagen sammanställdes i sprickrosor och stereoplottar med programmet GEORient. Efter sammanställning av materialegenskaper för såväl berg som jord kunde även de geohydrologiska problemen simuleras med beräkningar i programmet Comsol Multiphysics.

Berggrunden under sponten består av uppsprucken gnejs, genomskuren av ett antal kraftigare sprickzoner där vissa är ler- eller sandfyllda slag. Flertalet av sprickorna följer gnejsens foliationsplan vilkas strykning är 184 grader och vars stupning varierar mellan 36 och 52 grader. Spricktätheten uppgår till i medeltal 6,7 flackare sprickor per djupmeter varav hälften kan antas följa bergets foliation. Antalet brantare sprickor längs sponten har beräknats till omkring 0,3 sprickor per meter. Beräkningarna av inflödet i spontgropen visar på flöden som uppgår till 0,4 liter per minut och längdmeter i de djupare delarna av sponten och 0,1 liter per minut och längdmeter i de grundare. Skillnaden beror på att vattentrycket på spontens nedströmssida i den grundare delen ligger under spontbotten medan det ligger över botten i den djupare delen. Samtidigt som det pådrivande vattentrycket från uppströmssidan är lägre i den grundare delen än i den djupare.

Nyckelord: Karakterisering, sprickkartering, injektering, berg, kartering, strykning, stupning, vattenförlustmätning

# Innehållsförteckning

<b>Abstract</b> .....	<b>I</b>
<b>Sammanfattning</b> .....	<b>II</b>
<b>Innehållsförteckning</b> .....	<b>III</b>
<b>Förord</b> .....	<b>V</b>
<b>1 Inledning</b> .....	<b>1</b>
1.1 Bakgrund .....	1
1.2 Syfte och frågeställningar.....	4
1.3 Avgränsningar .....	4
<b>2 Metod</b> .....	<b>5</b>
2.1 Tillvägagångssätt.....	5
2.2 Insamlande av data .....	5
2.3 Geohydrologisk modellering.....	5
<b>3 Geologiska förhållanden</b> .....	<b>7</b>
3.1 Sydvästra Sveriges geologiska historia .....	7
3.2 Sammanställning av tidigare undersökningar .....	10
3.2.1 Jordbergsondering vid Ströms sluss 1983 .....	10
3.2.2 PM läckage under Inland 1993.....	12
3.2.3 Sonderingar vid Ströms sluss 1997 .....	17
3.2.4 Georadarundersökningar 1994 och 2001 .....	19
3.2.5 Grundundersökningar 2004.....	21
3.2.6 Byggnation av Lilla Edets Kraftverk .....	23
3.2.7 Grundvatten- och portrycksnivåer.....	25
3.2.8 Injekteringsarbete i cirkelspont 2005 .....	26
3.3 Kartering av berg.....	27
3.3.1 Strykning och stupning.....	28
3.3.2 Delområdesbeskrivning i väster .....	29
3.3.2.1 Delområde V1 .....	30
3.3.2.2 Delområde V2 .....	31
3.3.2.3 Delområde V3 .....	34
3.3.3 Delområdesbeskrivning i öster.....	35
3.3.3.1 Delområde Ö1 .....	36
3.3.3.2 Delområde Ö2 .....	41
3.4 Kärnkartering .....	43
3.4.1 Sammanställning av tidigare kärnkartering.....	47
Kärnborrhprov .....	48
<b>4 Modell</b> .....	<b>49</b>
4.1 Modellbeskrivning .....	49
4.1.1 Grafisk presentation med GEOrient.....	49
4.1.2 Strykning- och stupningsberäkningar.....	52
4.1.3 Geohydrologiska beräkningar .....	53
4.1.4 Flödesmodell med Comsol Multiphysics .....	54

4.2 Sprickmodellering .....	55
4.2.1 Sprickros och stereoplott med GEOrient .....	55
4.2.2 Tolkning av tidigare undersökningar .....	60
4.2.2.1 Beskrivning av inmätning med georadar .....	60
4.2.2.2 Kärnkartering .....	60
Kärnborrhprov .....	61
4.2.2.3 PM läckage under Inland 1993.....	65
4.2.2.4 Sondering uppströms Sluss 6 .....	67
4.2.2.5 Byggnation av Lilla Edets Kraftverk .....	67
4.3 Geohydrologisk modellering.....	69
4.3.1 Geohydrologiska förutsättningar.....	69
4.3.2 Simulering av flöden med Comsol Multiphysics.....	71
<b>5 Resultat.....</b>	<b>76</b>
5.1 Karterade sprick och krosszoner .....	76
5.2 Förväntad sprickbild.....	77
5.3 Förväntat flöde .....	81
<b>6. Diskussion och rekommendationer.....</b>	<b>82</b>
<b>7. Referenser .....</b>	<b>84</b>



## Förord

Den här rapporten har skrivits som det examensarbete, omfattande 20 p, vilket utgör den sista delen i civilingenjörsutbildningen, Väg- och vattenbyggnad vid Chalmers tekniska högskola i Göteborg.

Arbetet har bedrivits som ett grupparbete om två teknologer vid de båda avdelningarna Geologi och Vatten Miljö Transport. Samarbetet mellan avdelningarna ansågs nödvändigt då den av Vattenfall givna uppgiften innefattar både geologi och vattenbyggnad.

Tack vare arbetets omfattning har vi fördjupat våra kunskaper inom flera områden, huvudsakligen inom, berggrundsgeologi, bergmekanik samt hydrogeologiska problem vid dammbyggnad och injektering.

Vi vill tacka Michael Hellström för hans stöd under arbetets gång. Tack även till våra handledare, professor Lars Bergdahl och professor Gunnar Gustafson, för deras värdefulla synpunkter. Vi vill även tacka vår handledare utsedd av Vattenfall, Sten Palmer, för hans pådrivande och lärorika stöd samt Rolf Hultman på SWECO VBB för lånet av hans samling av bakgrundsmaterial och rapporter samt givande introduktion.

Vi vill även rikta ett mera allmänt tack till alla som besvarat våra frågor, diskuterat problem och agerat bollplank under arbetets gång här på Chalmers. Tack även till Vattenfall och Stefan Berntsson som givit oss ett intressant och stimulerande problem att lösa.

Göteborg, januari 2006

*Stefan Jonsson & Emil Lindqvist*

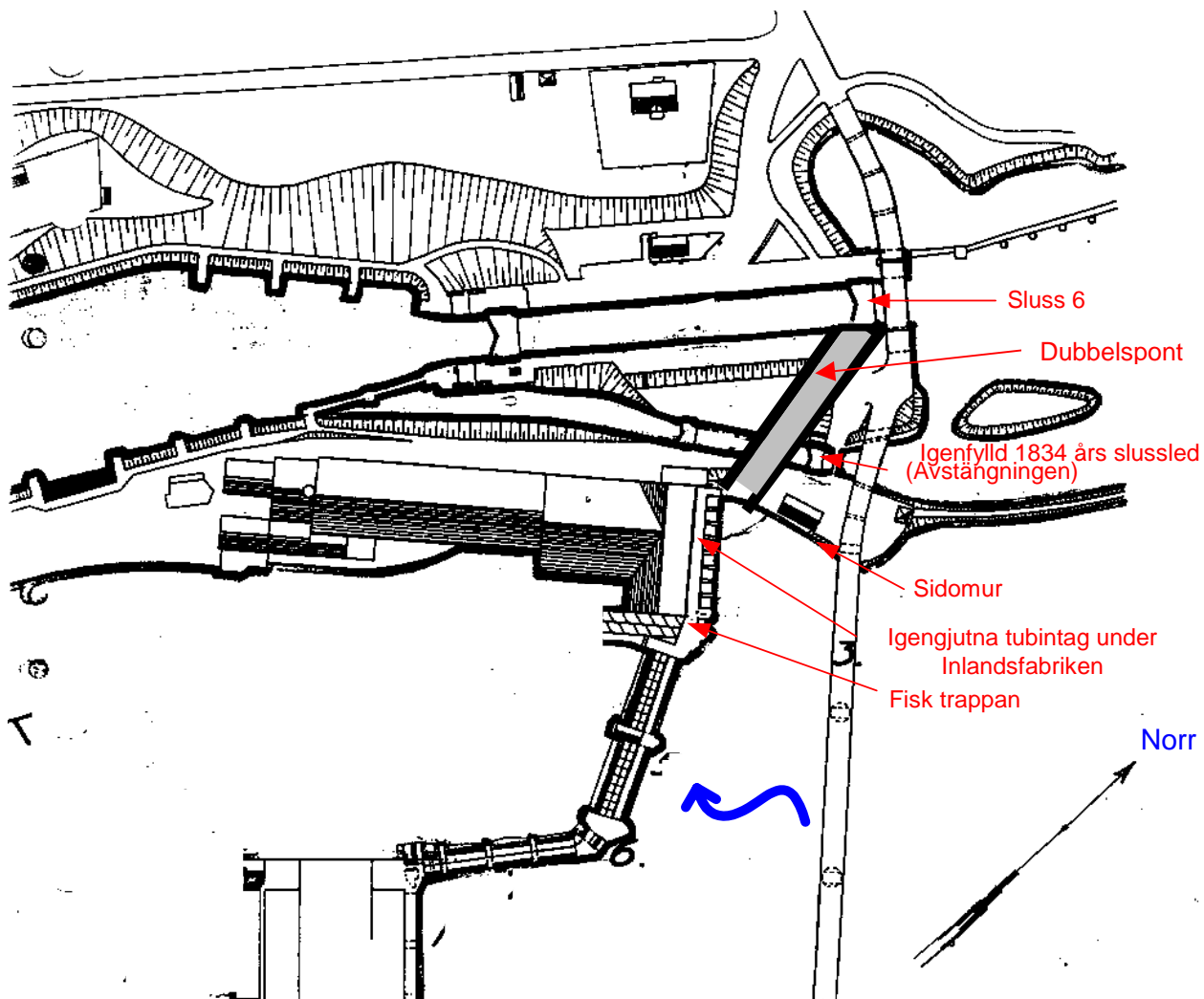


# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Vattenfall och Sjöfartsverket har i samarbete initierat ett projekt som syftar till att öka säkerheten mot dammbrott vid Lilla Edets kraftstation och kring Ströms sluss. En del i detta arbetet består av att uppföra en tätskärm i form av en dubbelspont med en tät fyllning av morän, se figur 1.1. Under dubbelsponton skall berget tätas genom injektering.

Följande redogörelse av tidigare bygg- och anläggningsprojekt ligger till grund för det arbete som skall bedrivas de kommande åren. Detta eftersom arbetet till stor del är ombyggnader och förstärkningar av de gamla konstruktionerna.



Figur 1.1, Karta över området kring Lilla Edets kraftverksdam (Berntsson 2001 med ändringar).

Den första sluss som byggdes på den västra sidan av älven togs i bruk 1834, se Figur 1.1. Inlandsfabriken uppfördes under mitten av 1890 talet på den ö som är belägen mellan slussleden och den fors som fanns där dagens kraftverksdam senare uppfördes. Fabriken norra vägg är konstruerad som en intagsdam till åtta parallella tilloppstuber vilka ledde vattnet till de turbiner som stod för fabriken's produktion av ström.

År 1916 togs den nya slussleden i bruk som lokaliserades väster om den äldre slussen från 1834. Denna stängdes samtidigt av med trästätter. I samband med ombyggnaden av slussen dämades även älven upp av dammen med de två valsutskoven. Vattennivån i älven uppströms slussen höjdes till nivån +7,30 meter över havet. Samtidigt fastställdes lågvattennivån till +6,25 meter. Detta för att möjliggöra transporter på älven och genom slussen med djupgående fartyg (Berntsson 2001).

Då älven dämades upp blev det även nödvändigt att förstärka och höja dammen med tilloppstuberna till Inlandsfabriken. Intagsdammen av tegel byggdes nu på med en betongpåbyggnad (Berntsson 2001).

I Redogörelse för arbetena med Lilla Edets kraftverks första utbyggnad (1932) uppges att intagen i Inlandsfabrikens intagsdamm blivit igengjutna med betong eller provisoriskt igensatta med träpålar. Då denna redogörelse är tryckt 1932 har således detta skett under tiden 1916 till 1932. Av de åtta intagen har under en tid två stycken använts som reservutskov. I dag används endast ett för processvattenintag till fabriken (Berntsson 2001).

Lilla Edets kraftverk byggdes mellan åren 1918 och 1926 (Kungl. Vattenfallsstyrelsen 1932). Ombyggnader av de ursprungliga isutskoven har utförts men i övrigt har inga stora ombyggnader av anläggningen varit aktuella (Berntsson 2001).

År 1928 byggdes en kulvert under Inlandsfabriken med utlopp i 1834 års slussled för att skydda fabriken mot upptryckning till följd av läckage genom fabriken intagsdamm och dess igensatta tilloppstuber. Kulverten är utformad på ett sådant sätt att den endast avbördar vatten likt ett bräddavlopp då nivån under fabriken stigit kraftigt. Det har dock visat sig att kulverten snarare leder in vatten under fabriken. Detta samtidigt som läckaget in under fabriken, dels genom intagsmuren i norr och dels genom marken, norr och väster om fabriken, ökat (Berntsson 2001). Någon omedelbar fara bedömdes inte vara för handen men övervakningen av dammen intensifierades samtidigt som Vattenfall beslutade sänka nivån i dammen (SWECO VBB AB 2005).

Eftersom det under lång tid varit stora problem med anläggningen har en fördjupad dammsäkerhetsutvärdering (FDU) utförts år 2001. Denna utvärdering påvisade områdets brister och svagheter, samt utmynnade i möjliga dammsäkerhetshöjande åtgärder.

Under år 2005 upprättade SWECO VBB AB en teknisk beskrivning avseende dammsäkerhetshöjande åtgärder för Lilla Edets kraftstation och Sluss 6 på uppdrag av Vattenfall AB Vattenkraft och Sjöfartsverket. Dessa handlingar låg till grund för tillståndsprovningen hos Länsstyrelsen och Miljödomstolen.

Arbetet mellan Sluss 6 och kraftverksdammen påbörjades innan tillstånd från Länsstyrelse och Miljödomstol kunde inväntas. Detta eftersom risken för dammbrott ansågs överhängande. Det är detta område som i huvudsak kommer att behandlas i denna rapport. Åtgärderna för det berörda området beskrivs i följande citat:

*”Mellan höger sidomur och Sluss 6 krävs det att man skapar en sammanhängande tätskärm genom jorden och det underliggande berget för att lösningen skall kunna anses uppfylla kravet att vara definitiv och permanent och uppfylla dammsäkerhetskraven.*

*Tätskärmen utförs genom att två parallella spontrader med ett avstånd av 3,6 m sätts ner till berget. Schaktning till berg utförs mellan spontraderna som stagats genom bakåtförankring alternativt stämpats och dubbning i berget. Berget injekteras. Tätningen utförs genom att fylla och kompaktera tätjord mellan de två spontraderna. Sponten kapas strax under marknivå och kvarlämnas.*

*Påträffas större block vid sättning av spont kan ett spontdike behövas schaktas. För att dikesväggarna inte skall kollapsa kan diket i samband med schaktningen behöva återfyllas med sand eventuellt slurry innan sponten sätts. Rörspont, eventuellt mindrejetpelare, kan ersätta sponten i kontakterna mot stenmur, 1834 års sluss och Sluss 6. Om läckagen genom jordlagren mellan höger sidomur och 1834 års sluss visar sig vara så omfattande att det är svårt eller bedöms som riskfyllt att skapa utrymmet mellan spontraderna kommer en temporär spont placeras uppströms om inlands kontorsbyggnad enligt markering på Ritning 120.*

*Befintliga murkonstruktioner i den över- och igenfyllda 1834 års sluss skall tas bort och tätväggen dras obruten igenom den.*

*Utanför den högra sidomuren finns sedan tidigare en kvartscirkelformad spont. Innan schaktning mellan dubbelsponten görs skall läns pumpning utföras innanför den kvartscirkelformade sponten.” (SWECO VBB, 2005-08-22).*

Konstruktionens täthet är av största vikt och är i stor utsträckning beroende av en väl utförd injektering. En noggrann kartläggning av berget är en viktig förutsättning för injekteringen. Det ansågs därför lämpligt att utföra en fördjupad studie av berggrunden i området i form av detta examensarbete.

## **1.2 Syfte och frågeställningar**

Det här examensarbetet syftar till att utreda och sammanställa berggrundsförhållandena under inlandsjön i Lilla Edet i en rapport som ska kunna användas som underlag för riskbedömning och val av lämplig injekteringsmetod.

Detta görs i samband med de arbeten som ingår i Sjöfartsverkets och Vattenfalls samarbetsprojekt med att höja dammsäkerheten mot brott för kraftverksdammen och slussen i Lilla Edet.

Målsättningen är att bestämma bergets sammansättning, sprickbild och inflödet från schaktbotten i spontgropen.

Detta ger följande frågeställningar:

Vad är orsaken till sprickorna i berget?

Hur sprickigt är berget, var finns större sprickor och slag, samt hur hänger dessa samman?

Hur mycket vatten kan förväntas transporteras genom sprickorna i berget?

## **1.3 Avgränsningar**

Den geologiska historien har begränsats till sydvästra Sverige.

Uppgifter om slag och sprickor som påträffats vid enstaka tillfällen och inte kunnat verifieras har inte redovisats som resultat i rapporten.

De geologiska undersökningarna har begränsats geografiskt till omkring 1 km kring Inlandsjön.

## **2 Metod**

### **2.1 Tillvägagångssätt**

Studien påbörjades genom inläsning av befintlig litteratur. Ett helhetsperspektiv över områdets regionalgeologiska historia ansågs som en god grund för fortsatt arbete samtidigt som förståelsen för områdets hydrologiska system grundades.

En fördjupad studie i geologi och bergmekanik ansågs nödvändig för förståelsen av sprickors uppkomst i berggrunden och vattentransport i sprickigt berg. Detta gjordes bland annat vid studiebesök i SKBs Äspölaboratorium. Den nödvändiga teoretiska bakgrunden för arbetet ansågs härmed tillfredsställande.

Därefter var det möjligt att gå in i mindre skala för att mer detaljerat kartlägga området för dubbelspanten med avseende på geologiska förhållanden. Konsultrapporter och uppgifter från annan litteratur sammanställdes och kompletterades med kartering av ytberg i området samt kartering av borrhävar från tidigare provborring i anslutning till kraftverksdammen. Detta resulterade i en preliminär modell av de förväntade förhållandena.

Från injekteringsprotokoll kunde uppgifter på bergets konduktivitet även inhämtas och den geologiska modellen kunde nu byggas på med ytterligare en dimension i form av hydrologiska förhållanden.

### **2.2 Insamlande av data**

På studerat område finns mycket litteratur som i stor utsträckning består av tekniska rapporter och resultat av tidigare undersökningar och arbeten. Då inga medel till ytterligare provtagning och undersökningar har funnits till förfogande har det befintliga materialet utgjort huvuddelen i informationsinhämtningen.

Undersökningar som varit möjliga att göra utan några större ekonomiska medel är karteringar av berg i dagen samt kartering av borrhävar som utförts i samarbete med handledare från GEO-institutionen. Det karterade berget har lokaliserats med utgångspunkt från jordartskartor från SGU (Statens Geologiska Undersökningar), samt topografiska kartor över området. Berghällar på ett avstånd från Inlandsjön på upp till 1 km har undersökts där stenprover, så kallade stuffer, har tagits. Borrhävarna tillhandahölls av Vattenfall och togs fram i samband med en besiktning av kraftdammens skick mellan 2003 och 2004.

### **2.3 Geohydrologisk modellering**

Genom att plotta sprickrosdiagram i datorprogrammet GEOrient kan de uppmätta dominerande sprickriktningarna och foliationsriktningarna bestämmas.

Dessa uppgifter kompletteras med uppgifter på sprickor och slags verkliga strykning och stupning. Efter utvärdering av uppgifter från sammanställningen av tidigare rapporter kan en god bild av förhållandena i berggrunden på Inlandsjön antas klarlagd.

När dessa resultat sammanställs med de uppgifter om spricktäthet och förekomst av andel extremt dåligt och krossat berg från borrhävarna i kraftverksdammen kan prediktion av inte bara sprickriktningar utan även sprickornas täthet göras. Således kan även uppgifterna om

bergets konduktivitet predikteras med utgångspunkt från de vattenförlustmätningar som finns både från provhål med tätare berg och mera uppsprucket berg.

En preliminär modell innehållande förväntad konduktivitet i både det mera uppspruckna ytberget och det tätare underliggande berget samt ovanliggande jordlager var därmed möjligt att ställa upp. Även förväntad förekomst och fördelning av slag och större sprickor samt sannolikt läge för dessa kunde då bestämmas.

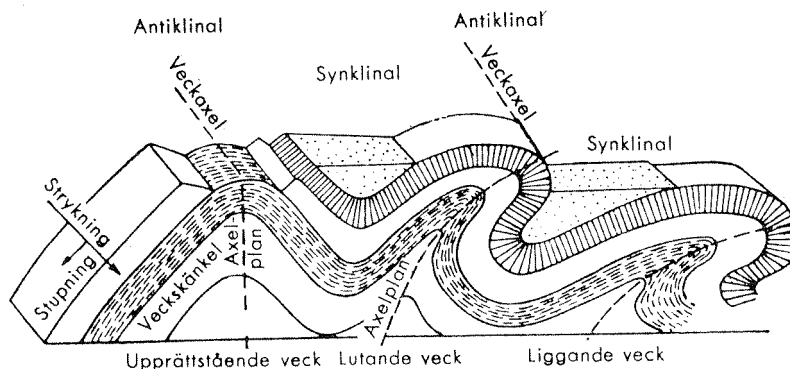
Denna information används för att skapa modeller i datorprogrammet Comsol Multiphysics, där geohydrologiska beräkningar utförs för att bestämma vattenflöden i marken.



## 3 Geologiska förhållanden

### 3.1 Sydvästra Sveriges geologiska historia

Berggrunden i sydvästra Sverige ingår i den Baltiska urbergsskölden. Denna berggrund har en kärna i öster mellan Kolahalvön och Karelen, därifrån har den successivt utvidgats västerut i flera steg. Den sydsvenska berggrunden började bildas för ca 1700 miljoner år sedan. Bildningen pågick i ca 800 miljoner år och har under denna tid påverkats av tre olika bergkedjebildningar. Under denna tid har berggrunden utsatts för både deformation och omvandling. Storleken på de vertikala rörelserna i berggrunden har varierat och därmed har även veckningen av jordskorpan blivit olika stor i olika delar av området. I vissa delar av området har bergarter som bildats vid ytan veckats ned till djup upp till mellan 10 och 20 km. I figur 3.1 visas principen för de veckningsprocesser som den sydvästsvenska berggrunden utsatts för. Genom höjning och erosion utgör dessa bergarter idag berggrundens övre del (Lundqvist 1997).

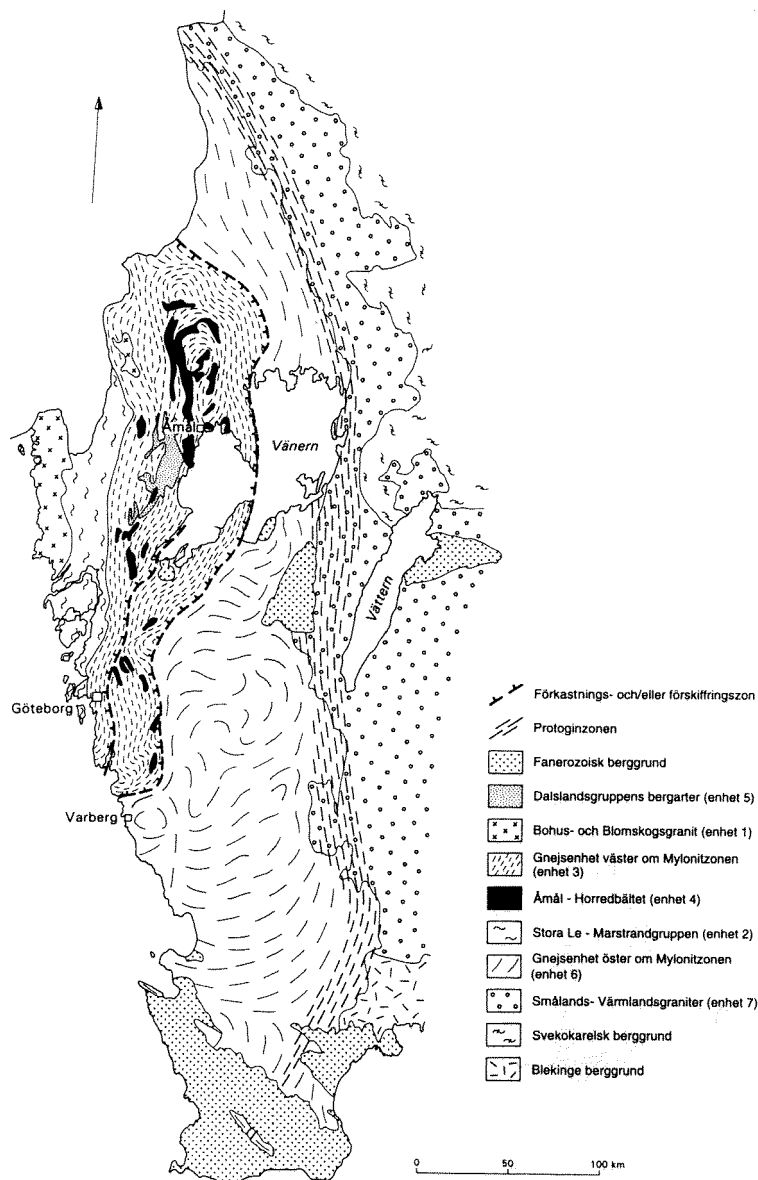


Figur 3.1, Berggrundsveckning (Loberg 1987).

Ett veck som sluter sig uppåt kallas antiklinalt medan ett veck som sluter sig nedåt kallas synklinalt. Veckaxeln är den omböjningslinje vilken berget veckats kring. Axelplanet är det plan veckaxeln bildar genom berget (Loberg 1987).

Berggrunden i sydvästra Sverige kan delas upp i nord-sydligt utsträckta delområden enligt figur 3.2. Varje delområde innehåller en viss typ av huvudbergarter från en ungefärlig bildningsperiod. I Tabell 3.1 visas huvudbergarterna och deras bildningsperiod i respektive delområde från den yngsta till den äldsta (Lundqvist 1997).

Området delas in i segment som åtskiljs av tre nordsydliga rörelsezoner. Dessa rörelsezoner är från väster mot öster, Göta Älvzonen, Mylonitzonen och Protoginzonen. Göta Älvzonen är en förkastningszon som gett upphov till Göta Älvdalen och älvens läge, Mylonitzonen är ett gränsområde mellan två olika gnejsområden och Protoginzonen skiljer Smålands-Värmlandsgraniter i öster från den starkt förgnejsade granitoiderna i väster (Lundqvist 1997).



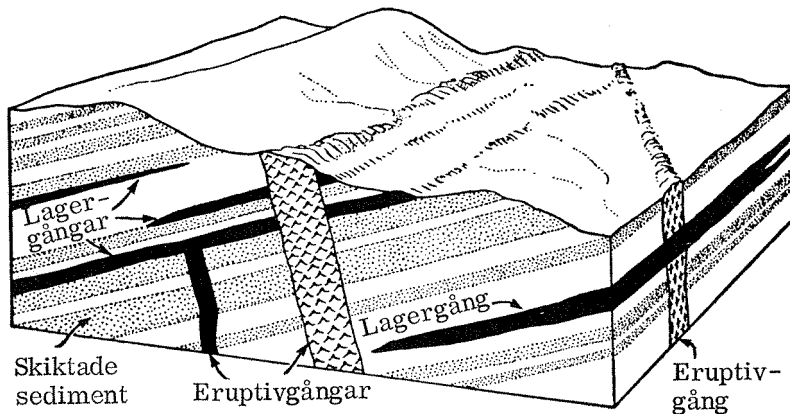
Figur 3.2, Den sydsvenska berggrunden (Lundqvist 1997).

Tabell 3.1, Delområden i Sydvästsverige och deras bildningsperiod (Lundqvist 1997).

Enhet och Huvudbergart	Bildningsperiod
1. Bohusgranit	920 miljoner år
5. Dalslandsgruppens ytbergarter	ca 1100 miljoner år
3. Gnejsområde väster om Mylonitzonen	ca 1650-1600 miljoner år
4. Åmål-Horredsbältets ytbergartsgnejser	ca 1650-1600 miljoner år
2. Stora Le-Marstrandsgruppens ytbergartsgnejser	ca 1760 (1610?) miljoner år
6. Gnejsområdet öster om Mylonitzonen	ca 1800-1600 miljoner år
7. Smålands-Värmlandsgraniter (TMB) med smärre inslag av ytbergarter	1800-1650 miljoner år

Enhet 3, se figur 3.2, som domineras av granitoider har inga tydliga gränser då dessa bergarter till stora delar sammanflutit med omgivande ytbergartsområden. Gränserna på kartan är således ungefärliga. Intressant att notera är att området i väster, Stora Le-Marstrandsgruppen domineras av gnejser med sedimentärt ursprung medan Åmål-Horredsbältet i öster domineras av gnejser med vulkaniskt ursprung. I dessa äldre delar av berggrunden finns flera olika yngre

intrusivbergarter, som bildats vid olika tidsperioder (Lundqvist 1997). Principen för deras uppkomst kan ses i figur 3.3. Intrusionsformerna kan indelas i två typer, de som bildas i en spricka som följer ett förskiffringsplan och de som bildas av magma som stelnat i sprickor som skär omkringliggande bergs skiktning. De förstnämnda kallas för lagergångar medan de senare benämns som intrusiv- eller eruptivgångar. Tjockleken på dessa intrusivgångar kan variera från ett par millimeter upp till ett par kilometer och längden kan uppgå till flera mil (Loberg 1987).



Figur 3.3, Princip för bildning av intrusiv- eller eruptivgångar (Loberg 1987).

I området öster om Mylonitzonen varierar riktningen på bergets struktur vilket de radiella streckformerna i figur 3.2 symboliserar. Berggrunden består här av mer eller mindre förgnejsade och ådrade intrusivbergarter. Väster om Mylonitzonen är strukturen i berget däremot entydigt nord-sydlig orienterad (Lundqvist 1997), vilket illustreras i figur 3.2 av det täta välstrukturerade streckmönstret.

Det är troligt att, efter bildandet av ytbergarterna i området, magmor av olika typ trängde in i Stora Le-Marstrandsgruppens bergarter. De äldsta av dessa magmor bildade mörka, basiska bergarter som exempelvis diorit, gabbro och ultrabasit. Ultrabasit är ett samlingsnamn för kiselsyrafattiga silikatbergarter, där oftast ett mineral dominerar, t.ex. hornblände, olivin eller serpentin. Senare kristalliserade stora delar av surare magmor och bildade därmed medel- till grovkorniga bergarter med tonalitisk till granitisk sammansättning. Då magmorna trängt in i ytbergarterna måste dessa ha befunnit sig djupt ned i jordskorpan till följd av bergskedjeveckning (Lundqvist 1997).

Som nämnts tidigare har området utsatts för bergskedjeveckningar i olika omgångar och den första av dessa inträffade troligen efter de intrusivbergartsbildande processerna ovan för omkring 1680 till 1580 miljoner år sedan. Då jordskorpan veckades förgnejsades bergarterna samtidigt som ådror bildades med omfattande intrusioner som följd. Detta gav upphov till grå och gråröda bergarter med en varierande sammansättning från tonalit till granit. Men även basiska bergarter såsom diorit och ultrabasit samt en ögonförade granit som kallas äldre ögongranit (Lundqvist 1997).

Under den andra bergskedjebildningen för omkring 1580 miljoner år sedan bildas huvuddelen av strukturerna för Bohusläns berggrund under omfattande deformationer och omvandlingar. För bergarterna i de andra områdena i sydvästra Sverige kan andra omvandlingsperioder varit

av större betydelse. Den andra bildningen kan delas upp i två olika faser. Mellan dessa har basiska till sura magmor skurit igenom veckstrukturer och ådror som bildats under den första fasen. Dessa gånger har sedan påverkats under den andra fasen genom omkristallisation (Lundqvist 1997).

Den Svekonorvegiska deformationen är den tredje bergskedjebildningen vilken inträffade för omkring 1000 miljoner år sedan. De deformationer som uppstod då drabbade hela sydvästra Sverige men koncentrerades i första hand till de ovan nämnda, Mylonitzonen och Protoginzonen. I dessa zoner har berggrunden genomgått en kraftig förskiffring eller mylonitisering vilket innebär en bergartsbildning i rörelsezonerna genom kraftig nermalning av berggrunden. Mylonit är för det mesta ihopläkt och flintliknande. Även en mängd andra zoner av varierande storlek uppstod i samband med den Svekonorvegiska deformationen. Gemensamt för dem alla är att de har en i stort sett nord-sydlig huvudriktning. I dessa zoner har rörelserna i princip inneburit att de västra blocken lyfts upp i förhållande till de östra. Zonerna övertvåras i väster av den 920 miljoner år gamla bohusgraniten, se figur 3.2 (Lundqvist 1997).

För mellan 900 och 570 miljoner år sedan höjdes jordskorpan i Sydvästsverige vilket ledde till att berget eroderade ned till ett djup av minst 5-10 km. Vid denna höjning skedde sprickbildningar i berggrunden vilket medförde uppträngning av basisk magma som idag återfinns som diabasgångar. Dessa skär rakt igenom äldre berggrundsstrukturer och de största gångarna har västnordvästlig-ostsydostlig riktning.

Landhöjningen övergick sedan i en sänkning för omkring 570 miljoner år sedan vilket resulterade i att den nu nästan helt plana bergytan hamnade under havsytan. I samband med detta började den sedimentation som senare bildade de bergarter som idag återfinns på bl.a. Västgötabergena och dessa har förmodligen täckt större delen av Sydvästsverige (Lundqvist 1997).

För omkring 280 miljoner år sedan trängde diabaser upp och överlagrade de kambro-siluriska sedimentbergarterna på Västgötabergena och bidrog härmed till att bevara dessa medan de sedimentära bergarterna i övrigt eroderat bort (Svensson 2004).

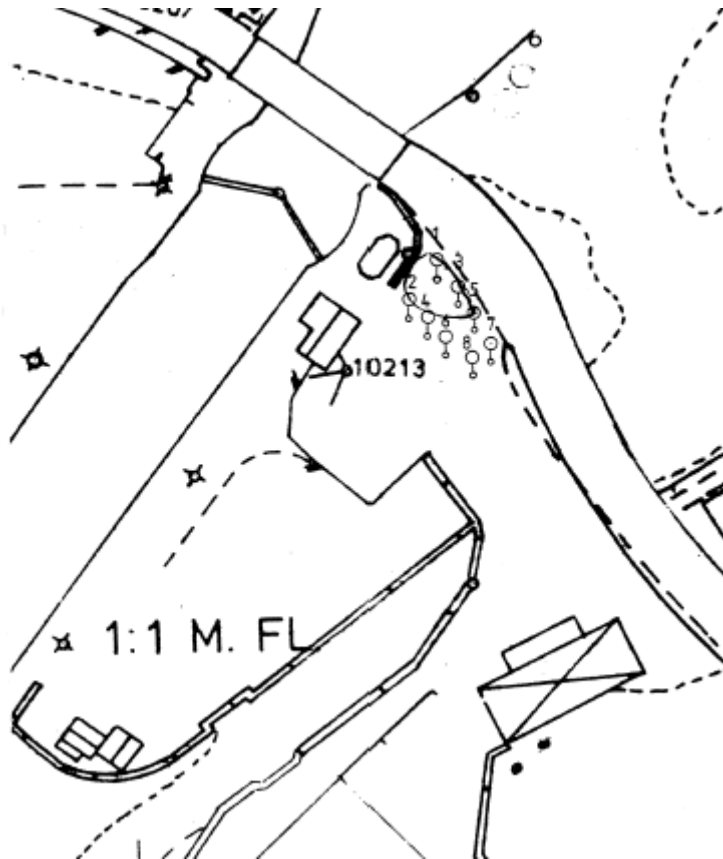
Yngre förkastningar har uppstått i både Västgötabergena och i diabasen. I västra Bohuslän finns även gångar med diabas och rombporfyr av samma ålder (Lundqvist 1997).

## **3.2 Sammanställning av tidigare undersökningar**

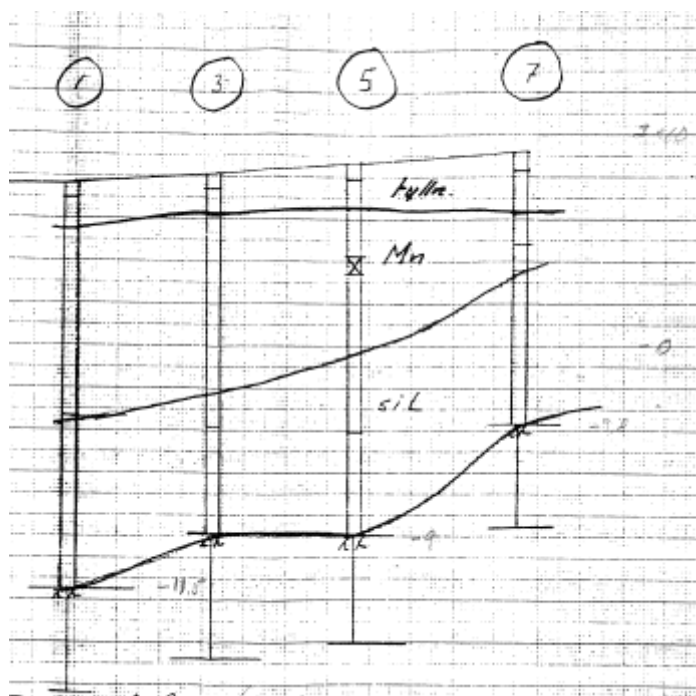
### **3.2.1 Jordbergsondering vid Ströms sluss 1983**

Sonderingen 1983 gjordes efter att ett sjunkhål upptäckts invid vägen. Provbörningarna utfördes runt hålet enligt figur 3.4. Avstånd till berg och jordlagerföljd bedömdes därmed enligt följande (Lindh 1990):

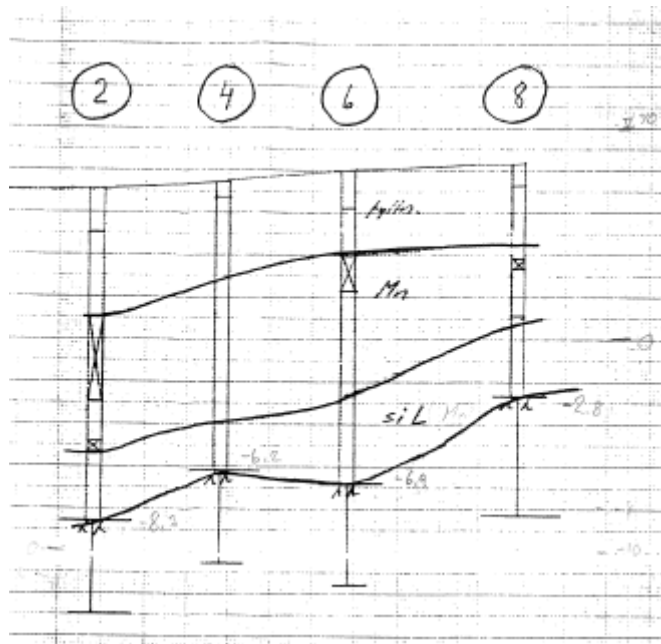
*”Med stöd av observationer vid börningarna bedömer vi att närmast vägen finns 1 - 1,5 m fyllning av grus och sand. Fyllningens tjocklek ökar till 2 – 3 m i den södra sektionen. Under fyllningen finns 2 – 5 m grovblockig grå morän. Under detta material finns 2 – 4 m ensartat material som bedöms bestå av siltig lera men som också kan vara lerig siltig morän, eftersom lera normalt inte kan förekomma under morän.”*



Figur 3.4, Borrplan över utförd jordbergsondering (Lindh 1983).



Figur 3.5, Borrsektion över borrhål 1, 3, 5 och 7 (Lindh 1983).

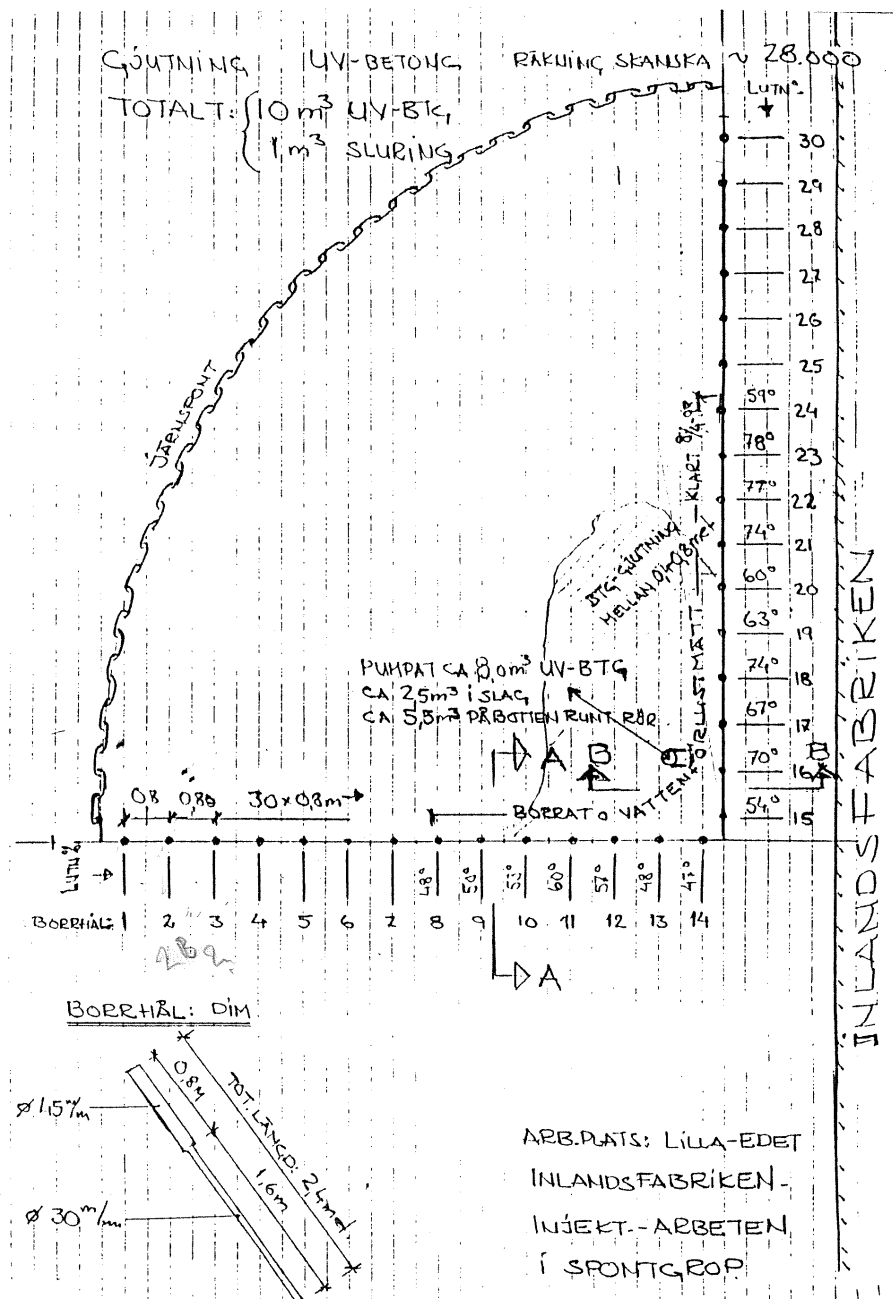


Figur 3.6, Borrsektion över borrhål 2, 4, 6 och 8 (Lindh 1983).

Data från jordbergssondering av de 8 provborrningarna visar bergrundens lutning lokalt för området öster om Sluss 6, enligt figur 3.5 och 3.6.

### 3.2.2 PM läckage under Inland 1993

De Neef Scandinavia AB utförde under våren 1993 omfattande tätningsarbeten av kontorsmuren och Inlandsfabrikens intagsdamm. Syftet var att tätta inläckaget under fabriken. Borrning till ett djup av 2,4 m gjordes enligt borrhplan i figur 3.7 nedan.



Figur 3.7, Borrplan för injektering framför Inlandsfabriken (Borchart 1993).

Därefter utfördes vattenförlustmätningar i borrhålen 8 till 24 med en tätslutande manschett vilket gör att endast förlusten för hela hålet kan mätas. Resultatet från dessa mätningar redovisas i tabell 3.2 och 3.3.

Tabell 3.2, Vattenförlust mätning för borrhål 15 till 24 mot Inlandsfabriken (Borchart 1993).

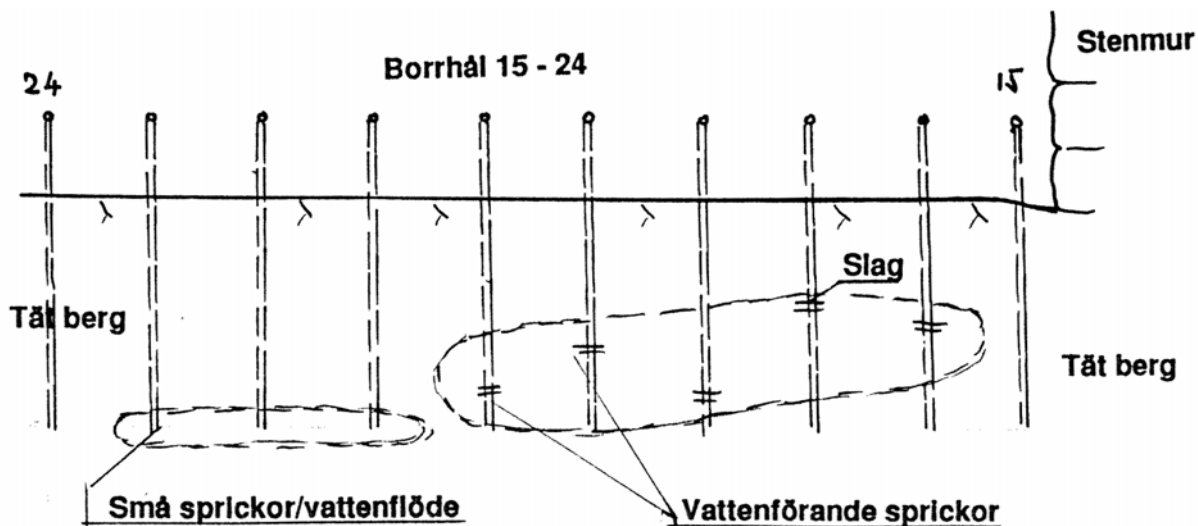
Borrhål	Borrdjup (m)	Tryck (bar)	Tid (min)	Vattenförlust (l)	Lutning (grader)	Specifik Vattenförlust (l/min. m atö)	Anmärkning
24	2,4	1,5	3	0	59	0	Tätt borrhål, ingen förbindelse
23	2,4	1,5	3	0	78	0	Tätt borrhål, ingen förbindelse
22	2,4	1,5	3	0	77	0	Tätt borrhål, ingen förbindelse
21	2,4	1,5	3	0	74	0	Tätt borrhål, ingen förbindelse
20	2,4	1,5	3	94	60	8,7	Förbindelse under Inland
19	2,4	1,5	3	87	63	8,06	Förbindelse under Inland
18	2,4	1,5	3	87	74	8,06	Förbindelse under Inland
17	2,4	1,5	3	86	67	7,96	Förbindelse under Inland
16	2,4	1,5	3	83	70	7,67	Förbindelse under Inland
15	2,4	1,5	3	0	54	0	Tätt borrhål, ingen förbindelse

Tabell 3.3, Vattenförlust mätning för borrhål 8 till 14 mot Inlandskontor (Borchart 1993).

Borrhål	Borrdjup (m)	Tryck (bar)	Tid (min)	Vattenförlust (l)	Lutning (grader)	Specifik Vattenförlust (l/min. m atö)	Anmärkning
14	2,4	1,5	3	43	47	3,98	Förbindelse med vattenflöden bakom mur, mottryck 0,8 Bar
13	2,4	1,5	3	79	48	7,31	Förbindelse med vattenflöden bakom mur, 0,4 Bar
12	2,4	1,5	3	71	57	6,57	Förbindelse med vattenflöden bakom mur, 0 Bar
11	2,4	1,5	3	88	60	8,15	Förbindelse med vattenflöden bakom mur, läckage i fogar, 0 Bar
10	2,4	1,5	3	96	53	8,89	Förbindelse med vattenflöden bakom mur, läckage i fogar, 0 Bar
9	2,4	1,5	3	100	50	9,26	Förbindelse med vattenflöden bakom mur, läckage i fogar, 0 Bar
8	2,4	1,5	3	10	48	0,93	Ingen förbindelse, lite läckage i fog, 1,0 Bar

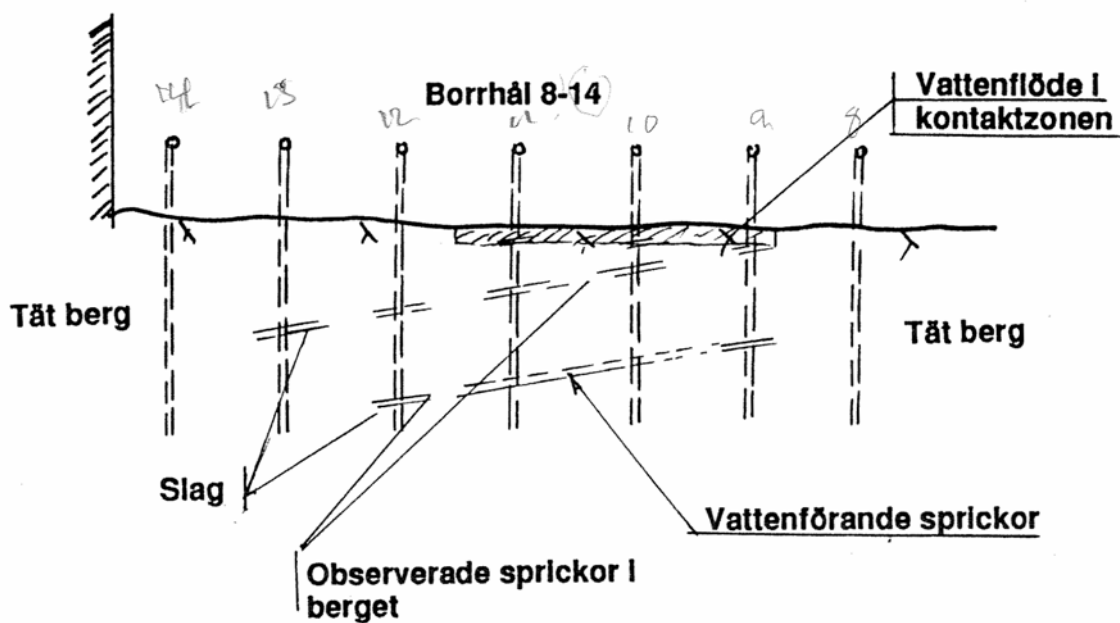
Injekteringen utfördes sedan i flera omgångar tills erforderligt sluttryck uppmätts. En till två ton cement per borrhål användes. Figur 3.8 och 3.9 visas de vattenförande slag som upptäckts under borrhningen (Borchart 1993).





Figur 3.8, Sektion över borrhål 15 till 24 (Borchart 1993).

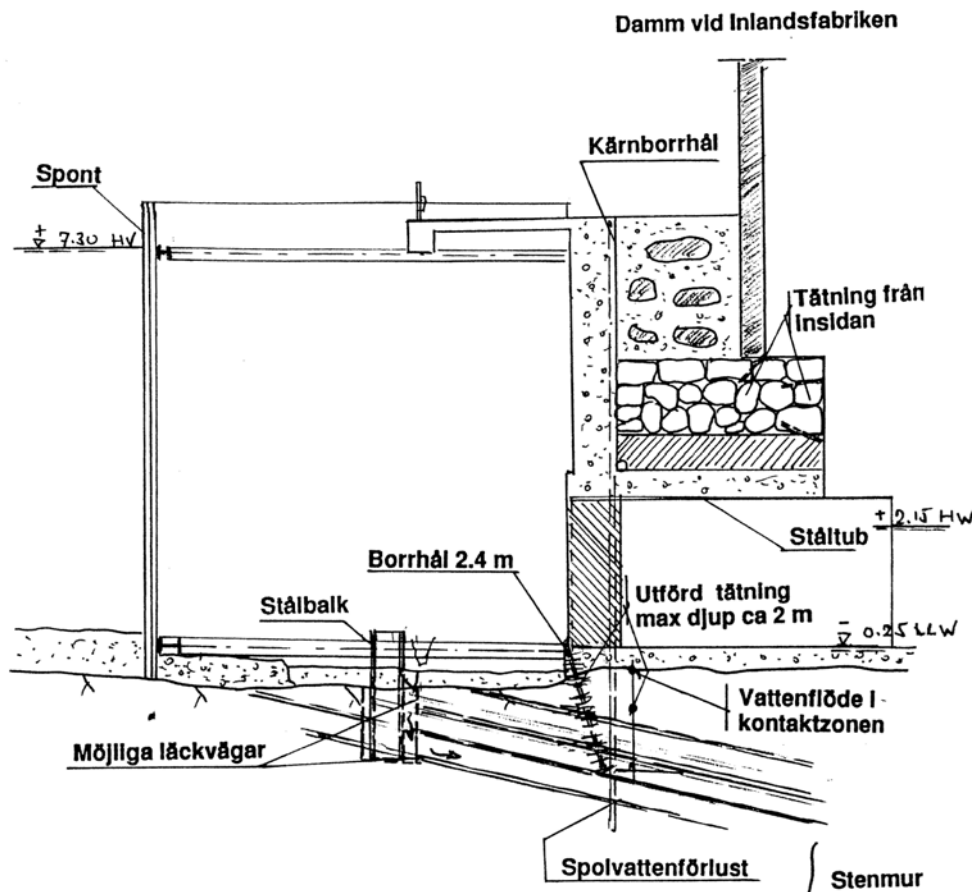
### Mur Inlandsfabrik



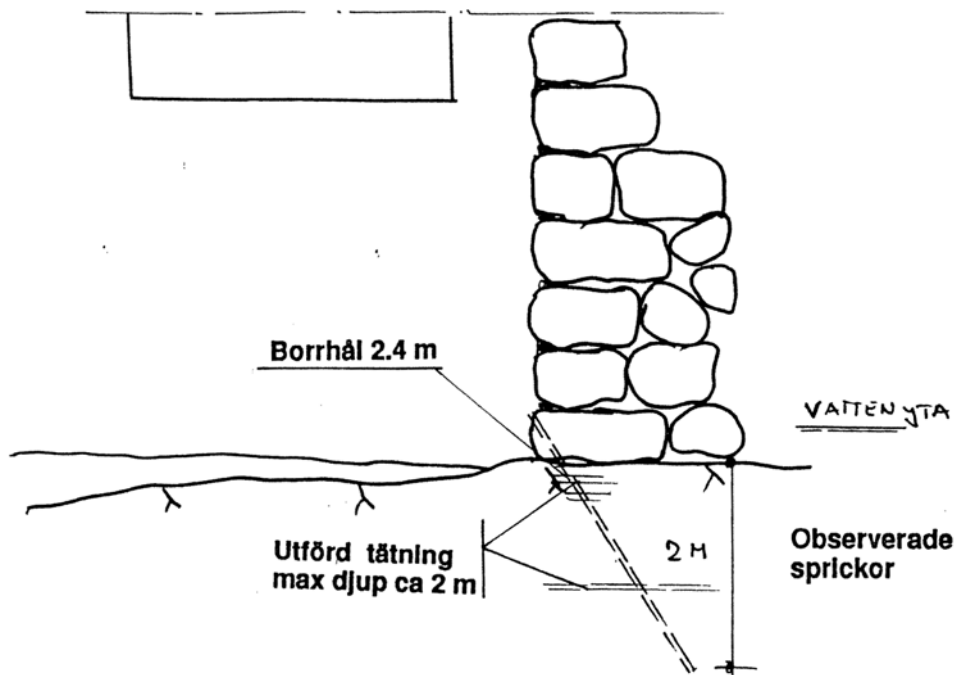
Figur 3.9, Sektion över borrhål 8 till 14 (Borchart 1993).

De inritade vattenförande sprickornas lutning uppmättes i figur 3.9 till mellan 9 och 10 grader längs profilen mellan borrhål 8 till 14.

Borrhålen utfördes enligt sektionerna i figur 3.10 och 3.11 nedan med vinklar enligt tabell 3.2 och 3.3 ovan.

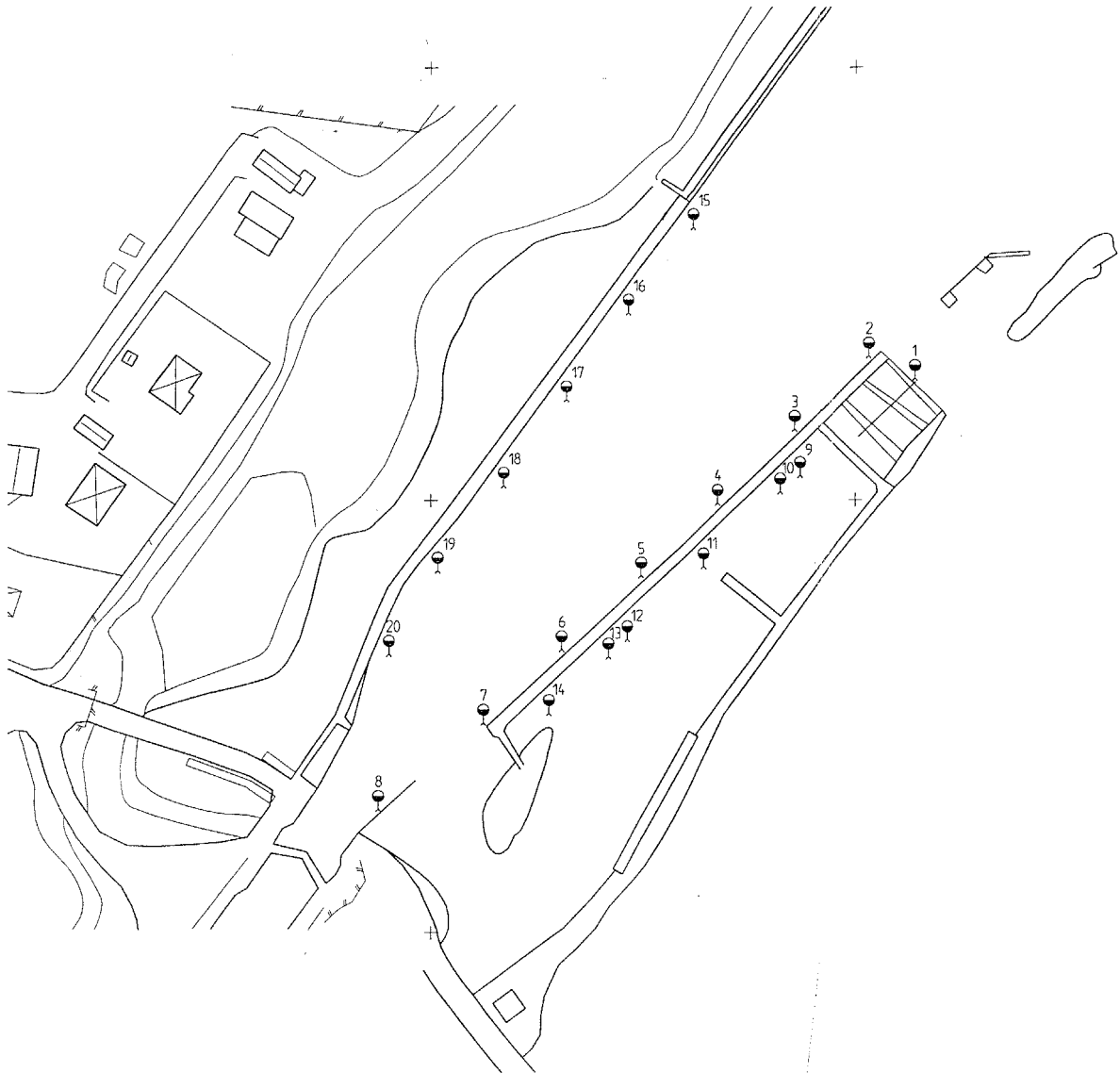


Figur 3.10, Sektion över injektering av Inlandsfabrikens damm (Borchart 1993).



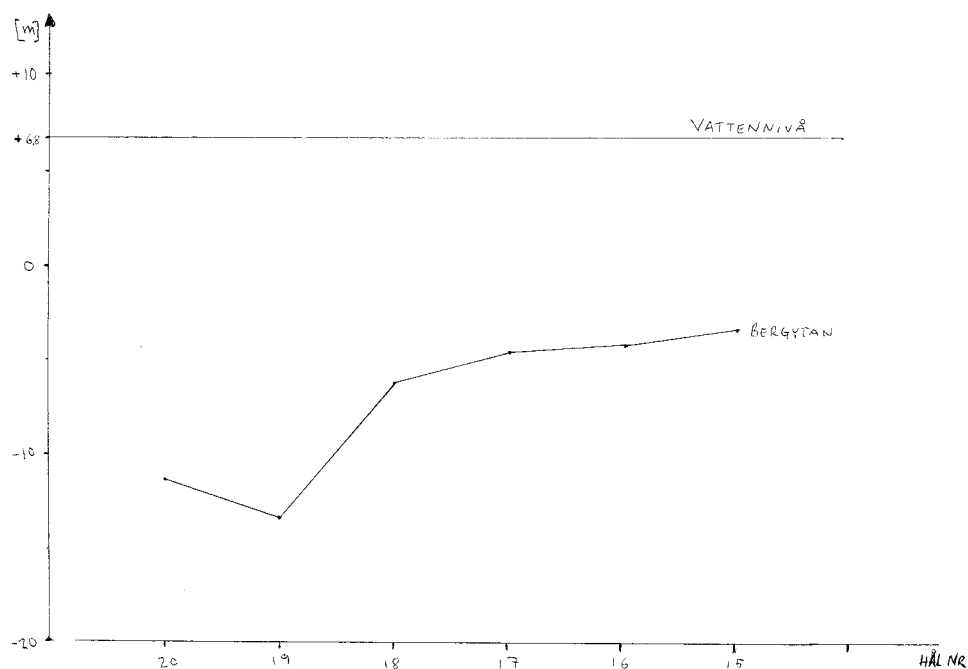
Figur 3.11, Sektion över injektering av muren mot Inlands kontor (Borchart 1993).

### 3.2.3 Sonderingar vid Ströms sluss 1997

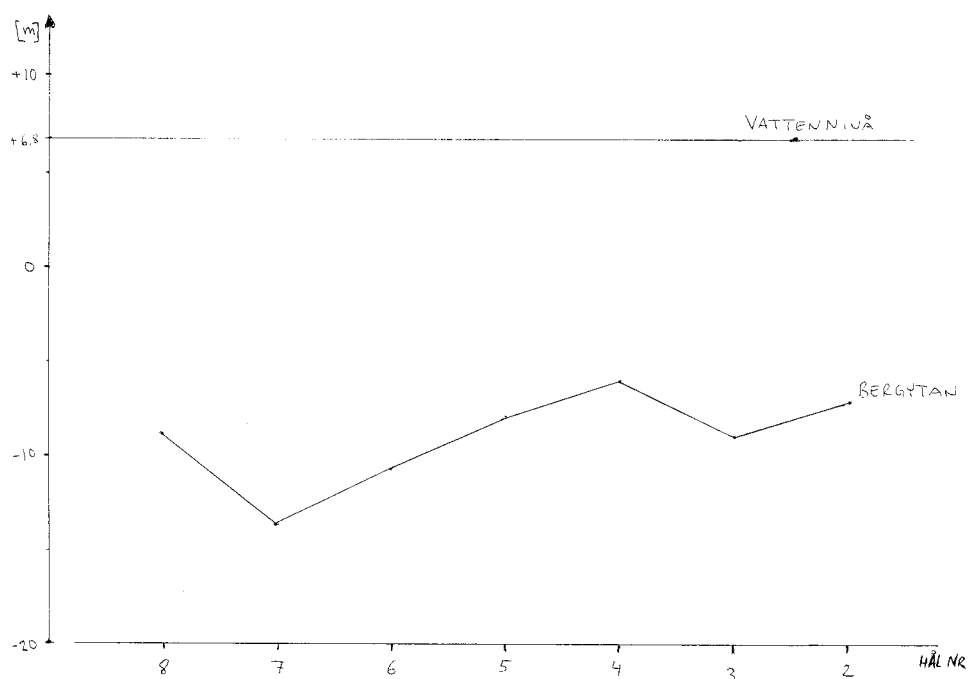


Figur 3.12, Karta över utförda sonderingar vid Sluss 6 (Ottosson 1997).

Den utförda sonderingen uppströms Sluss 6, se figur 3.12, ger berggrunden lutning samt visar på en kraftig sänka (Ottosson 1997). Vid sonderingen längs slussleden mättes djupet från vattenytan ner till berggrunden utan någon angiven fast plushöjd för vattennivån vid den aktuella tidpunkten. För att kunna bedöma bergnivån under botten i slussleden antas vattennivån uppströms kraftverket ha nivån +6,8 m under mätperioden (Bengtsson 2005). Avstånd till berg uppströms slussen bedömdes därmed enligt följande två profiler, väster och öster om slussleden, se figur 3.13 och 3.14.



Figur 3.13, Profil över hål 15 till 20 väster om slussleden.



Figur 3.14, Profil över hål 2 till 8 öster om slussleden.

Anmärkningsvärt kan vara att sonderingen i både hål 19 på västra sidan om slussleden och hål 7 på den östra sidan avbrutits vid djupet 20,5 m från vattenytan innan fast berg hittats. På denna plats har vid dykning en sänka observerats (Hultman 2005), vilket kan tyda på att ett vertikalt slag skär genom berggrunden. Då sänkan är bred tyder det på att en zon med mycket uppsprucket berg. Att sonderingen avbrutits innan fast berg påträffats tyder även detta på att sprickzonen sannolikt fortsätter djupt ned i berget.

### 3.2.4 Georadarundersökningar 1994 och 2001

Georadarundersökning har utförts för det aktuella området mellan Inlandsfabriken i öster och Sluss 6 i väster. Undersökningarna utfördes vid två olika tillfällen för att kunna jämföra variationer av vattenhalten i marken och berggrunden. Detta för att bestämma bergytans läge och vattenförande sprickor i berget samt jordmaterialförhållanden (Piirainen 2001).

I plankartan, se figur 3.15 nedan, har de profilsträckningar där berget bedömts som mest vattenförande märkts med blå färg. Grön färg visar på berg med flacka och öppna sprickor. Dessa sprickor är mest horisontella och oftast vattenförande.

Profilerna P1, P2, P3 och P4 går från mellan sydost till syd sydost i riktning mot nordväst till nord nordväst. Riktningarna på profilerna visas i tabell 3.4 nedan. I dessa profiler syns flera vattenförande sprickor som har en stigande tendens från Sluss 6 till den gamla igenfyllda slussen.

I profil P1 syns två större sprickor på 12 och 15 meters djup vilka har direkt kontakt mellan Sluss 6 och botten av den gamla slussen. Vid det kända slaget på 15 meters djup vid slutet av profil P1 finns en kraftig spricka som stiger svagt i riktning mot Inlandsfabriken och en annan som har en neråtgående riktning (Piirainen 2001).

I slutet av profil P4, vid det kända slaget på ca 10 meters djup, finns öppna horisontella sprickor.

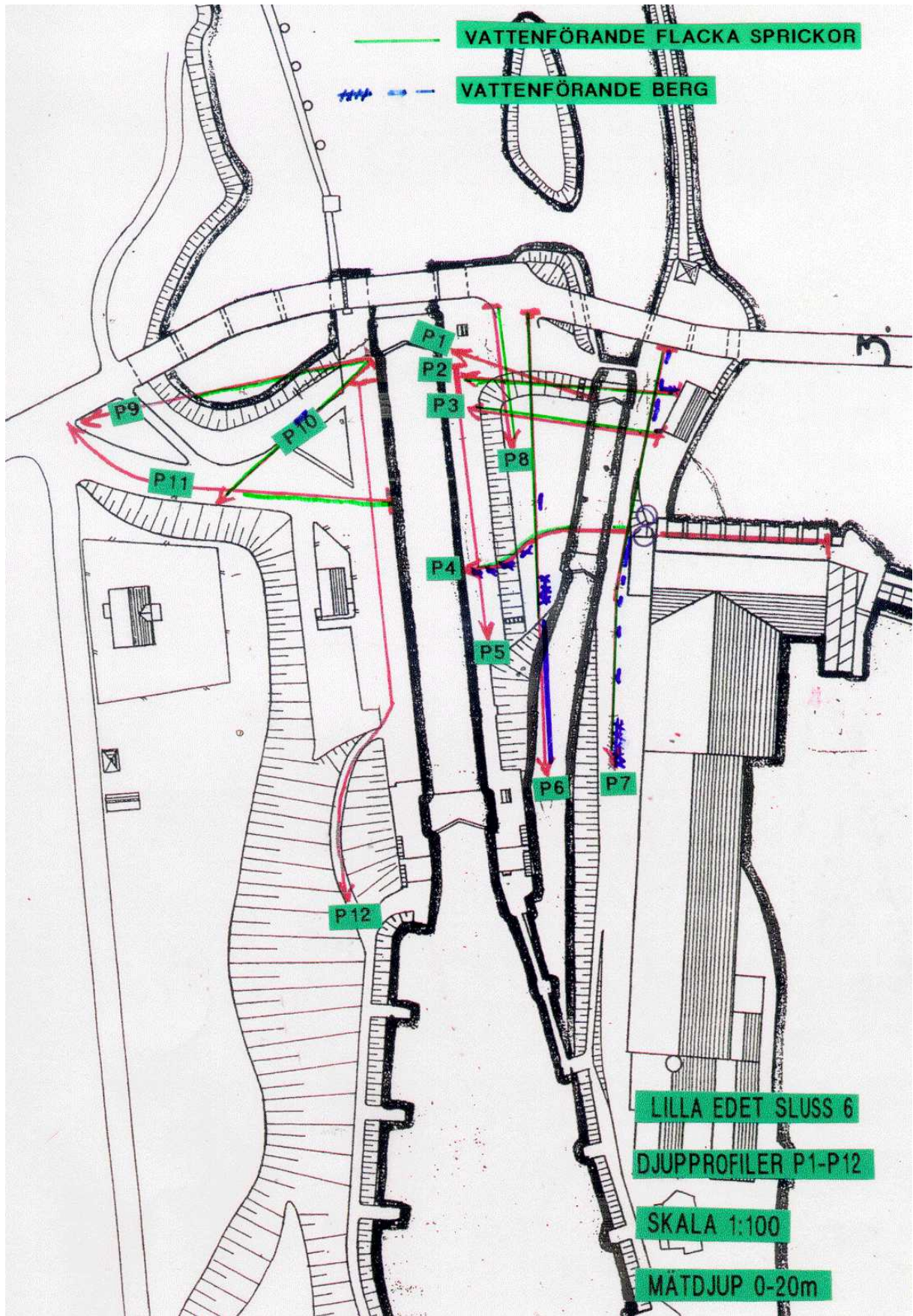
I profil P6 finns en kraftig vattenhaltökning i berggrunden efter mellan 52 och 60 meter i linjens riktning.

I profil P7 stiger vattenhalten avsevärt i flera bergsprickor, särskilt vid Inlands kontor. Mest vattenförande har berget visat sig vara i slutet av profilen.

I profil P8 finns öppna bergsprickor som är mest horisontella längs med profillinjen eller något sjunkande.

Tabell 3.4, Profilplanernas riktning.

<b>Profilplan</b>	<b>Riktning (grader)</b>
P1	334
P2	319
P3	323
P4	317
P6	222
P7 A	235
P7 B	227
P8	217



Figur 3.15, Kartplan över området med georadarundersökningar utmärkta (Pirainen 2001)

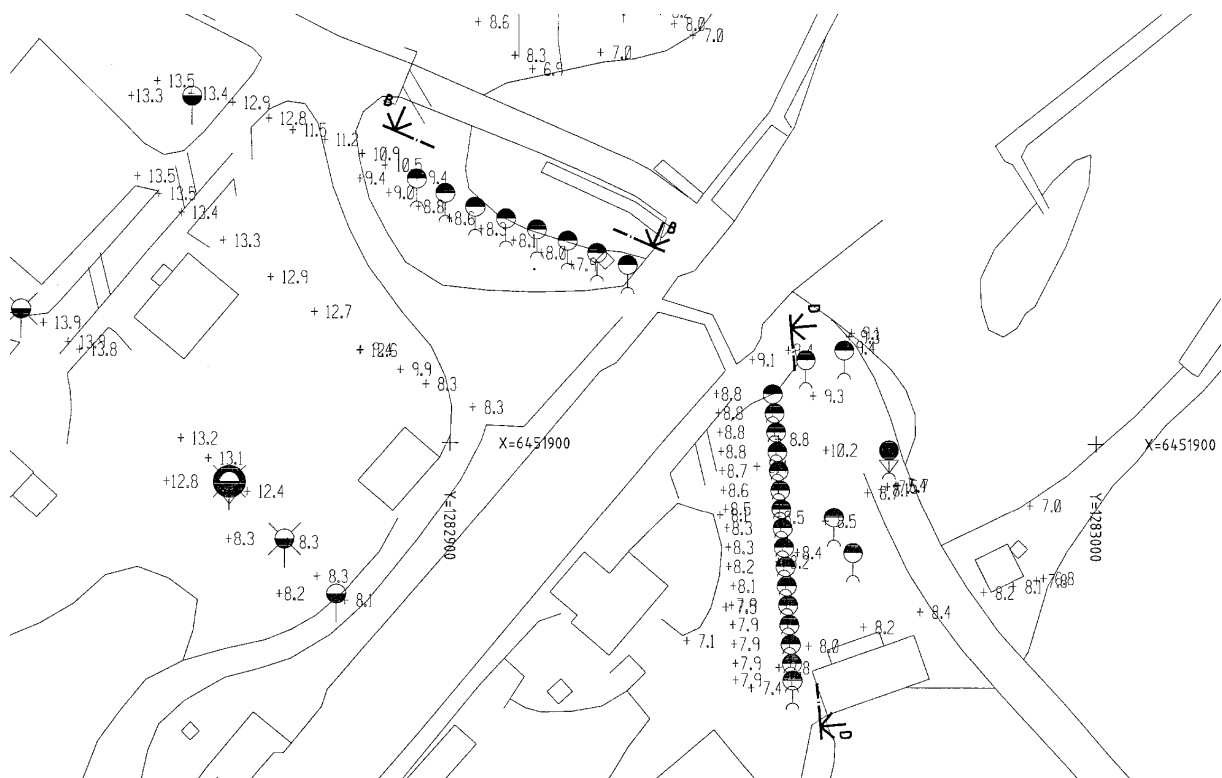
### 3.2.5 Grundundersökningar 2004

Berggrunden i området består av glimmerrik gnejs med en utpräglad foliationsriktning mot sydväst med mindre inslag av granit och pegmatit. Bergytans nivå är inom området småkuperad och huvudsprickriktningen varierar mellan nordväst till sydost och nord nordväst till syd sydost. Stupningen varierar mellan 20 till 45 grader mot sydväst. Den dominerande sprickorienteringen bedöms följa gnejsens struktur. Berget är uppsprucket längs glimmerband som bildar svaghetszoner i bergmassan. I berggrunden förekommer rikligt med större slag som ofta är öppna och vattenförande (Hultman 2004).

Resultat från kärnborrhningar i dammkonstruktionen visar att bergkvaliten under dammen varierar från bra till zoner med uppkrossad kärna och öppna slag samt kraftig vattenförande zoner (Hultman 2004).

Portrycksmätare i bergsprickor visar att grundvattentrycket är större i dessa än vad som motsvarar grundvattennivån i marken (Hultman 2004).

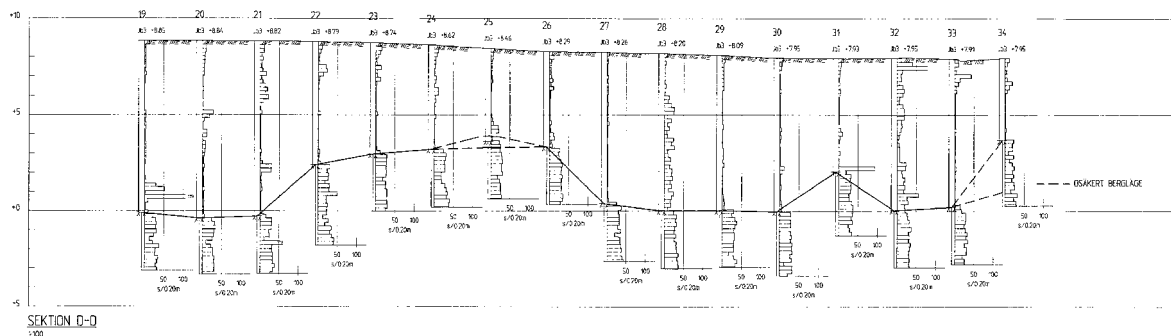
Utförda jord- bergsonderingar ger nivån på berget längs den planerade spontlinjen mellan Inlandsfabriken och Sluss 6 samt västerut från Sluss 6 enligt borrhplan i figur 3.16.



Figur 3.16, Borrhplan (Hultman 2004).

Sektion D i figur 3.17 nedan visar en längdsektion med inlagda parametrar från sonderingen. Sonderingshålen är numrerade från 19 till 34 från Sluss 6 och ner mot kontorsbyggnadens södra ände (Hultman 2004).





Figur 3.17, Sektion D (Hultman 2004).

Följande citat från Rolf Hultmans rapport, Lilla Edet dammsäkerhet, Geologiska och geotekniska förhållanden samt grundundersökningar, beskriver jordbergsonderingen i sektion D:

*”Hål 19 visar att det finns block på ca 8 m djup. Vid analys av detaljloggen från sonderingen syns det att blocken är relativt små, ca 20 cm. Ett kraftigare slag finns i berget på ca. 10,1 till 10,5 m djup, motsvarande nivå -1,4 till -1,8.*

*I hål 20 finns block ( ca. 0,4 m) eller stenar på 4 respektive 5 m djup samt ett slag i berget på 10,5 m djup, motsvarande nivå -1,8.*

*Hål 21 startar med ett grovt material, sten och block, till 3 m djup. På 6,5 m djup finns ett ca 0,5 m block, eller eventuellt flera stenar. Slag i berget mellan 10,0 och 10,5 m djup, motsvarande nivå -1,3 till -1,8.*

*I hål 22 till 24 finns relativt grovt fyllnadsmaterial från ytan ner till ca. 2 m djup. Bergstratan i hål 22 innehåller mycket sprickor och slag medan det i hål 23 och 24 finns större slag på ca. 7 m djup, motsvarande nivå +1,6.*

*I hål 25 och 26 är det något mindre grovt material i de övre delarna. Ett större slag i berget finns på ca. 4,5 m djup, motsvarande nivå +3,6, som överlagras av bättre berg i hål 25 medan resultatet tyder på rösberg i hål 26.*

*Hål 27 har en jämn jorddel och ett berg med mindre markerade slag.*

*Hål 28 respektive 32 är troligen borrhade i gamla slussväggen. Berget är relativt sprickfattigt.*

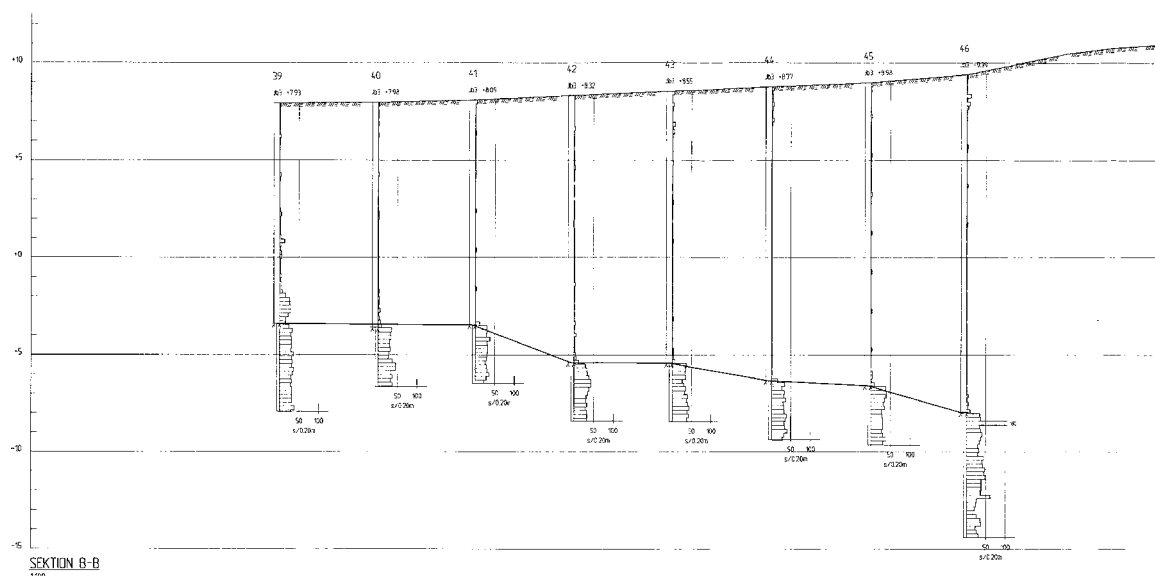
*Hål 29, 30 och 31 är borrhade i gamla igenfyllda slussen. Hålen som i nivå är borrhade något djupare än omkringliggande hål har markanta slag i berget på ca 10,5 m djup, motsvarande nivå -2,3.*

*I hål 33 påträffades block ner till ca. 1 m djup. Mellan 3,5 och 4,0 m djup, motsvarande nivå +4,0 till +4,5, i jorddelen fanns ett mycket dåligt lager med litet motstånd. Mindre slag noterades i berget.*

*Hål 34, fyllning ca. 1, 5 m. Bergnivå är markerad till ca. 3,5 m högre än i hål 33. Baserat på borresultatet är berget mycket uppsprucket, vilket skulle kunna vara en stenmur eller fyllning med block och grovt berg som utförts i samband grundläggningen av Inland. Berget kan då ligga på ungefär samma nivå som i hål 33 vilket betyder 0,5 m över borrhade.”*



Sektion B i figur 3.18 nedan visar en längdsektion med inlagda parametrar från sonderingen väster om Sluss 6 och är numrerade från 39 till 46 i nordvästlig riktning (Hultman 2004).



Figur 3.18, Sektion B (Hultman 2004).

Följande citat från Rolf Hultman beskriver jordbergsonderingen i sektion B.

*”Markytan närmast slussen, vid sonderingshål 39, ligger på nivån +7,9 och stiger till nivån +9,4 vid slutet av sektionen, sonderingshål 46. Motsvarande nivåer för bergytan som faller mot väster är -1,9 respektive -8,0.*

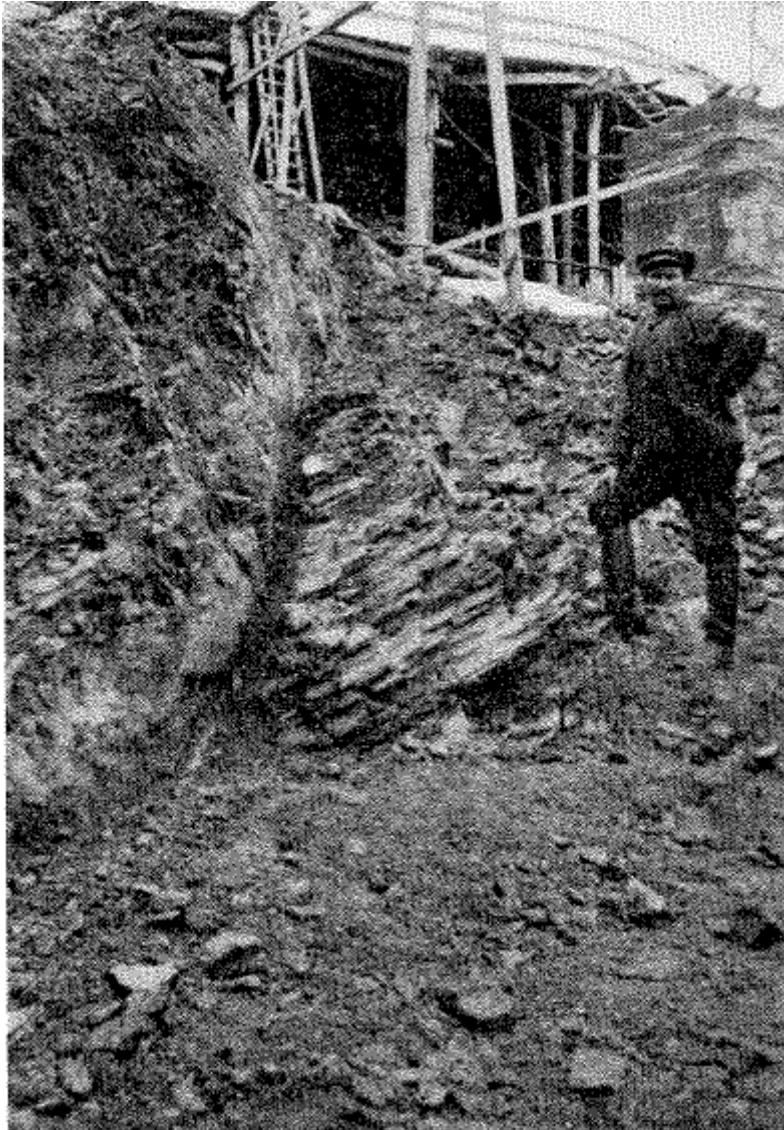
*Berget är mer homogent med mindre sprickor och slag jämfört med förhållandena öster om slussen. De mest markanta slagen i berget finns i sonderingshål 39 på nivån -3,0, i hål 42 på nivån -5,6, i hål 43 på nivån -6,4 och i hål 46 finns ett sämre parti runt nivån -13,0.*

*Sonderingen tyder på att marklagren i huvudsak består av lera med enstaka mindre block i sektionens västra del. Sonderingshål 39 visar att det ovan berg kan finnas ca 4 m med friktionsmaterial eller eventuellt fyllningsmassor sen byggtiden. Borrmetoden är relativt okänslig vilket medför att gränsen mellan lera och friktionsmaterial är svårbedömd. Den gjorda tolkningen är att leran i sonderingshål 41 och 44 går ner mot berget medan det i övriga sonderingar finns 1 till 2 m med friktionsmaterial ovan berget.”*

Resultaten visar att det är mindre block i jordlagren än vad som tidigare antagits. Berget är genomsatt av kraftiga, troligen vattenförande slag.

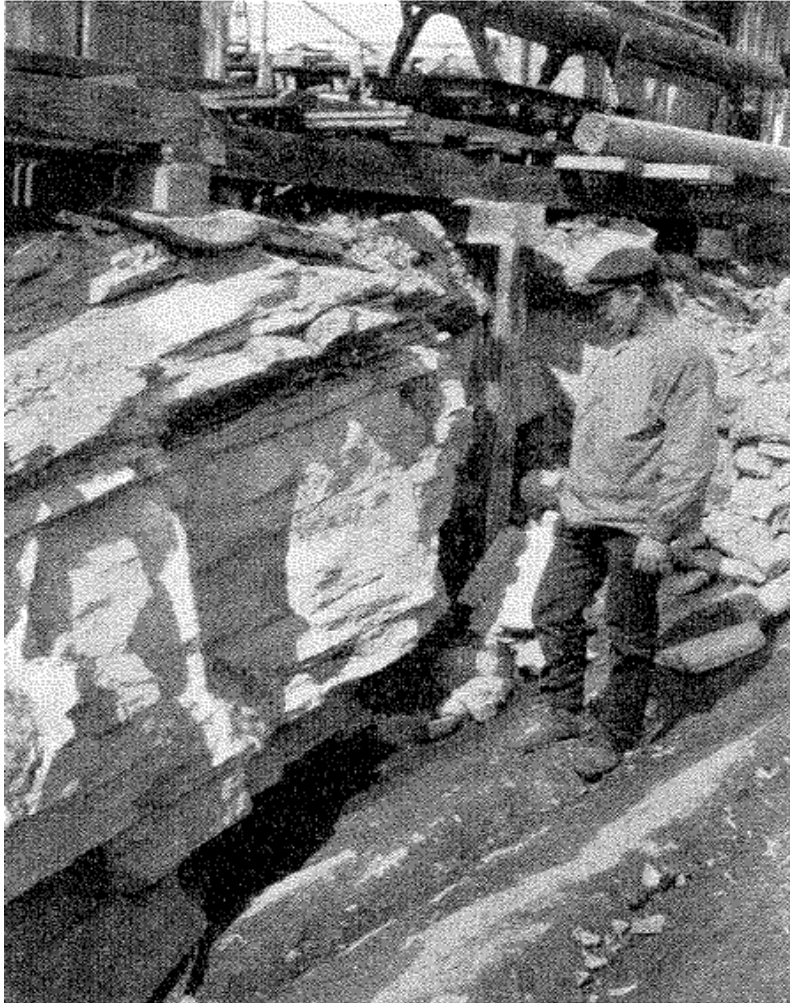
### 3.2.6 Byggnation av Lilla Edets Kraftverk

I redogörelsen för arbetena med Lilla Edets Kraftverks första utbyggnad finns två slag angivna. Ett vertikalt lerslag upptäcktes vid sprängningen för sugrören. Detta slags sträckning anges starta vid avstängningssätten i sugröret för aggregat III och vidare snett under hela maskinstationsgrunden för att sedan passera linjen för den västra gavelmuren 12 m norr om överbyggnadens nedströmsfasad. Slaget fotograferades 1921 och bilden visas i figur 3.19.



Figur 3.19, Vertikalt lerslag genom berget vid maskinstationens sydvästra hörn (Kungl. Vattenfallsstyrelsen 1932).

Det andra slaget anges vara flackare och även detta löper under hela kraftstationen. Slaget var kraftigt vattenförande och påträffades dels vid arbetena med fördelningsbassängen norr om kraftverket och vid sprängningen av sänket till den permanenta pumpcentralen i maskinstationens västra del. Fotot i figur 3.20 visar slaget och man ser här att det följer bergets foliationsplan.

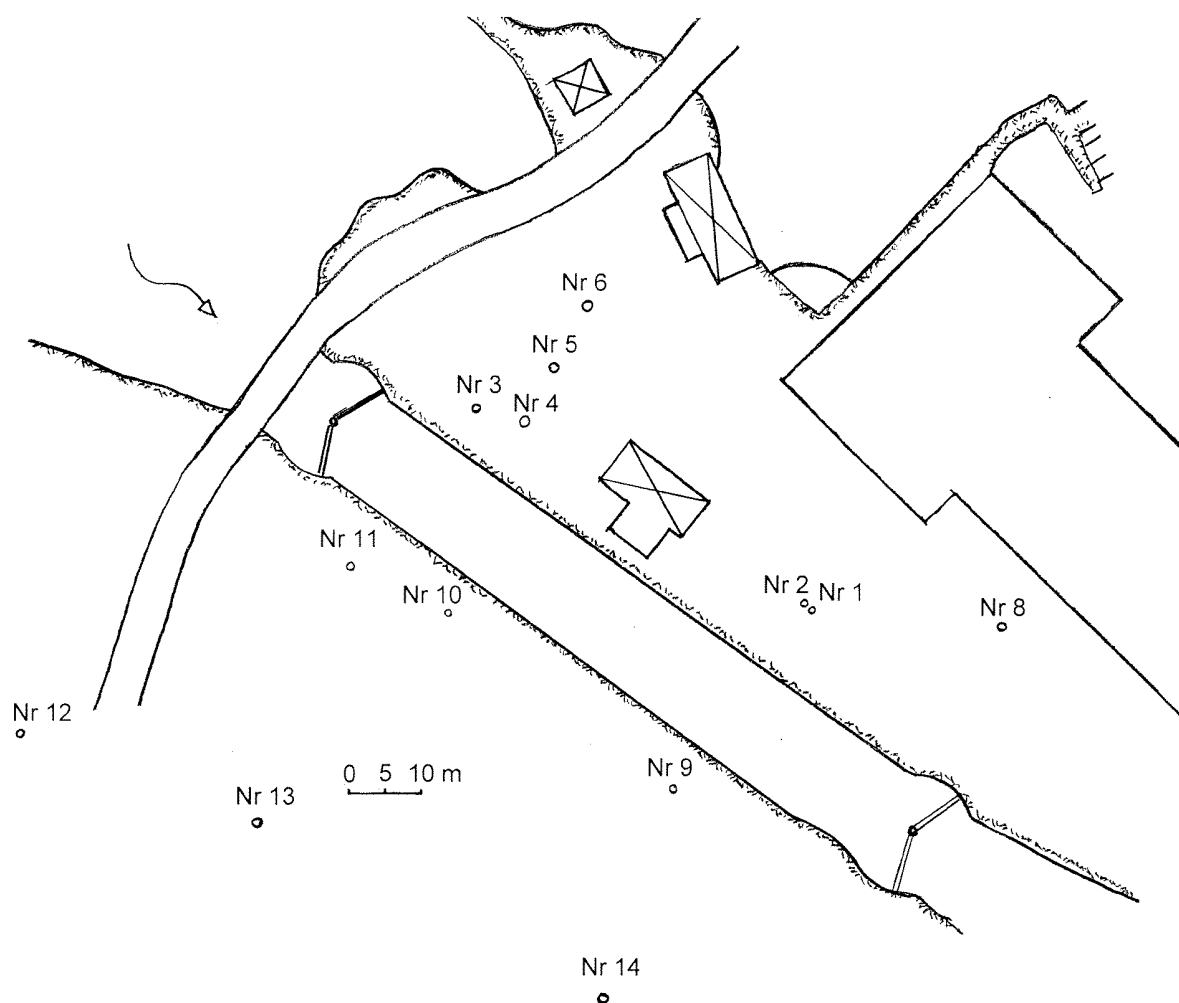


Figur 3.20, Vattenförande slag längs foliationsplanet vid intagsdammen (Kungl. Vattenfallsstyrelsen 1932).

### 3.2.7 Grundvatten- och portrycksnivåer

Grundvattenmätningar har utförts kring Sluss 6 enligt ritning i figur 3.21. Denna undersökning utfördes för att övervaka eventuella grundvattensänkningar till följd av tätning och stabilisering av slussmurarna. Mätperioden är dock för kort för att några större förändringar skall kunna utläsas. Viss variation i mätserien kan antas bero på tätningsarbetena (Berntsson 2001).

Grundvattennivåerna i dessa mätrör följer i stort sett markens nivåförändring förutom i området närmast slussen där grundvattennivån är ca 2 m högre än i de övriga rören.



Figur 3.21, Placering av grundvattenrör och porttrycksmätare kring Sluss 6 (Berntsson 2001).

Medelvärdet på grundvattennivån ifrån mätningar mellan Inland och Sluss 6 presenteras i tabell 3.5 nedan.

Tabell 3.5, Grundvatten- och porttrycksnivåer.

Rör nummer	Medel nivå [m] 01-03-22 till 01-09-20	Rörtyp
1	2,7	Vattenståndsrör
2	2,7	Porttrycksmätare
3	4,3	Porttrycksmätare
4	5,9	Vattenståndsrör
5	3,9	Vattenståndsrör
6	3,9	Vattenståndsrör
8	1,6	Vattenståndsrör

### 3.2.8 Injekteringsarbete i cirkelspont 2005

I samband med arbetena med dubbelponten har en betongkärm gjutits i hörnet med cirkelsponten, mot den mur som ansluter mot dubbelponten. Före gjutningen utfördes vattenförlustmätningar och injektering ned till ett djup av 4,8 m. Dessa mätningar är således

utförda på samma plats som arbetena beskrivna i kapitel 3.2.2. Tabell 3.6 visar resultaten från de senaste vattenförlustmätningarna utförda 20 oktober 2005 av MFAB på uppdrag av PEAB.

Tabell 3.6, Vattenförlustmätningar vid mur i cirkelspont (MFAB 2005)

Borrhål	Borr djup (m)	Tid (min)	Tryck (MPa)	Flöde (l/min)	Lugeon Värde (l/(min*m*Mpa))	Anmärkning
1	4,8	2	0,15	4,2	5,8	Samband 2,3
1	4,8	4	0,15	4,2	5,8	
1	4,8	6	0,15	4,2	5,8	
2	4,8	2	0,15	3,8	5,3	Samband 1,3
2	4,8	4	0,15	3,8	5,3	
2	4,8	6	0,15	3,8	5,3	
3	4,8	2	0,15	4,0	5,6	Samband 1,2
3	4,8	4	0,15	4,0	5,6	
3	4,8	6	0,15	4,0	5,6	
4	4,8	2	0,15	0,0	0	
4	4,8	4	0,15	0,0	0	
4	4,8	6	0,15	0,0	0	
5	4,8	2	0,15	0,0	0	
5	4,8	4	0,15	0,0	0	
5	4,8	6	0,15	0,0	0	
6	4,8	2	0,15	0,0	0	
6	4,8	4	0,15	0,0	0	
6	4,8	6	0,15	0,0	0	
7	4,8	2	0,15	0,0	0	
7	4,8	4	0,15	0,0	0	
7	4,8	6	0,15	0,0	0	

Berget injekterades i två omgångar. Vid den första injekteringen användes ett cementbruk med vct 1,0 under 1,5 timmar. Därefter användes ett cementbruk med vct 0,8 i 2 timmar och 10 min. Sluttrycket uppgick till 0,5 MPa.

Efter injekteringen borrades två nya hål för att kontrollera bergets täthet. Även dessa borrades ned till 4,8 m. Hålen trycksattes med vatten under 2,4 och 6 minuter med ett tryck på 0,5 MPa. Inga vattenförluster kunde uppmätas.

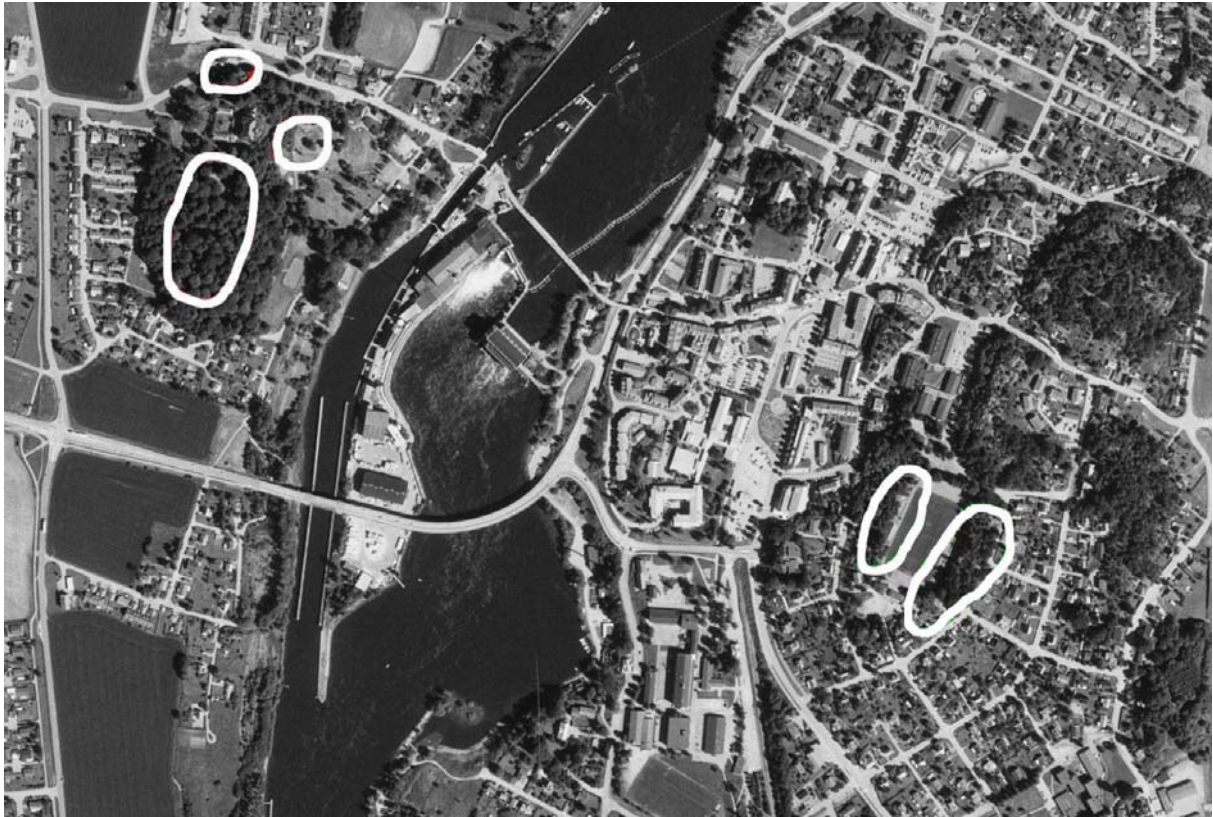
### 3.3 Kartering av berg

Området kring kraftverksdammen i Lilla Edet avsöktes för att lokalisera synligt berg. Berghällar påträffades på båda sidor om Göta älv och dessa delades därför upp i två områden, ett västligt och ett östligt enligt figur 3.21. Sprickorna i berget karterades med avseende på strykning och stupning. Detta förfarande beskrivs nedan i kapitel 3.3.1. Åtskillnad gjordes vid inmätningen av sprickor i foliationsplanet och sprickor vilka skar detsamma.

Med foliationsplan menas de parallella plan eller skikt som uppstår i exempelvis gnejser. Dessa kan bildas genom rörelser och uppsmältning, så kallad metamorfos, där berget ombildas och mineralerna struktureras i ordnade former. Tydliga foliationsplan utgörs ofta av svaghetsplan där berget lättare spricker.

Stuffer har tagits i de olika delarna av området, vilka redovisas på foton i anslutning till beskrivningen av delområdena i kapitel 3.3.2 och 3.3.3. Detta för att möjliggöra

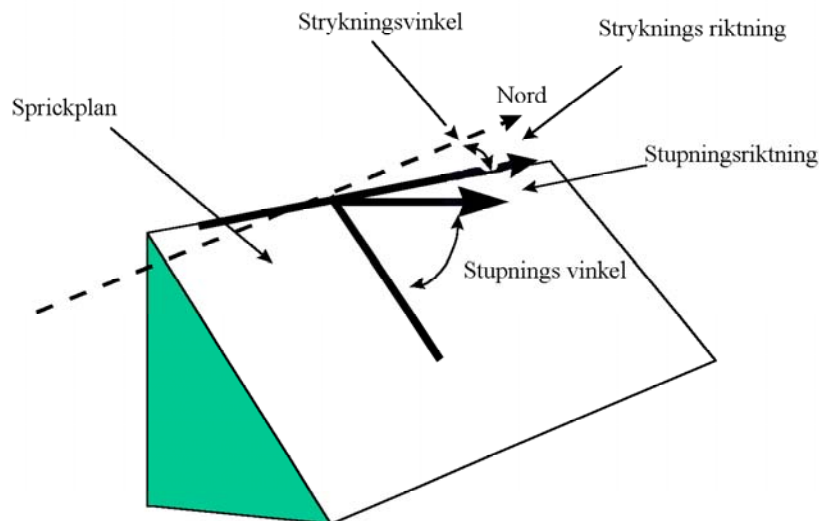
bergartsbestämning och jämföra lokala skillnader som påvisar de bildningsprocesser som uppstått genom de tidigare bergkedjebildningar som beskrivits i kapitel 3.1. Resultatet från dessa karteringar utgör indata till datorprogrammet GEORient, vilket beskrivs i kapitel 4.1.1, och redovisas i tabellform i anslutning till respektive delområde i kapitel 3.3.2 och 3.3.3.



Figur 3.21, Flygfoto över Lilla Edet med karteringsplatserna utmärkta.

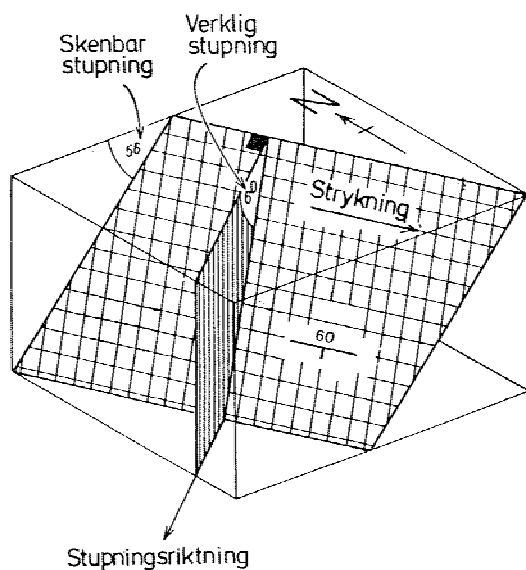
### 3.3.1 Strykning och stupning

Lagerföljd, foliation och sprickors riktning i berggrunden beskrivs genom inmätning av strykning och stupning. Strykningen utgör vinkeln från norr till skärningslinjen mellan det lutande planet och horisontalplanet, se figur 3.22, och anges i grader från 0 till 360. Stupningen är bergets lutning mot horisontalplanet vinkelrätt strykningen och varierar mellan 0 och 90 grader.



Figur 3.22, Schematisk bild över strykning och stupning (Funehag 2004).

I fält kan det vara svårt att avgöra en sprickas verkliga stupning. Den verkliga stupningen, enligt figur 3.23, utgörs alltid av den brantaste vinkeln i ett givet plan. Ofta kan en skenbar stupning förefalla om det inte går att bedöma sprickans strykning. I dessa fall går det istället utgå från stupningen vilken då bestäms genom att låta vatten rinna över sprickplanet. Då vattnet alltid rinner längs den brantaste vinkeln kan stupningen mätas längs vattnets väg. Strykningen mäts därefter in i horisontalplanet och vinkelrätt mot stupningsriktningen.

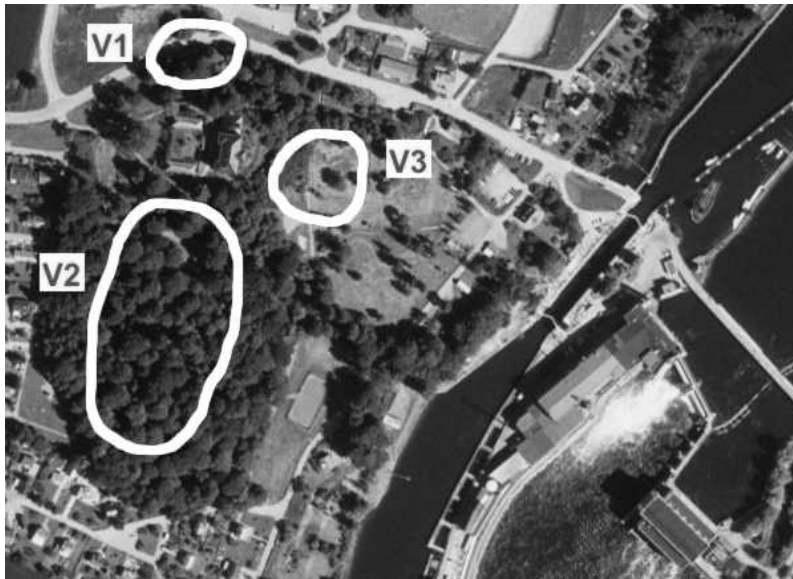


Figur 3.23, Skillnad mellan skenbar och verklig stupning (Loberg 1987 med ändringar).

### 3.3.2 Delområdesbeskrivning i väster

De berghällar som lokaliserats och karterats på den västra sidan av Göta älv är markerade med ringar i figur 3.24. Delområdena har karterats var för sig och har därför numrerats V1, V2 och V3 enligt figuren. I följande kapitel beskrivs dessa områden.





Figur 3.24, Flygfoto över det västra området med karteringsplatserna numrerade.

### 3.3.2.1 Delområde V1

Platsen utgörs av en bergskärning som härstammar från byggnationen av en lokal gata. I bergskärningen finns tydliga kvartsgångar med en tjocklek på upp till 10 cm. Av stoffen som togs på platsen för bergartsbestämning, se figur 3.25, framgår efter noggrann okulär besiktning vara gnejs med huvudsakliga mineralen hornblände (amfibol) och kvarts samt även förekommande plagioklas och glimmer. Kornstorleken är fin och strukturen är orienterad med tydliga genomskärande stråk av kvarts samt rik på glimmer i brottytan.



Figur 3.25, Stuff av gnejs och kvartsgång från delområdet V1.

När platsen studeras i sin helhet framgår strukturen vara mer migmatisk, se figur 3.26. Efter att sprickor längs foliationsplanet i bergskärningen studerats har foliationsriktningen uppskattats till strykningen 170 grader och stupningen 30 grader. I tabell 3.5 redovisas samtliga inmätningar i området.





Figur 3.26, Bergskärning i delområde V1 med migmatitiskt struktur, delvis uppsmält, och tonalitisk sammansättning.

Tabell 3.5, Kartering av strykning/stupning i området V1.

Nummer	Strykning	Stupning	Anmärkning
1	170	30	Foliationsplan
2	184	45	Foliationsplan
3	184	45	Foliationsplan
4	184	45	Foliationsplan

### 3.3.2.2 Delområde V2

Berget i område V2 är mycket eroderat och därmed svårkarterat. Erosionen har påverkat de delar av berget med lägre hårdhet mer än de hårdare. Detta har gjort att tydliga kvartsband bildar ett mönster av täta kammar på hällens yta. Kammarna följer tydligt bergets foliation vilken även är lätt att observera på lite avstånd vilket framgår av figur 3.27 nedan. Vid karteringen inmättes både sprickor som följde foliationsplanet, vilket då bestämdes ha en strykning på 190 grader och en stupning på 24 grader, samt sprickor vilka skar detsamma. I tabell 3.6 nedan, redovisas samtliga inmätningar i området.



Figur 3.27, Berghäll i delområde V2.

Stuffer från detta område studerades för bergartsbestämning. En myloniserad struktur observerades, se figur 3.28. Bergarten liknar mylonitgnejs vilken bildas då gnejsgranit deformeras ytterligare under stort tryck exempelvis vid bergkedjebildning. Grå gnejsgranit är ofta förskiffrad tonalit. Röd eller rödlätt gnejsgranit bildas genom förskiffring av granodiorit. Då laxrosa spalter även framträder tydligt är det dock sannolikare att berget bildats genom förskiffring av rödlätt gnejsgranit som kommer från granit eller granodiorit än från tonalit (Lundegårdh 1978).



Figur 3.28, Stuff av gnejsgranit från område V2.

Skillnaden mellan granit granodioriten och diorit är andelen kvarts. Granit innehåller mycket kvarts och en mindre andel plagioklas. Dioriten innehåller i princip ingen kvarts utan består istället till stor del av plagioklas. Granodioriten innehåller således mer plagioklas än granit och dessutom mindre kvarts. Samtidigt som kvartshalten sjunker kan andelen hornblände och plagioklas öka och granodioriten övergår då till tonalit (Lundegårdh 1978).

Då andelen plagioklas och kvarts bedöms nära likvärdig i stufen innebär det att bergarten bör vara förskiffrad granodiorit. Både mylonitgnejs och tonalit kan bildas av granodiorit.

Tabell 3.6, Kartering av strykning/stupning i området V2.

Nummer	Strykning	Stupning	Anmärkning
1	190	40	Foliationsplan
2	160	30	Foliationsplan
3	190	24	Foliationsplan
4	95	88	Spricka
5	95	70	Spricka
6	68	75	Spricka
7	67	80	Spricka
8	90	75	Spricka
9	160	45	Slag
10	139	90	Spricka
11	70	80	Spricka
12	70	80	Spricka
13	70	80	Spricka
14	70	80	Spricka
15	255	80	Spricka
16	255	80	Spricka
17	165	70	Spricka
18	335	80	Sprickzon
19	335	80	Sprickzon
20	155	85	Sprickzon
21	155	85	Sprickzon

En sprickzon påträffades bestående av fyra branta sprickor med en strykning som skiljer sig från övriga observationer i området. Dessa nummerades 18 till 21 i tabell 3.6. Sprickorna var fördelade på 30 cm och skar genom alla synliga delar av berget.



### 3.3.2.3 Delområde V3

Berget i delområdet är mycket eroderat. De i bergmassan ingående hårdare mineralen så som kvarts och fältspat har bildat uppstickande åsar vilka är orienterad som band i foliationsplanen. Mineralorienteringen i berget framgår av figur 3.29 nedan. Strukturen på berget är väldigt lik den i delområde V2. Berget är kraftigt förgnejsat med fler sprickor längs foliationsplanen.



Figur 3.29, Bergets förgnejsade struktur.      Figur 3.30, Muskovit i brottytan.

Vid närmare okulär besiktning av brottytan på stoffen i figur 3.30 från området framgår tydligt att det även här är glimmer som är den dominerande mineralen i bergets svaghetszoner. Glimmerfjällen är här ljusare, nästan transparenta och bör således vara muskovit.



Figur 3.31, Krosszon i delområde V3.

En krosszon karterades, se figur 3.31, med strykningen mellan 70 till 77 grader och stupning mellan 80 till 82 grader vilka redovisas som krosszon, nummer 33, 34 och 35 i tabell 3.7.

Tabell 3.7, Kartering av strykning/stupning i området V3.

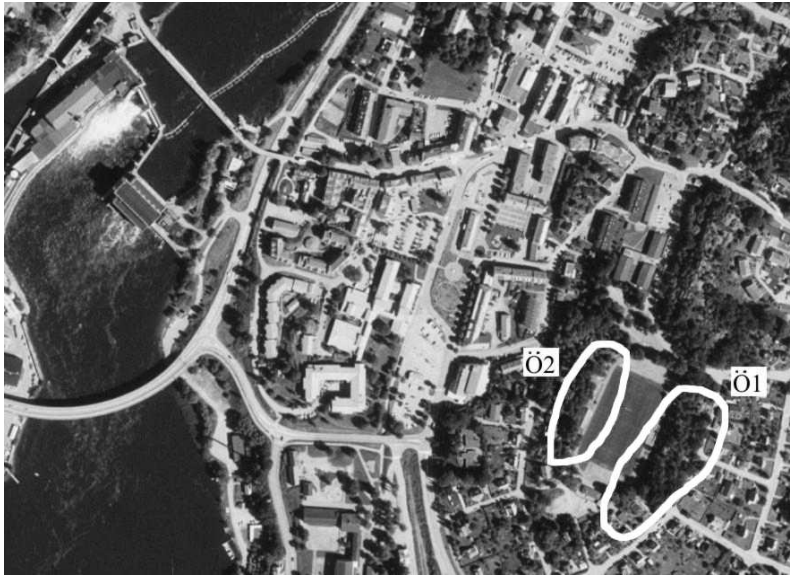
Nummer	Strykning	Stupning	Anmärkning
1	186	54	Spricka i foliationsplan
2	186	54	Spricka i foliationsplan
3	186	54	Spricka i foliationsplan
4	186	54	Spricka i foliationsplan
5	260	80	Spricka
6	260	80	Spricka
7	186	40	Spricka i foliationsplan
8	186	40	Spricka i foliationsplan
9	186	40	Spricka i foliationsplan
10	186	40	Spricka i foliationsplan
11	186	40	Spricka i foliationsplan
12	186	40	Spricka i foliationsplan
13	190	50	Spricka i foliationsplan
14	190	50	Spricka i foliationsplan
15	190	50	Spricka i foliationsplan
16	190	50	Spricka i foliationsplan
17	248	90	Sprickzon
18	248	90	Sprickzon
19	248	90	Sprickzon
20	180	48	Spricka i foliationsplan
21	180	48	Spricka i foliationsplan
22	180	48	Spricka i foliationsplan
23	180	48	Spricka i foliationsplan
24	180	48	Spricka i foliationsplan
25	82	88	Spricka
26	82	88	Spricka
27	82	88	Spricka
28	254	90	Spricka
29	234	70	Spricka
30	254	85	Spricka
31	254	85	Spricka
32	254	85	Spricka
33	77	82	Krosszon
34	77	82	Krosszon
35	70	80	Krosszon
36	83	80	Spricka
37	262	80	Spricka

Ytterligare zoner med uppsprucket berg och litet sprickavstånd observerades. Exempel på detta är den sprickzon i foliationsplanets riktning bestående av fyra sprickor inom 35 cm, numrerade 1 till och med 4 i tabell 3.7. Ytterligare en vertikal sprickzon inmättes och redovisas som nummer 17 till 19 i tabellen.

### 3.3.3 Delområdesbeskrivning i öster

Berget i det här området har till stor del frilagts i samband med anläggandet av en fotbollsplan. Detta skedde genom sprängning vilket har lett till att det i vissa delar är kraftigt uppsprucket. Därför var det viktigt att noggrant studera berget för att skilja de naturliga

sprickorna från de sprängda. Det östra området delades in i två delområden vilka framgår av figur 3.32.



Figur 3.32, Flygfoto över det östra området med karteringsplatserna numrerade.

### 3.3.3.1 Delområde Ö1

Kartering av delområdet utfördes från den norra delen av bergskärningen till den södra eller från vänster till höger i figur 3.33.



Figur 3.33, Bergskärning på östra sidan om fotbollsplanen.

Bergets mineralsammansättning är relativt enhetlig och utgörs huvudsakligen av kvarts, fältspat, glimmer eller biotit samt plagioklas och hornblände. Kornstorleken varierar från fin



till medelgrov med en viss antydning till foliation vilket även syns på stoffen i figur 3.34, vilken är tagen mitt på bergsskärningen i figur 3.33 ovan.



Figur 3.34, Stuff av gnejsgranit från område Ö1.

Stofferna i figur 3.35 nedan, är tagna i närheten av skärningen i figur 3.33 med bara ett par meters mellanrum i områdets södra ände. Den vänstra, rödare stoffen är tagen något lägre i vertikalled men gränsen mellan dem är otydlig. En antydning till vilken stupningsvinkel som skiljer dem är den skiktning som syns i form av grå band på den vänstra stoffen. På samma sätt skär det rödare berget upp genom den i övrigt mer gråspräckliga bergmassan.



Figur 3.35, Stuffer från södra delen i Ö1, Gnejsiga granitoider (vänster, höger) och hornblände (mitten).

Trots att färgen skiljer sig markant är mineralinnehållet likartat. Skillnaden kan förklaras av att de mikroskopiska, runda, hämatitkornen i fältspaten som färgar den vänstra stoffen röd i den högra utbildats till små järnglansfjäll vilka ligger regelbundet ordnade efter kristallstrukturen och då reflekterar ljuset blågrått (Lundegårdh 1978).

På flera ställen är berget genomskuret av läkta sprickor, se figur 3.36. Exempel på detta är den 30 cm tjocka gång av 20 till 30 mm grova korn med kvarts och ljusrosa fältspat som numrerats 4 i tabell 3.8 nedan, samt nummer 24 med ca 20 cm tjocklek. Dessa gångar har granitisk till pegmatitisk struktur. Det förekommer även stora kristaller av hornblände, se figur 3.35 ovan, i anslutning till gångbergarterna.



Figur 3.36, Genomskärande läkt spricka med granitisk till pegmatitisk struktur.

Särskilt utmärkande för denna profil är den upp till 1,3 m breda krosszon, se figur 3.37, som skär berget i västlig riktning med strykningen 290 grader. Stupningen är nära vertikal och uppmättes till 88 grader. Krosszonen noterades även fortsätta österut.





Figur 3.37, En tydlig krosszon genom bergskärningen.

De sprickor som inmäts invid krosszonen är på båda sidor om denna mer vertikalt stupande än övriga sprickor vilka tenderar att följa foliationsplanen. Vid inmätningen av två sprickor vilka bildar en v-form in i berget, ca 2 meter till vänster om krosszonen, påträffades en kraftig magnetisk anomali. Kompassens norrpil ställde in sig i riktning in mot sprickan vid ett avstånd närmare än ca en meter. Sprickan syns längs till vänster i figur 3.37 som en ljusare yta. Dessa sprickor är numrerade 12 och 13 i tabell 3.8 nedan. I denna tabell redovisas samtliga inmätta sprickor i delområdet.

Tabell 3.8, Kartering av strykning/stupning i området Ö1.

Nummer	Strykning	Stupning	Anmärkning
1	260	78	Spricka
2	122	86	Spricka
3	266	66	Spricka
4	198	58	Pegmatitgång
5	333	75	Spricka
6	333	75	Spricka
7	336	66	Spricka
8	336	66	Spricka
9	42	44	Spricka i foliationsplan
10	42	44	Spricka i foliationsplan
11	42	44	Spricka i foliationsplan
12	266	55	Spricka
13	143	85	Spricka
14	290	88	Krosszon
15	266	55	Spricka
16	143	85	Spricka
17	94	81	Spricka
18	94	81	Spricka
19	94	81	Spricka
20	189	40	Spricka
21	155	25	Spricka i foliationsplan
22	287	50	Spricka
23	150	27	Foliationsplan
24	24	70	Pegmatitgång

### 3.3.3.2 Delområde Ö2

Delområdet Ö2, figur 3.38, är beläget mitt emot Ö1 längs fotbollsplanens andra långsida. Norr är således till höger på denna bild och det är även från detta håll karteringen utfördes.



Figur 3.38, Bergskärning väster om fotbollsplanen.

Bergets mineralsammansättning i detta delområde är densamma som i delområde Ö1. Detta framgår tydligt genom jämförelse av stufverna i figur 3.34 ovan och den i figur 3.39 nedan. I de brottytor som följer foliationen är strukturen tydligt gnejsisk, i andra brottytor ser strukturen mer granitisk ut men detta förklaras av att mineralkornens stänglighetsriktning i detta fall är vinkelrät mot brottytan. Även här genomskärs berget av ljusrosa strimmor och kraftigare gångar med pegmatit. Exempel på detta är den kvartsrika och ljusrosa långsträckta gång med nummer 14 i tabell 3.9 nedan.





Figur 3.39, Stuffer från delområde Ö2, grå gnejsgranit (vänster) med band av ljusrosa fältspat (höger) och pegmatit (mitten).

I skärningens övre del påträffades en zon med kraftigt uppsprucket och folierat berg. Denna sprickzon är synlig längs en stor del av den undersökta bergskärningen och uppmättes ha en längd på 35 till 40 meter. I den nordliga delen är strykningen 172 grader och stupningen 52 grader. Sprickzonen är i denna del mellan 5 och 7 cm tjock, kraftigt uppsprucken och folierad samt även till stora delar fylld med jord eller lera. Figur 3.40 visar en del av detta jordfyllda slag som tagits från platsen. Längre söderut ökar sprickzonens bredd samtidigt som avståndet mellan sprickorna ökar. Detta beskrivs av de fyra sprickor som benämns sprickzon 1 i tabell 3.9 nedan. Avståndet mellan den översta och den nedersta sprickan uppgick till ca 20 cm, samtidigt som strykningen riktning är mer österlig och stupningen är flackare. Strykning och stupning uppmättes till 153 grader respektive 34 grader.



Figur 3.40, Stuffer från jordfyllt slag i delområde Ö2.

Ytterligare ett slag eller uppsprucken zon inmättes i området och benämns sprickzon 2 i tabell 3.9 nedan. Här inmättes tre sprickor inom 20 cm med strykningen 134 grader och stupningen

28 grader. Denna sprickzons utsträckning uppmättes till mellan 20 och 25 m. Båda dessa slag framgår som antydningar till sneda linjer i bergets struktur i figur 3.38 ovan. Det jordfyllda slaget är den undre sneda linjen medan den andra sprickzonen är den övre.

Tabell 3.9, Kartering av strykning/stupning i området Ö2.

Nummer	Strykning	Stupning	Anmärkning
1	47	45	Spricka i foliationsplan
2	47	45	Spricka i foliationsplan
3	47	45	Spricka i foliationsplan
4	171	40	Foliationsplan
5	180	45	Spricka
6	180	45	Spricka
7	180	45	Spricka
8	180	45	Spricka
9	177	26	Spricka
10	149	30	Foliationsplan
11	4	36	Spricka
12	164	32	Spricka
13	179	52	Slag
14	168	73	Pegmatitgång
15	100	82	Spricka
16	284	74	Spricka
17	271	88	Spricka
18	153	34	Sprickzon 1
19	153	34	Sprickzon 1
20	153	34	Sprickzon 1
21	153	34	Sprickzon 1
22	134	28	Sprickzon 2
23	134	28	Sprickzon 2
24	134	28	Sprickzon 2

### 3.4 Kärnkartering

En i berg vanlig undersökningsmetod är så kallad kärnborrning eller även kallad diamantborrning. Med hjälp av ett borrverktyg kan borrkärnor av berg tas upp från stora djup. Det verktyg som används består av en borrkrona med diamantkristaller och ett dubbelrör där det yttre röret driver borren medan det inre fungerar som behållare för borrkärnan. Det berg som slits sönder av borrkronan transporteras upp i ett mellanrum mellan rören med hjälp av vatten, tryckluft eller annan smörjande borrvätska i form av flisor eller så kallat "kax" (Lindblom 2001).

Efter upptagningen karteras borrkärnan för att möjliggöra en klassificering av berget. Det finns flera olika metoder för bergklassificering exempelvis, RQD (Rock Quality Designation), Q (Rock Tunnelling Quality Index) och RMR (Rock Mass Rating) (Lindblom 2001).

Karteringen av borrkärnorna från diamantborrningen bör ha följande innehåll: Ingående mineral med avseende på färg, kornstorlek och glans för senare bergartsbestämning. Öppna och läkta sprickor, sprickavstånd, sprickorientering, antalet sprickset samt sprickytornas råhet. Eventuell mineralbeläggning och vittring. Bergets struktur och eventuell foliation (Jern 2004).



Karteringen utfördes på borrkärnor från tidigare diamantborrningar utförda mellan år 2003 och 2004 i en undersökning med syfte att kontrollera betongkvaliteten i dammkonstruktionen samt det underliggande berget. Vid denna undersökning togs 25 borrkärnor fram enligt figur 3.42. Vissa består nästan enbart av betong medan andra har borrats djupare ned i berget. Av dessa valdes de ut som bedömdes innehålla berg i sådan utsträckning att de kunde ge tillförlitlig information för kartering beträffande bergets kvalitet och sprickighet. Följande borrprover valdes ut: KB11A, KB11B, KB12B, KB15, KB17, KB19, KB20, KB21, KB22 och KB23.



Figur 3.42, Borrplan över kärnborrning vid kraftverket i Lilla Edet (Hultman 2004).

Kartering av dessa kärnor har redan utförts av Rolf Hultman på SWECO VBB AB för Vattenfalls räkning i Lilla Edet dammsäkerhet, Geologiska och geotekniska förhållanden samt grundundersökningar. Resultatet från karteringen av de utvalda kärnorna har sammanställts från denna rapport och presenteras i kapitel 3.4.1 nedan.

För att det ska vara möjligt att avgöra sprickors strykning och stupning måste kärnorna vara orienterade i förhållande till omgivningen. Där stora sprickor påträffats skall dessa ersättas av trädistanter i samband med att kärnorna placeras i sina lådor. I det aktuella fallet har inget av detta gjorts. Kärnornas delar är inte heller orienterade i förhållande till varandra. Detta medför att det är omöjligt att bestämma sprickriktningar, sprickvidder och sprickors samband och utbredning även om sådana samband kan antas. Därför kan endast bergart, foliation,

sprickfrekvens och en klassificering med RQD metoden utföras. Varför denna klassificeringsmetod valdes framför de andra beror på att bergets hållfasthetsegenskaper eller behov av förstärkning vid bergbyggnad inte är av intresse. I detta sammanhang ligger vikten vid bergets vattenföring och sprickfrekvens, vilken kan beskrivas grovt med RQD metoden.

RQD metoden beskriver graden av sprickighet i berget. Metoden går ut på att antalet delar i en borrhärla som överstiger 100 mm mäts och adderas. Summan divideras med kärnans totala längd och denna produkt blir då RQD-värdet vilket anges i procent. Insatt i tabell 3.10 leder detta till en klassificering. Kärnornas längd varierar vanligen mellan 1,5 m, 3 m eller 6 m. För att ett giltigt RQD-värde skall kunna erhållas måste kärnans diameter överstiga 55 mm (Lindblom 2001).

Tabell 3.10, Bergkvalitetsindelning efter RQD-värde (Lindblom 2001).

<b>RQD</b>	<b>Bergkvalitet</b>
90-100	Mycket bra
75-90	Bra
50-75	Relativt dålig
25-50	Dålig
0-25	Mycket dålig

Då berget skall klassificeras med RQD-metoden klassas vanligen borrhärlans totala längd men även i enmetersintervall. Detta eftersom delar av borrhärlan kan vara av avsevärt sämre kvalitet än den sammanvägda klassificeringen visar. Således framgår bergets svagheter på ett tydligt vis. RQD-beräkningen för kärnloggen i figur 3.41 ovan, redovisas i följande tabell 3.11.

Tabell 3.11, RQD-beräkning av utförd kartering av kärnborrhärla 12 B.

<b>Avstånd från botten (cm)</b>	<b>Längd (cm)</b>	<b>Kärndelar över 10 cm</b>	<b>Andel helt berg</b>	<b>RQD (%)</b>
0-100	100	15+14+15+16+27=87	87/100=0,87	87
100-200	100	13+11+15+18=57	57/100=0,57	57
200-300	100	27+31,5+30=88,5	88,5/100=0,885	88,5
300-410	110	18+14,5+22+42=96,5	96,5/110=0,877	87,7
410-505	95	10+45+10=65	65/95=0,684	68,4
505-606	101	41+17+20+11+11=100	100/101=0,99	99
606-656	50	21+20=41	41/50=0,82	82

<b>RQD medel (%)</b>	86,8
----------------------	------

Om resultaten i tabell 3.11 nu sätts in i klassificeringsintervallen i tabell 3.10 framgår att exempelvis delen 100-200 klassas som relativt dålig medan delen 505-606 klassas som mycket bra. Detta samtidigt som medelvärdet för hela borrhärlan hamnar i intervallet, bra. Således har vikten av individuell klassificering av kärnproverna i detta exempel påvisats och även svårigheten med detta klassificeringssystem i och med att felkällor kan döljas vid analys i större perspektiv. Talesättet, "Ingen kedja är starkare än dess svagaste länk" gör sig i detta fall verkligen gällande.



### 3.4.1 Sammanställning av tidigare kärnkartering

Följande citat från Rolf Hultmans rapport, Lilla Edet dammsäkerhet, Geologiska och geotekniska förhållanden samt grundundersökningar, beskriver karteringen av de utvalda kärnorna:

*”KB11A: Relativt uppsprucket berg med mindre krosszoner. Sprickor, i huvudsak ofyllda, stupar mellan 5° och 20°. Övre delen av berget är tätt medan stora läckage finns längs de understa 2 m där bland annat rostfärgad lera förekommer som sprickfyllnad.”*

*”KB11B: Bra berg, mindre sprickzoner. Mest ofyllda sprickor som stupar 5° till 10°. Berget otätt.”*

*”KB12B: Bra berg, tätt. Mest ofyllda sprickor men även injekteringsbruk noterades. Uppsprucken zon mellan 15,75 och 15,95 m djup med lera, silt och injekteringsbruk. Injekteringsbruk sitter runt siltmaterial vilket tyder att på svårigheter att rensa hålet innan injektering.”*

*”KB15: Bra berg till 1 m innan borrstopp, hög glimmerhalt, läckage i övre delarna. Huvudsak ofyllda sprickor med 10° till 30° stupning. Sista metern är berget kraftigt uppsprucket med lera och injekteringsbruk. Vattenförlustmätning kunde ej utföras sista delen på grund av ras.”*

*”KB17: I huvudsak bra berg. Sprickor mest ofyllda eller täckta med tunt lerskikt. Markant slag i berget på 11,75 m djup, troligen 5 cm kärnförlust (öppet slag). Stora läckage till 12 m därunder tätt.”*

*”KB19: I huvudsak bra berg. Sprickor mest ofyllda med 10° till 20° stupning. Tre slag noterades vid borringen på 11,05, 11,30 och 11,60 m djup. Tappade spolvattnet vid 11,3 m. Stora läckage till 12 m därunder tätt.”*

*”KB20: I huvudsak bra berg. Sprickor mest ofyllda med 20° till 45° stupning. Slag i berget på 8,9 och 9,3 m djup. Spolvattenförlust vid 8,1 och 8,9 m djup. På 11,6 m djup noterades upp till 3 mm lerfyllning samt mindre berg”flagor” i en spricka.”*

*”KB21: Bra berg. Sprickor mest ofyllda med 10° till 20° stupning. Stora läckage ner till 12 m, därefter tätt.”*

*”KB22 och 23 borrade i mur under Inlands fabrik: I huvudsak bra berg med inblandning av pegmatit. Ca. 10 cm kärnförlust i KB23 ungefär 2 m ner i berget.”*

Med utgångspunkt från ritningsmaterialet i, Geologiska och geotekniska förhållanden samt grundundersökningar (Hultman 2004), har tabell 3.12 kunnat sammanställas vilken visar variationen av min-, max- och medel RQD värden för de utvalda kärnproverna.

Tabell 3.12, RQD sammanställning från utvalda kärnbörprover.

<b>Kärnbörprov</b>	<b>RQDmin</b>	<b>RQDmax</b>	<b>RQD medel(%)</b>
KB11A	8	70	30
KB11B	65	100	80
KB12B	62	100	84
KB15	0	100	71
KB17	65	100	91
KB19	55	100	83
KB20	75	100	88

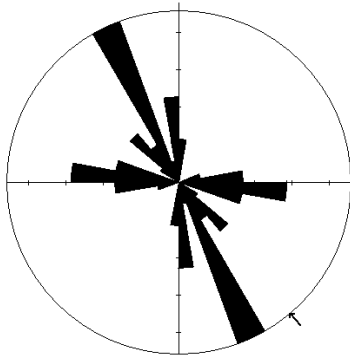
## 4 Modell

### 4.1 Modellbeskrivning

#### 4.1.1 Grafisk presentation med GEOrient

Strykningen och stupningen från inmätningarna i fält, vilka redovisats i kapitel 3.3, utgjorde indata till modellframställningen i programmet GEOrient. Alla sprickor införs med sin strykning och stupning och detta resulterar i två olika grafiska modeller, sprickros och stereoplot.

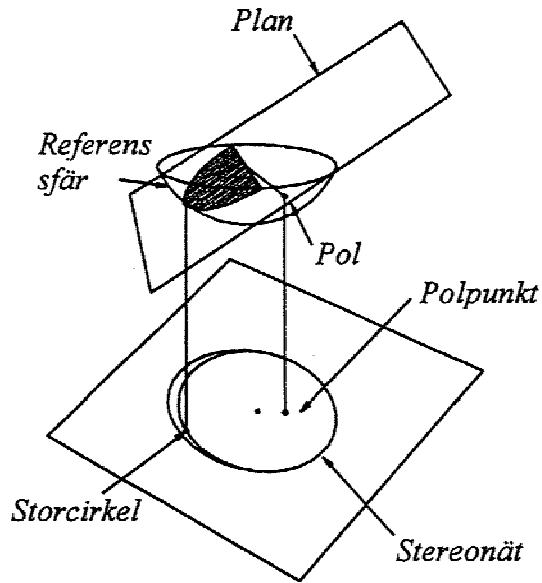
De uppmätta sprickriktningarna ritas upp som linjer, där linjernas längd beskriver riktningfrekvensen i inmätningarna (Loberg 2005). På detta sätt skapas en sprickros, se figur 4.1, där de införda sprickornas huvudriktningar i horisontalplan och de vanligast förekommande sprickriktningarna framgår tydligt.



Figur 4.1, Sprickros visar huvudsprickriktningarna.

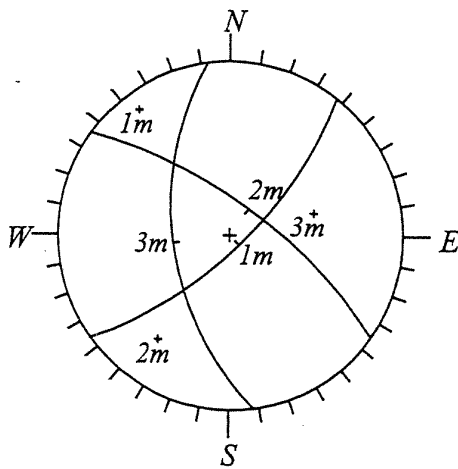
För att beskriva stupningen görs detta enklast genom framtagande av en stereoplot vilket även detta kan göras i programmet GEOrient. Det är en grafisk metod som beskrivs nedan.

Vid framtagandet av en stereoplott används sfärisk projektion, se figur 4.2, där ett sprickplan införs i en referenssfär med strykning som skär sfärens medelpunkt. Skärningen mellan sprickplanet och referenssfären definieras storcirkel. En linje från sfärens medelpunkt, vinkelrät mot sprickplanet, ger vid sfärens yta en polpunkt. Både storcirkeln och polpunkten projiceras till ett horisontellt betraktningssplan kallat stereonät (Lindblom 2001).



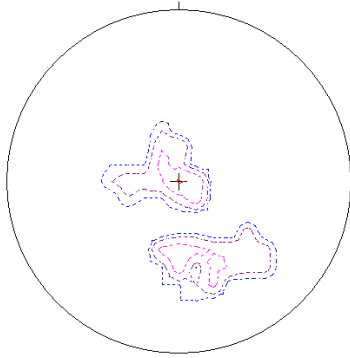
Figur 4.2, Sfärisk projektion av sprickplan (Lindblom 2001).

När sprickplanen infogats med respektive storcirklar och polpunkter bildas ett stereonät vilket visar variationer på införda strykningar och stupningar enligt figur 4.3 nedan (Lindblom 2001).



Figur 4.3, Stereonät med tre polpunktsprojektioner av ytor (Lindblom 2001).

När antalet inmätta sprickplan är stort är polpunktsplottning ett tydligare alternativ då endast polpunkterna plottas, se figur 4.4. Dessa punkter grupperas efter den variation på strykning och stupning som uppmäts. Grupperingarnas storlek varierar med strykningen och stupningens frekvens (Lindblom 2001).



Figur 4.4, Stereoplott visar sprickornas stupning.

Indata sammanställs i tabellform i Excel vilket därefter kopieras in i programmet. Den indata som sammanställts delades upp i delområde väster och öster, enligt kapitel 3.3.2 och 3.3.3. Sprickorna sorterades in i sprickor som följer foliationen och sprickor som skär densamma. Sprickrosdiagram och tillhörande stereoplottar från GEOrient presenteras i kapitel 4.2.1.

För att bestämma inom vilket intervall sprickorna i berget varierar utgående från de inmätta sprickorna tillämpas följande formler i beskrivande statistik för spridningsmått vid mätningar (Ingelstam 1995):

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.1)$$

$s^2$  = variansen

$n$  = antal mätvärden

$x_i$  = mätvärde från  $i$  till  $n$

$\bar{x}$  = medel av mätvärden

$$s = \sqrt{s^2} \quad (4.2)$$

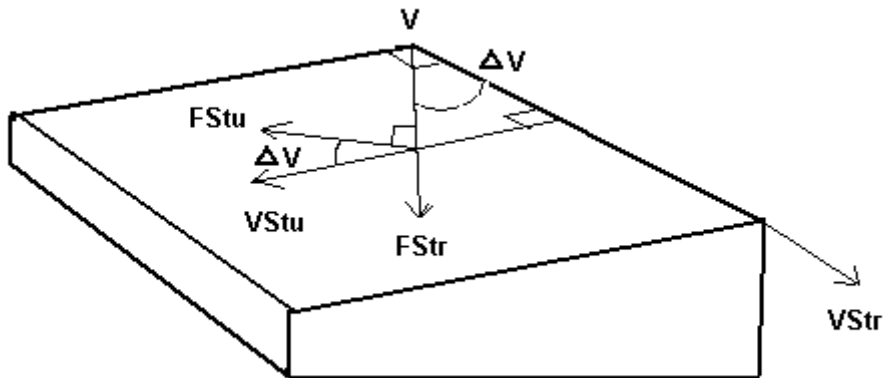
$s$  = standardavvikelse

Variansen är standardavvikelsen i kvadrat. Standardavvikelsen används sedan för att bestämma det intervall kring medelvärdet som förekommer bland de inmätta sprickorna.

### 4.1.2 Strykning- och stupningsberäkningar

När ett slag eller en spricka är känd med både strykning och stupning kan dess lutning beräknas även i andra riktningar enligt ekvation 4.3. I detta förfarande är det viktigt att skilja på lutningar och riktningar samt hur dessa förhåller sig till varandra. Stupningsriktningen är alltid vinkelrät mot tillhörande strykning.

Skall lutningen i en viss riktning beräknas, falsk stupning  $F_{Stu}$ , sätts alltid den falska strykningen  $F_{Str}$ , till  $F_{Stu}$  minus 90 grader. Begreppen illustrerades tydligare i figur 3.22. Vinkelförhållandena framgår av figur 4.5.



Figur 4.5, Förhållande mellan falsk och verklig strykning samt stupning.

$$V_{Stu} = \frac{V \cdot F_{Stu}}{V - \Delta V} \quad (4.3)$$

$V_{Stu}$  = verklig stupning [grader]

$V = 90$  [grader]

$F_{Stu}$  = falsk stupning [grader]

$$\Delta V = VStr - FStr \text{ (för } VStr > FStr \text{)} \quad (4.4)$$

$$\Delta V = FStr - VStr \text{ (för } VStr < FStr \text{)} \quad (4.5)$$

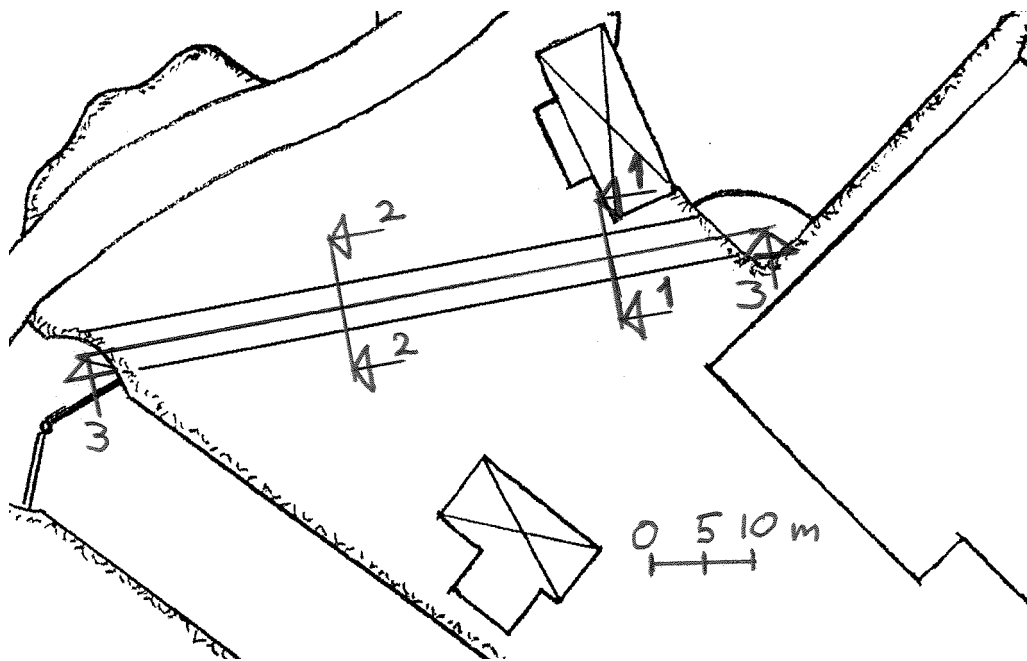
$\Delta V$  = vinkel skillnaden [grader] (för  $0 \leq \Delta V \leq 90$ )

$V_{Str}$  = verklig strykning [grader]

$F_{Str}$  = falsk strykning [grader]

Kraftiga slag och sprickor som påträffats i flera av de tidigare undersökningarna i närheten av Inlandsön antas ha stor utbredning. Dessa sprickplan extrapoleras därför in i det aktuella

området under dubbelsponton. Resultatet från extrapoleringen visas i två tvärgående snitt och ett längsgående snitt vilka redovisas i kapitel 5.2. I figur 4.6 nedan, framgår snittens läge.



Figur 4.6, Schematisk skiss över dubbelsponton med snitt 1, 2 och 3 markerade.

Snitt 1 valdes till den östra änden av dubbelsponton där schaktningsarbetet inleddes och visar de kända slag som kunnat bestämmas utifrån de tidigare utförda undersökningarna.

Snitt 2 visar de slag som finns representerade i den del av schaktgropen där berggrunden ligger närmare ytan. I detta snitt visas ej kända slag på större djup under sponton eftersom dessa inte kan antas ha någon geohydrologisk inverkan.

Snitt 3 visar de kända slagens lutning längs med sponton.

### 4.1.3 Geohydrologiska beräkningar

Vattenförlustmätningar utförda i samband med injektering, beskrivna i kapitel 3.2.2 och 3.2.8, har använts för att beräkna den hydrauliska transmissiviteten och konduktiviteten enligt ekvation 4.6 respektive 4.7 nedan. Därmed kan även vattenflödet i berget beräknas (Fransson 2005).

$$T = \frac{\rho \cdot g \cdot b^3}{12 \cdot \mu} \approx \frac{Q}{dh} \quad (4.6)$$

$T$  = Transmissivitet [ $\text{m}^3/\text{s m}$ ]

$b$  = Hydraulisk sprickvidd [ $\text{m}$ ]

$Q$  = Vattenflöde [ $\text{m}^3/\text{s m}^2$ ]

$dh$  = Vatteninpressningstryck [ $\text{m}$ ]

$$K = \frac{T}{L} \quad (4.7)$$

$K$  = Hydraulisk konduktivitet [ $\text{m}^3/\text{s m}^2$ ]

$L$  = Borrhålets längd [m]

#### 4.1.4 Flödesmodell med Comsol Multiphysics

För att beräkna de geohydrologiska flödena i berget och jordlagren används programmet Comsol Multiphysics med verktyget Earth science module som tillämpar Darcys lag, ekvation 4.8 (Häggström 1999):

$$q = K \cdot i \quad (4.8)$$

$q$  = grundvattenflödet per tvärsnittsarea [ $\text{m}^3/\text{s m}^2$ ]

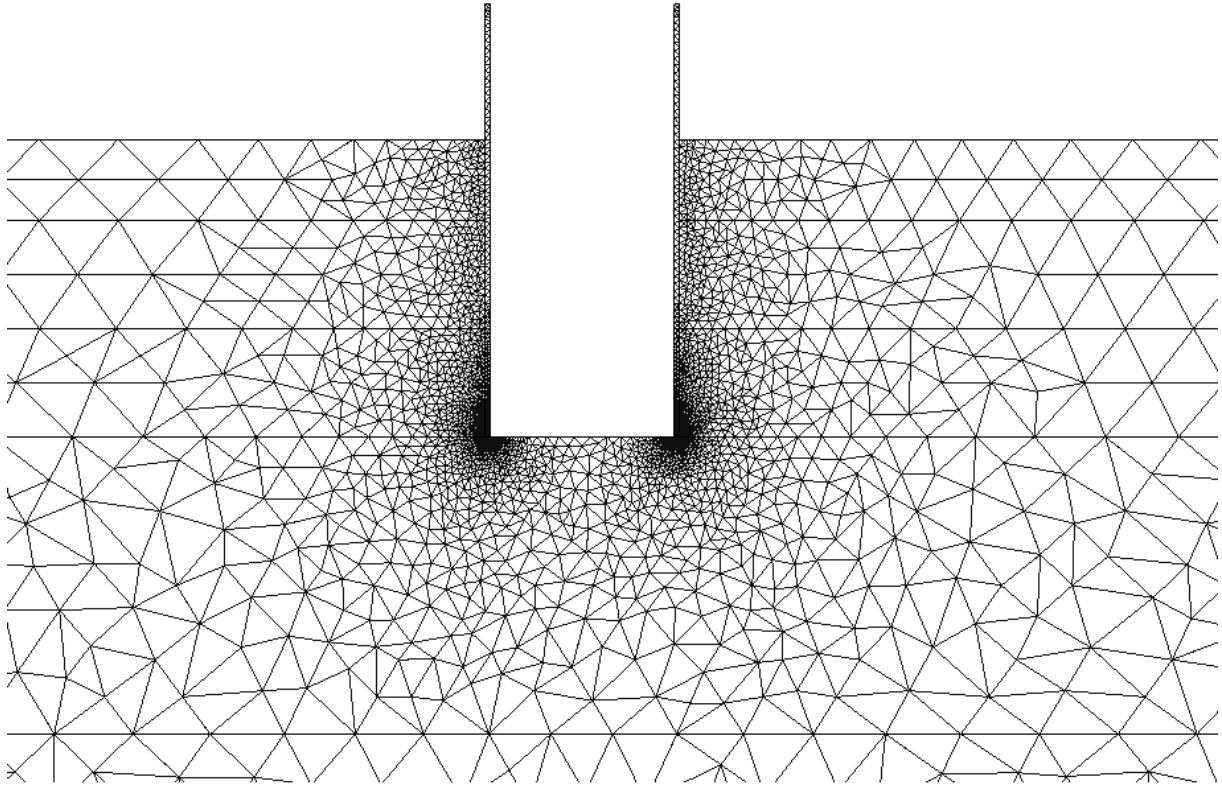
$i$  = energilinjens lutning

I denna modell beräknas inflödet i schaktbotten utifrån givna värden på grundvattnets tryckhöjd och markens konduktivitet under förutsättningarna att tryckhöjderna är konstanta samt att sponten och markytan är täta skikt. Dessutom antas modellens anslutningar mot kraftverksdammen samt sluss 6 vara täta. Detta för att möjliggöra simulering i 2D.

Bredden på modellen har på uppströmssidan valts för att spegla öns storlek. Nedströmssidan och djupet på modellen har valts med hänsyn till vad som kan antas påverka inflödet i schaktbotten.

Aktuella randvillkor och materialegenskaper presenteras mera ingående i kapitel 4.3.1 och 4.3.2.





Figur 4.7, Indelning av meshnätet kring spontgropen.

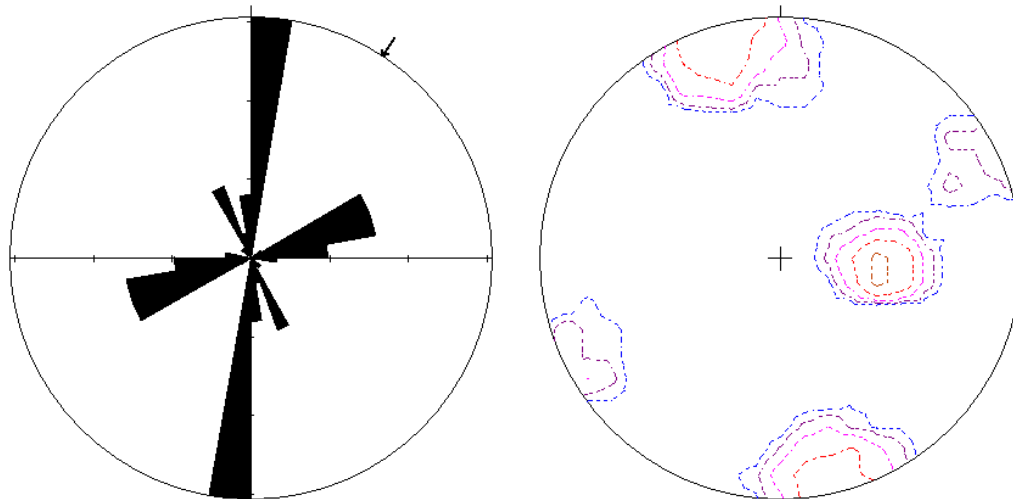
Den matematiska metoden bygger på att skillnaden i flödes hastighet till riktning och storlek inte får vara för stor mellan angränsande element. Där skillnaderna mellan elementen blir för stora måste detta regleras genom en finare elementstruktur för att noggrannheten skall kunna bibehållas. Detta visas tydligt i figur 4.7 där elementen utgörs av ett meshnät som är väldigt tätt kring spontplankornas nedre kant där flödes hastigheten och flödet är som störst.

## **4.2 Sprickmodellering**

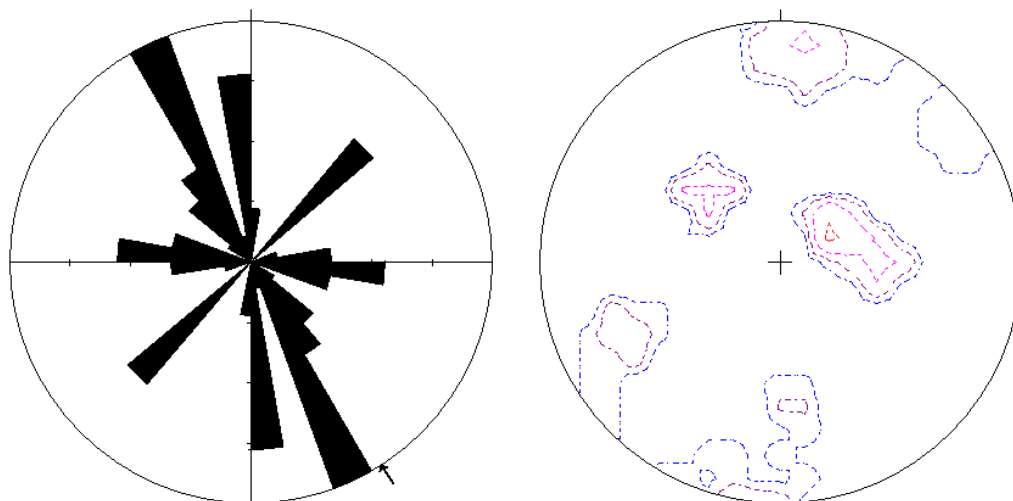
### **4.2.1 Sprickros och stereoplott med GEOrient**

Samtliga sprickor som karterats i väster och öster, enligt kapitel 3.3.2 och 3.3.3, presenteras grafiskt nedan som sprickrosor med tillhörande stereoplottar, enligt metod beskriven i kapitel 4.1.1. I plottarna framträder de vanligast förekommande huvudsprickriktningarna och deras stupning tydligt för respektive delområde. Sprickrosor har jämförts i följande ordning, samtliga karterade sprickriktningar, sprickor längs foliationen och sprickor som skär foliationen.

När plottade sprickrosor för samtliga karterade sprickor från väster och öster jämförts visar dessa på olika huvudsprickriktningar i området, se figur 4.8 och 4.9. I det västra delområdet finns tre huvudsprickriktningar, 39 % med riktningen 184 grader, 26 % med riktningen 75 grader och 21 % med riktningen 255 grader. Den vanligaste förekommande sprickriktningen i detta område är sprickor som uppstått längs med foliationen.



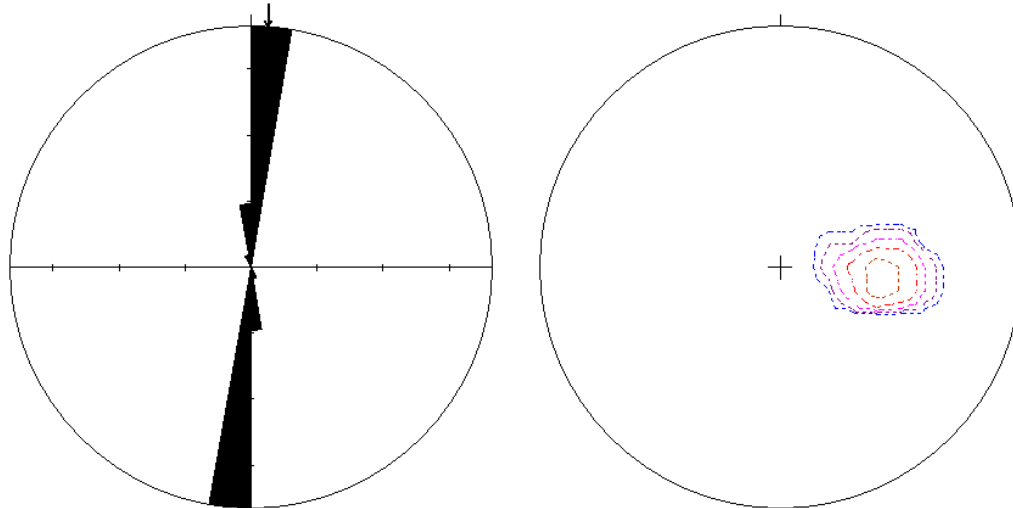
Figur 4.8, Sprickros och stereoplott över samtliga karterade sprickor i delområde väster.



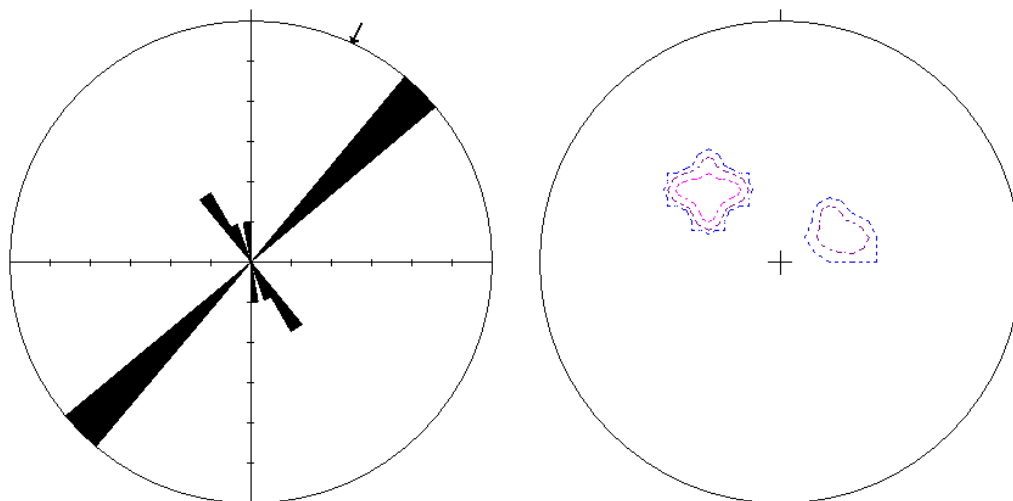
Figur 4.9, Sprickros och stereoplott över samtliga karterade sprickor i delområde öster.

Sprickbilden i delområde öster, se figur 4.9 ovan, visar sig ha fler huvudsprickriktningar än det västra området. De vanligast förekommande riktningarna är fördelade enligt följande, 18 % med riktningen 143 grader och 11 % med riktningen 180 grader samt även 11 % med riktningen 275 grader. Sprickorna längs med foliationen utgör här endast 9 % med riktningen 45 grader.

De sprickor som karterats längs foliationsplanen har plottats för vardera av dessa två områden. I väster finns endast en huvudsaklig sprickriktning, 92 % med riktningen 184 grader, vilket framgår tydligt i figur 4.10. Sprickbilden i öster, se figur 4.11, visar även denna en framträdande sprickriktning, 60 % med riktningen 45 grader. Stupningen för foliationsplanen är i båda delområdena mellan 40 till 45 grader.



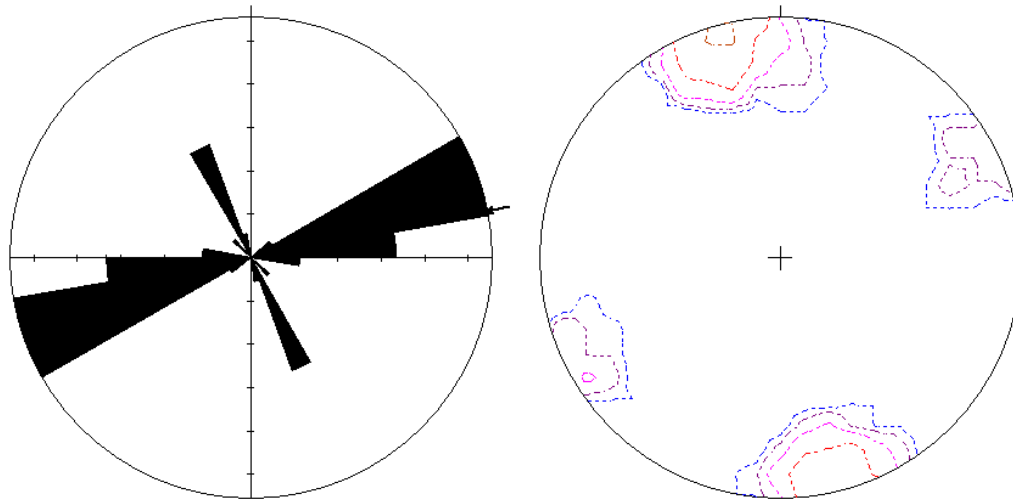
Figur 4.10, Sprickros och stereoplott över sprickor längs foliationen i delområde väster.



Figur 4.11, Sprickros och stereoplott över sprickor längs foliationen i delområde öster.

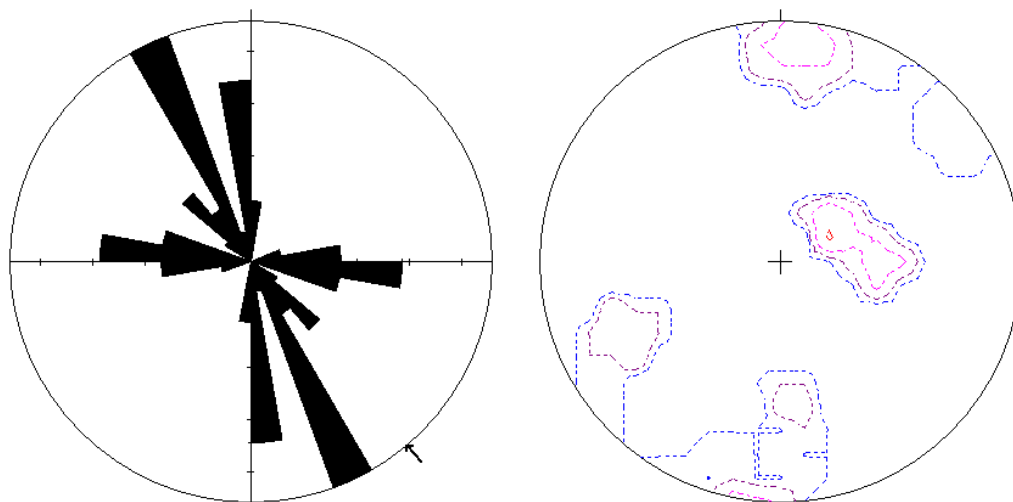
När plottarna för sprickor längs med foliationsplanen studerats visar detta på stora skillnader på foliationsriktningarna i de två delområdena. I väster är det riktningen 184 grader som är helt dominerande med en stupning på 44,5 grader. Den östra riktningen är 45 grader men med samma stupning som den västra. I öst utgörs 40 % av sprickorna längs foliationen av medelsprickriktningen 156 grader med en stupning på 30,5 grader.

När sprickorna från respektive område plottas finns i väster fyra sprickriktningar, se figur 4.12, 44 % med riktningen 75 grader, 36 % med riktningen 255 grader, 14 % med riktningen 155 grader och 5,5 % med riktningen 335 grader. Stupningen är i väster nästan helt vertikal med 81 grader.



Figur 4.12, Sprickros och stereoplott över sprickor i delområde väster.

I plottarna från öster, se figur 4.13, finns fler huvudsprickriktningar än i väster. Vanligaste förekommande riktningarna är 143 grader med 31 % av sprickorna. Riktningen 274 grader representeras med 23 % av sprickorna och riktningarna 180 samt 275 grader med vardera 20 %.



Figur 4.13, Sprickros och stereoplott över sprickor i delområde öster.

När sprickrosorna från väster och öster jämförts med varandra finns den dominerande sprickriktningen i väster inte representerad i öster. Den vanligaste sprickriktningen i öster finns även representerad i det västra delområdet. Denna riktning, mellan 143-155 grader, har i öster en flackare stupning på 31,5 grader. Av dessa har en andel på 9 % en brantare stupning på 85 grader vilken även återfinns i väster. Ytterligare en riktning som återfinns i båda områdena är riktningen 334,5 grader som utgör 11 % av sprickorna i öster och har en stupning på 70,5 grader medan den i väster motsvaras av 5,5 % och har stupningen 80 grader.

Sprickbilden i de två karterade delområdena varierar. Tydliga skillnader visas både på huvudsprickriktningarna och på foliationsplanens riktningar. Tidigare utförda undersökningarna av området, beskrivna i kapitel 3.2, har använts för att utvärdera vilken sprickbild som stämmer bäst överens med det aktuella området. Detta resulterar i att det mest troliga är att bergrunden mellan inlandsfabriken och Sluss 6 är densamma som i delområde väster med en foliationsstrykning på 184 grader. Spridningen på foliationens stupning varierar mellan medelvärdet plus, minus standardavvikelsen vilken beräknas enligt ekvation 4.1 och 4.2 i kapitel 4.1.1 enligt följande:

$$s^2 = \frac{1}{26-1} \cdot \sum_1^{26} (x_i - 44)^2 \quad (4.9)$$

$$s = \sqrt{61^2} = 8 \quad (4.10)$$

Intervallat blir då:

$$\bar{x} \pm s = 44 \pm 8 \quad (4.11)$$

Foliationens stupning kan därmed antas variera mellan 36 och 52 grader.

Vinkelskillnaden,  $\Delta V$ , mellan foliationens strykning och spontens riktning, blir då:

$$\Delta V = 184 - 169,5 = 14,5^\circ \quad (4.12)$$

Stupningen för foliationen tvärs spanten beräknas för det övre och undre värdet i intervallet samt för medelvärdet enligt nedan:

$$F_{stu}(36^\circ) = \frac{36 \cdot (90 - 14,5)}{90} = 30^\circ \quad (4.13)$$

$$F_{stu}(44^\circ) = \frac{44 \cdot (90 - 14,5)}{90} = 37^\circ \quad (4.14)$$

$$F_{stu}(52^\circ) = \frac{52 \cdot (90 - 14,5)}{90} = 44^\circ \quad (4.15)$$

Foliationsplanens stupning tvärs spanten kan därmed antas variera mellan 30 grader och 44 grader.

De 33 vertikala sprickorna i delområde väster, se tabell 3.6 och 3.7, uppskattats ha karterats på en sträcka av 100 m.

$$\text{Spricktätheten}_{\text{verikal}} = 33/100 = 0,33 \text{ sprickor/m} \quad (4.16)$$

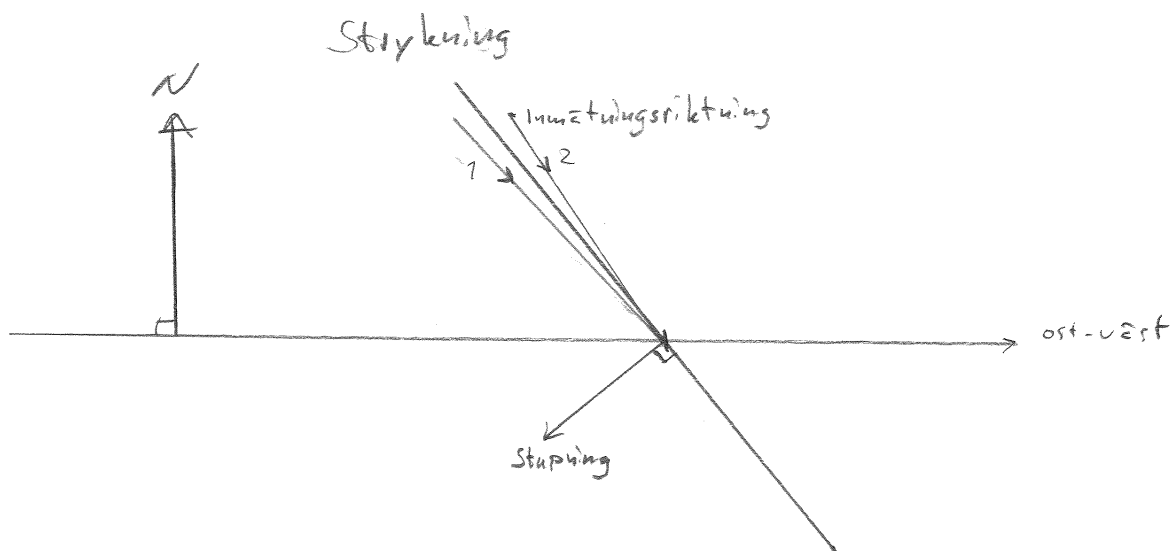
I delområde V3, beskrivet i kapitel 3.3.2.3, har 19 sprickor längs med foliationen karterats, se tabell 3.7. Dessa sprickor har karterats på en sträcka i höjddled som uppskattats till 6 m. Spricktätheten för sprickor längs med foliationen blir då:

$$\text{Spricktätheten}_{\text{foliationen}} = 19 / 6 = 3,2 \text{ sprickor/m} \quad (4.17)$$

## 4.2.2 Tolkning av tidigare undersökningar

### 4.2.2.1 Beskrivning av inmätning med georadar

Vid beräkning av sprickors lutning i en viss profil är förhållandet mellan profillinjen och sprickans strykning av yttersta vikt. Om en profil utförts längs med sprickans strykning framstår stupningen vara horisontell. Däremot om profilen utförts vinkelrätt från sprickans strykning skulle den verkliga stupningen erhållas.



Figur 4.14, Inmättningsriktning i förhållande till strykning och stupning i horisontalplanet.

Om inmätningen sker enligt linje 1 i figur 4.14, alltså flackare riktningsvektor än strykningen, resulterar detta i att mätningen visar på en stigande sprickriktning. Sker inmätningen däremot som linje 2, alltså med en brantare riktningsvektor än strykningen, resulterar detta i att mätningen visar på en sjunkande sprickriktning.

Med stöd av detta är det möjligt att förklara varför resultatet på georadarundersökningen, beskriven i kapitel 3.2, visar på sprickor som lutar stigande från Inland mot Sluss 6 medan alla andra undersökningar visar på det motsatta. I mätningarna med georadar är de olika profilerna utförda i olika riktningar. Hänsyn till detta måste tas vid utvärderingen av resultatet.

### 4.2.2.2 Kärnkartering

Från kärnkarteringen, utförd av Rolf Hultman, har stupningen på sprickorna i upptagna borrhälsar, som redovisats i kapitel 3.4.1, bestämts. Dessa varierar mellan 5 till 45 grader. De lägre vinklarna 5 till 10 grader uppmättes mot öster medan brantare vinklar på 10 till 45 grader uppmättes längre västerut.

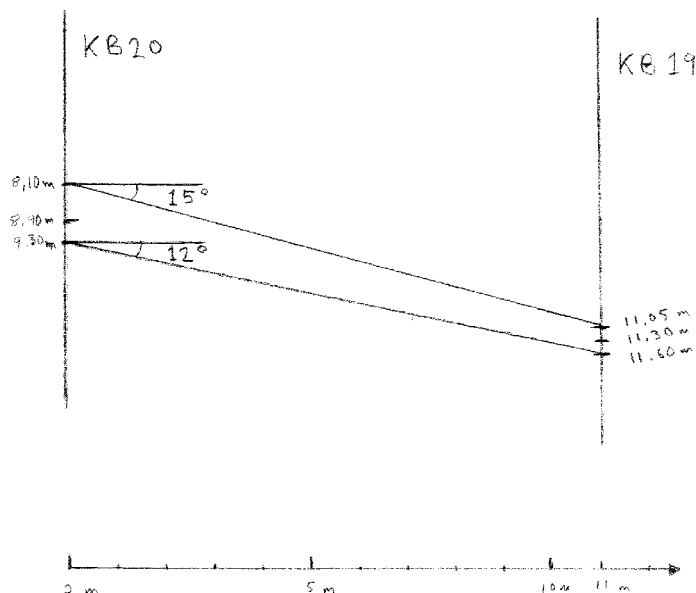
Följande tabell 4.1, är framtagen genom att antalet sprickor per meter har räknats på fotografier av de aktuella kärnborrhöverna.

Tabell 4.1, Spricktätheten på de utvalda kärnborrhöver.

Kärnborrhöver	Sprickor per meter
KB11A	13,4
KB11B	7,8
KB12B	7,0
KB15	8,3
KB17	5,6
KB19	6,2
KB20	4,9

Då det är stor varians mellan borrhål KB11A och de resterande hålen antas detta hålet vara borrarat i en sprick- eller krosszon. Medelsprickigheten i de övriga utvalda proverna ges av 255 sprickor på 38,2 m borrhöver, vilket blir 6,7 sprickor per meter.

Kraftiga sprickor och slag redovisas i både kärnborrhål KB19 och KB20 på ett avstånd av 11 m från varandra. I KB19 finns tre slag inom 0,55 m på djup mellan 11,05 m och 11,60 m medan det i KB20 finns en spolvattenförlust på 8,1 m djup och två slag på 8,9 m respektive 9,3 m djup. Dessa slag skulle kunna antas ha ett samband vilket skulle resultera i en stupningsvinkel på mellan 12 till 15 grader mellan dessa kärnborrhål med en strykning på 63 grader, se figur 4.15.



Figur 4.15, Slag mellan kärnborrhål KB19 och KB20.

Om foliationsriktningens strykning i väster, som är 184 grader enligt kapitel 4.2.1, antas vara den verkliga strykningen för slagen. Kan stupningarna beräknas enligt nedan.

Vinkelskillnaden,  $\Delta V$ , mellan den verkliga och falska strykningen blir då för slaget i kärnbronningen:

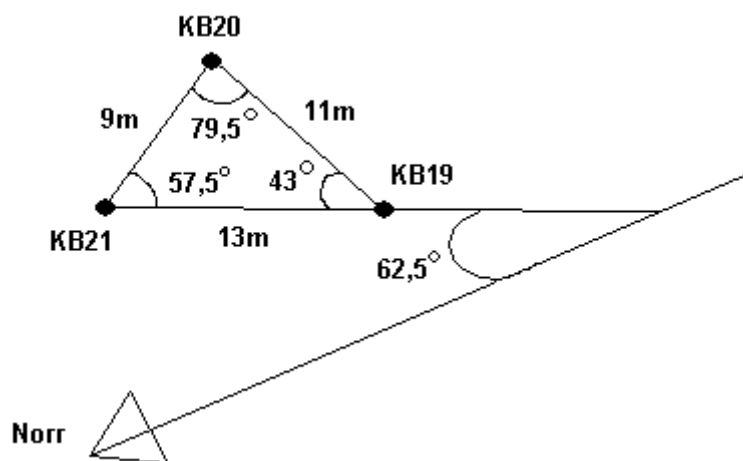
$$\Delta V = 184 - 153 = 31^\circ \quad (4.18)$$

Den verkliga stupningen beräknas då enligt ekvation 4.3 till:

$$V_{stu} = \frac{90 \cdot 13,5}{90 - 31} = 21^\circ \quad (4.19)$$

Eftersom de beräknade stupningarna inte överensstämmer med foliationens stupningsintervall, från kapitel 4.2.1 ovan, måste antagandet om trolig strykningens riktning anses felaktigt. Slaget har således en annan strykning.

Genom att utgå från tre borrhål lokaliserade i närheten av varandra har strykningen och stupningen i stället bestämts genom de trigonometriska beräkningarna nedan. Avstånd och vinklar mellan hålen framgår av den schematiska skissen i figur 4.16, vilken är baserad på uppmätta förhållanden i borrhålen i figur 3.42. Det bör dock kommenteras att slaget i KB21 antas vara beläget på den nivå där bergets kvalitet övergår från uppsprucket till tätt.



Figur 4.16, Schematisk skiss över borrhålen KB19, KB20 och KB21.

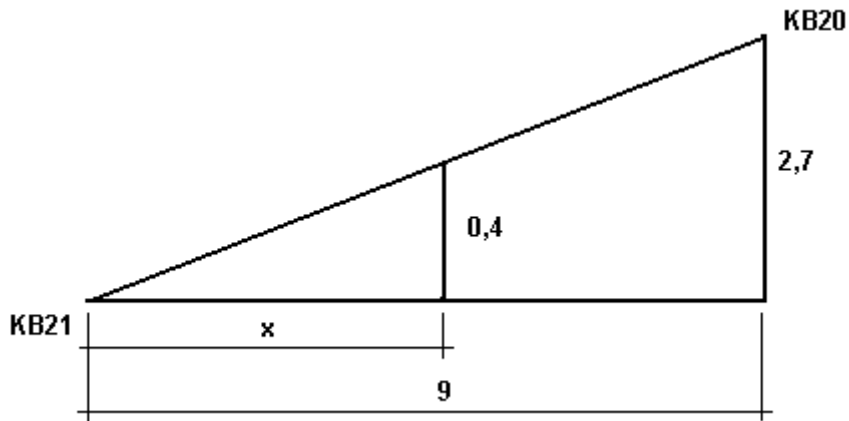
Höjderna på det införda slaget är vid respektive borrhål, KB19 nivå  $-11,6$  m, KB20  $-9,3$  m och KB21  $-12$  m. Nivån på slaget vid KB19 ligger mellan nivåerna vid de andra två borrhålen. Från KB19 infogas en horisontell linje som skär linjen mellan KB20 och KB21 på nivå  $-11,6$  m. Denna linje utgör sprickplanet strykningens riktning och beräknas nedan.



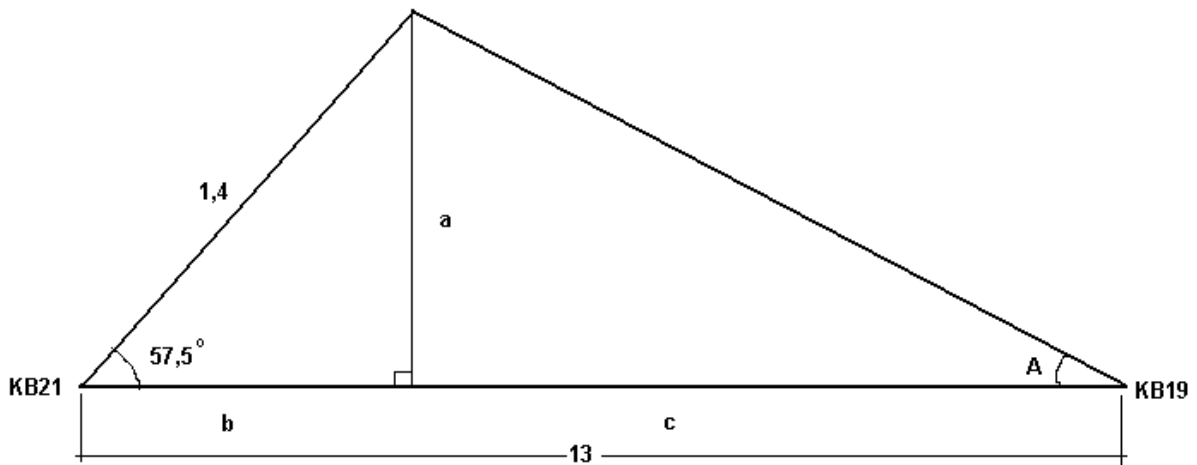
Likformighet för en triangel, se figur 4.17, ger:

$$\frac{x}{0,4} = \frac{9}{2,7} \quad (4.20)$$

$$x = 1,4 \text{ m}$$



Figur 4.17, Nivåskillnaden mellan borrhål KB20 och KB21.



Figur 4.18, Vinkel A, mellan borrhål och slagets strykning, samt avstånd mellan kända punkter.

När slagets strykningsriktning är känt i horisontalplanet kan dess vinkel, A i figur 4.18, beräknas enligt nedan:

$$\sin(57,5^\circ) = \frac{a}{1,4} \quad (4.21)$$

$$a = 1,2 \text{ m}$$

$$\cos(57,5^\circ) = \frac{b}{1,4} \quad (4.22)$$

$$b = 0,75 \text{ m}$$

$$c = 13 - b = 12,25 \text{ m}$$

$$\tan(A) = \frac{a}{c} \quad (4.23)$$

$$A = \arctan\left(\frac{1,2}{12,25}\right) = 5,6^\circ \quad (4.24)$$

Den verkliga strykningen,  $V_{str}$ , blir därmed:

$$V_{str} = 180 + (62,5 - (43 - 5,6)) = 205,1^\circ \quad (4.25)$$

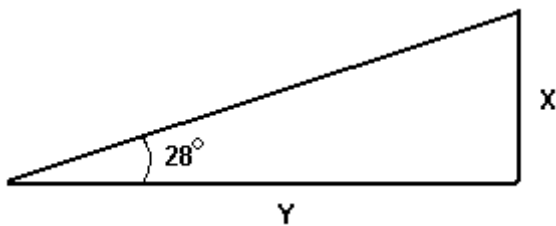
Den falska strykningen på planet,  $F_{str}$ , blir enligt tidigare beräkningar mellan KB19 och KB20 153 grader. Vinkelskillnaden,  $\Delta V$ , mellan den verkliga och falska strykningen blir då:

$$\Delta V = 205 - 153 = 52^\circ \quad (4.26)$$

När vinkelskillnaden och den falska stupningen är kända kan planets verkliga stupning beräknas enligt ekvation 4.3 i kapitel 4.1.2:

$$V_{stu} = \frac{90 \cdot 12}{90 - 52} = 28,4^\circ \quad (4.27)$$

Planet som nu beräknats extrapoleras till snitt 1 och 2 i figur 4.6 och benämns som slag 4 i kapitel 5.2. Det undre slaget i figur 4.15 benämns nr 3. Detta utfördes grafiskt genom att avståndet Y mättes från respektive snitt vinkelrätt mot den extrapolerade strykningen. Då detta motsvarar stupningsriktningen och höjdnivån i utgångspunkten är känd kan slagets nivå i snittet beräknas, se figur 4.19, enligt följande:



Figur 4.19, Slagets geometriska förhållanden.

Höjdskillnad till snitt 1,  $Y = 37 \text{ m}$ , blir:

$$x = 37 \cdot \tan(28^\circ) = 20 \text{ m} \quad (4.28)$$

Höjdskillnad till snitt 2,  $Y = 52 \text{ m}$ , blir:

$$x = 52 \cdot \tan(28^\circ) = 28 \text{ m} \quad (4.29)$$

Då planen för slag 3 och 4 förhåller sig med 0,5 m mellanrum från varandra blir i snitt 1 deras läge -22,9 m för slag 3 och -23,4 m för slag 4. I snitt 2 blir läget -30,9 för slag 3 och -31,4 för slag 4 vilka visas i kapitel 5.2.

Stupningen för slag 3 och 4 tvärs spanten i snitt 1 samt snitt 2 beräknas nedan:

$$\Delta V = 205 - 169,5 = 35,5^\circ \quad (4.30)$$

$$F_{stu} = \frac{28 \cdot (90 - 35,5)}{90} = 17^\circ \quad (4.31)$$

Slag 3 och 4 har lutningen 17 grader i snitt 1 samt snitt 2, se kapitel 5.2.

#### 4.2.2.3 PM läckage under Inland 1993

Från inmätta sprickor vid injekteringen beskriven i kapitel 3.2.2 anges dessa vattenförande slag ha lutningen 9 till 10 grader i ett snitt med strykningen 44 grader. Dessa två slag som är redovisats har 0,6 m mellanrum.

Om foliationsriktningens strykning i väster, som är 184 grader enligt kapitel 4.2.1, antas vara den verkliga strykningen för slagen. Kan stupningarna beräknas enligt nedan.

Vinkelskillnaden,  $\Delta V$ , mellan den verkliga och falska strykningen blir då för slaget påträffat vid injekteringen:

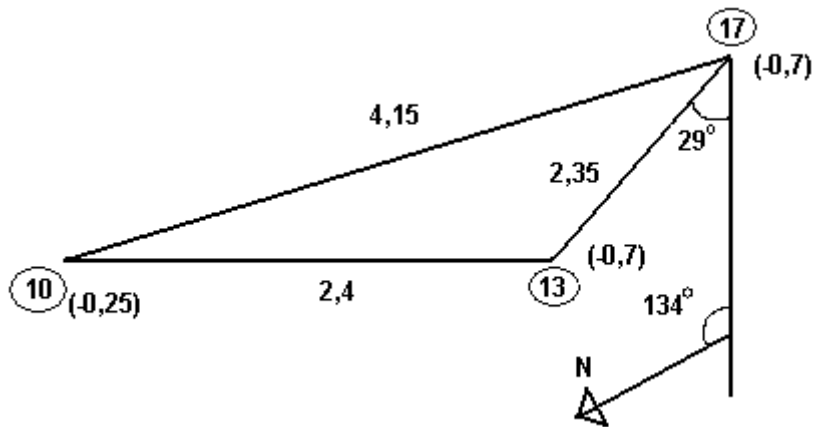
$$\Delta V = 184 - 134 = 50^\circ \quad (4.32)$$

Den verkliga stupning beräknas enligt ekvation 4.3 till:

$$V_{stu} = \frac{90 \cdot 10}{90 - 50} = 22,5^\circ \quad (4.33)$$

Eftersom de beräknade stupningarna inte överensstämmer med foliationens stupningsintervall, från kapitel 4.2.1 ovan, måste antagandet om trolig strykningens riktning anses felaktigt. Slaget har således en annan strykning.

Från de angivna vattenförande slagen i figur 3.7, 3.8, och 3.9 har följande schematiska skiss, se figur 4.20 nedan, tagits fram under antagandet att dessa slag har ett samband. Samband mellan dessa punkter bekräftades även vid injekteringsarbeten utförd av PEAB på samma plats den 20/10 2005.



Figur 4.20, Schematisk skiss över borrhål 10, 13 och 17 samt avstånd och vinklar mellan dessa.

När slagets strykning och stupning skall bestämmas har borrhål 10, 13 och 17 jämförts. Slagets läge i höjddled har uppmätts i ritningarna och i både hål 17 och 13 är djupet  $-0,7$  m från bergets yta vilket medför att slagets strykning skär rakt mellan dessa borrhål med plushöjden  $-1,2$  m. Då bergbotten befinner sig på nivån  $-0,5$  m enligt figur 3.10.

Slagets strykning fås genom att vinkeln mäts från norr till den vertikala linjen i figur 3.20 som representerar Inlandsfabrikens fasad. Därefter mäts vinkeln mellan denna och den tänkta linjen från hål 17 till hål 13. Slagets strykning beräknas som:

$$V_{str} = 134 + 29 = 163^\circ \quad (4.34)$$

I anslutning till figur 3.9 i kapitel 3.2.2, beskrivs slaget mellan hål 10 och 13 ha en lutning på 9 till 10 grader vilket i detta fall är den falska stupningen med den falska strykningen 134 grader. Vinkelskillnaden mellan den falska och den verkliga strykningen blir:

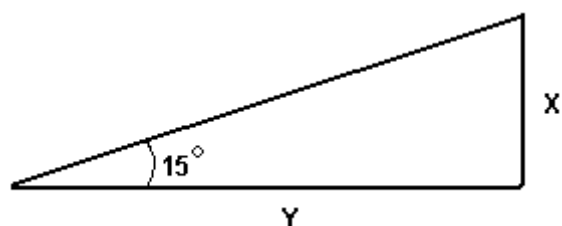
$$\Delta V = 163 - 134 = 29^\circ \quad (4.35)$$

Slagets verkliga stupning kan sedan beräknas:

$$V_{stu} = \frac{90 \cdot 10}{90 - 29} = 15^\circ \quad (4.36)$$

Efter utförda beräkningar blir slagets strykning 163 grader med stupningen 15 grader. Då två slag angivits med samma lutning och 0,6 m emellan kan båda dessa slag antas ha samma strykning och stupning.

Planet som beräknats extrapoleras till snitt 1 och 2 och benämns som slag 1 i kapitel 5.2. Det undre slaget i figur 3.9 benämns nr 2. Detta beräknas, se figur 4.21, enligt följande:



Figur 4.21, Slagets geometriska förhållanden.

Höjdskillnad till snitt 1,  $Y = 7,6$  m, blir:

$$x = 7,6 \cdot \tan(15^\circ) = 2 \text{ m} \quad (4.37)$$

Höjdskillnad till snitt 2,  $Y = 11$  m, blir:

$$x = 11 \cdot \tan(15^\circ) = 2,9 \text{ m} \quad (4.38)$$

Då planen för slag 1 och 2 förhåller sig med 0,6 m mellanrum från varandra blir i snitt 1 deras nivå +0,8 m för slag 1 och +0,2 m för slag 2. I snitt 2 blir nivån +1,7 för slag 1 och +1,1 för slag 2 vilka visas i kapitel 5.2.

Stupningen för slag 1 och 2 tvärs spanten i snitt 1 samt snitt 2 beräknas nedan:

$$\Delta V = 169,5 - 163 = 6,5^\circ \quad (4.39)$$

$$F_{stu} = \frac{15 \cdot (90 - 6,5)}{90} = 14^\circ \quad (4.40)$$

Slag 1 och 2 har lutningen 14 grader i snitt 1 samt snitt 2 se kapitel 5.2.

#### 4.2.2.4 Sondering uppströms Sluss 6

Från sonderingar beskrivna i kapitel 3.2.3 fås strykningen för en vertikal sprickzon. Denna har förts in på flygfotot i figur 5.1 i kapitel 5.1.

#### 4.2.2.5 Byggnation av Lilla Edets Kraftverk

Lutningen på det slag som tidigare beskrivits i kapitel 3.2.6, kan fastställas med hjälp av höjdkurvorna i figur 4.22. Avståndet från den översta angivelsen på -5 m till angivelsen -20 m uppgår, när hänsyn till skalan tagits, till 58 m. Vinkeln på planets falska stupning,  $F_{stu}$ , blir då:

$$F_{stu} = \arctan\left(\frac{15}{58}\right) = 14,5^\circ \quad (4.41)$$

Den falska strykningen på planet,  $F_{str}$ , blir 126 grader då denna mätts in mot angiven norrpil i figur 4.22. Riktningen på berggrundens foliationsplan är 184 grader, beskriven i kapitel 4.2.1. Denna strykning antas vara slagets verkliga då bilden i figur 3.20 i kapitel 3.2.6 visar att

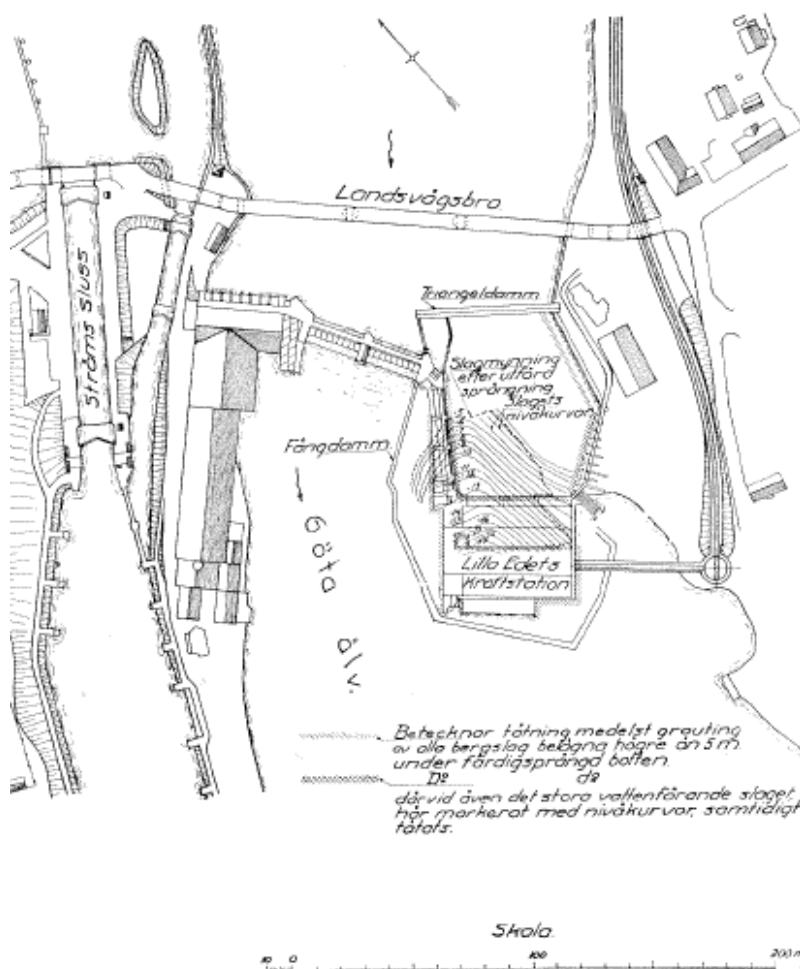
slaget följer bergets foliation. Vinkelskillnaden,  $\Delta V$ , mellan den verkliga och falska strykningen blir då:

$$\Delta V = 184 - 126 = 58^\circ \quad (4.42)$$

När vinkelskillnaden och den falska stupningen är kända kan planets verkliga stupning beräknas enligt ekvation 4.3 i kapitel 4.1.2:

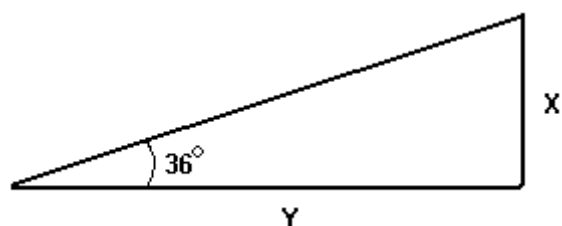
$$V_{stu} = \frac{90 \cdot 14,5}{90 - 58} = 36,3^\circ \quad (4.43)$$

Det vertikala lerslag som beskrivs i kapitel 3.2.6 har efter inmätning i ritningar över maskinstationen konstaterats ha en strykning omkring 145 grader.



Figur 4.22, Höjdkurvor för slag längs med foliationsplanet under kraftverket (Kungl. Vattenfallsstyrelsen 1932).

Planet som beräknats extrapoleras till snitt 1 och 2 och benämns som slag 5 i kapitel 5.2. Detta beräknas, se figur 4.23, enligt följande:



Figur 4.23, Slagets geometriska förhållanden.

Höjdskillnad till snitt 1:

$$x = 55 \cdot \tan(36^\circ) = 40 \text{ m} \quad (4.44)$$

Höjdskillnad till snitt 2 blir:

$$x = 61 \cdot \tan(36^\circ) = 44 \text{ m} \quad (4.45)$$

Läget för slag 5 i snitt 1 blir - 45 m och i snitt 2 blir läget -49 m vilket visas i kapitel 5.2.

Stupningen för slag 5 tvärs sponten i snitt 1 och snitt 2 beräknas nedan:

$$\Delta V = 184 - 169,4 = 14,5^\circ \quad (4.46)$$

$$F_{stu} = \frac{36 \cdot (90 - 14,5)}{90} = 30^\circ \quad (4.47)$$

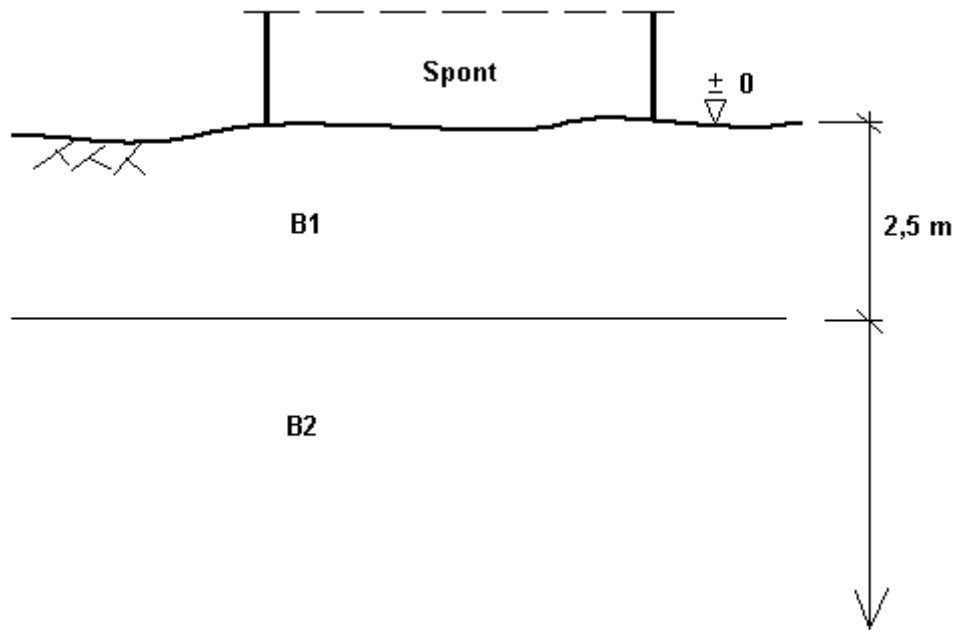
Slag 5 har lutningen 30 grader i snitt 1 och snitt 2 se kapitel 5.2.

### 4.3 Geohydrologisk modellering

#### 4.3.1 Geohydrologiska förutsättningar

Då berggrunden under spontgropen varierar i täthet har en indelning, B1 och B2 i figur 4.24, gjorts med ett mera uppsprucket berg närmast ytan och med mindre uppsprucket berg på djup större än -2,5 m.

Endast en manschett användes i borrhålets överkant vid vattenförlustmätningarna beskrivna i kapitel 3.2.2 och 3.2.8. Detta ger att konduktiviteten beräknas från manschetten och ner till borrhålets botten. Vilket medför att endast ett medelvärde erhålls för ett borrhål och att mäta ett specifikt flöde för en viss spricka eller slag är inte möjligt.



Figur 4.24, Schematisk bild av berggrundens indelning under spontgropen med bergmassorna B1 och B2.

Beräkningarna för berggrundens hydrauliska konduktivitet för bergmassan närmast schaktbotten, B1, kan göras med utgångspunkt från vattenförlustmätningarna i tabell 3.2 och 3.3. Medelvärde för vattenförlusten har beräknats till 7,13 liter per minut. Transmissiviteten beräknas enligt ekvation 4.6 och blir med insatta värden:

$$T = \frac{7,13}{60 \cdot 15 \cdot 1000} = 7,92 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s m} \quad (4.48)$$

Den hydrauliska konduktiviteten beräknas enligt ekvation 4.7 från transmissiviteten och borrhålets längd för bergmassan närmast ytan till:

$$K = \frac{7,92 \cdot 10^{-6}}{2,4} = 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s m}^2 \quad (4.49)$$

Med stöd av de vattenförlustmätningar som finns tillgängliga visar detta på att berggrunden blir tätare på större djup än nivån -2,5 m. Från vattenförlustmätningar beskrivna i kapitel 3.2.8, kan transmissivitet och hydraulisk konduktivitet beräknas för den undre bergmassan, B2 i figur 4.24.

$$T \approx \frac{4,0}{60 \cdot 15 \cdot 1000} = 4,44 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s m} \quad (4.50)$$

$$K = \frac{4,44 \cdot 10^{-6}}{2,4} = 1,85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s m}^2 \quad (4.51)$$

Jordlagrens hydrauliska konduktivitet antas utifrån beskrivningen av jordlagerföljden från jordbergsonderingen beskriven i kapitel 3.2.1 och visas i figur 4.25.





Figur 4.25, Schematisk skiss av jordlagerföljden på Inlandsön.

Konduktiviteten för dessa jordlager antas, se tabell 4.2, utifrån ungefärliga värden (Häggström 1999).

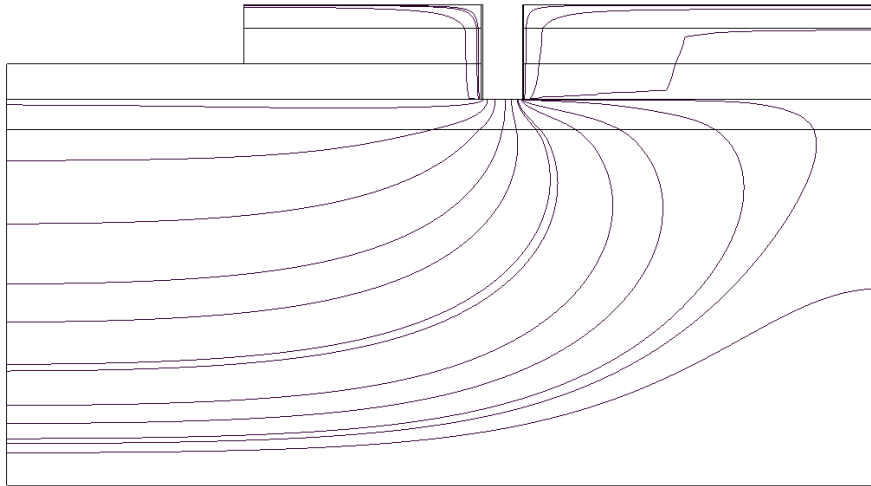
Tabell 4.2, Antagen hydraulisk konduktivitet för jordlagren.

Jordart	Hydraulisk konduktivitet $\text{m}^3/\text{s m}^2$
Fyllning med grus och sand	$10^{-3}$
Grovblockig grå morän	$10^{-7}$
Lerig siltig morän	$10^{-8}$

### 4.3.2 Simulering av flöden med Comsol Multiphysics

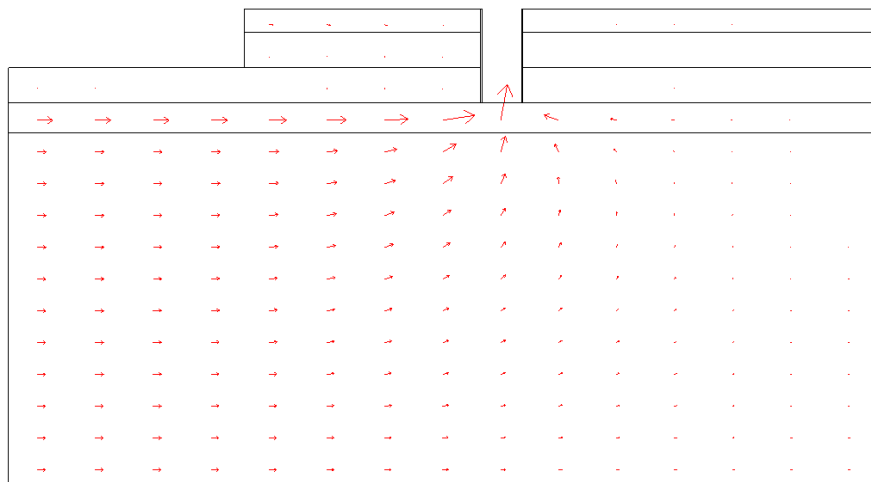
En förenklad hydrologisk modell av det aktuella problemet har beräknats med programmet Comsol Multiphysics. Genomsnittliga värden på jordlagerföljd och dessas täthet samt tjocklek framgår i kapitel 4.3.1. Dessa villkor har utgjort indata till programmet. Randvillkor på uppströmssidan, till vänster i figur 4.26 och 4.27 utgörs av grundvattenytan, satts till +6,8 m vilket motsvarar uppströms vattennivå i älven. Nedströms randvillkor, till höger om spanten, utgörs av grundvattenytan, satt till +1,6 m enligt mätningar redovisade i kapitel 3.2.7. Då marken i området utgörs av hårdgjord yta har tillrinningen av regnvatten till grundvattnet försumrats och den övre randen, markytan, har därför gjorts tät.





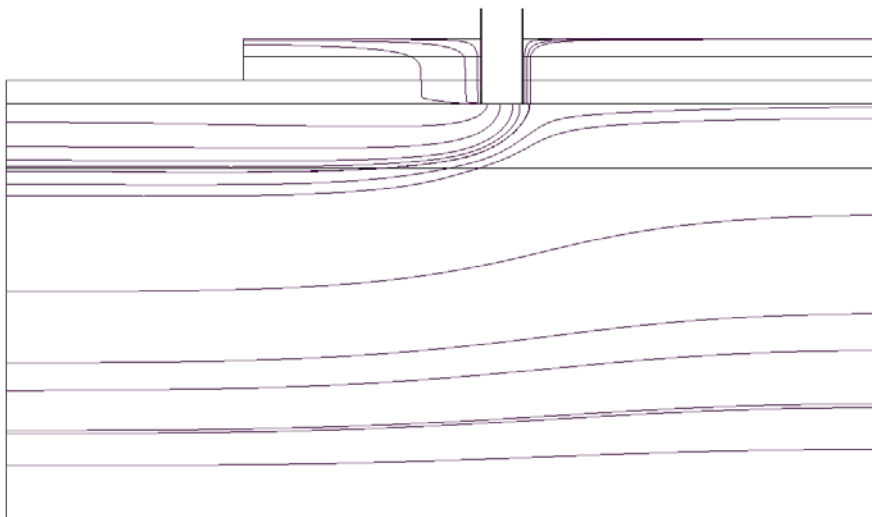
Figur 4.28, Flödeslinjer i snitt 1-1.

I figur 4.28 och 4.29 framgår resultatet från simuleringen av grundvattenflödet genom snitt 1-1 med de initialvillkor som beskrivits ovan, samt i kapitel 4.3.1. Figurerna visar att den största delen av vattenflödet genom profilen mynnar i spontgropen. Pilarna i figur 4.29 visar även att det största enskilda flödet sker genom ytberget medan det genom de ovanliggande jordlagren uppstår endast mycket små flöden.



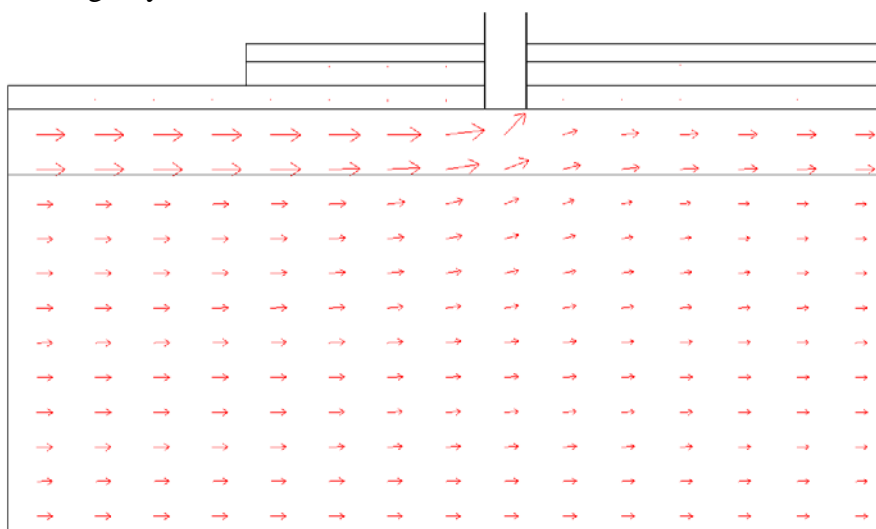
Figur 4.29, Flödesriktningar i snitt 1-1.

Genom randintegration i Comsol beräknas flödet genom spontbotten i snitt 1-1 till 0,4 liter per minut och längdmeter.



Figur 4.30, Flödeslinjer i snitt 2-2.

I figur 4.30 och 4.31 framgår resultatet från simuleringen av grundvattenflödet genom snitt 2-2. Figureerna visar här att den största delen av vattenflödet passerar genom profilen under sponten medan endast en mindre andel mynnar i spontgropen. Pilarna i figur 4.31 visar att flödet även i detta snitt är störst i ytberget och genom de ovanliggande jordlagren är det samtidigt mycket litet.

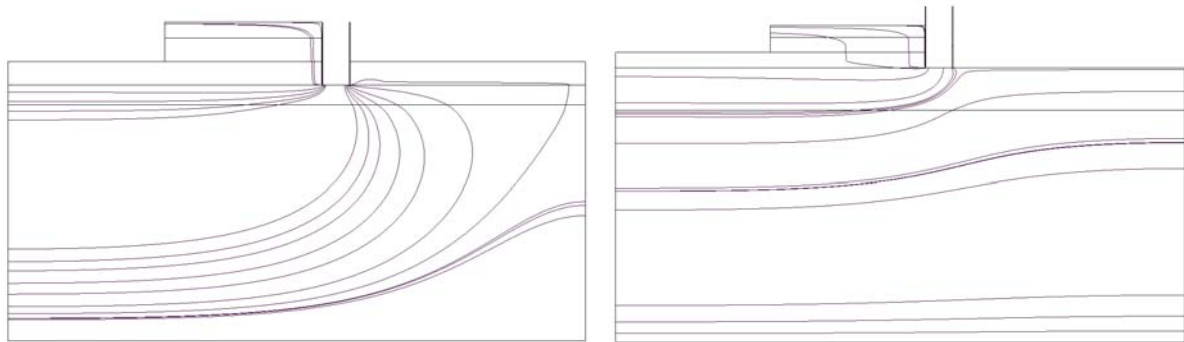


Figur 4.31, Flödesriktningar i snitt 2-2.

Genom randintegration i Comsol beräknas flödet genom spontbotten i snitt 2-2 till 0,1 liter per minut och längdmeter.

Intressant är att grundvattenflödet, se figur 4.28 och 4.30 ovan, stiger nedströms om spontgropen över grundvattennivån. Men då inga flöden finns ovan grundvattensytan kan detta inte anses vara korrekt. Som flödespilarna visar i figur 4.29 och 4.31 är dessa flöden väldigt små och bör därmed inte påverka resultatet nämnvärt.

För att kontrollera vilken påverkan detta fel medför på inflödet i schaktgropen har de jordlager ovan grundvattenytan nedströms tagits bort. Flödeslinjerna i respektive snitt efter korrigeringen visas i figur 4.32.



Figur 4.32, Flödeslinjer i snitt 1-1 (vänster) och snitt 2-2 (höger) efter borttagande av icke inverkan jordlager.

Efter randintegration i Comsol beräknas flödet genom spontbotten i snitten. Skillnaden mot tidigare blir obetydlig. Således blir flödet även här 0,4 respektive 0,1 liter per minut och längdmeter.

## 5 Resultat

Berggrunden under sponten på Inlandsön består av gnejs. Berget är kraftigt förgnejsat och mycket uppsprucket. De huvudsakliga mineralen är hornblände (amfibol) och kvarts samt även förekommande plagioklas, fältspat och glimmer. Kornstorleken är fin och strukturen är orienterad med tydliga genomskärande stråk av kvarts samt rik på glimmerfjäll vilka ligger orienterade i skikt vilka utgör svaghetsplan i berggrunden. Det finns även inslag i berget med mer migmatisk eller delvis uppsmält struktur där mineralsammansättningen är omblandad. Dessa delar av berget är således mindre uppspruckna och även starkare då tydliga svaghetsplan inte finns. Berget i området är genomskuret av ett antal kraftigare sprick- och krosszoner, vilka till viss del utgörs av ler- eller sandfyllda slag.

### 5.1 Karterade sprick och krosszoner

Inom de karterade områdena har ett antal sprick- och krosszoner hittats. Dessa zoner har sedan införts i figur 5.1 och därefter extrapolerats längs sina respektive strykningar.



Figur 5.1, Flygfoto med sprickzoner markerade.

Följande sprick- och krosszoner har införts i figur 5.1:

En nästan vertikal sprickzon med strykningen 155 grader från område V2. Från område V3 har en sprickzon införts med strykningen 75 grader och stupningen 82 grader. En krosszon med strykningen 290 grader har införts från område Ö1. Från sondering uppströms har en vertikal sprickzon med strykningen 157 grader införts. Ett vertikalt lerslag från byggnationen av kraftverket, och som skär under detta med strykningen 145 grader, har införts.

Där den extrapolerade linjen från krosszonen Ö1 skär kraftverksdammen har mycket uppsprucket berg påträffats vid kärnborrhuvning.

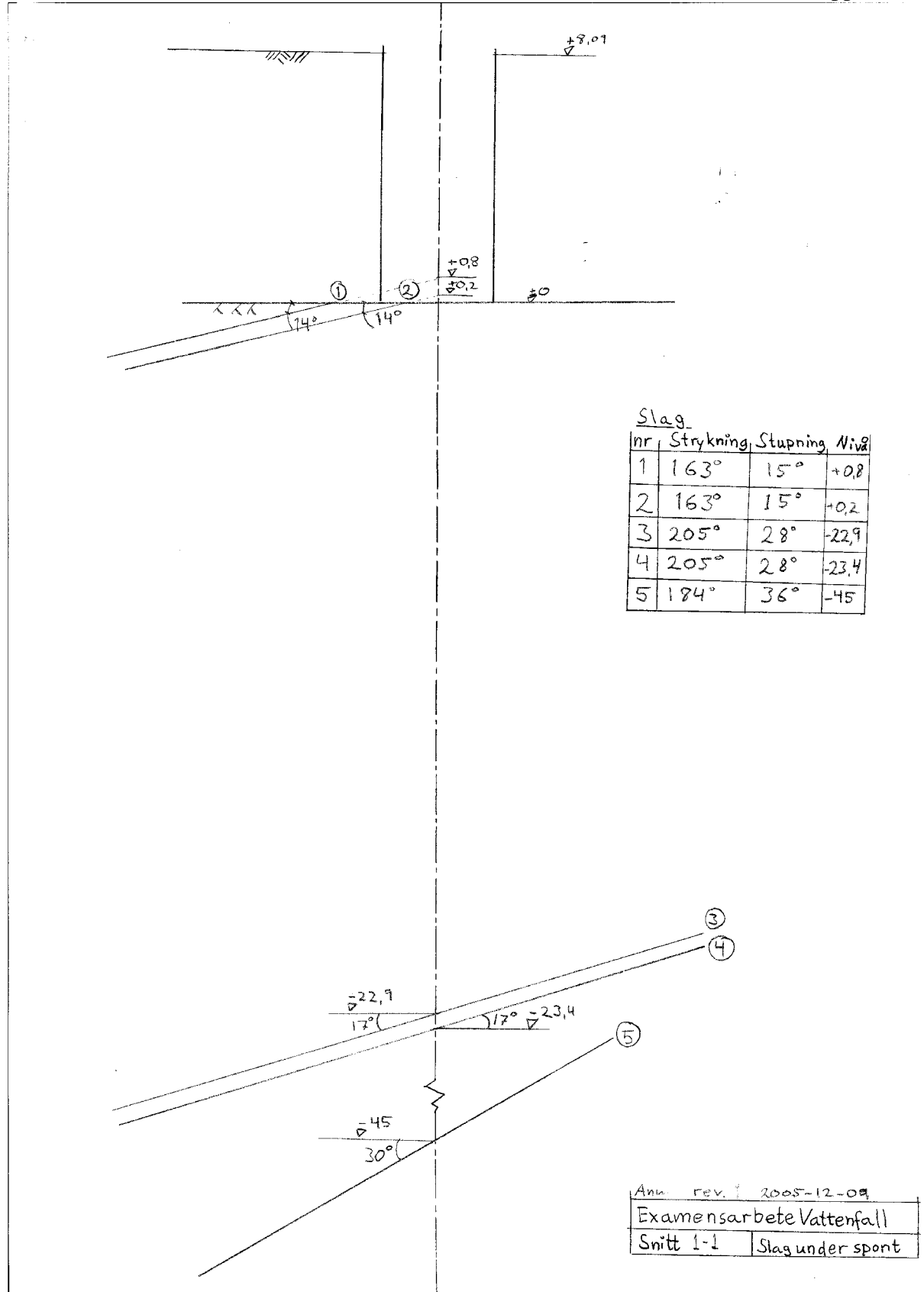
## **5.2 Förväntad sprickbild**

Fem olika slag har beräknats i kapitel 4.2.2 där tillräcklig information funnits för att kunna bestämma strykning och stupning. Dessa är så kraftiga att man kan anta att de har en stor utsträckning.

De slag som förväntas återfinnas under sponten redovisas nedan i snitt 1-1 och snitt 2-2 i figur 5.2 och 5.3. De fem slagen redovisas med sin strykning, stupning, plushöjd och lutning i de aktuella snitten. Ett tvärsnitt längs spontlinjen, snitt 3-3 i figur 5.4, visar slagens lutning i denna.

Nedströms

Uppströms



Figur 5.2, Snitt 1-1, ritning över förväntade slag.



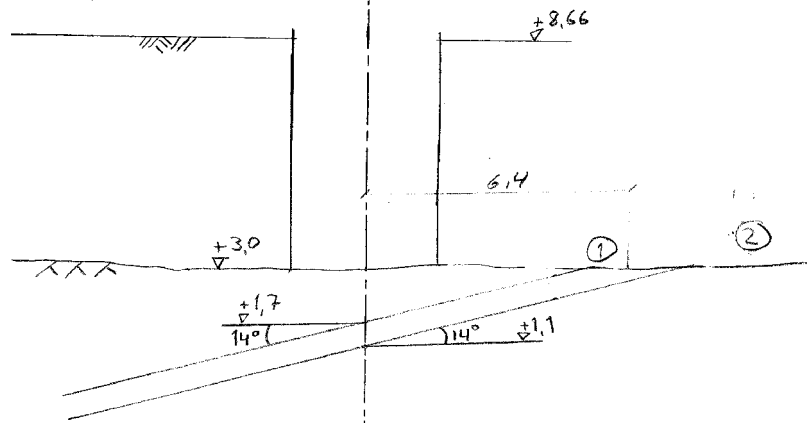
Slag 1 mynnar i snitt 1-1 precis utanför spontlinjens södra sida medan det i snitt 2-2 nedan, mynnar norr om spontan. Således skär slagets mynning genom spontgropen mellan dessa snitt.

Slag 2 ligger parallellt med slag 1, men 0,6 m lägre och mynnar i snitt 1-1 i spontlinjen. I snitt 2-2 nedan mynnar då även detta slag norr om spontan. Avståndet från spontens centrumlinje till slagens mynning bör vara omkring 6,4 m då bergnivån antas vara horisontell. Om berget stiger ökar avståndet samtidigt som slaget mynnar närmare spontan om bergnivån sjunker. Uppgifterna i kapitel 3.2.1 tyder på att det senare fallet är det mest troliga.

Slag 3 och 4 skär spontlinjen i snitt 1-1 på nivån, -22,9 m samt -23,4 m. I snitt 2-2 ligger de på nivån -30,9 m respektive -31,4 m. Dessa slag kan förutsättas mynna i älvbotten längre uppströms.

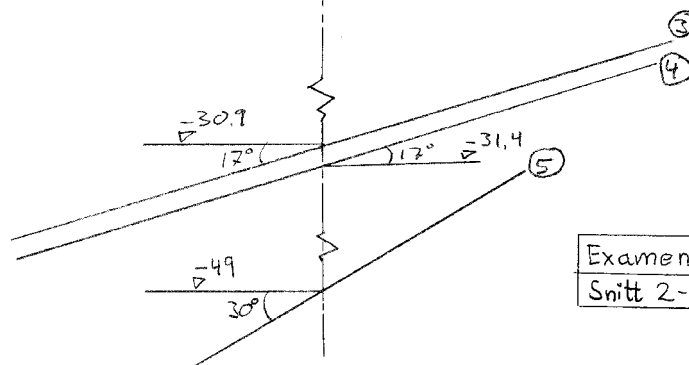
Slag 5 skär spontens centrumlinje i snitt 1-1 på nivån -45 m och i snitt 2-2 på nivån -49 m. Även detta slag mynnar i älven och dokumenterades vara kraftigt vattenförande vid arbetena med kraftstationens uppförande.

Berget spricktäthet uppgår till i medeltal 6,7 flackare sprickplan per djupmeter. Av dessa förväntas 3,2 sprickor per meter vara sprickor längs foliationen, med en lutning i snitt 1-1 och snitt 2-2 inom intervallet 30 grader till 44 grader. Antalet vertikala sprickor som kan förväntas per ytmeter berg är 0,33.



Slag

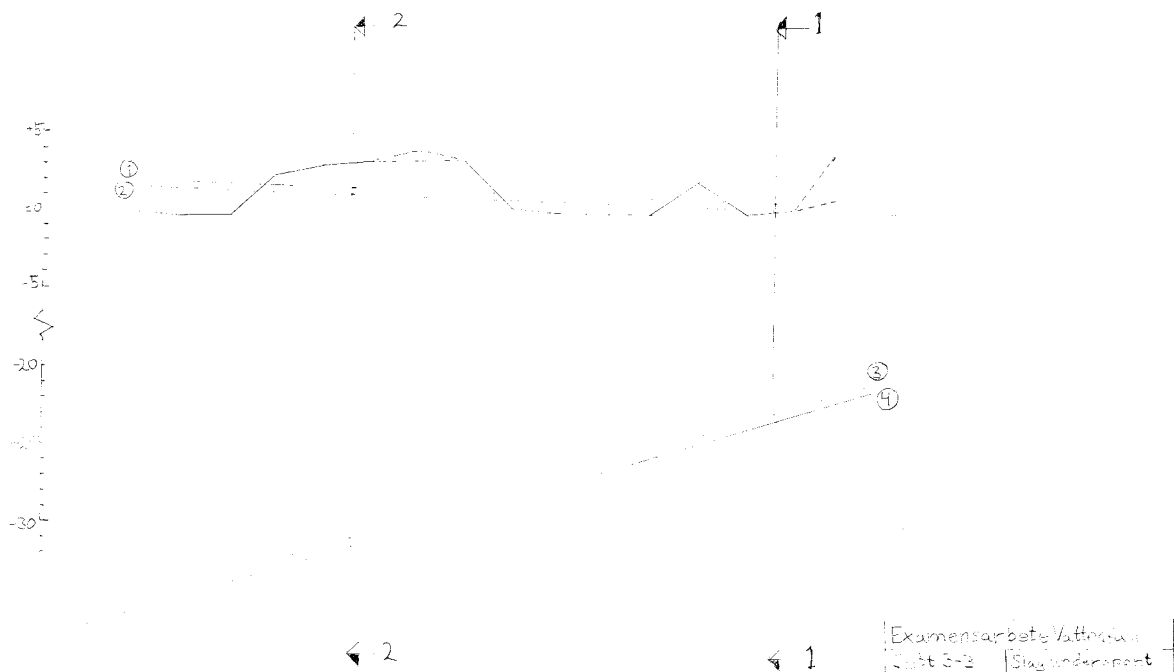
nr	Strykning	Stupning	Nivå
1	163°	15°	+1.7
2	163°	15°	+1.1
3	205°	28°	-30.9
4	205°	28°	-31.4
5	184°	36°	-4.9



Examensarbete Vattenfall
Snitt 2-2   Slag under spont

Figur 5.3, Snitt 2-2, ritning med förväntade slag.

Tvärsnittet längs spontlinjen, se figur 5.4, visar tydligt att slag 1 och 2 följer bergets yta längs hela sträckan och kan förväntas ge problem med mer eller mindre uppsprucket berg och vattenläckage.



Figur 5.4, Snitt 3-3, ritning med förväntade slag.

Streckade slaglinjer visar i vilka sektioner slaget mynnar nedströms dubbelsponten och heldragna linjer innebär att slaget mynnar uppströms sponten. Där slagen skiftar mellan heldragen och streckad linje mynnar slaget kring spontens centrumlinje.

### 5.3 Förväntat flöde

Från de utförda simuleringarna med programmet Comsol Multiphysics, se kapitel 4.3.2, har inflödet i schaktbotten beräknats i snitt 1-1 till 0,4 liter per minut och längdmeter i spontlinjen. I snitt 2-2 blir inflödet 0,1 liter per minut och längdmeter.

Felet i Comsolmodellen har beräknats som skillnaden mellan inflödet och utflödet dividerat med inflödet. Resultatet blir följande:

Felet i snitt 1-1: 1,6 %

Felet i snitt 2-2: 0,5 %.

Det låga felet visar att beräkningarna i Comsol har hög noggrannhet.

De beräknade värdena gäller för frischaktat berg före borrning och injektering.

Som förväntat är jordlagren av lera tätare och därmed mindre vattenförande än berggrunden. Ofta kan berg förefalla tätt men de många sprickorna gör det möjligt för vattnet att strömma genom berggrunden vilket framgår av dessa resultat.

## 6. Diskussion och rekommendationer

Under arbetets gång har det diskuterats huruvida Götaälvdalsförkastningen är belägen öster eller väster om kraftverksstationen i Lilla Edet. Eftersom vi funnit stora likheter mellan berggrunden väster om sluss 6 och berget i de kärnbörprover som tagits under kraftverksdammen. Samtidigt skiljer sig dessa från berget i det östra området. Därför drar vi slutsatsen att förkastningen är belägen någonstans öster om kraftstationen.

Intressant att notera är den utsträckta krosszon från område Ö1 som skär kraftverksdammen och där ger kärnbörprover som visar på väldigt uppsprucket berg. Detta styrker Inger Lundins teori att flera yngre sprickzoner har uppkommit i området efter Götaälvdalsförkastningens tillkomst, vilket kan förklara hur krosszonen kan skära igenom denna i en rät linje utan parallellförskjutning.

För ett statistiskt säkerställt resultat av sprickkarteringen skulle det ha varit fördelaktigt med större mätserier, men utan ekonomiska möjligheter att frischakta ytterligare berg i området fick karteringen av de naturliga berghällarna utgöra underlag.

Från simuleringar med programmet Comsol Multiphysics fås ett högre inflöde i snitt 1-1 än i snitt 2-2. Detta beror på att spontgropen är grundare i snitt 2-2 vilket medför att vattentrycket nedströms ligger under spontbotten samtidigt som det pådrivande vattentrycket från uppströmssidan är lägre.

Bergets hydrauliska konduktivitet har beräknats till  $3,3 \cdot 10^{-6}$  och  $1,85 \cdot 10^{-6}$ . Dessa värden kan anses vara rimliga då den hydrauliska konduktiviteten för gnejs kan variera mellan  $10^{-6}$  och  $10^{-8}$  meter per sekund (Lindblom 2001). Observera att dessa beräkningar är baserade på mätningar som utförts i berg vilket tidigare tätats genom injektering och i varierande grad är mer eller mindre urlakat.

Hur väl resultatet överensstämmer med verkligheten beror dock på hur väl modellen beskriver de verkliga förhållandena. I modellen finns fritt vatten längs hela modellens kant, 30 m uppströms sponten. I verkligheten fortsätter de täta lagren längs hela älvens botten. Detta antagande har gjorts för att begränsa modellens utsträckning. Då det inte är osannolikt att stora vertikala krosszoner skär genom älven kan detta antagande beskriva ett värsta fall och resultera i beräkningar på den säkra sidan.

Under projektets gång har vi utvärderat alla påträffade uppgifter för att bedöma deras relevans. Med hänsyn till detta borde resultatet vara någorlunda rättvisande.

Eftersom förekomsten av stora lokala sprickor och mindre förkastningar ej går att utesluta kan resultatet skilja sig från verkligheten med flera hundra procent. Uppgifter i områdets geologiska historia visar att det är sannolikt att detta är fallet. Detta skulle i så fall kunna medföra lokalt mycket höga flöden.

En kontroll av resultaten är av stort intresse och ett sätt att göra detta är att mäta flödet på det vatten som pumpas ur schaktgropen. Det kan dock vara svårt att avgöra hur stor del av bergytan som bidrar till inflödet vid en given tidpunkt.

För att underlätta projekteringen och bedömningen av berggrundsförhållandena samt utformningen av injekteringen bör minst tre orienterade kärnbörprov borraras i det aktuella området. Om möjligt bör separata vattenförlustmätningar göras för de större sprickorna och

sprickzonerna. Dessa borrhov bör lokaliseras i en triangel då detta underlättar de trigonometriska beräkningarna för slagens strykning och stupning. Efter ett sådant förfarande borde det således vara relativt enkelt att bestämma var slagen mynnar samt vilka av dessa som bör injekteras samt hur injekteringen skall utföras med avseende på injekteringstryck och typ eller sammansättning av injekteringsbruk.

Under de rådande förhållandena med mynnande slag i och omkring spontlinjen är det troligt att stora mängder injekteringsbruk kommer att tryckas ut och upp i dessa områden. Det blir således svårt att uppnå något sluttryck under injekteringen. Särskild hänsyn bör tas i området kring snitt 2-2 där alltför stora injekteringstryck kan leda till upptryckning av den bergklack som höjer sig över den kringliggande berggrunden eftersom den troligtvis är genomskuren av kraftiga slag.

För att åstadkomma en tätskärm bör noggrann urspolning av hålen och sprickorna utföras. Det mer uppspruckna ytberget bör injekteras i en första etapp med lågt tryck. Därefter kan en efterföljande injektering på större djup utföras. Hålen bör då borras och injekteras ett efter ett med så kallad split spacing metod. Detta innebär att efter en första injekteringsomgång borras ytterligare hål mellan de första så att hålavståndet halveras. Den beskrivna metoden betecknas i dammbyggnadssammanhang som en klassisk damminjektering. Det kan även vara fördelaktigt att lägga den djupare injekteringen till uppströmssidan av spontgropen då detta medför att fler sprickor nås. Detta eftersom sprickornas lutning gör att de ligger grundare i uppströmsskanten. För att uppnå bästa resultat bör även en injekteringslinje förläggas på spontlinjens uppströmssida.

Målsättningen med examensarbetet var att bestämma bergets sammansättning, sprickbild och inflödet från schaktbotten i en spontgrop vid ombyggnaden av kraftverksdammen i Lilla Edet.

I de inledande kapitlen med geologisk historia besvarades frågan om sprickornas uppkomst medan bergets sammansättning i området beskrevs i kapitlen med ytbergskartering, kärnkartering och sprickmodellering där även frågan om bergets sprickighet kunde besvaras.

De större sprickornas och slagens lägen samt hur dessa hänger samman i området kunde bestämmas genom utvärderingen av de tidigare undersökningarna och i kapitlet om sprickmodellering.

Slutligen kunde även frågan om vatteninflödet i schaktgropen beräknas med datorprogrammet Comsol i kapitlet Geohydrologisk modellering. Således har alla uppställda frågor besvarats och målsättningen med rapporten uppnåtts.

## 7. Referenser

- Berntsson, S, Ekström, I, Lindström, L, Messing, L M, 2001: Trollhätte kanal Ströms sluss (sluss 6), Fördjupad dammsäkerhetsutvärdering. Swedpower AB, Stockholm.
- Borchart, P, 1993: PM angående återstående läckage vid Inlandsfabriken, Lilla Edet. De Neef Scandinavia AB, Göteborg.
- Funehag, J, 2004: PM Sprickmätning. Chalmers Tekniska Högskola, Geologiska institutionen, Göteborg, Opublicerad stencil.
- Hultman, R, 2004: Lilla Edet dammsäkerhet, Geologiska och geotekniska förhållanden samt grundundersökningar. SWECO VBB AB, Stockholm
- Häggström, S, 1999: Hydraulik för v-teknologer. Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för vattenbyggnad, Göteborg.
- Ingelstam, E, Rönnäng, R, Sjöberg, S, 1995: Tefyma, Handbok för teknisk fysik, fysik och matematik. Sjöbergs Bokförlag AB, Helsingborg.
- Jern, M, 2004: PM Bergklassificeringsövning, V4. Chalmers Tekniska Högskola, Geologiska institutionen, Göteborg.
- Kungl. Vattenfallsstyrelsen, 1932: Redogörelse för arbetena med Lilla Edets kraftverks första utbyggnad, Tekniskt meddelande från Kungl. Vattenfallsstyrelsen. Trollhättans tryckeri AB, Trollhättan.
- Lindblom, U, 2001: Bergbyggnadsteknik. Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.
- Lindh, G, 1983: Beträffande jordbergsondering vid Ströms sluss, Lilla Edet. VIAK AB, Vänersborg.
- Lindh, G, 1990: Läckage öster om slussen i L:a Edet, Förslag till tätning genom injektering. B.G. Lindh AB, Göteborg.
- Loberg, B, 1987: *Geologi, Material, processer och Sveriges berggrund*, Nordstedts Tryckeri, Stockholm.
- Loberg, B, 2005: *Geologi, Material, processer och Sveriges berggrund*. Nordstedts Akademiska Förlag, Stockholm.
- Lundegårdh, P H, 1978: Lilla sten boken. Almqvist & Wiksell Förlag AB, Uppsala.
- Lundqvist, I, 1997: Beskrivning till berggrundskartan Vänersborg SO. Sveriges Geologiska Undersökning, Uppsala.
- Ottosson, T, 1997: Sjöfartsverket, Trollhätte kanal Lilla Edet, Ströms sluss, Ombyggnad av ledverk vid slussen. Scandiaconsult bygg och mark AB, Göteborg.
- Piirainen, Y, 2001: Lilla Edet, Inlandsfabriken – sluss 6, Georadarundersökning. AB Geo-Work, Tyresö.

SWECO VBB AB, 2005: Lilla Edet, teknisk beskrivning, tillståndshantering, Teknisk beskrivning avseende dammsäkerhetshöjande åtgärder för Lilla Edets kraftstation och Sluss 6. SWECO VBB AB, Stockholm.

Muntlig källa:

Fransson, Å, 2005: Chalmers Tekniska Högskola, asa.fransson@geo.chalmers.se.

Palmer, S, 2005: Palmer Engineering, sten@palmerengineering.se.

Hultman, R, 2005: SWECO VBB AB, rolf.hulman@sweco.se.

Svensson, C, 2004: Chalmers Tekniska Högskola, chester.svensson@telia.com.

Bengtsson, U, 2005: Vattenfall Service Syd, ulf.bengtsson@vattenfall.com.