

Bergerosion i utskovskanaler

Rock Scour in Spillway Channels

Lena Mören

Referat

Bergerosion i utskovskanaler

Lena Mören

Dagens klimatsituation ser ut att ge ökad mängd nederbörd i Sverige, vilket innebär att de svenska älvarna kommer att utsättas för allt högre vattenflöden. De flesta av Sveriges älvar är reglerade, d v s längs älvarna finns en mängd större och mindre dammar. Ett högre flöde i älvarna innebär även rikligare tillrinning till dammarna vilket medför att avbördningen från dem måste bli större. Avbördningen från dammarna sker genom utskov och höga vattenflöden i utskovskanalerna kan orsaka erosion på det berg som kanalen vanligen består av. Erosionen är av typen ”blockerosion” där hela bergblock av större eller mindre storlek lösgörs från bergmassan. I värsta fall kan blockerosionen krypa uppströms och erodera dammkroppen bakifrån, vilket skulle kunna innebära att dammen brister.

Syftet med detta arbete var att identifiera omfattning och typ av bergerosionsproblem som uppkommer i utskovskanaler. Blockerosion uppkommer i regel då forsande vatten skapar tryckskillnader mellan övre och undre ytan på block. Tryckskillnaden kan då skapa tillräckliga lyftkrafter för att block ska lossna. De huvudsakliga faktorerna som styr blockerosionen är bergmassans sprickighet och material, utskovskanalens geometri och vattnets flöde och ytfluktuation. Genom litteraturstudie, numerisk modellanalys samt fältstudie har inverkan på blockerosionen av sprickriktningar utretts. En bergmassa som innehåller sprickgrupper som har liten, nära horisontell, stupning är känslig för vattenbelastning. Stupningsriktningen i förhållande till flödesriktningen har också betydelse för blockerosionen. Stupningsriktning i flödesriktningen gör bergmassan mer känslig för belastning av forsande vatten och gynnar därmed erosionen.

Utskovskanalerna i Ligga, Harsprånget, Porjus, Satisjaure samt Seitevare har undersökts med avseende på erosionsrisk. Erosionen i Ligga, Harsprånget och Porjus har varit omfattande och detta beror troligtvis på att dessa kanaler har subhorisontella banknings-sprickor med litet sprickavstånd. I Satisjaure är bergmassan mycket sprickig, varför denna kanal är mycket känslig för vattnets belastning. Där har dock åtgärder vidtagits så att kanalen ska tåla sitt dimensionerande flöde. I Seitevare är erosionsrisken i kanalens övre del liten.

Det finns olika metoder för att bedöma erosionsrisken i en bergmassa. Erosionsindex-metoden är en semiempirisk metod som är verifierad med platsobservationer i USA. Med hjälp av observationer från Porjus, Harsprånget och Seitevare har erosionsindex-metodens tillämplighet på svenska kanaler undersökts. För dessa tre observationer verkar metoden fungera bra och har därför även använts i kanalerna i Satisjaure och Ligga.

Energidämpande åtgärder i kanalerna, såsom energiomvandlargastrappor och utsprängda trappor i kanalerna, har visats sig vara mycket effektivt för att minska erosionsrisken. En noga dokumentering av utskovskanaler, som t ex kartering och inmätningar, skulle bidra till att erosionsindexmetoden kunde verifieras ytterligare och att en översiktlig bedömning av erosionsrisken i utskovskanaler enkelt kan erhållas.

Nyckelord: *Bergerosion, Erosionsindex, Utskovskanaler, Vattenbelastning*

Abstract

Rock scour in spillway channels

Lena Mören

Today's climate changes will probably give rise to precipitation in Sweden, which will cause more floods in Swedish rivers. Many of the Swedish rivers are regulated and have lots of hydro-electro power plants. Higher floods in the rivers will give greater water loads on the dams, which mean that a higher discharge through the sluice gates and in the spillway channels is needed. High discharge of water in a spillway channel can create scour of the material in the channel. Usually, for spillways in Swedish hydropower plants, this material is rock and the scour is in form of rock blocks. Scour downstream of dams can in the worst case endanger the dam construction.

The purpose of this study was to identify the extent and the type of rock scour that may appear in spillway channels of Swedish hydro power plants. The scour in rock material in a spillway channel is usually caused by pressure fluctuations in the water, which can cause large differences in pressure on the top and bottom surfaces of blocks. This pressure difference can be high enough to lift whole blocks. The main factors that affect this kind of scour are the crack pattern of the rock mass, the geometry of the spillway, the discharge of water and the surface fluctuation in the water. In this study a numeric model analyse, a field study and a literature study has been made in order to examine the influence on scour of the orientation of cracks in a rock mass. A rock mass containing a group of cracks with small or no dip is more likely to scour when it is exposed to discharging water. The orientation of the cracks in a rock mass relative to the direction of the water flow has also an impact on the capacity of the rock mass to resist scour.

In the field study the scour pattern in the spillway channels of the hydro power plants in Ligga, Harsprånget, Porjus, Satisjaure and Seitevare was examined. The scour of rock mass in the spillway channels in Ligga, Harsprånget and Porjus has been extensive. The rock mass in these channels has bedding cracks of small distances. This is probably the reason why these rock masses are sensitive for loads from discharging water. The rock mass in the spillway channel in Satisjaure has lots of cracks and is also very sensitive for loads from discharging water. This channel has been rebuilt during 2004.

There are different methods to predict the ability of a rock mass to resist scour. The Erodibility Index Method is a semi-empirical method that is verified by field observations in the USA. In this work the ability to apply this method on Swedish channels has been examined with field observations from Porjus, Harsprånget and Seitevare. As the Erodibility Index Method seemed to work in the case of these three spillways, it was also applied on the spillways in Satisjaure and Ligga.

Measures to reduce the energy in the discharging water in the spillways are very effective to reduce the risk of scouring in the rock mass. Blasted stairs in the rock mass in a channel or a stilling basin downstream the sluice gate is something that can reduce the energy in discharging water. Further documentary of spillway channels, like mapping and laser scanning, would contribute to a further verification of the Erodibility Index Method and to get a general survey of the risk of scour in Swedish spillways.

Keywords: Erodibility Index, Erosion of rock mass, Scour, Spillway channel, Water load

*Department of Earth Sciences, Uppsala University, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala, Sweden
ISSN 1401-5765*

Förord

Detta examensarbete ingår som en del i civilingenjörsutbildningen Miljö- och vattenteknik vid Uppsala Universitet. Examensarbetet utfördes under ledning av SwedPower AB i samarbete med Vattenfall Vattenkraft AB och Institutionen för geovetenskaper på Uppsala Universitet. Professor Kenneth Axelsson vid Institutionen för geovetenskaper på Uppsala Universitet har varit ämnesgranskare till arbetet. Industriell handledare till arbetet var Jonny Sjöberg, SwedPower AB. Examensarbetet har ingått i Vattenfall Vattenkrafts kompetensförsörjningsprojekt.

Examensarbetet hade inte varit möjligt att genomföra utan hjälp från många engagerade personer.

Ett stort tack till Jonny Sjöberg på SwedPower AB som utarbetade projektidén och som hjälpt mig under hela arbetets gång.

Kartering fick jag lära mig från grunden av Ulf Lindfors på SwedPower AB. Utan de goda instruktionerna hade jag inte klarat av den kartering som jag senare gjorde på egen hand. Jag vill även tacka för den välgjorda organiseringen av platsbesöken, med bl a inskaffande av tillstånd och val av lämpliga kanaler. Tack även till Fredrik Perman på SwedPower AB för bär- och karteringshjälp under det första platsbesöket. Fredrik gav även glatt hjälp när jag hade datorproblem inne på kontoret.

Per-Erik Söder på SwedPower AB i Ludvika har bidragit mycket till min förståelse för hur erosionsmekanismerna fungerar och har hjälpt mig att få fram litteratur från tidigare arbeten inom området. Tack även till Nils Johansson på SwedPower AB i Älvkarleby som hjälpt mig med de hydrauliska beräkningarna och antaganden kring dessa. Nils har även bistått mig med gamla fotografier.

Mats Billstein på Vattenfall Utveckling AB ordnade ett kontor åt mig i Älvkarleby och har även varit till hjälp med framförallt kontroll av de hydrauliska beräkningarna. Tack även till Alf Linderheim på Vattenfall Utveckling AB som ordnade fram gamla bilder från Porjus och Liggas kraftstationer. Ett stort tack även till Ingvar Olofsson på SwedPower AB i Stockholm som letade fram bilder på utskovskanaler ur Dammarkivet åt mig.

Den information jag sökte hos Uno Koljok på Vattenfall Vattenkraft AB i Vollerim levererades snabbt och hjälpen jag fick på Vattenfalls kontor i Porjus sparade många mils resa.

Jag vill också framföra mitt tack till alla andra jag kontaktat under arbetets gång. De personer jag kontaktat har varit positiva och mycket hjälpsamma.

Slutligen vill jag tacka Kenneth Axelsson för rådgivning och hjälp. Rapportskrivningen underlättades tack vare Kenneths strukturerade instruktioner.

Uppsala i februari 2005

Lena Mören

INNEHÅLL

Sida

1	INLEDNING.....	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	SYFTE OCH MÅL	2
1.3	RAPPORTENS INNEHÅLL	2
2	BERGEROSION.....	4
2.1	SPRICKOR I BERGMASSAN	4
2.2	EROSIONSFÖRLOPP OCH DESS PÅVERKANDE FAKTORER	4
2.3	BROTTMEKANISMER	7
3	TRYCKVARIATIONER I SPRICKOR.....	9
3.1	ANALYSER AV TRYCKFLUKTUATIONER	9
3.2	FÖRDELNING AV TRYCKHÖJDER KRING BLOCK	11
4	METODER FÖR BEDÖMNING AV EROSIONSRISK	13
4.1	INLEDNING	13
4.2	MODELLFÖRSÖK OCH NUMERISK ANALYS AV MIDSKOG	13
4.3	LÅSSTENSTEORIN	15
4.4	DE NUMERISKA METODERNA CFM OCH DI	15
4.5	EROSIONSINDEX	16
4.5.1	Bergmassans erosionsindex	16
4.5.2	Vattnets erosionskraft	18
4.5.3	Erosionsgräns	19
5	NUMERISK ANALYS AV EROSIONSPÅVERKANDE FAKTORER.....	23
5.1	NUMERISK METOD	23
5.2	NUMERISKA MODELLFÖRSÖK	23
5.3	RESULTAT AV DE NUMERISKA MODELLFÖRSÖKEN	29
5.3.1	Inverkan av vattendjup	29
5.3.2	Stupningens inverkan	33
6	FÄLTUNDERSÖKNING.....	35
6.1	DOKUMENTERINGSMETOD	35
6.2	PLATSOBSERVATIONER	37
6.2.1	Satisjaure	37
6.2.2	Harsprånget	38
6.2.3	Ligga	40
6.2.4	Porjus	42
6.2.5	Seitevare	45

7	BEDÖMNING AV RISKEN FÖR EROSION.....	48
7.1	INLEDNING	48
7.2	BESTÄMNING AV EROSIONSINDEX	48
7.3	BERÄKNING AV EFFEKTEN I VATTNET	50
7.4	KONTROLL AV EROSIONSGRÄNS	52
8	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	54
9	REKOMMENDATIONER OCH ÅTGÄRDSFÖRSLAG	58
10	REFERENSER	61

Bilagor

Bilaga I	Tabeller för bestämning av parametervärden vid kartering	I-1
Bilaga II	Huvudsprickgrupper i Satisjaure	II-1
Bilaga III	Fotograferingsbeskrivning från Satisjaure	III-1
Bilaga IV	Huvudsprickgrupper i Harsprånget	IV-1
Bilaga V	Fotograferingsbeskrivning från Harsprånget	V-1
Bilaga VI	Huvudsprickgrupper i Ligga	VI-1
Bilaga VII	Fotograferingsbeskrivning från Ligga	VII-1
Bilaga VIII	Huvudsprickgrupper i Porjus	VIII-1
Bilaga IX	Fotograferingsbeskrivning från Porjus	IX-1
Bilaga X	Huvudsprickgrupper i Seitevare	X-1
Bilaga XI	Fotograferingsbeskrivning från Seitevare	XI-1

1 INLEDNING

1.1 BAKGRUND

I Sverige finns omkring 700 vattenkraftverk med högre effekt än 1,5 MW och ytterligare 1200 med lägre effekt. Till kraftverken hör ca 190 dammar som är högre än 15 m (Johansson et al., 2003). Många av dessa dammar är så kallade fyllnadsdammar, där själva fördämningen består av fyllnadsmaterial som sprängsten, morän, grus, lera etc. Sådana konstruktioner är känsliga för översköljning och brister lätt om stora mängder vatten strömmar över deras krön. Utskov är därför en mycket viktig del i dammkonstruktioner för att kunna leda överflödigt vatten genom fördämningarna. Utskovskanalerna är i många fall utsprängda i berg eller ligger direkt i den gamla älvfåran, se principskissen i Figur 1.1.



Figur 1.1 Principskiss över en vattenkraftsdamm med utskovskanal (Bergström, 1999).

Kanalerna ska kunna ta emot höga ”stötvisa” flöden utan att varken dammen eller området där omkring tar skada. Trots att kanalerna ofta består av berg kan erosion uppstå då vatten släpps på. Erosionen är av typen blockerosion där belastningen från vattentryck och vattenflöde lösgör hela bergblock. Blocken kan sedan transporteras med vattnet längs utskovskanalen och hamna på olämpliga ställen. Exempelvis kan block lägga sig mot befintliga ledmurar och bidra till överspolning av dessa. Detta kan leda till jorderosion bakom murarna. De lösa blocken kan även orsaka betongskador och ändra strömningen i kanalen. I värsta fall kan erosionen gå uppströms och därmed riskera dammbrott.

Eftersom dagens klimatsituation ser ut att ge ökad mängd nederbörd i Sverige har nya riktlinjer på dimensioneringsberäkningar för flöden fastställts av Flödeskommitén (1990). Det innebär att de flesta av dagens dammar ska dimensioneras för att klara högre flöden än tidigare. Ett större flöde medför även att utskovskanalerna utsätts för mer vatten. I många av de större dammarnas utskovskanaler har det redan idag observerats blockerosion vid spill. Spillen har i regel inte varit långvariga men skador av block som flyttats och ändring av kanalens geometri har upptäckts. De nya dimensionerande flödena beräknas kunna pågå i veckor vilket innebär att erosionen då skulle kunna bli betydande på dessa ställen. Därför behövs en utredning om hur denna bergerosion uppkommer och i vilken omfattning blockerosion kan ske.

I nuläget finns inga omfattande svenska undersökningar om blockerosionsproblemet och endast ett fåtal kanaler har utvärderats vad gäller motståndskraft mot erosion. Det finns ingen generell förklaringsmodell för blockerosionen och inga förslag till förbättrande åtgärder. En i USA väl använd och verifierad metod för bedömning av erosionsrisk är erosionsindexmetoden (Annandale 1995). Denna metod är dock inte verifierad för svenska förhållanden.

1.2 SYFTE OCH MÅL

Syftet med detta arbete var att identifiera omfattning och typ av de bergerosionsproblem som uppkommer i utskovskanaler. Genom att studera befintlig litteratur om bergerosion samt utvärdera de metoder som finns för bedömning av erosionsbenägenhet har mekanismen för erosionen i utskovskanalerna utretts närmare. Litteraturstudien har framförallt behandlat inverkan av tryckvariationer i turbulentvatten samt sprickriktningar och spricktäthet på erosionen. Inga studier har gjorts med avseende på det intakta bergmaterialet.

Målet med arbetet var att ta fram en förklaringsmodell som beskriver uppkomsten av bergerosion samt föreslå åtgärdsprogram för att reducera bergerosionen i utskovskanaler i framtiden.

En närmare utredning av bergerosionen i utskovskanalerna i Ligga, Harsprånget, Porjus, Satisjaure samt Seitevare har utförts. Detta gjordes genom en fältundersökning med platsbesök och dokumentation av tidigare skador. Dessa platsbesök låg även till grund för utredningen av troliga erosionsmekanismer. Fältundersökningen syftade även till att försöka verifiera användandet av en metod för bedömning av erosionsrisk, erosionsindexmetoden (Annandale, 1995), i svenska kanaler.

Med hjälp av numerisk modellanalys och datorprogrammet UDEC, *Universal Distinct Element Code*, har några erosionspåverkande faktorer, såsom sprickriktning, studerats närmare. Undersökningen har framförallt begränsats till hur sprickriktningar och vattnets djup påverkar erosionen.

1.3 RAPPORTENS INNEHÅLL

Kapitel 2 behandlar allmänt bergerosion och dess förutsättningar, erosionsförlopp samt några allmänna mekanismer och baseras främst på litteraturstudier. I kapitel 3 presenteras en sammanställning av den forskning som gjorts beträffande tryckvariationer i sprickor som uppkommer vid turbulent vattenflöde. Där redovisas även en del metoder för att beräkna de lyftkrafter som bildas av tryckvariationer.

Kapitel 4 ger en översiktlig beskrivning av de metoder som idag finns för bedömning av erosionsrisker i berg, där framförallt Annandales erosionsindex beskrivs i detalj. Även en platsspecifik studie för kanalen i Midskog redovisas. Både kapitel 3 och 4 baseras på litteraturstudier.

I kapitel 5 redovisas en numerisk statisk analys av en sprickig bergmassa. Den numeriska metoden beskrivs och resultaten av de genomförda analyserna redovisas.

Kapitel 6 redogör för fältstudien där kanalerna i Ligga, Harsprånget, Porjus, Satisjaure och Seitevare har undersökts. Där återfinns en beskrivning av kanalerna, med bl a information från kartering, samt hur omfattande blockerosionen varit på platserna. Kapitel 7 innehåller en utvärdering av erosionsindexmetoden samt en bedömning av erosionsrisken på de platser som ingick i fältstudien.

Slutligen presenteras en diskussion och några sammanfattande slutsatser i kapitel 8. Några åtgärdsförslag samt rekommendationer för fortsatt arbete återfinns i kapitel 9.

2 BERGEROSION

2.1 SPRICKOR I BERGMASSAN

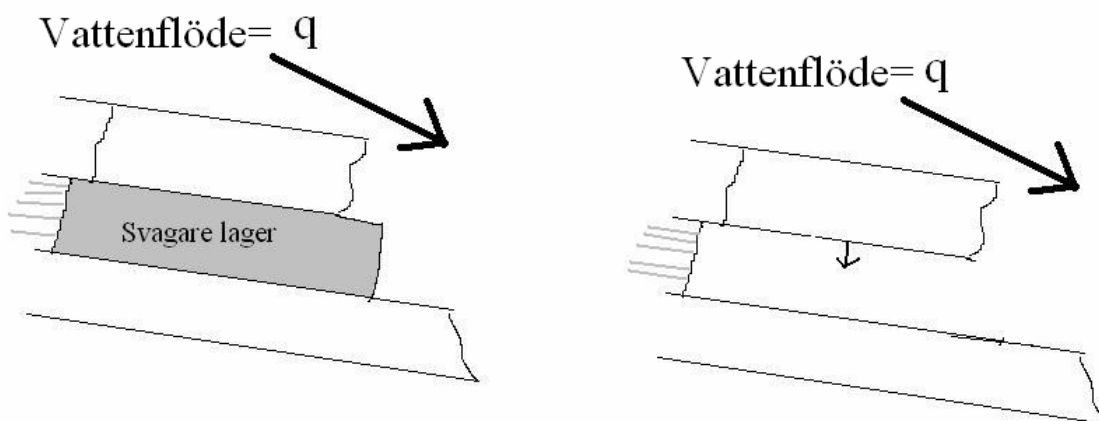
Vid stora spill har många utskovskanaler problem med erosion av det bergmaterial som kanalerna vanligen består av. Den erosion på hårt berg som orsakas av höga vattenflöden utgörs främst av blockerosion där hela block bryts loss och flyttas. I dessa fall kan bergmassan bestå av en mycket hållfast bergart genomkorsad av många sprickor. Denna erosion sker inte gradvis och kontinuerligt utan snarare som plötsliga incidenter när stora block flyttas (Woodward, 1992).

Blockerosion skulle inte uppstå i hårt, höghållfast berg utan befintliga sprickor i bergmassan. Sprickor förekommer inte slumpmässigt i bergmassan utan i regel i grupper med liknande egenskaper. Sprickgrupperna har olika egenskaper beroende på hur de bildats. Skjuvsprickor uppstår då bergmassan utsätts för tryck medan tensionsprickor bildas då dragspänningar verkar på bergmassan. Tensionssprickor har ofta en rå sprickyta. Bankning är ett ytligt fenomen som förekommer i granitisk berggrund, vilken till stor del är berggrunden i Sverige. Det består av system av horisontella sprickor i ytan av berggrunden. Sprickorna tros ha uppkommit då berggrunden avlastats vid avsmältningen av inlandsisen (Nordlund et al, 1998).

De naturliga älvfåror och sjöarna i Sverige går i regel längs stora förkastningar och andra svaghetszoner, detta eftersom vattnet lättare kunnat erodera ned sin väg här. Därför består de flesta älvfåror och även utskovskanaler av uppsprucket berg. Bankning är ett mycket vanligt fenomen i Sverige och därför innehåller stora delar av bergmassan här, inklusive många bergkanaler, ytliga subhorisontella sprickor (Söder, 2004).

2.2 EROSIONSFÖRLOPP OCH DESS PÅVERKANDE FAKTORER

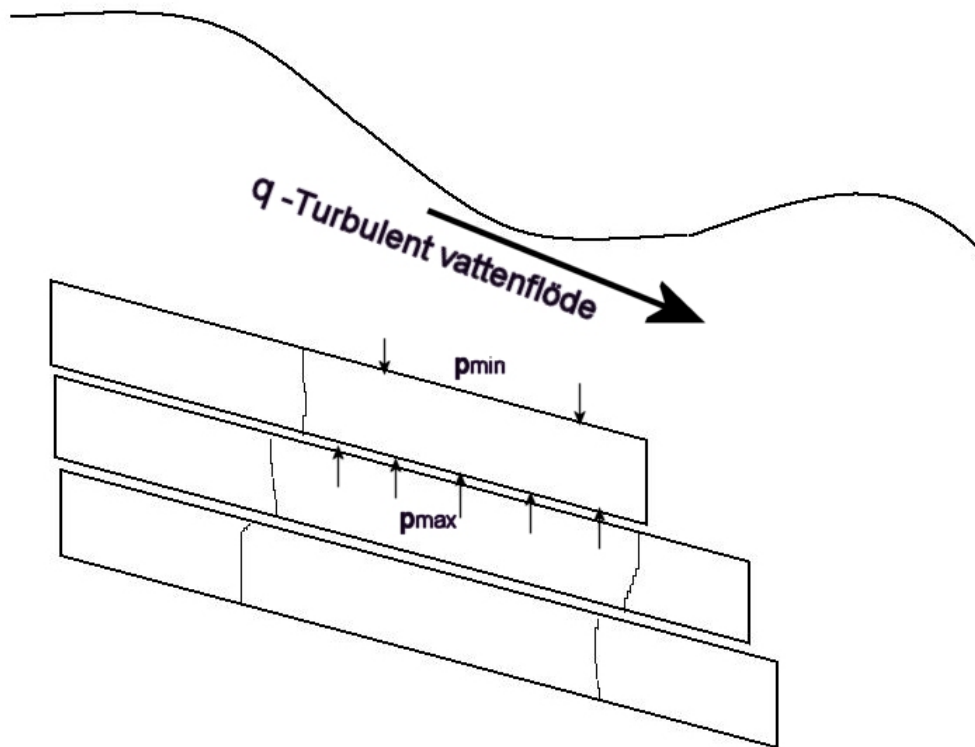
Brott i bergmassan av vattenbelastning kan ske på olika sätt. Om det finns lager av hållfast berg ovanpå svagare lager kan det ske urspolning av de svagare lagren varpå även det mer hållfasta lagret brister, se Figur 2.1.



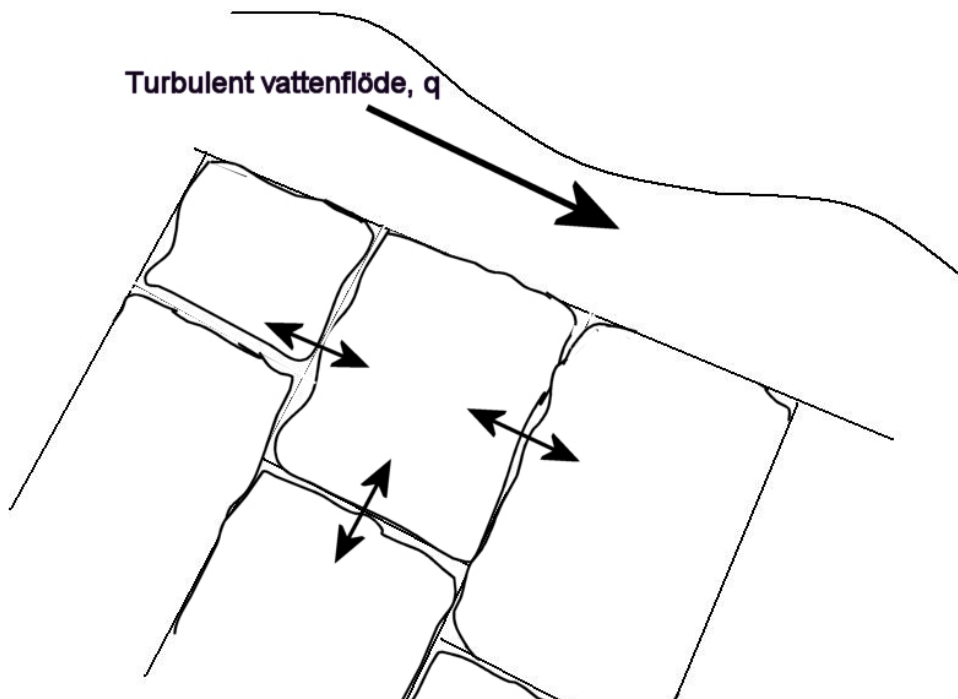
Figur 2.1 Erosion då ett svagare lager spolas bort och övre lager brister.

Blockerosion kan även uppkomma av tryckvariationer vid botten. Trycket varierar på grund av en fluktuerande vattenyta och turbulens i vattnet. När trycket sprids i

sprickorna skapas tryckskillnad mellan övre och undre delarna av blocken, se Figur 2.2 och Figur 2.3. Tryckskillnaden kan bli tiotals kPa.



Figur 2.2 Tryckvariation så att p_{max} är kvar i sprickan då p_{min} är på botten.



Figur 2.3 Turbulent vatten ger upphov till fluktuerande tryck i sprickor som skapar både spänningar och lyftkrafter, som i sin tur kan ge upphov till blockerosion.

Blockerosion orsakad av tryckvariation kan ske i olika steg. Tryckvariationen i sprickorna skapar spänningar i berget som kan ge uppsprickning längs bergmassans naturliga svaghetszoner (Liu et al, 1998). Därefter kan lyftkrafter som bildas flytta block som avgränsas av sprickorna. När väl en liten omplacering av ett block skett kommer turbulensen kring blocket att öka. Detta ger större tryckvariation kring blocket som bidrar till ännu större lyftkrafter och till slut lyfts hela blocket iväg av vattnet, se Figur 2.3.

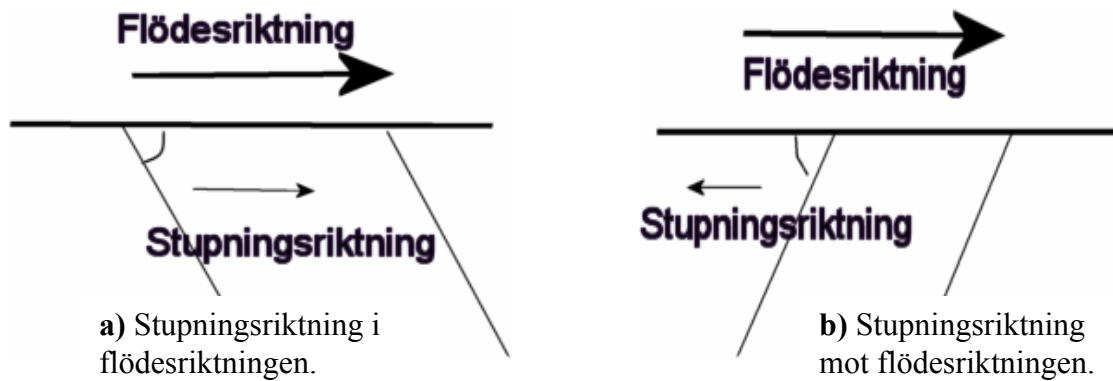
Den lyftkraft som krävs för att flytta ett block bestäms av bergets densitet, storleken på blocket, hur vida sprickorna är och hur sprickyterna ser ut. Trånga sprickor kräver mer kraft för att blocket ska flyttas (Bollaert, 2004). Stupar sprickorna nedströms kan överstjälpning bidra till att blocken lättare bryts loss.

Blockerosion skapad av tryckvariationer är det troliga i utskovskanaler eftersom vattenflödet i en utskovskanal i regel är mycket turbulent och dess vattenyta fluktuerar stort, ofta flera meter. Denna erosionsmekanism behandlas därför mer ingående i avsnitt 2.3. Tryckvariationer i sprickor behandlas i kapitel 3.

Faktorer som påverkar hur stor erosionen blir i en kanal är geometrin på kanalen, fysiska egenskaper på det material som kanalen består av och vattenströmningen i kanalen. Kanalens geometri inverkar på flödets karaktär, det vill säga kanalens djup och bredd påverkar hastigheten på vattnet för en viss avbördning. Oregelbundenheter ger mer turbulens i vattnet och därmed ökad belastning på berget (Cato & Mathewson, 1990). De fysiska egenskaperna i kanalen är vilken bergart den består av, dess hållfasthet samt heterogeniteten/sprickigheten i bergmassan.

Magmatiska och metamorfa bergarter har en stor variation i hur motståndskraftiga de är för erosion. De har dock en tillräckligt hög hållfasthet mellan kornen att den erosion som uppkommer är blockerosion. Sedimentära bergarter har en ännu större spridning av hur känsliga de är för erosion (Cato & Mathewson, 1990). Hållfastheten beror till stor del på vilken sedimentär bergart det rör sig om och i vilken riktning belastningen sker. Hållfastheten är dock låg jämfört med magmatiska och metamorfa bergarter, med en enaxiell tryckhållfasthet mellan 30-130 MPa (Nordlund et al, 1998). Den låga hållfastheten ger vid vattenbelastning i regel en kemisk/mekanisk erosion, korn för korn. Men blockerosion kan också förekomma eftersom sedimentära bergarter ofta är skiktade (Cato & Mathewson, 1990).

Sprickornas orientering i en bergmassa inverkar också på hur stor erosionen kan bli. Vid undersökningar i USA (Cato & Mathewson, 1990) har det framkommit att en bergmassa som har horisontella sprickor eller sprickor som stupar mot flödets riktning är mer motståndskraftig för erosion än en bergmassa som har sprickor som stupar i flödets riktning, se Figur 2.4 a och b.



Figur 2.4 Sprickriktning i förhållande till flödets riktning.

2.3 BROTTMEKANISMER

Vid spill utsätts utskovskanalerna för stora mängder vatten som forsar med hög hastighet över bergytan. Det är stor turbulens i vattnet och ofta uppstår kraftiga vågfluktuationer. Bergblocken i botten av kanalen utsätts för horisontella dragkrafter på ytan, som skapas av det forsande vattnet, samt för tryck från vattnet i sprickorna. Blocken utsätts även för en vertikal tryckkraft från vattnet ovanför som helt beror av vattnets djup. Denna tryckkraft varierar med vågfluktuationerna och kan därför orsakas av ett tryck på flera meter vattenpelare.

Den horisontella dragkraften på ett bergblock i en kanal beror av bergytans råhet, djupet och hastigheten på vattnet samt blockytans area. Av dragkrafterna bildas ett skjuvmotstånd till närliggande block. Skjuvhållfastheten, τ_s , beräknas enligt Mohr-Coulombs lag:

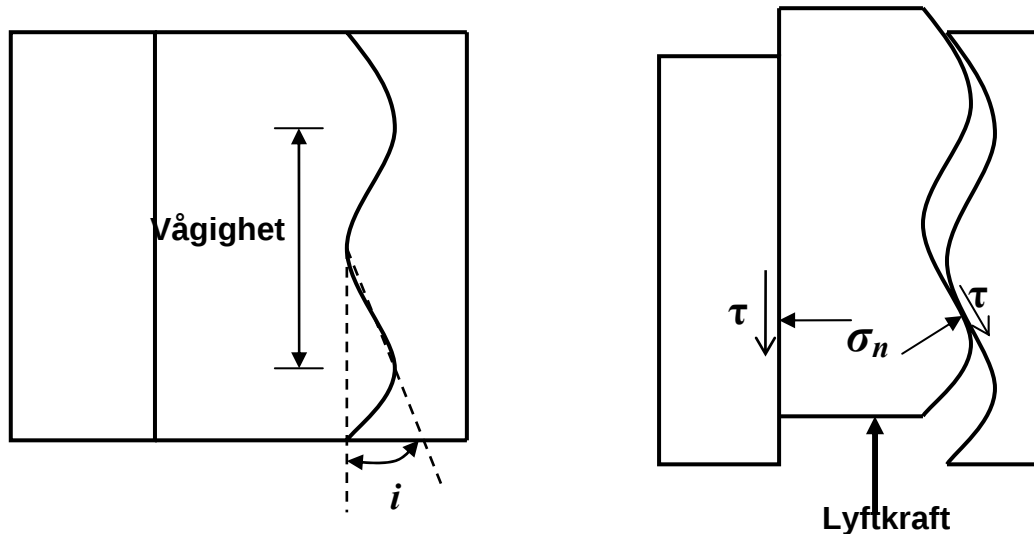
$$\tau_s = c + \sigma'_n \tan \phi \quad (2.1)$$

Den effektiva normalspänningen, σ'_n , är den totala normalspänningen minus vattentrycket verkande på sprickytor (Nordlund et al, 1998). Kohesionen betecknas c och ϕ är friktionsvinkeln för materialet. En reduktion av effektiva normalspänningen genom exempelvis högt vattentryck i sprickorna resulterar alltså i minskad skjuvhållfasthet. Då skjuvhållfastheten inte längre står emot skjuvkraften från vattnet kan blocket flyttas. I vilken grad erosionen sker beror på hur stor skillnad det är mellan skjuvhållfastheten och skjuvkrafterna, massan på blocket och tiden som skjuvkraften överstiger skjuvhållfastheten (Lorig, 2002).

Skjuvhållfastheten beror även på hur plan sprickytan är. En vågig sprickytas hållfasthet kan uppskattas genom:

$$\tau_s = \sigma'_n \tan(\phi + i), \quad (2.2)$$

där i utgör ett tillägg på friktionsvinkeln på grund av den storskaliga vågigheten, se Figur 2.5. I detta uttryck försummas kohesionen. Mera vågighet ger större skjuvmotstånd om sprickytor har tät kontakt eftersom blocken då måste dilatera vid skjuvning, se Figur 2.5 (Montgomery, 1984).



Figur 2.5 Skjuvmotståndet, τ_s , vid böljande respektive plan yta (Montgomery, 1985).

I fyllda sprickor är materialet i sprickorna avgörande för hur stort skjuvmotståndet är. Fyllnadsmaterialet kan bestå av mineral med mycket låg hållfasthet som talk, kalcit eller lermineral. Vatten tillsammans med lera i sprickorna kan fungera som glidlager och reducera skjuvhållfastheten väsentligt (Nordlund et al., 1998). Skjuvmotståndet minskar alltså med ökad sprickvidd och tjocklek på fyllnadsmaterialet.

En fluktuerande vattenyta ger upphov till ett varierande statiskt tryck på botten. Trycket sprids vidare in i sprickorna. Det är stor skillnad på den hastighet som trycket fortplantar sig i en spricka och den hastighet som trycket fortplantar sig i det turbulenta vattnet, eftersom sprickorna kan ses som ett stelt material. Därför skapas en tryckskillnad mellan bergblockens övre och undre delar, se Figur 2.2.

3 TRYCKVARIATIONER I SPRICKOR

Tryckvariationer i sprickor är en viktig orsak till blockerosionen och är relativt lätt att mäta genom bland annat modellförsök. Därför har det gjorts en mängd experiment och utredningar kring detta. De andra faktorerna som påverkar erosionen, så som sprickornas skjuvhållfasthet, friktionsvinkel på materialet och olika bergmaterial är inte lika enkla att mäta. När befintlig litteratur om bergerosion studeras är det lätt att tro att tryckvariationer i sprickor är den absolut viktigaste faktorn till blockerosion, eftersom det skrivits mest om denna. Troligtvis är t ex bergets hållfasthet och sprickors orientering minst lika viktiga faktorer. Nedan presenteras en kort sammanställning av innehållet i en del av den litteratur som finns om tryckvariationer i sprickor.

3.1 ANALYSER AV TRYCKFLUKTUATIONER

Nedströms ett utskov är vattenflödet sannolikt superkritiskt eller som ett hydrauliskt-språng (Montgomery, 1984). Turbulens i vattnet ger energiförluster och skapar stora amplituder i tryckfluktuationer vid botten. Trycket vid botten beror även på variation av vattenytans nivå och bidrar, som redan nämnts, till blockerosion. För att utreda omfattningen av tryckvariationerna har både numeriska modeller skapats och en mängd modellförsök utförts.

En av de första studierna kring tryckfluktuationer vid hydrauliska språng gjordes 1969. Då togs ett uttryck fram för den maximala tryckskillnaden som funktion av rörelse-energinivån utan att hänsyn togs till Froudes tal (Bowers & Tsai, 1969). Froudes tal är förhållandet mellan vattenhastigheten och våghastigheten (Häggström, 1999). Statistiska undersökningar av tryckvariationen vid ett hydrauliskt språng har också utförts (bl a Vasiliev & Bukreyev, 1967). Firoto och Rinaldo (1992) beskriver tryckfluktuationerna i den tunna vattenfilm som troligen finns i sprickorna genom att ställa upp kontinuitets- och rörelsemängdsekvationerna för vågen i sprickan och lösa dem. För det endimensionella fallet har dessa ekvationer formen:

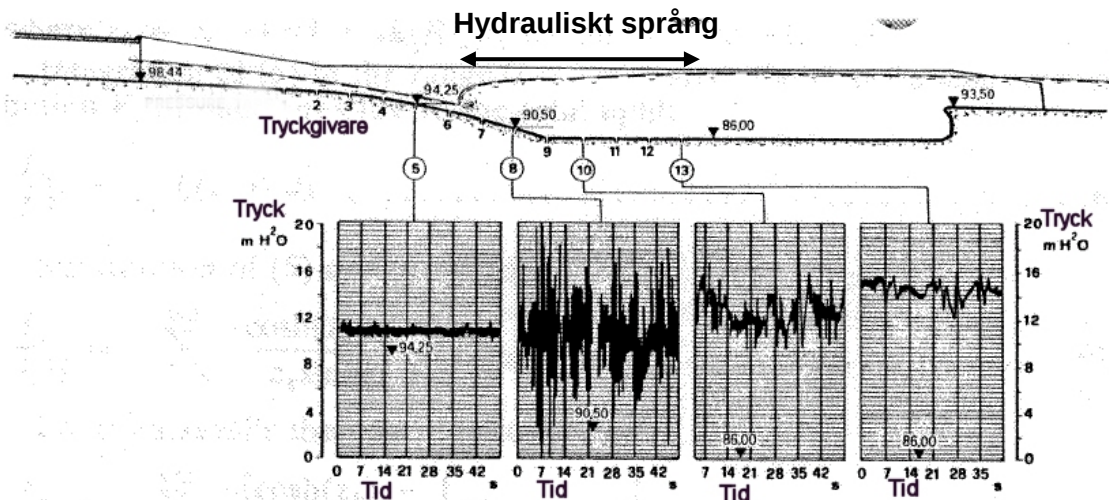
$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + R(v)v = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{C^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (3.2)$$

I ekvationerna är v vattenhastigheten i sprickan, h tryckhöjden för det fluktuerade trycket, C hastigheten på tryckutbredningen och $R(v)$ en parameter som beskriver friktionseffekten. Lösningen fås genom spektralanalys där $h(x, t)$ är tryckhöjden vid en viss plats, x , och en viss tidpunkt, t . När ett uttryck för tryckhöjden finns kan lyftkraften över sträckan beräknas genom att integrera uttrycket med avseende på sträckan, x .

En annan metod att definiera lyftkraften är att använda sig av kovariansfunktionen till det fluktuerande trycket på botten av ett hydrauliskt språng (Firoto & Rinaldo, 1992). Den maximala lyftkraften sker i den zon där differensen av det fluktuerande trycket är som störst. I denna zon kan tryckvariationen antas vara normalfördelad (Vasiliev & Bukreyev, 1967).

Modellförsök har gjorts på tryckfluktuationerna där en liten kanal med botten gjord av tunna cementplattor med ett skibord har använts för att simulera en riktig utskovskanal. Trycket mättes i springorna och mitt under plattorna där det hydrauliska språnget bildades. I Figur 3.1 visas både försökssuppställningen och ett exempel på resultatet. Tryckfluktuationerna var som väntat störst mitt under det hydrauliska språnget. Det är botten under ungefär en tredjedel av längden på det hydrauliska språnget som utsätts för maximal tryckvariation (Firoto & Rinaldo, 1992).



Figur 3.1 Försökssuppställning vid modellförsök där trycket i och mellan tunna cementplattor har mätts. Resultatet från tryckgivare 5, 8, 10 respektive 13 visas i diagrammet. Tryckgivare 8 sitter precis under det hydrauliska språnget (Firoto & Rinaldo, 1992).

Tryckvariationerna är olinjära och kortvariga och detta antas bero på att den luftinblandning som sker i vattnet ger vattnet speciella kompressionsegenskaper. Detta medför alltså att hastigheten på vågutbredningen beror av trycket då ett högt tryck ger liten luftvolym och alltså hög hastighet medan ett lågt tryck ger stor luftvolym och låg hastighet (Bollaert, 2004).

För att undersöka vattnets lyftkraft på bergblock använde Lui et al (1997) samma modell för tryckutbredningen i sprickor som Firoto och Rinaldo (1992), se ekvation 3.1 och 3.2. Om vattentjockleken i sprickan antas vara oförändrad i tiden fås numeriskt att variansen av tryckfluktuationerna i sprickan är ungefär desamma som variansen av tryckfluktuationerna vid sprickans mynning. Detta beror på att tryckvågutbredningen i sprickan kan anses ske omedelbart. På den övre ytan av bergblocket har tryckutbredningen inte högre hastighet än det turbulenta vattnets hastighet. Det skiljer alltså minst en tiopotens i utbredningshastighet och tryckvariationerna kan då anses vara oberoende av varandra (Liu et al, 1997).

Genom att använda en modell för transient flöde har Lui et al (1997) skapat ett numeriskt uttryck för den maximala lyftkraften, vilket har verifierats genom modellförsök. De gjorde samtidigt en tvådimensionell numerisk modell för transient flöde som också visade att tryckvariationerna på ytan och i sprickorna inte var i fas och att detta kan ge upphov till lyftkrafter. Vid experimentella försök ses att bandbredden på frekvensen av lyftkrafterna sammanfaller med bandbredden på frekvensen av tryck-

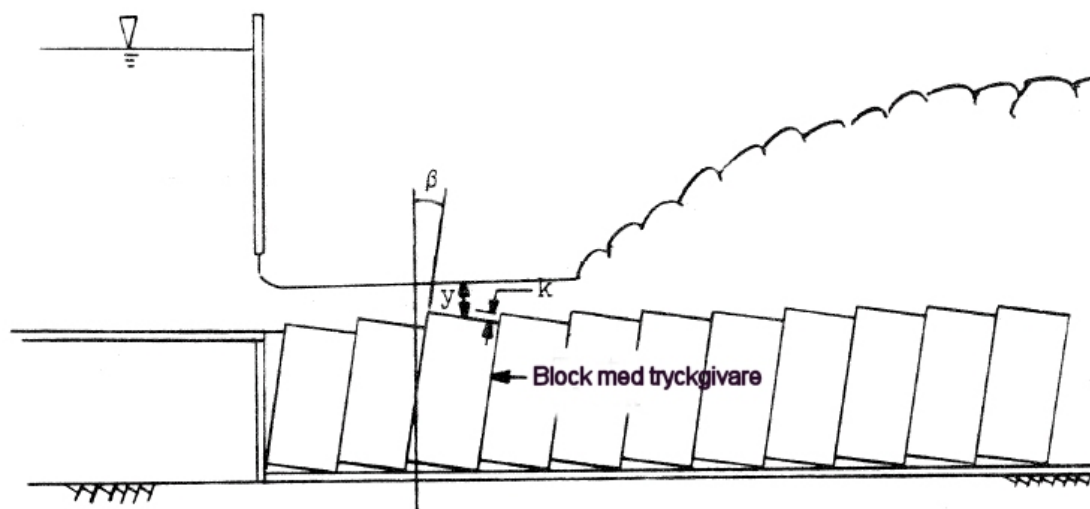
fluktuationerna på botten av gropen vilket verifierar att det är tryckfluktuationerna som skapar lyftkrafterna (Liu et al, 1997).

Modellförsök har även visat att medellyftkraften ökar då djupet på vattnet ökar efter ett hydrauliskt språng (Liu et al, 1997). Vid jämförelse av lika tunga och tunna block ses att kvadratiska tunna block får större lyftkraft än rektangulära. Allra minst lyftkraft får rektangulära block som är avlånga i flödesriktningen (Firoto & Rinaldo, 1992).

I andra modellförsök (Bollaert, 2004) har det visat sig att ”endimensionella” sprickor, d v s de som är djupa med endast en liten öppning, har en tryckvariation mellan nära atmosfärstryck och tre gånger tryckhöjden vid botten. Denna förstärkning av tryckamplituden kan uppkomma då tryckfluktuationen vid en sprickas öppning har en liknande frekvens som den sprickiga bergmassans egenfrekvens.

3.2 FÖRDELNING AV TRYCKHÖJDER KRING BLOCK

Tryckfördelningen kring block som utsätts för kraftiga vattenflöden har undersökts vid KTH (Montgomery, 1984 och Reinius, 1986). Detta gjordes genom att studera en modell av en kanal där botten bestod av cementblock staplade bredvid varandra, se Figur 3.2. Kring ett av cementblocken fanns 14 tryckgivare och genom att variera vattenflöde och uppställning av blocken analyserades olika trycktillstånd.



Figur 3.2 Provuppställning för mätning av tryckhöjder kring block. Det markerade blocket är utrustat med 14 tryckgivare (Montgomery, 1984).

Resultatet från undersökningarna var sammanfattningsvis att huvudsakligen storskalig råhet av bergytan samt höghastighetsflöden, såsom vid superkritisktflöde och i början på ett hydrauliskt språng, orsakar lyftkrafter. Sprickor med stupning i flödets riktning ger mer tryck i sprickorna än på ytan och därmed en större risk för erosion. Sprickor med stupning mot flödet har däremot mindre tryck i sprickorna än på ytan.

Vid testerna gjordes inga mätningar på de tryckfluktuationer som uppkommer vid vattenturbulens och vattenytans nivåändringar. Dessa är som redan nämnts betydande

för det totala trycket i sprickorna och därmed även för erosionsförloppet (Reinius, 1986).

4 METODER FÖR BEDÖMNING AV EROSIONSRISK

4.1 INLEDNING

Erosionsbenägenheten hos en bergmassa går inte att mäta exakt men den är viktig att kunna uppskatta för att förhindra skador och kunna dimensionera flöden. Metoderna som finns idag för bedömning av en bergmassas erosionsbenägenhet varierar från att vara helt empiriska till att baseras på teoretiska fysiska samband. Några av de befintliga allmänna metoderna är:

- Låsstensteorin.
- Erosionsindex.
- CFM, Comprehensive Fracture Mechanics, det vill säga allmän sprickmekanik och DI, Dynamic Impulsion, ”dynamisk stöt”.

Det finns även helt empiriska metoder för att uppskatta erosiondjupet, då bergmassan utsätts för en fallande stråle, som till exempel Veronese, Mason och Tildiz ekvationer (Wittler et al, 1998).

En platsspecifik mycket lyckad utredning av erosionsrisken har utförts av utskovskanalen i Midskog (Billstein et al, 2003), där både modellförsök och numeriska beräkningar låg till grund.

Erosionsindex är en semiempirisk metod medan CFM och DI bygger på fysikaliska modeller. Låsstensteorin ger en noggrann beskrivning av möjligheten för block i bergmassans yta att lossna (eng. removability). Metoderna beskrivs i detalj nedan.

4.2 MODELLFÖRSÖK OCH NUMERISK ANALYS AV MIDSKOG

Midskogs kraftstation är belägen i Indalsälven och byggdes på 1940-talet. Avbördningen sker genom fem utskov varav ett är ett bottenutskov och den totala avbördningskapaciteten är 2375 m³/s. År 1997 var det mycket höga vattenflöden och omfattande erosion uppkom i kanalen. Därefter fick avbördningen genom utskoven begränsas genom driftrestriktioner för att inte fortsätta allvarliga skador skulle uppkomma på dammkroppen och i kanalen. Innan reparationsarbete och ombyggnation av kanalen påbörjades utfördes både modellförsök och numeriska beräkningar för att kunna optimera kanalen för att tåla ännu högre flöden (Billstein et al, 2003).

I de fysiska modellförsöken byggdes en modell av kanalen upp i skala 1:50. Modellen omfattade ett område på 250 m uppströms och 300 m nedströms utskovspartiet (Billstein, 2002). I modellen undersöktes sedan avbördningskapaciteten, flödesriktningar, vattennivåer och vattenhastigheter. Även tryckamplituder vid botten nedströms utskoven samt olika våghöjder registrerades. Syftet med modellförsöken var dels att undersöka inverkan av olika åtgärder och konstruktionslösningar i kanalen och dels att ge underlag för de numeriska beräkningarna (Billstein et al, 2003).

Olika utformningar på utskovspartiet prövades för att minska vattenhastigheten och bergbelastningen. I den utformning som fungerade bäst lyftes vattenstrålen över bergsslänten ner i en energiomvandlargrop. Denna kunde utformas så att bergpåkänningen där inte blev högre än tidigare.

I den numeriska studien undersöktes kanalen i tre olika utformningar:

1. Originalutformning, d v s som det var på 1940-talet.
2. 1997 års förhållande efter de höga flödena med erosion.
3. Den konstruktion som i modellförsöken visat sig bäst.

Datorprogrammet som användes för de numeriska analyserna var *UDEC*, *Universal Distinct Element Code*. Det är ett tvådimensionellt numeriskt program som baseras på distinkta elementmetoden. Programmet simulerar diskontinuerligt material, t ex sprucket berg, som utsätts för antingen statisk eller dynamisk belastning. En sprucken bergmassa representeras som en samling av diskreta block och sprickorna behandlas som randvillkor mellan blocken. I programmet tillåts stora rörelser av blocken längs sprickorna samt rotation av blocken. En närmare beskrivning av *UDEC* återfinns i avsnitt 6.1. De diskreta blocken i modellerna simulerades som deformierbara block (Billstein et al, 2003).

Lorig (2002) gjorde först en enkel modell av erosionsmekanismen. En dynamisk modell skapades i *UDEC* bestående av ett kubiskt block med kantlängden 1 meter. Modellen skulle visa händelseförloppet då de horisontella krafterna från vattnet överstiger skjuvmotståndet i sprickorna som definierar blocket (ekvation 2.1). Den enkla modellen kunde även illustrera hur ett fluktuerande vertikalt tryck kan ge förflyttning av ett block. Blocket sattes 3 meter under en vattenyta och det flödande vattnet antogs resultera i en 2 kPa stor skjuvlast på övre ytan av blocket. Därefter utsattes blocket för en varierande vertikal ytlast. Resultaten visade tydligt sambandet mellan blockets förflyttning i sidled och minskad vertikal ytblastning. Denna enkla modell kunde även visa att erosionsrisken ökar med följande faktorer:

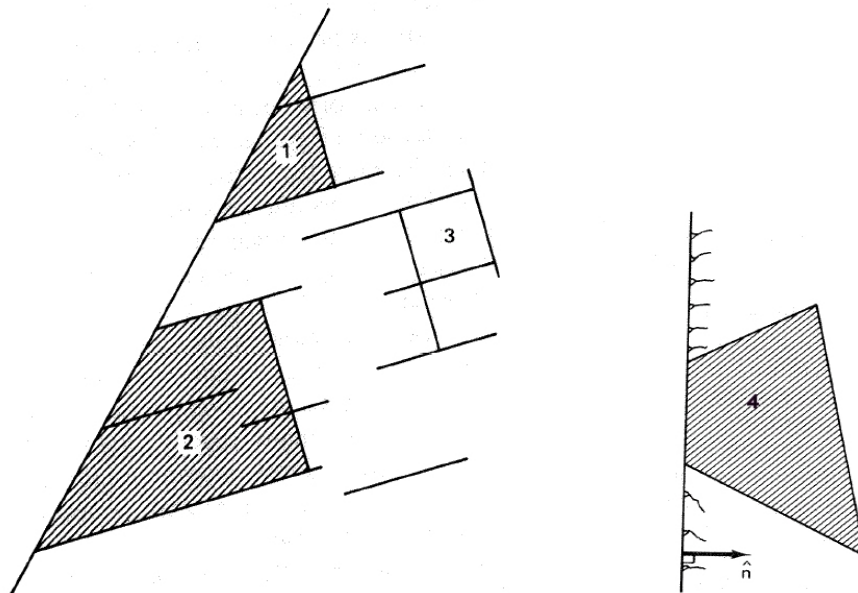
- Lågt skjuvmotstånd i sprickor.
- Små block.
- Stora ytskjuvspänningar skapade av forsande vatten.
- Block som har stor bredd i förhållande till djup, d v s tunna block.
- Block utsatta för vertikala laster med långa avlastningsperioder.
- Högt porttryck i sprickor.

De numeriska analyserna av kanalen i Midskog utfördes sedan genom att göra profiler av kanalen som innehöll bergmassans struktur. Denna hade bestämts tidigare genom kartering av kanalområdet. Berget i Midskogs kanal är av gnejs och blocken antogs vara linjärt elastiska med en elasticitetsmodul på 10 GPa. Sprickornas egenskaper skattades också efter informationen som inhämtades vid karteringen. De vattentryck och vattenhastigheter som simulerades i kanalen togs från modellförsöken. De numeriska beräkningarna visade sig mycket väl kunna förutspå den erosion som skett 1997. De visade även att de föreslagna åtgärderna skulle minimera risken för fortsatt erosion och att inga driftrestriktioner vad gäller avbördning av vatten då skulle behöva införas.

Denna mycket noggranna bestämning av erosionsrisken genom simulering av erosionen vid olika förhållanden har fungerat mycket bra. Det krävs dock en hel del förarbete med modellförsök och kartering. Den numeriska modellen som gjordes här är platspecifik för Midskog och för att göra en liknande bedömning av erosionsrisken på en annan plats bör en ny numerisk modell skapas, och relevant samt repeterbar indata samlas in från platsen.

4.3 LÅSSTENSTEORIN

I Låsstensteorin (eng. Keyblock Theory) identifieras de block som har en av sina sidor i bergytan, se t ex block 1, 2 och 4 i Figur 4.1. Detta görs genom att undersöka olika kombinationer av sprickgrupper i bergmassan. De ytliga block som har en gynnsam form för att lossna från bergmassan kallas kritiska låsblock. Stabiliteten på de kritiska låsblocken kan sedan uppskattas genom tredimensionella jämviktsvillkor mellan verkande krafter och hållfastheten i sprickplanen (Goodman & Shi, 1985).



Figur 4.1 Block 1 är ett kritiskt låsblock, block 2 är också ett block som kan lossna medan block 3 och 4 anses vara stabila block (Goodman & Shi, 1985).

Modellen används främst vid stabilitetsberäkningar av slänter och hålrum men har utökats för att kunna användas vid beräkningar av belastning från vatten (Goodman & Hatzor, 1991). Först görs en noggrann kartering av den berörda bergmassan för att identifiera block som kan lossna. Dessa blocks benägenhet att förflyttas bedöms sedan genom att undersöka de avgränsande sprickornas rårhet och vinklar mellan varandra. För de mest instabila blocken, de kritiska låsblocken, undersöks hur mycket kraft från vattnet som skulle krävas för förflyttning. Detta görs genom att jämföra blockets tyngd och exponerad yta med vattentrycket. På detta sätt fås en uppfattning om hur stor belastning bergmassans svagaste områden tål. Dock har endast de statiska krafterna från vattnet använts hittills, vilket inte är representativt för den rådande situationen i en utskovskanal, då de dynamiska krafterna i sprickor vid snabbt forsande vatten kan vara mycket större (Annandale et al, 2004).

4.4 DE NUMERISKA METODERNA CFM OCH DI

Metoderna, CFM (eng. Comprehensive Fracture Mechanics) och DI (eng. Dynamic Impulsion) baseras på numerisk modellanalys av tryckvariationerna i bergmassans sprickor. Metoderna tar hänsyn till två av de grundläggande brottmekanismerna i sprucket berg, erosion genom plötslig eller tidsberoende spridning och utvidgning av sprickor samt upplyftning och förflyttning av hela block (Schleiss & Bollaert, 2003). De hydrauliska beräkningarna bygger på att vattnet kommer som en stråle från ett överfall.

De båda numeriska metoderna CFM och DI baseras på fysiska samband. De behandlar tre delar av skeendet vid blockerosion av ett vattenfall:

1. **Karaktärisering av vattenstrålen.** Initial hastighet på vattnet samt infallsvinkel och bredd på strålen används för att beräkna spridning, hastighet och diameter på strålen då den träffar vattenytan.
2. **Beräkningar i vattnet där strålen träffar.** Denna del uttrycker energin i vattnet och belastning på bergmassan av vattnet. Relationen mellan vattendjup och strålens diameter då den träffar ytan används för att beräkna hur strålen sprids i vattnet. Från detta förhållande beräknas koefficienter som motsvarar hastighetshöjden för den inkommande rörelseenergin.
3. **Påverkan på bergmassan, d v s erosionen.** Det maximala trycket som bildas i sprickorna av den inkommande rörelseenergin beräknas, där hänsyn tas till bl a tätheten på sprickorna.
(Bollaert, 2004).

Trycket i öppna sprickor, d v s under blocken, sammankopplas numeriskt med motsvarande tryck på ytan av blocken. Genom denna metod erhålls även ett förenklat uttryck för spänningen, K_1 , i sprickorna orsakat av tryckfluktuationerna:

$$K_1 = P_{\max} F \sqrt{\pi L_r} , \quad (4.1)$$

där $P_{\max}$ är maximala trycket, F är en korrektionsfaktor som beror på sprickans form och hållfasthet och L_r är sprickans längd. Sprickans form har betydelse då denna avgör hur mycket stöd det omgivande berget kan ge. De numeriska beräkningarna har verifierats genom modellförsök (Bollaert, 2004) och har visat sig uppskatta både tidsberoende och plötslig erosion bra. Metoden kan även prediktera erosionsdjup och utbredning väl.

4.5 EROSIONINDEX

4.5.1 Bergmassans erosionsindex

Den semiempiriska metoden med erosionsindex baseras på en jämförelse mellan vattnets erosionskraft och bergmassans motståndskraft. För att uppskatta bergmassans motståndskraft används ett erosionsindex, K_h , vars värde representerar ett mått på materialets motståndskraft mot erosion. Ett underlag med högt K_h har stor motståndskraft mot erosion medan ett underlag med lågt K_h har liten motståndskraft mot erosion (Annandale, 1994).

Erosionsindexet är en funktion av ett antal geologiska parametrar som ges numeriska värden och som tillsammans ska representera bergmassans karaktär. Erosionsindex definieras som produkten av följande fyra primära parametrar:

- bergmassans hållfasthet, M_s
- bergmassans blockstorlek, K_b
- sprickornas skjuvhållfasthet, K_d
- sprickornas/blockens riktning i förhållande till strömriktningen, J_s

d v s erosionsindexet, K_h , har formen (Annandale, 1995):

$$K_h = M_s \cdot K_b \cdot K_d \cdot J_s \quad (4.2)$$

Parametern för bergets hållfasthet, M_s , bestäms i fält och beror av den enaxliga tryckhållfastheten, se Tabell I.4 i Bilaga I.

Medelblockstorleken, K_b , bestäms genom (Annandale, 1995):

$$K_b = \frac{RQD}{J_n}, \quad (4.3 \text{ a})$$

där J_n benämns som sprickgruppstalet och är ett mått på hur många sprickgrupper den undersökta bergmassan har, enligt Tabell I.1 i Bilaga I. RQD kallas *rock quality designation* och bestäms genom undersökning av borrhärlor. Längden på varje bit över 10 cm på provborrhärlan summeras då ihop och summan delas med totala längden på borrhärlan. På så sätt fås ett förhållande på hur stor andel av berget som är uppsprucket. För de fall då RQD inte kan mätas på detta sätt kan en uppskattning av värdet göras genom:

$$RQD = 115 - 3,3 \times J_v, \quad (4.3 \text{ b})$$

där J_v motsvarar det totala antalet sprickor per kubikmeter berg. J_v kan beräknas genom att summera inversen av sprickavståndet inom respektive sprickgrupp enligt:

$$J_v = \left(\sum \frac{1}{S_i} \right) + \frac{Nr}{5}, \quad (4.3 \text{ c})$$

där S_i är sprickavståndet för respektive sprickgrupp och Nr antalet slumpmässiga sprickor (Lindfors et al, 2003). J_v kan även beräknas genom att använda medellängden på en kub som avgränsas av tre huvudsprickgrupper, D :

$$J_v = 105 - \frac{10}{D} \quad (4.3 \text{ d})$$

$$D = \sqrt[3]{s_1 \times s_2 \times s_3} \quad (4.3 \text{ e})$$

I ekvation (4.3 e) är s_i sprickavstånd på huvudsprickgrupperna (US Department of Agriculture, 2001).

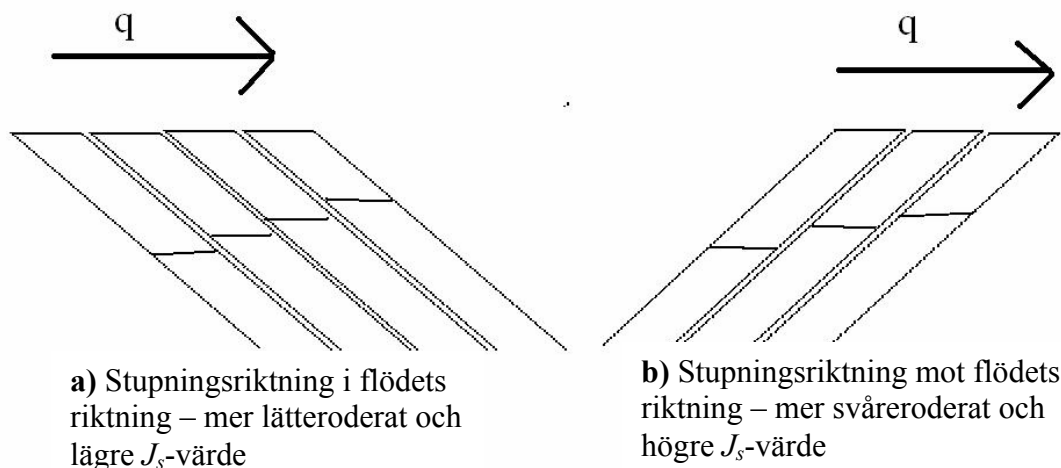
Sprickornas skjuvhållfasthet, K_d i ekvation (4.2), bestäms som:

$$K_d = \frac{J_r}{J_a}, \quad (4.4)$$

där J_r benämns sprickråhetstalet som beskriver sprickytans råhet och väljs enligt Tabell I.2 i Bilaga I. I ekvation (4.4) är J_a det så kallade sprickomvandlingstalet som ger ett

uttryck för hur omvandlad sprickytan eller sprickfyllningen är. Denna väljs enligt Tabell I.3 i Bilaga I (US Department of Agriculture, 2001).

Sprickriktningstalet, J_s i ekvation (4.2), är en parameter för hur huvudsprickorna, d v s blocken, ligger i förhållande till strömriktningen, se Figur 4.2. J_s bestäms enligt Tabell I.5 i Bilaga I.



Figur 4.2 Sprickriktning i förhållande till flödets riktning och hur J_s -värdet påverkas.

Erosionsindex baseras på ett grävbarhetsindex (Kirsten, 1982, 1988) som används för att karaktärisera bergmassan för bestämning av hur stor effekt som krävs för att gräva i ett material. Parametrarna som ingår i grävbarhetsindex är i princip samma som parametrarna i erosionsindex. Kirstens grävbarhetsindex är i sin tur en modifiering av Bartons Q -klassificeringssystem för bergets egenskaper. Q -systemet är ett vanligt använt klassificeringssystem för att karaktärisera bergmassa. Det utvecklades för dimensionering och bedömning av förstärkningsbehov i bergrum och tunnlar (Nordlund et al, 1998; Lindfors et al, 2003; Barton, 2002).

4.5.2 Vattnets erosionskraft

Vattnets erosionskraft uppskattas genom att beräkna energiförlusterna i vattnet vid överfall, hydrauliska språng eller vid ändring av lutning i kanalen. Eftersom det är mycket svårt att mäta tryckfluktuationer relateras de istället till energiförlusterna vid turbulens och på så sätt uppskattas fluktuationernas storlek. Relationen mellan energiförluster i vattnet vid olika värden på Froudes tal och tryckfluktuationernas relativa storlek har visats sig vara linjär (Annandale, 1994). Vid försök på hydrauliska språng där standardavvikelsen på tryckfluktuationerna och energiförlusterna vid olika värden på Froudes tal jämfördes, konstaterades att energiförlusten i vattnet ökade linjärt med ökad standardavvikelse på tryckvariationen i sprickorna (Firoto & Rinaldo, 1992). Standardavvikelsen av tryckfluktuationerna ger ett mått på tryckvariationens relativa storlek. Eftersom det är ett linjärt samband mellan energiförlust i vattnet och tryckfluktuation i sprickorna kan energiförlusterna i vattnet användas som ett mått på det fluktuerande tryckets storlek.

För att beräkna effekten som finns i det flödande vattnet multipliceras energiförlusterna [J], ΔE , med flödet per breddmeter [$\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$], q , samt med vattnets tunghet [N/m^3], γ , enligt:

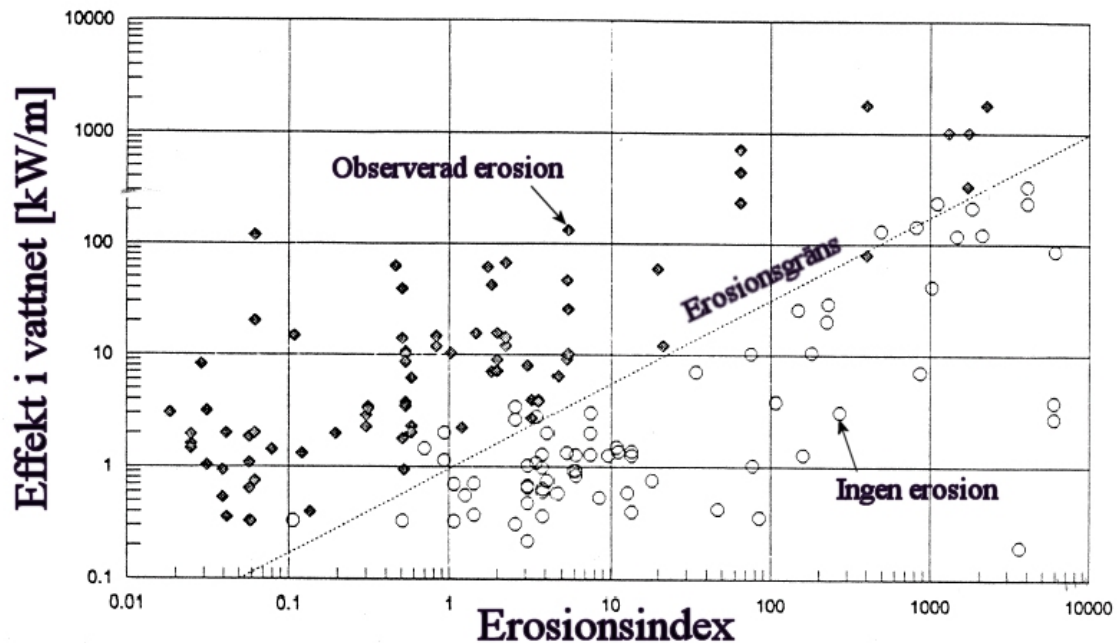
$$P = \gamma q \Delta E \quad (4.6)$$

Vattnets effekt beräknas alltså per breddmeter (Annandale, 1995).

Annandale (1995) har tagit fram ett antal ekvationer för att beräkna energiförlusterna vid olika flödesvillkor, bland annat vid hydrauliska språng, ändring av kanalens lutning och vid fallande flöden.

4.5.3 Erosionsgräns

Förhållandet mellan erosionsindex och den effekt på vattnet som krävs för att erosion ska inträffa kallas erosionsgräns. Denna bestämdes av Annandale (1995) genom 137 fältobservationer och databasvärden, där observationernas erosionsindex avsatts mot vattnets effekt på platsen och det noterats om erosion skett, se Figur 4.3.



Figur 4.3 Erosionsgräns med 137 observationer (Annandale, 1995).

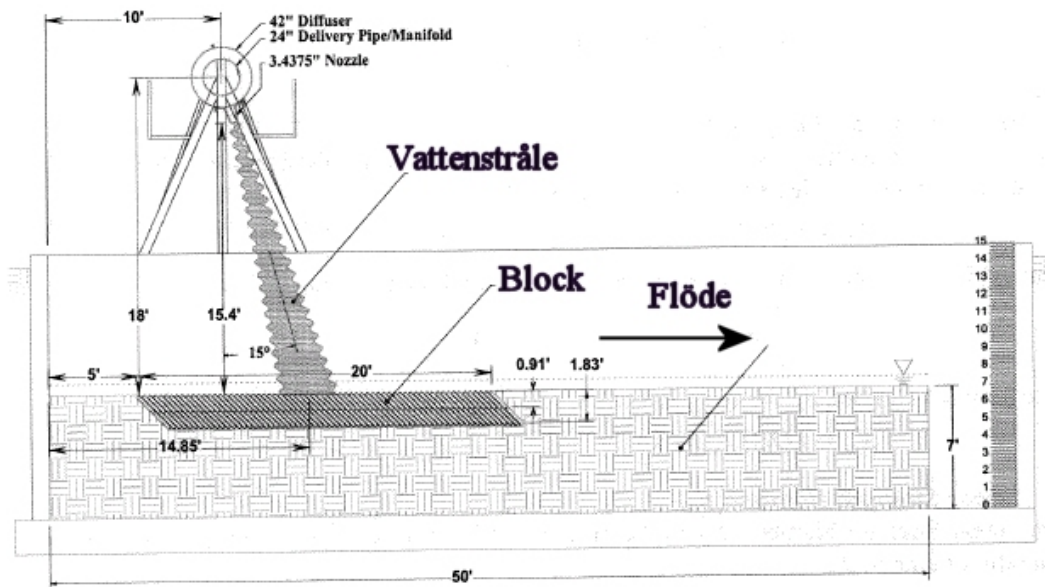
Dessa fältobservationer är gjorda i alla slags kanaler, från rena jordkanaler till kanaler i hårt berg. Erosionsgränsen, den räta linjen i Figur 4.3, bestämdes som (Annandale et al, 2004):

$$P = K_h^{0,75}, \quad (4.7)$$

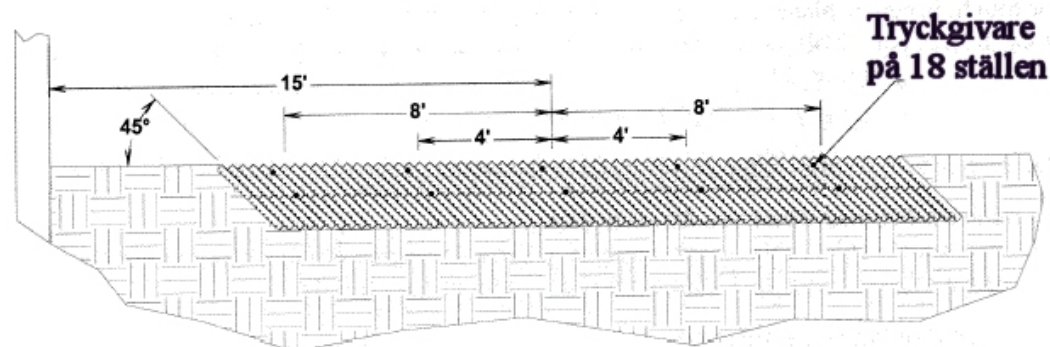
där erosionsindex är K_h , och vattnets beräknade effekt är P . Detta förhållande kan användas för att utreda vid vilket vattenflöde som erosion av bergmassan är trolig. Erosionsgränsen fungerar alltså för alla slags underlag och är den samma oavsett vilket material den undersökta kanalen består av.

Ett antal fallstudier i USA har utförts för att verifiera metoden. Bland annat har Barlett-dammen i Arizona undersökts. Det är en kanal som består av grov- och finkornig granit. Där verifierades metoden med hjälp av historiska erosionsfall i både den grov- och finkorniga graniten samt i betongväggen där ingen erosion skett. I denna kanal fungerade erosionsindexmetoden bra varför den sedan användes för att bestämma om erosion kan komma att ske vid maximal tappning i dagsläget (Annandale, 1994). Även vid Gibsondammen i Montana, USA, undersöktes samstämmigheten mellan förutspådd erosion genom erosionsindexmetoden och observerad erosion. Denna kanal består av kristallin kalksten och erosionsindexmetoden verifierades även här. På denna plats kunde metoden även förutspå betongdelarnas erosionsbenägenhet (Annandale et al, 2004).

Erosionsgränsen har också verifierats med modellförsök där en simulerad bergmassa av betongblock, lutande 45° mot flödesriktningen, utsattes för en infallande vattenstråle se Figur 4.4 a. Erosionsindex beräknades för den simulerade bergmassan och även vattnets effekt undersöktes. Försöket visade att erosionsgränsen för erosionsindex är applicerbart för en bergmassa då vattnet kommer som en infallande stråle från ett överfall (Annandale et al, 1998).



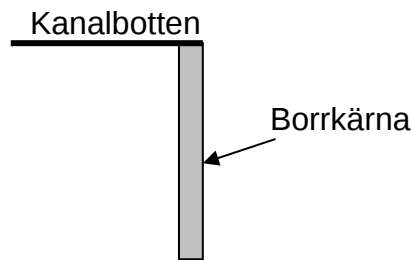
a) Hela försöksuppställningen.



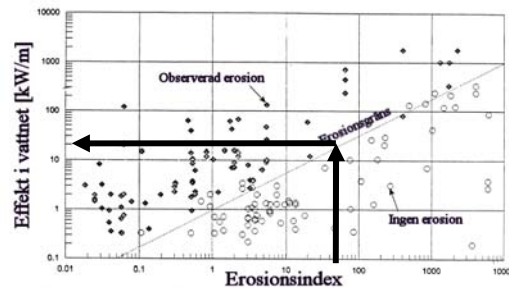
b) Blockens placering i försöksuppställningen.

Figur 4.4. Försöksuppställning för modellförsök då erosionsindexmetoden validerades. Måtten är angivna i tum (Annandale et al, 1998).

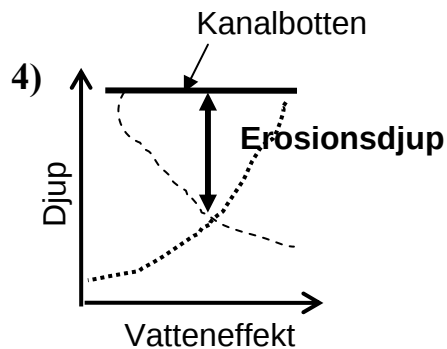
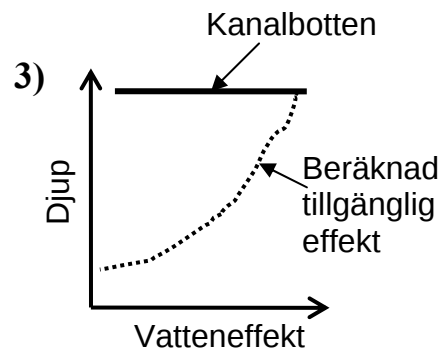
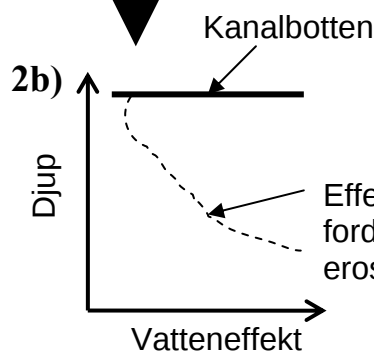
Erosionsindexmetoden kan även användas för att beräkna djupet på en eventuell erosion. Detta görs genom att bestämma erosionsindex på olika djup och samtidigt bestämma tillgänglig erosionskraft som funktion av djupet på flodbädden. Erosionsindex på olika djup kan fastläggas genom analys av borrhärdar ur kanalbotten. Därefter kan den effekt på vattnet som behövs för att erosion ska uppkomma på de olika djupen fastställas genom erosionsgränsen. Denna effekt ritas sedan som funktion av djupet under bottenytan. I samma graf ritas även den tillgängliga kraft som vattnet kan ge på olika djup. Det djup där den beräknade tillgängliga effekten i vattnet är samma som den effekt på vattnet som krävs för erosion är då det maximala erosionsdjupet. Tillvägagångssättet illustreras i Figur 4.5.



1) Genom att undersöka en borrkärna bestäms erosionsindex på olika djup av kanalbotten



2a & b) Erosionsgränsen används för att bestämma den effekt som fordras för erosion vid olika djup.



3) Tillgänglig effekt i vattnet vid olika djup beräknas.

4) Erosionsdjupet bestäms.

Figur 4.5 Exempel på hur erosionsdjupet kan bestämmas. Maximala erosionsdjupet är vid det djup där den vatteneffekt som krävs för erosion är lika stor som den vatteneffekt som är tillgänglig.

5 NUMERISK ANALYS AV EROSIONSPÅVERKANDE FAKTORER

För att undersöka hur sprickriktningar i en bergmassa påverkar erosionen har enkla numeriska modellanalyser av en bergprofil utförts. Den uppbyggda profilen i modellerna har givits egenskaper motsvarande typiskt svenskt sprickigt berg och inverkan av olika sprickriktningar samt sprickavstånd har undersökts. Datorprogrammet *UDEC*, *Universal Distinct Element Code*, har framgångsrikt nyttjats för dynamiska analyser av erosionen i utskovskanalen i Midskog (Billstein, 2003; Lorig, 2002), varför detta program även användes i denna studie. I studien gjordes endast statiska analyser av bergmassan för att undersöka inverkan av sprickriktningar.

5.1 NUMERISK METOD

UDEC, *Universal Distinct Element Code*, är som redan nämnts ett tvådimensionellt numeriskt datorprogram som baseras på finita differensmetoden för diskontinuerligt medium (Cundall, 1971). Både statiska och dynamiska analyser kan utföras i datorprogrammet på diskontinuerligt material, såsom sprucket berg. De diskreta blocken kan antingen göras stela eller deformerbara. Vid simulering av deformerbara block delas dessa in i så kallade finita differenselement (Itasca, 2004).

Beräkningarna i datorprogrammet utförs i två steg. Först utnyttjas ett kraft-förskjutnings förhållande verkande i alla kontaktytor, dvs i alla sprickor, och sedan utnyttjas Newtons 2:a lag verkande på blocken. Kraft-förskjutnings förhållandet används för att beräkna krafterns storlek i kontaktytorna som uppkommer vid förskjutning. Newtons 2:a lag, $F=ma$, används sedan för att beräkna rörelsen på blocken som uppkommer av krafterna i kontaktytorna. Används deformerbara block i modellen beräknas rörelsen i finita differenselement och spänningarna i blocken kan ändras. Vid varje tidssteg i beräkningarna får blocken nya positioner som i sin tur genererar nya krafter i kontaktytorna (Itasca, 2004).

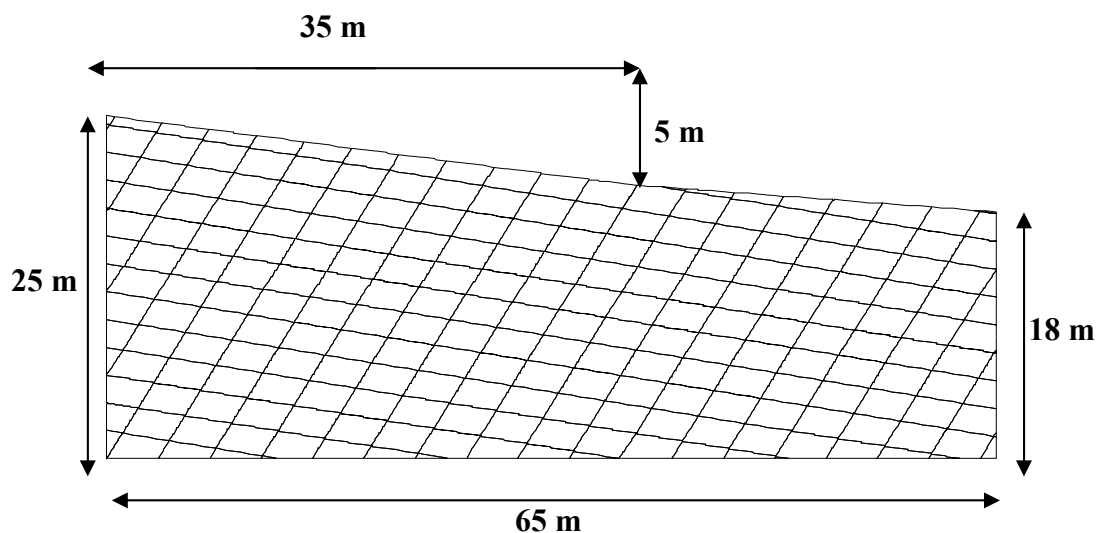
Olika material- och sprickegenskaper kan simuleras i *UDEC* vilket gör att en mängd skilda geologiska förhållanden kan simuleras. Det går även att simulera vattenflöde genom sprickor och håligheter i en modell. Flödet beskrivs då som lamminärt visköst flöde mellan två parallella plattor (Fox & McDonald, 1994). När ett vattenflöde simuleras i *UDEC* görs en mekanisk/hydraulisk kopplad analys, vilket innebär att konduktiviteten genom sprickorna beror av den mekaniska deformationen samtidigt som vattentrycket i sprickorna påverkar den mekaniska deformationen.

UDEC är ett tvådimensionellt program vilket innebär att analyserna som utförs i programmet måste förenklas till att vara tvådimensionella. En beskrivning av en tredimensionell bergmassa måste alltså generaliseras till två dimensioner. Det medför att alla sprickor och även block som beskrivs i programmet är oändligt långa vinkelrätt mot det plan som undersöks i *UDEC*. I verkligheten är blocken inte oändligt långa utan kan ha egenskaper i dessa kanter som t ex förhindrar eller underlättar rörelse.

5.2 NUMERISKA MODELLFÖRSÖK

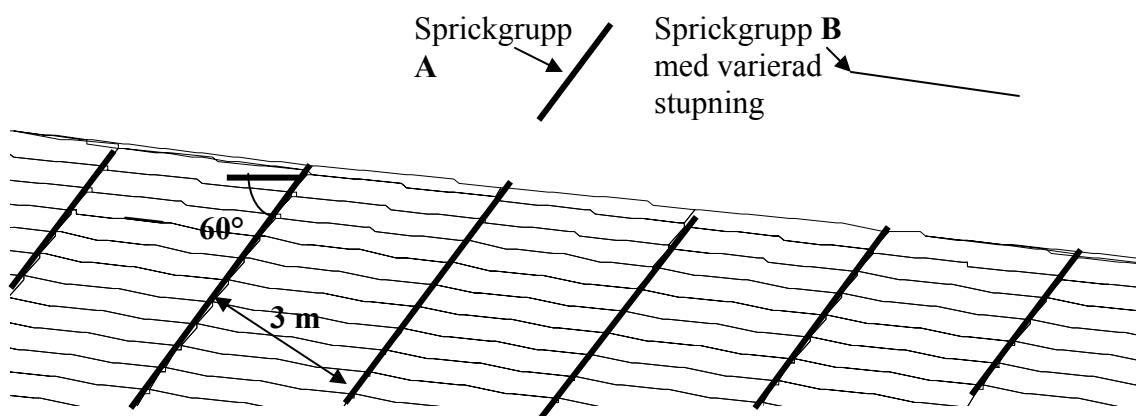
För att undersöka om erosionsmekanismerna kunde beskrivas med en statisk modell,

d v s en modell med endast statiska belastningar, konstruerades en sådan modell i UDEC. Profilen som undersöktes var 60 meter lång och 25 till 18 meter hög, se Figur 5.1.



Figur 5.1 Exempel på den undersökta profilens utseende.

Modellen gavs två sprickgrupper, en kallad A, med stupning på 60° och sprickavstånd 3 meter och en kallad B, med varierad stupning och tätare sprickavstånd, se Figur 5.2. På så sätt kunde inverkan av sprickplanens stupningsriktning på erosionsförloppet undersökas. Denna är intressant då sprickriktningen troligtvis har stor betydelse för hur omfattande erosionen kan bli i en kanal (enligt kapitel 2). Det är dessutom en parameter som är mycket enkel att mäta i fält.



Figur 5.2 De två sprickgrupperna som användes i analyserna.

Profilen tilldelades materialegenskaper motsvarande en hård och sprickig bergmassa (t ex granitisk). Värdena på bergegenskaperna framgår av Tabell 5.1. Skjuv- och normalstyvheter för sprickorna uppskattades baserat på erfarenhet (Sjöberg, 2004). Sprickvidden antogs att initialt vara 5 mm och permeabiliteten uppskattades till $81,3 \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1}$ efter jämförelse med andra beräkningsförsök i *UDEC* (Itasca, 2004; Lorig, 2002).

Tabell 5.1 Materialegenskaper för den undersökta modellen.

Bergegenskaper	Värde
Bulkmodul	40 GPa
Skjuvmodul	24 GPa
Densitet	2700 kg/m ³
Sprickegenskaper	Värde
Skjuvstyvhet	10 GPa/m
Normalstyvhet	10 GPa/m
Friktionsvinkel	30°
Draghållfasthet	0 Pa
Permeabilitet	81,3 Pa ⁻¹ s ⁻¹
Initial öppning	5 mm
Residual öppning	0,5 mm
Kohesion	0 kPa

Det primära spänningstillståndet i profilen antogs motsvara typiskt spänningstillstånd för Skandinavien (Nordlund et al., 1998). Detta allmänna approximativa spänningstillstånd beskrivs enligt:

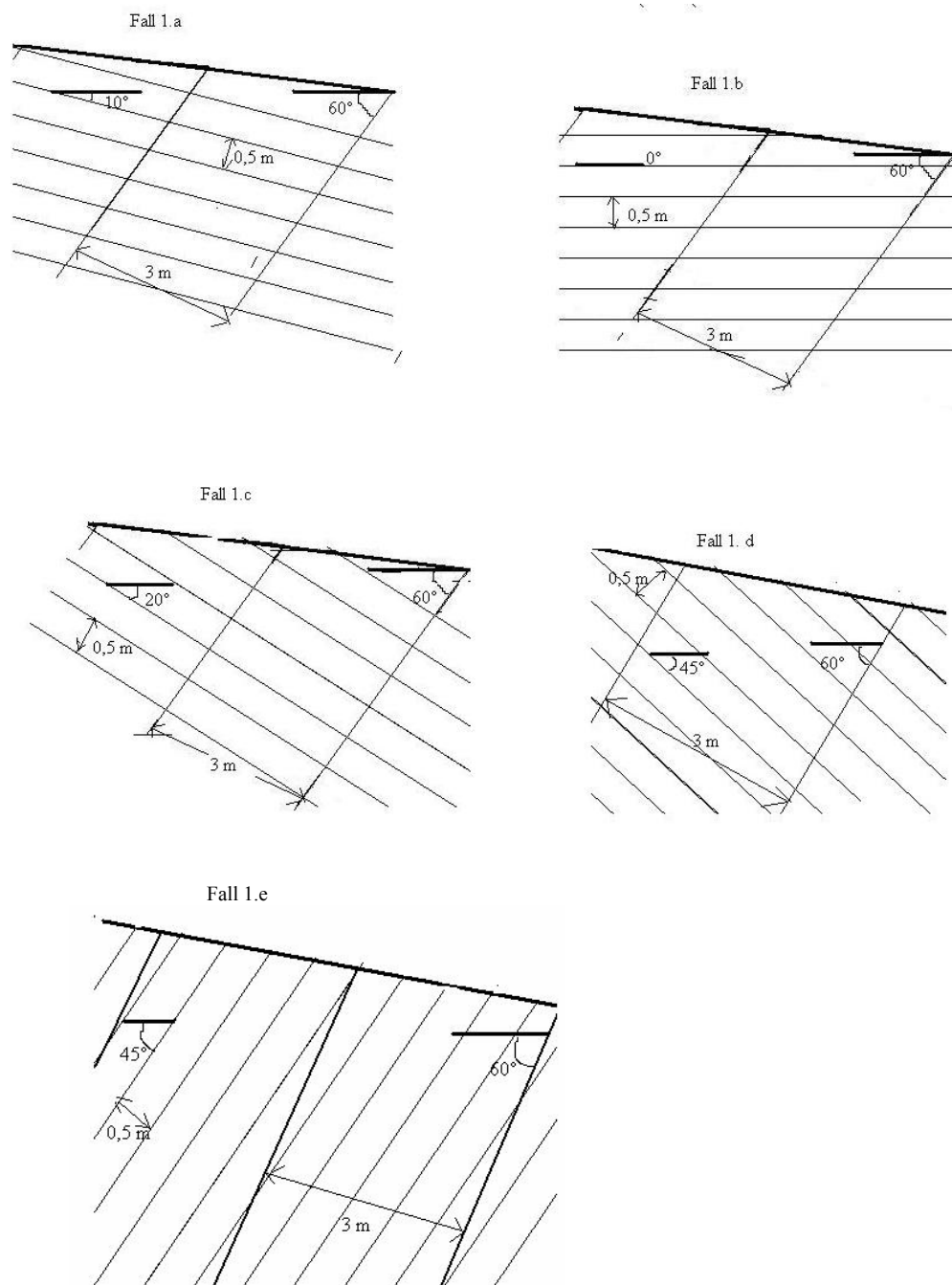
$$\sigma_v = \rho g z \quad (6.1)$$

$$\sigma_H = 2.8 + 0.04z \text{ [MPa]} \quad (6.2)$$

$$\sigma_h = 2.2 + 0.024z \text{ [MPa]} \quad (6.3)$$

Den vertikala spänningen [Pa] betecknas σ_v och de horisontella spänningarna betecknas σ_h och σ_H . De horisontella primärspänningarna har olika riktning. Djupet under markytan [m] benämns som z , ρ är bergets densitet [kg/m³], och g är tyngdaccelerationen [m/s²]. En kanal går i regel genom en dal där de horisontella primärspänningarna är flera gånger större än de vertikala (Nordlund et al, 1998). För att vid simuleringarna försöka likna tillståndet i en svensk kanal användes därför den största horisontella primärspänningen, σ_H , som modellens horisontella primärspänning riktad längs profilen och σ_v som den vertikala.

För att undersöka vattens påverkan på profilen sattes en vattenyta över hela profilen. Djupet på vattnet varierades mellan 0 och 5 m och flödet antogs vara stabilt. De olika sprickgruppskombinationerna som undersöktes visas i Figur 5.3.



Figur 5.3 De olika kombinationer på sprickgruppsriktningar som undersöktes.

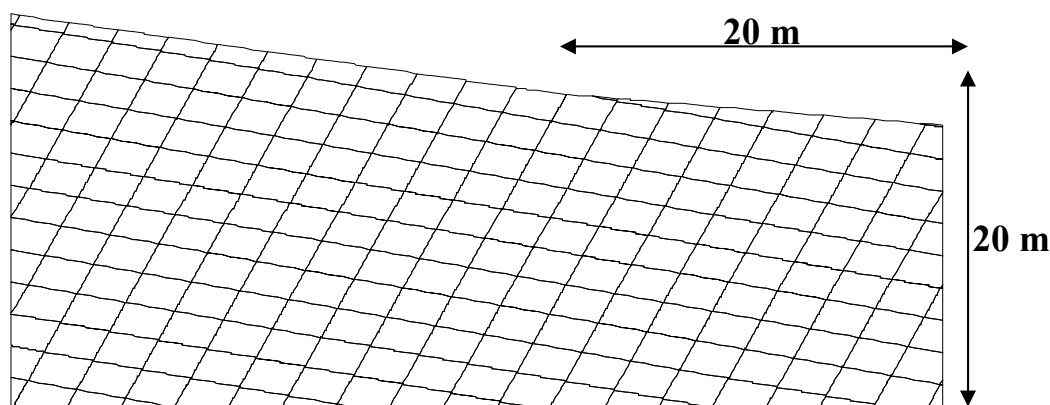
De olika fallen i Figur 5.3 exponerades för vattendjup mellan 0-5 m, enligt Tabell 5.2, under lika lång simuleringstid. Simuleringstiden är en fiktiv tid för vilken programmet utför beräkningarna. Därefter undersöktes förskjutningen av blocken och sprickornas separation kontrollerades.

Tabell 5.2 Beräkningsfallen vid analys då vattenytan varierades.

Analys 1	Vattendjup (m)					
Profil enligt Figur 5.3						
Fall 1.a	0	1	2	3	4	5
Fall 1.b	0	1	2	3	4	5
Fall 1.c	0	1	2	3	4	5
Fall 1.d	0	1	2	3	4	5
Fall 1.e	0	1	2	3	4	5

Då de första resultaten studerades framgick att storleken på blocken i ytan av profilerna varierade stort. Detta medförde att den maximala förskjutningen varierade med storleken på dessa kantblock. För att minimera inverkan av dessa mindre block togs block som var mindre än $1,4 \text{ m}^3$ bort i de fortsatta analyserna.

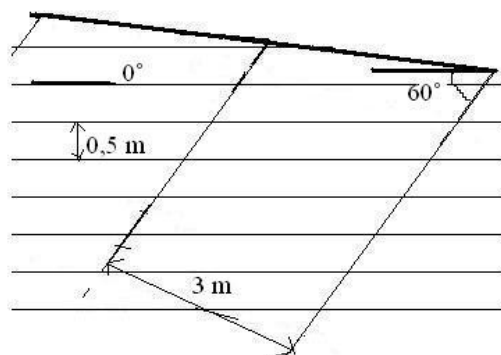
Det som kan hända då en kanal utsätts för snabbt flödande vatten är att trycket ökar i sprickorna. I de sista beräkningsfallen undersöktes därför hur ett ökat tryck i sprickorna i en del av profilen påverkade blocken. Vattendjupet hölls konstant på 5 meter över hela profilen medan trycket varierades i den högra delen av profilen på ett 20 meter brett och 20 meter högt område, se Figur 5.4.



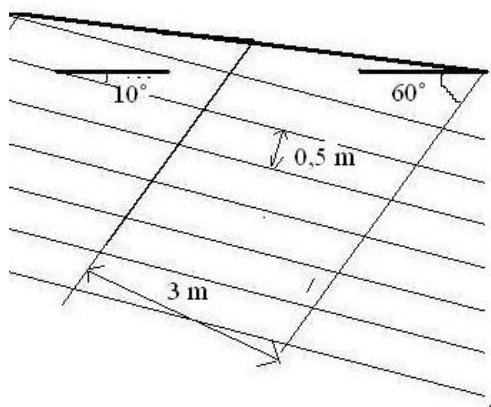
Figur 5.4 Ett exempel på försöksprofilen, med det område där trycket ökades markerad.

Trycket ökades med motsvarande 1 till 10 mVp (meter vattenpelare) och responsen undersöktes för olika stupning på sprickgrupp B, enligt Tabell 5.3. De sprickgruppskombinationer som undersöktes här visas i Figur 5.5. En dubblering av sprickavstånden på sprickgrupp B provades även för två av fallen, 2b och 2c.

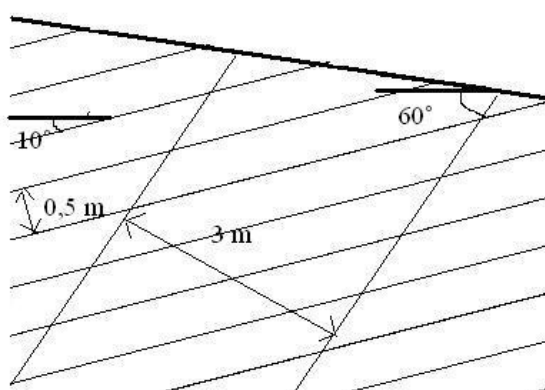
Fall 2.a



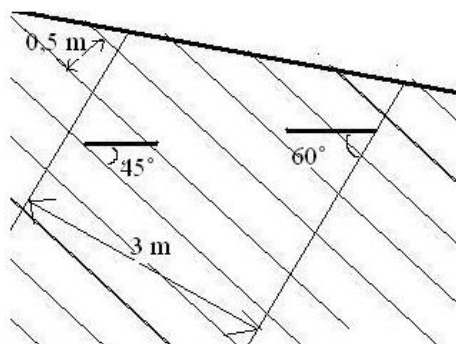
Fall 2.b



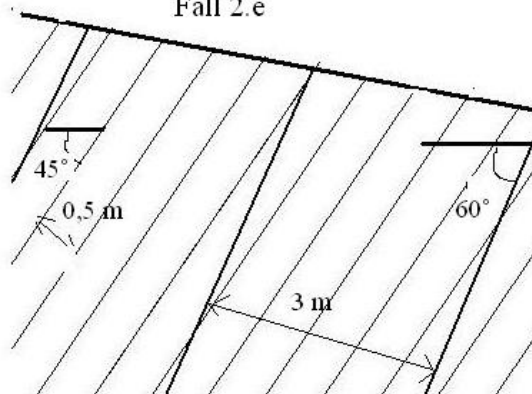
Fall 2.c



Fall 2.d



Fall 2.e



Figur 5.5 De olika sprickgruppskombinationer som undersöktes vid simulering av höjt tryck i sprickorna.

Tabell 5.3 Beräkningsfallen vid analys då trycket höjdes i sprickorna i en del av profilen.

Analys 3	Vattendjup (m)	Tryckhöjning i området enligt Figur 5.4 (mVp)
Profil enligt Figur 5.5		
Fall 2.a	5	1
Fall 2.b	5	1, 2, 5 och 10
Fall 2.b med dubbelt =1 m sprickavstånd (sprickgrupp B)	5	1 och 2
Fall 2.b	0	1 och 2
Fall 2.c	0	1 och 2
Fall 2.c med dubbelt =1 m sprickavstånd (sprickgrupp B)	0	1 och 2
Fall 2.c	5	1, 2, 5 och 10
Fall 2.d	5	1
Fall 2.e	5	1

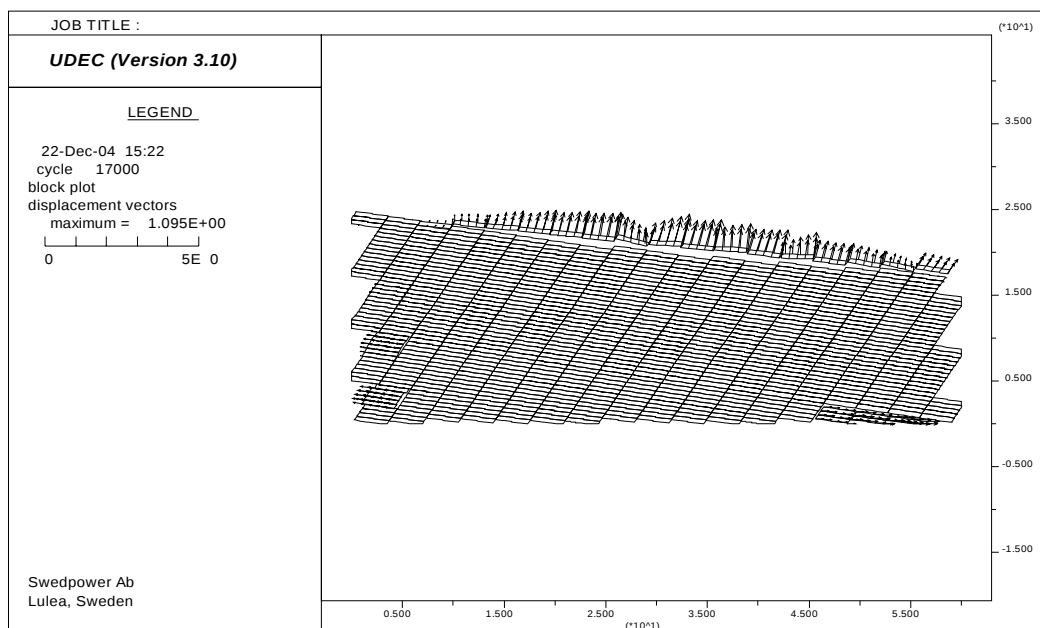
5.3 RESULTAT AV DE NUMERISKA MODELLFÖRSÖKEN

I resultatet från de numeriska försöken är inte de enskilda värdena intressanta. Det som har studerats är istället förhållandet mellan resultaten från de olika beräkningsfallen. Modellen kan inte anses ge några tillförlitliga absoluta värden eftersom den är generell och inte kalibrerad mot några fältobservationer. De resultat som däremot kan utvärderas är parametrarnas relativa förhållande till varandra.

5.3.1 Inverkan av vattendjup

I den första analysen då vattendjupet varierades mellan de olika beräkningsfallen sågs en tydlig påverkan av vattnet på blocken. De övre blocken lyfte efter en tids exponering av vatten. Ett exempel på detta visas i Figur 5.6 där profilen i Fall 1.a simulerats och utsatts för 5 meter djupt vatten.

Sambandet mellan vattnets djup och blockens förskjutning i alla beräkningsfall visade sig vara närmast linjärt, se Figur 5.7. Detta beror troligen på att ett större djup på vattnet ger högt tryck i sprickorna som i sin tur ger lägre skjuvhållfasthet för sprickplanen. Beräkningsfallet där sprickgrupp B stupar 45°, Fall 1.e, påverkas inte nämnvärt av vattnet. Anledningen till detta är troligtvis att blocken som avgränsas av sprickplanen blir stora i detta fall. Då denna profil utsätts för 5 meter djupt vatten blir förskjutningen 150 ggr mindre än då en profil med mindre stupning av sprickgrupp B, t ex Fall 1.a, utsätts för samma vattendjup. Denna stora skillnad beror troligtvis på att blockstorleken för de olika fallen skiljer sig mycket åt. Resultatet för beräkningsfall 1.e är därför utelämnat i Figur 5.7.



Figur 5.6 Förskjutning av block i en simulering i *UDEC* då Fall 1.a utsatts för 5 meter djupt vatten.

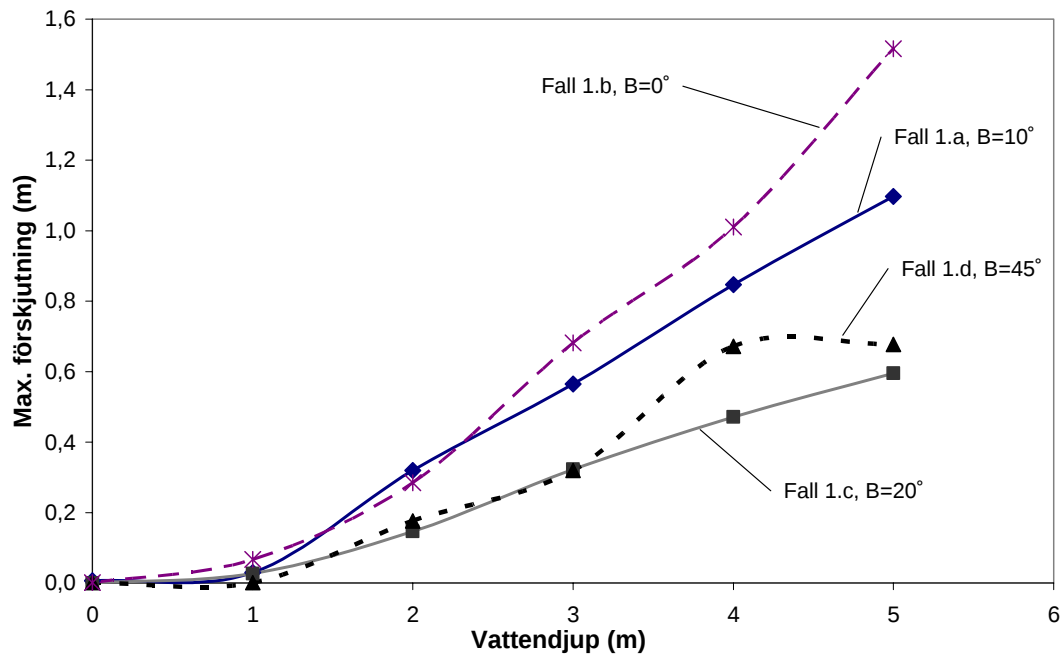
Vid vattendjup större än 2 meter och 20° stupning eller mindre, alltså i Fall 1.a-c, kommer systemet inte till jämvikt vilket innebär att blocken inte ligger stilla under de rådande förhållandena. Ett exempel på detta visas i Figur 5.8 där profil 1.b exponeras för 4 meter djupt vatten och blocken rör sig både uppåt och nedåt vilket syns på hastighetsvektorena. Detta är intressant då blocken ändå är relativt stora och inte utsätts för något flödande vatten. Det innebär att profiler med dessa förutsättningar som i verkligheten skulle utsättas för ett 2 meter djupt forsande vattenflöde troligtvis skulle erodera. Detta eftersom belastningen på bergmassan blir betydligt större då vatten forsar över den.

De beräkningsfall där en tryckökning skedde i en del av sprickorna påverkades även av vattendjupet. Då trycket ökades med 1-2 mVp i sprickorna på en del av profilen kunde endast en viss påverkan ses då vattendjupet var 5 m. Blocken försköts inte synligt mer då 1 mVp tryck lades i sprickorna än den förskjutning som skedde beroende av det 5 m djupa vattnet, jämför Figur 5.6 och Figur 5.9.

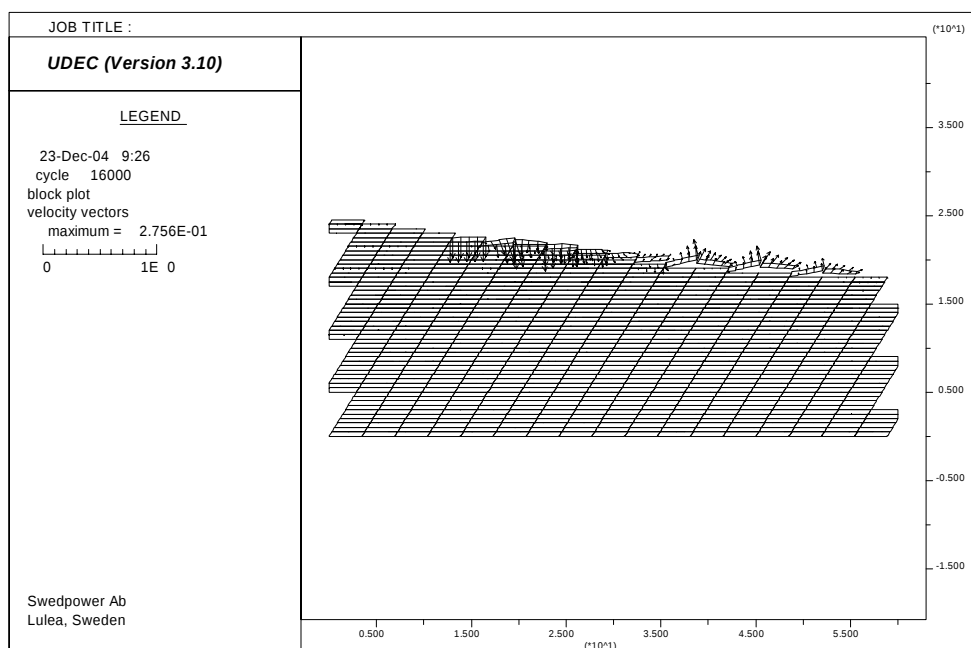
En tryckökning på både 5 och 10 mVp i sprickorna påverkar däremot blocken. Trots det 5 meter djupa vattnet lyfter blocken direkt, se ett exempel i Figur 5.10. De block som lyfts uppåt är dessutom på väg ännu högre upp då de har uppåtriktade hastighetsvektorer.

Då profilerna inte utsattes för något vattendjup utan endast en tryckökning på 1 mVp i den högra delen påverkades inte blocken nämnvärt. En ökning av trycket till 2 mVp gav

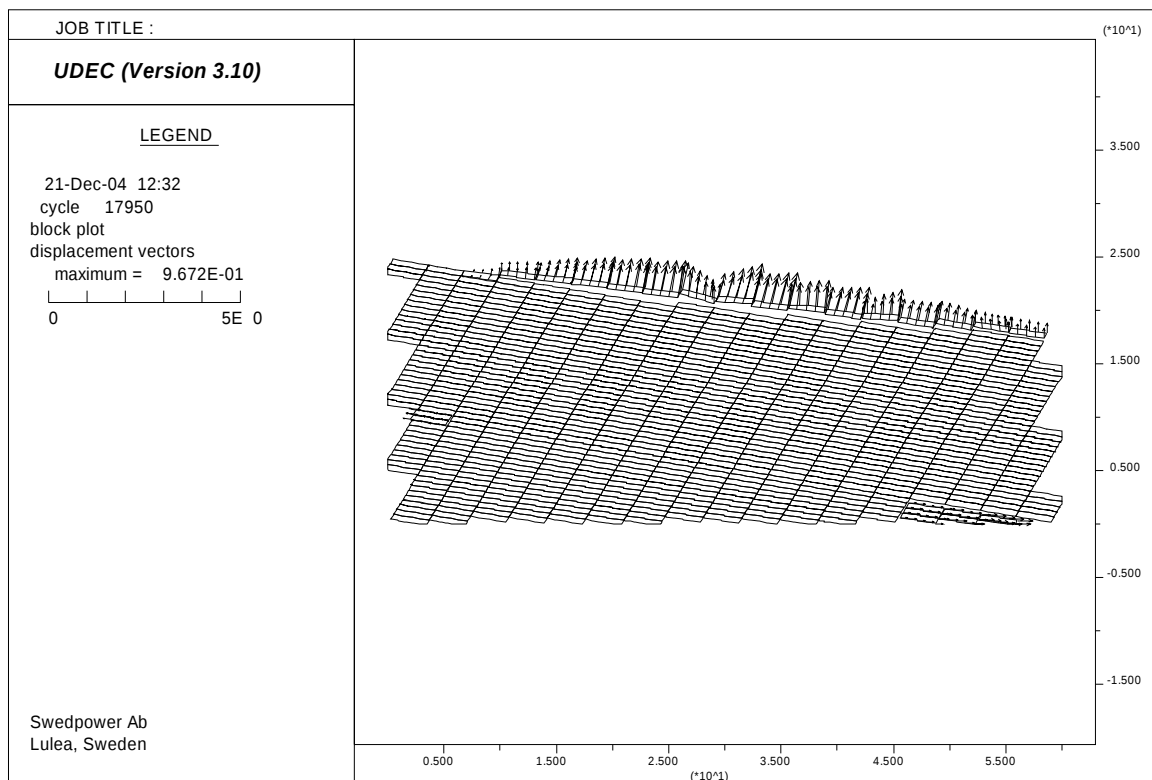
en mycket liten förskjutning av de ytliga blocken till höger. Detta påvisar att det snarare är vattendjupet som påverkar blocken då profilerna utsätts för små tryckökningar.



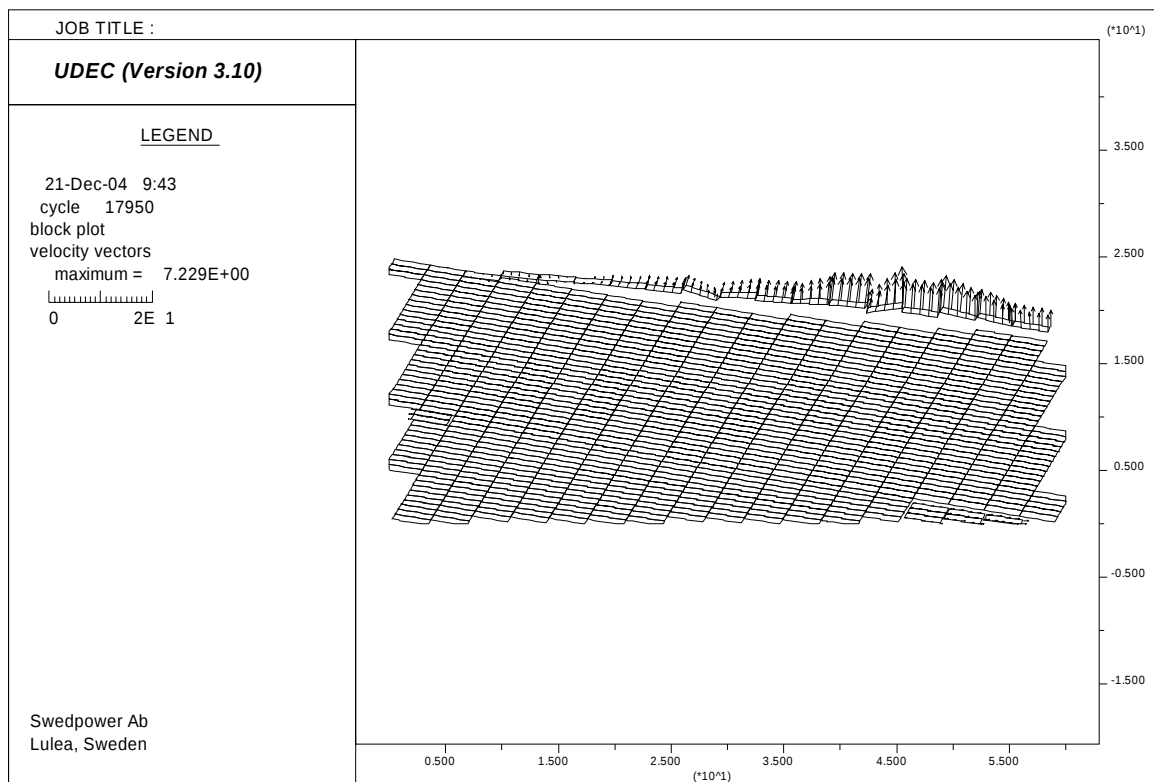
Figur 5.7 Beräknad maximal förskjutning av block då försöksprofilerna utsätts för olika vattendjup.



Figur 5.8 Hastighetsvektorer för blocken i Fall 1.b efter exponering av 4 m djupt vatten.



Figur 5.9 Sprickgruppskombinationen i Fall 2.b som utsätts för 5 m djupt vatten samt 1 mVp tryckhöjning i en del av profilen.

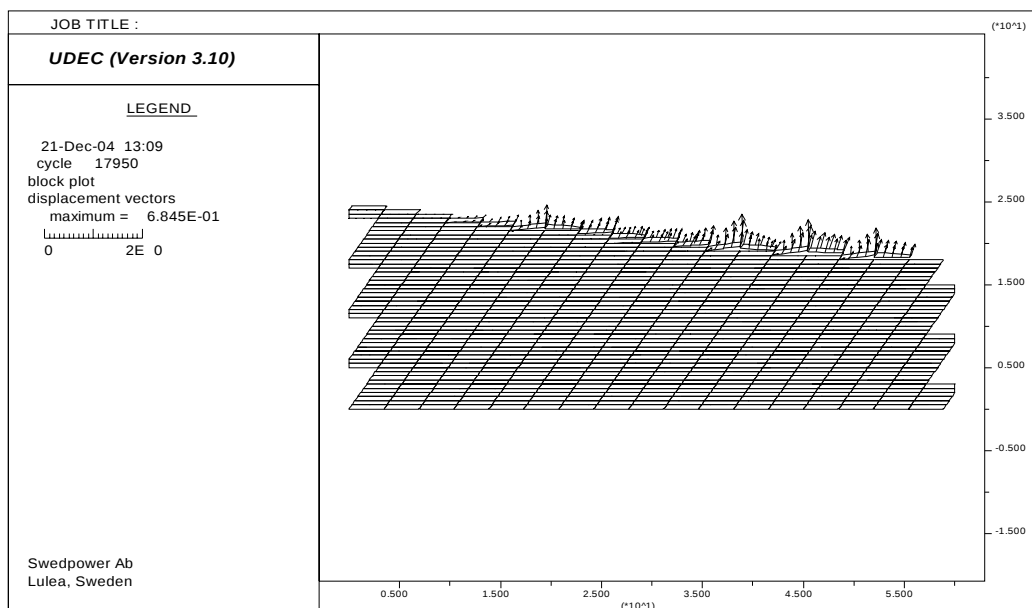


Figur 5.10 Fall 2.b med 5 m djupt vatten som har ett 5 mVp högre tryck i sprickorna i högra delen. Pilarna i figuren är hastighetsvektorer.

5.3.2 Stupningens inverkan

Stupningen på sprickgrupp B inverkar på hur stor påverkan vattnet ger på blocken. Mindre stupning på sprickgruppen ger större vattenpåverkan på blocken med undantag för Fall 1.d, se Figur 5.7. För det fall då sprickgrupp B är horisontell, Fall 1.b, blir blocken som avgränsas av sprickytorna större än i de övriga fallen, men förskjutningen blir ändå störst för detta fall. Detta påvisar att det inte bara är blockstorleken som är den avgörande faktorn för hur stor förskjutningen blir då en bergprofil utsätts för vatten.

Då trycket ökas med 1 mVp i en del av sprickorna i den profil som har en horisontell sprickgrupp lyfter blocken lite trots att profilen även utsätts för 5 meter djupt vatten, se Figur 5.11. Liten stupning av en sprickgrupp ger alltså större påverkan på blocken vid en tryckökning i sprickorna. Det är dessutom relativt stor skillnad mellan hur mycket den profil med en horisontell sprickgrupp påverkas jämfört med en profil med 10° stupning på en sprickgrupp. Profilen med en sprickgrupp med 10° stupning som utsätts för samma vattendjup måste ha en fem gånger större tryckökning innan någon tydlig påverkan sker på blocken. Det verkar även vara skillnad på hur känslig profilen är för tryckökningar beroende av i vilken riktning sprickgrupp B stupar. Då sprickgrupp B stupar 10° i motsatt riktning, Fall 2.c, är profilen mer känslig för tryckökningar än då sprickgrupp B stupar i andra riktningen, Fall 2.b.



Figur 5.11 Förskjutning av block då Fall 2.a exponeras för 5 m djupt vatten samt en tryckökning i sprickorna i högra delen av profilen.

Ett dubblerat sprickavstånd på sprickgrupp B gav för alla undersökta fall en mindre påverkan på blocken av både vattendjup och tryckökning. Störst skillnad i förskjutning var det då Fall 2.c gavs dubbelt sprickavstånd. Förskjutningen halverades då den profilen gavs samma tryckhöjning i sprickorna.

Sammanfattningsvis kan påpekas att blocken helt klart påverkas av vattendjupet och det tryck som vatten kan ge i sprickorna. Den avgörande faktorn som inverkar på hur stor förskjutning som sker av denna påverkan är blockstorleken. Men vid dessa statiska undersökningar har det visats sig att även riktning på sprickorna påverkar förskjutningen. Liten stupning av en sprickgrupp ger en större påverkan av vattendjupet på profilen. Detta verkar även gälla för då trycket ökas i sprickorna på ett område i profilen. En tryckökning i en profil där en sprickgrupp har liten lutning ger större påverkan på blocken än i en profil med större lutning på sprickgrupperna. Formen på blocken verkar också ha betydelse för hur känslig profilen är för tryckändringar i sprickor. Det framgår vid jämförelse av profilerna då sprickgrupp B stupar 10° . Den profil som har samma stupningsriktning på båda sina sprickgrupper påverkas mer av en tryckökning än den profil som har motsatt stupningsriktning på sina två sprickgrupper.

6 FÄLTUNDERSÖKNING

Den fältundersökning som genomfördes inom ramen för detta examensarbete syftade främst till att dokumentera utskovskanalerna vid några utvalda vattenkraftverk längs Luleälv. Vid undersökningen skulle även eventuella befintliga erosionsskador i de utvalda kanalerna om möjligt fastläggas. Fältundersökningen avsåg även att inhämta tillräcklig information om kanalerna så att erosionsindexmetoden skulle kunna appliceras på dem.

6.1 DOKUMENTERINGSMETOD

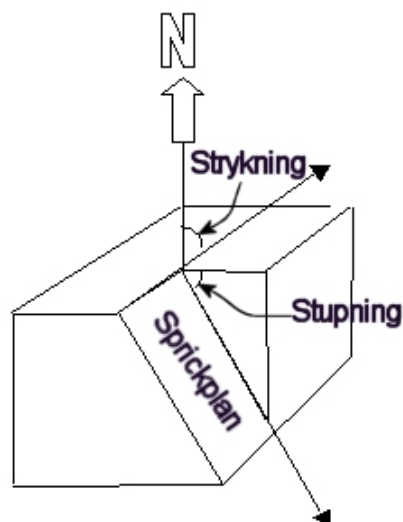
De kanaler som ingick i fältundersökningen ligger alla längs Luleälv. Det var utskovskanalerna i Porjus, Harsprånget, Ligga, Satisjaure och Seitevåre som besöktes och karterades, se Figur 6.1.



Figur 6.1 Karta över Luleälven med de besökta utskovskanalerna markerade.

Fältundersökningen skedde under september 2004 och varje kanal dokumenterades med fotografier och en kartering av bergmassan. Skador och lösa block noterades speciellt och fotograferades.

Vid karteringen bestämdes strykning, stupning och sprickavstånd för spricksystemen i kanalerna. Alla riktningar har uppmätts enligt den så kallade högerregeln, se Figur 6.2.



Figur 6.2 Definition av strykning och stupning.

Sprickornas egenskaper bedömdes genom att känna och titta på de synliga sprickytorna. Sprickornas råhet och omvandlingstal, d v s vittringsgrad, kunde då fastställas enligt Tabell I.2 och I.3 i Bilaga I. Eventuell sprickfyllnad antecknades med tjocklek och material.

Bergmassans hållfasthet bedömdes genom att slå på berget med hammare enligt Tabell I.4 i Bilaga I och sprickgruppstalen bestämdes genom att uppskatta antalet huvudsprickgrupper och läsa av Tabell I.1 i Bilaga I. Där det var möjligt uppskattades *RQD* för olika delsträckor av kanalen. En 3–5 m lång linje som var representativ för delsträckan valdes ut där en tänkt borrhärd mättes. Alla sträckor över 10 cm summerades och delades med den totala linjelängden. Bergart bestämdes okulärt på plats och eventuella erosionsskador på bergmassan antecknades.

Huvudsprickriktningar i kanalerna togs fram med hjälp av datorprogrammet *DIPS* (Rocscience, 2004) i vilket sprickriktningarna ritades i form av sfäriska projektioner.

Dokumenteringen av kanalerna skedde med en digitalkamera där alla delar av övre delen av kanalerna fotograferades samtidigt som kartering utfördes. Platserna där fotografierna togs markerades på ritning över kanalen. Lösa block i kanalerna markerades också på ritning samt mättes och fotograferades. För att undersöka hur omfattande erosionen varit jämfördes dessa fotografier med gamla fotografier från bl a Dammarkivet, rapporter från provtappningar och besiktningsprotokoll. Det har skett en mycket liten dokumentering av utskovskanalerna tidigare och därför har endast fotografier från 1980 och framåt hittats. Från Seitevare och Satisjaures kanaler har inte några äldre fotografier än från år 1998 respektive 2000 påträffats.

6.2 PLATSOBSERVATIONER

6.2.1 Satisjaure

Satisjaure kraftstation ligger högt upp i Stora Luleälven och har Sveriges femte största vattenmagasin (Svensk Energi, 2001). Dess utskovskanal har vertikala kanter och är utsprängd i berg av fältspatsandssten. Berget är sockerbitsblockigt på många ställen i kanalen, framförallt 290 m nedströms från utskoven. Under hösten 2004 har åtgärder utförts för att minska vattnets belastning på berget. En strålllyftare har byggts och en ”energiomvandlargrop” har sprängts ut nedströms. Botten där vattnet från strålllyftaren kommer att landa har förstärkts med en fastbultad betongplatta. Kanalen har även breddats och sprängts 10-20 m djup och väggarna har förstärkts med sprutbetong.

En kartskiss över huvudsprickgrupperna finns i Bilaga II. Tvärs över kanalen går ett antal sprickgrupper/skjuvzoner med stupning 60-90°. Över väggarna går också subhorisontella sprickplan med något varierande strykning. Sprickavståndet är på många ställen mycket litet, se Figur 6.3. Den vänstra väggens sprickighet är troligen orsakad av veckning av bergmassan (Söder, 2003).



Figur 6.3 Vänstervägg i Satisjaures utskovskanal. De täta sprickavstånden ses tydligt.

På kanalens högra sida, samt 300 meter nedströms på vänstra sidan, finns en sprickgrupp med riktning 10-20/90. Denna sprickgrupp har sprickavståndet 0,05-0,5 m. Ungefär 290 meter nedströms i kanalen går en 5 meter bred krosszon som syns både på vänster kanalvägg och på energiomvandlargropens bakkant. I krosszonen är berget sockerbitsblockigt.

Kanalens bergmassa kan delas upp i tre olika typer, se Figur II.1 i Bilaga II:

- a) Område med lodräta skjuvzoner med litet sprickavstånd och subhorisontella sprickplan som huvudsprickgrupper. Dessa bildar en relativt småblockig struktur i berget.
- b) Område där huvudsprickgrupperna är de lodräta skjuvzonerna men också en lodrät stupande sprickgrupp vars riktning skiljer ca 60 grader från skjuvsprickorna. Detta ger lite större rombiska block
- c) Småblockigt område med blockstorlek kring 0,008 m³.

Fotografierna som togs över kanalen finns beskriva i Bilaga III.

Erosionen av berget i kanalen har enligt rapporter varit omfattande och före ombyggnationen uppkom erosion i regel vid tappning (Söder, 2003). Kanalen svämmade då också över vid tappning. Ombyggnationen under hösten 2004 har ändrat kanalens utseende och därför kan inte erosionens omfattning bedömas eftersom gamla fotografier inte kan jämföras med de nya. Det är svårt att säga var erosionen varit kraftigast och hur den gått till. Bergmassan är i tunna skivor i stor del av kanalen och på vissa ställen, t ex 290 m nedströmsutskovet, mycket småblockig. Detta tillsammans med de lodräta kanalkanterna gör berget känsligt för belastning. Block kan lätt brytas loss varpå även övre lager blir instabila. Erosionsmekanismen här var alltså gissningsvis framförallt urspolning av svagare lager. De ombyggnationer och förstärkningar som gjorts ska göra att belastningen på berget minimeras så att kanalen fortsättningsvis tål det dimensionerade flödet.

6.2.2 Harsprånget

Harsprångets kraftstation ligger i Stora Luleälv 3 mil norr om Jokkmokk och är en av världens största vattenkraftstationer (Vattenfall, 2002). Utskovskanalen är bred och flack. Botten och stranden utgörs av berghällar av rosa granit som är uppsprucken i bankningsplan. Kanalen är nedsprängd någon meter på vänstra sidan och detta tillsammans med ledmurar styr vattnet i en vid vänsterkurva ned till gamla älvfåran. Kanalens flackhet och bergytans utseende ger stora ytfluktuationer, vågor, vid spill. Under hösten 2004 pågick arbete för att framförallt göra kanalen djupare för att kunna avbörda mer vatten.

Den karta över huvudsprickgrupperna som erhöles av karteringen redovisas i Bilaga IV. Över hela kanalen går subhorisontella bankningssprickor som förtätas mot vänstra kanten. Stupningen på bankningssprickorna är mellan 15-30 grader snett nedströms, se Figur 6.4. Skivorna bildar trappsteg upp mot högra kanten. Sprickavståndet minskar mot vänstra kanten och de 1-5 decimetertjocka skivorna går in under vänstra ledmuren.

Utspridd över hela övre delen av kanalen går en skjuv- och sprickgrupp med stupning kring 75 grader, som stryker lite snett i flödesriktningen. Mellan 40 och 60 meter från utskovsluckorna dominerar en sprickgrupp med stupning 50° som går tvärs över kanalen. I detta område bildas väl avgränsade block. Mellan 100 och 150 meter nedströms utskoven blir kanalen helt utan sprickor men längre ned i kanalen återkommer sprickigheten. Kanalen börjar då luta något mer och bankningssprickornas stupning avtar.



Figur 6.4 Nedströms utskoven i Harsprånget. De markerade subhorisontella sprickorna blir tätare mot vänstra kanten.

Det finns många lösa block i kanalen varav flertalet är stora, kring 30 m^3 . I övre delen av kanalen är det mer block på högra sidan. Dessa block har storleken $10\text{-}15 \text{ m}^3$. Längre ned i kanalen, ca 100-200 meter, återfinns flest block på vänstra sidan, i storlek mellan $1\text{-}30 \text{ m}^3$. På vänstersidan av övre delen av kanalen finns erosionshål där det tydligt syns att stora hela block flyttats.

Direkt efter utskoven är berghällarna högre än skiborden, se Figur 6.5, vilket torde innebära ett kraftigt hydrauliskt språng just där. Bergmassan består där av 0,5 m tjocka skivor genomkorsad av ett antal skjuvsprickor som delar dem i rombiska block.



Figur 6.5 Nedströms utskoven är bergmassan högre än skiborden.

Kanalen kan delas in i tre områden med ungefär samma bergkaraktär, se Figur IV.1 i Bilaga IV:

- a) Relativt tunna block där tre huvudsprickriktningar skapar tunna rombiska block.
- b) Inga eller tjocka bankningssprickor.
- c) Rombiska tjockare block skapade av undulerande bankningssprickor.

Fotografierna som togs över kanalen finns beskrivna i Bilaga V.

För att undersöka omfattningen av erosionen i kanalen har gamla fotografier jämförts med nyare. Då fotografier från 1994 jämförs med fotografier från provtappningen 1997 kan inga större erosionsskador upptäckas. Det är inte heller möjligt att upptäcka några betydande erosionsskador mellan 1994 och idag. Dock finns många spår av erosion i form av lösa block, kring 15-20 m³ stora, samt urgröpningar i kanalen. I rapporten från provtappningen 1997 (Vattenfall Hydropower AB, 1997) uppges erosion ha skett i spillfåran vid provspillet och att blocken har lagrats vid höger strand och inne i skogen på höger sida. Det ansamlades även block på vänster sida vid båda ledmurarnas slut.

Erosionen sker troligtvis huvudsakligen i början av kanalen. Där är bergmassan mycket tunnskivig och kanalbotten lutar inget här. Detta medför ett kraftigt hydrauliskt språng som i sin tur skapar stor turbulens. Vid spill bildas stora vågor av kanalens plana start.

Den tunna skivigheten och de stora vågfluktuationerna som uppkommer under spill ger goda förutsättningar för blockerosion. Erosionsmekanismen är då upplyftning av block, jämför t ex Figur 2.2. Men då skivigheten varierar mycket kan även urspolning ske av ett tunnare undre lager vilket kan resultera i att större ovanliggande block bryts loss.

6.2.3 Ligga

Ligga kraftstation ligger någon mil nedströms från Harsprånget. Kanalen är flack, relativt bred och utsprängd i mitten. Den består till största del av rosasvart grovkornig granit, men genom kanalen går även ett par mörkgröna diabasgångar, 2-6 dm breda. En del av sprickorna som är fyllda med gångbergart innehåller även vit kvartsporfyr. Gångbergarterna går nästan i nord-sydlig riktning, vilket är ungefär i kanalens riktning. Övre delen av kanalen innesluts av ledmurar. Högra sida av kanalen är djupare än vänstra där vänstra kanten består av tunnskivigt berg, se Figur 6.6.



Figur 6.6 Liggas kanal nedströms utskovet. Bergmassan på vänstra sidan av kanalen är skivigare och högre.

En kartsnitt över huvudsprickgrupperna finns i Bilaga VI. Den dominerande sprickgruppen är bankningssprickor med ett litet sprickavstånd. Dessa sprickor finns över hela

kanalen. Sprickavståndet är 0,1 till 1 meter och är tätast ca 100 m ner i kanalen på vänster sida. Tvärs över hela kanalen går sprickor vinkelräta mot strömriktningen. Dessa förekommer främst i mitten och i de nedre delarna av kanalen. Drygt 100 meter ner i kanalen är dessa mycket täta med sprickavstånd 1-2 dm. Medelsprickavståndet minskar något längre ned i kanalen, framförallt för bankningssprickorna. Parallellt med hela kanalen går ett antal skjuv- och sprickgrupper med medelsprickavstånd 1-2 meter.

Längs kanterna finns block i storlek 5 till 15 m³. Flest block finns framförallt i kanalens vänstra del. I högra delen verkar blocken vara dit skyfflade. Cirka 200 meter ned i kanalen är det småblockigt och stenigt. Blocken ligger framförallt i mitten och på kanterna.

Kanalen kan delas in i tre zoner med samma bergkaraktär enligt Figur VI.1 i Bilaga VI:

- a) Småskivigt (0,1-0,4 m tjocka skivor) med tvärgående sprickor med litet sprickavstånd.
- b) Samma bankingsavstånd men få tvärgående sprickor.
- c) Skjuv- och sprickgruppen parallellt med kanalen dominerar, sprickavstånd 0,7-2 meter. Bankningssprickorna är avtagande och har sprickavstånd kring en meter.

Fotografierna som togs över kanalerna finns beskrivna i Bilaga VII.

För att utreda omfattningen av bergerosionen i kanalen i Ligga studerades gamla foton. Då fotografier från 1980 studeras ses tydligt sprickgruppen med riktning 10/70-80 samt bankningsplanen. Ett par block som ser stora ut, kring 10 m³, ligger lösa strax nedströms utskovet vilket tyder på att erosion förekommit även innan 1980. Området nedanför skibordet består av en mörk bergart, ev. diabas, som har subhorisontella sprickor med ett sprickavstånd på uppskattningsvis 0,1-1 meter. Efter det 1-2 meter tjocka lagret av mörk bergart kommer granit som även den är skivig av bankningssprickor. Detta område av granit har efter 1993 eroderat bort. I fotografier från 1993 ses dessa erosionsskador i form av urgröpning närmast utskovspartiet. Urgröpningen är upp till 3 meter djup. Uppskattningsvis är det trekantiga erosionshål i medel 2,5 meter djupt, 15 meter långt och sidorna är 10 meter långa. Året efter, 1994, förstärktes detta område med en betong och fick formen av en grop, se Figur 6.7.

I fotografier från 1993 upptäcks också en erosionskada en bit nedströms intill höger ledmur. Denna erosionsgrop är belägen i mycket uppsprucket berg och har en trekantsform. Block vid erosionskadan finns dokumenterade från 1994 innan ombyggnaden och kan uppskattas till 5 m³ stora. Erosionsgropen verkar vara kring två meter djup. Idag är detta område förstärkt med betong. I andra fotografier från 1994 ses ett vattenfyllt erosionshål, 2 x 6 meter, nedanför höger ledmur. I fotografier från 1983 ser bergytan i kanalen ut att vara högre än idag. Det verkar som att översta lagret eroderat bort.

Redan 1993 finns mycket lösa bergmassor i älvfårans botten nedströms. Blocken är ganska små och väl utspridda i kanalen. Jämfört med 1999 är det idag mera småblockigt nedströms, framförallt på höger sida. I mitten på kanalen har en viss erosion skett sedan 1999. Här verkar den troliga erosionsmekanismen vara underliggande svagare lager i det skiviga berget. Det har även lossnat lite berg från en uppstickande diabasgång.



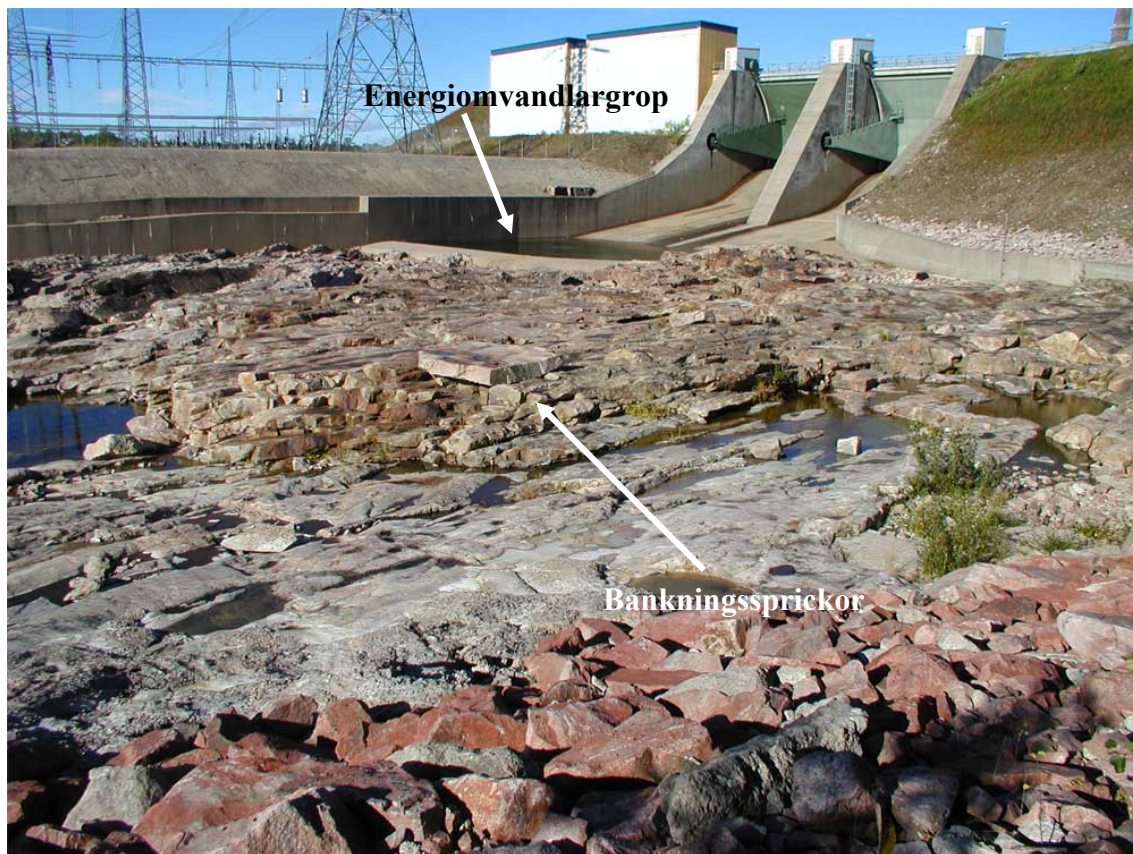
Figur 6.7 Det markerade området nedströms utskoven eroderade bort innan 1993.

Sammanfattningsvis kan sägas att erosionen i Ligga verkar ha varit omfattande. Detta beror troligtvis på att kanalens flackhet, i synnerhet i början, ger stora vågfluktuationer. Bergmassan innehåller relativt tunna bankningsplan som då lätt kan förflyttas av lyftkrafterna som bildas. Blocken avgränsas dessutom av några sprickgrupper som går parallellt med och tvärs över kanalen. Till viss del har även erosionen skett genom urspolning av underliggande lager.

6.2.4 Porjus

Kraftverksdammen i Porjus ligger vid mynningen av Stora Lulevattnet. Kraftverket stod klart 1915 och är ett av Sveriges äldsta vattenkraftverk (Jokkmokks turistbyrå, 2005). Berget i utskovskanalen består främst av rosa granit som på vissa ställen är väldigt grovkornig innehållande mycket biotit. Kanalen är relativt flack, framförallt en bit nedströms. Tvärs över kanalen går en cementserad gångväg för golfspelare. Vid luckorna, efter skibordet, finns en energiomvandlargrop av betong som är vattenfylld. Tre vallar av betong (ledmurar) är byggda på vänstra kanten.

En karta över huvudsprickgrupperna finns i Bilaga VIII. I början av kanalen dominerar en sprickgrupp som går nästan längs med kanalen med stupning 30°. Genom hela kanalen går en subhorisontell sprickgrupp, se Figur 6.8. Mellan betongvallarna är medelsprickavståndet 3 dm på de subhorisontella sprickorna. I resten av kanalen varierar detta sprickavstånd mellan 0,1-1 meter. Nedströms återfinns skivigheten framförallt på höger sida. Parallellt med hela kanalen går ett par skjuvzoner. Strax nedanför skibordet på höger sida finns en krosszon som är ca 7 meter bred.



Figur 6.8 Övre delen av utskovskanalen i Porjus.

Nedströms i kanalen finns lösa block i storleken mellan 1 och 6 m³. En grupp större block finns i kanalens centrum, ca 15 meter nedströms den cementerade vägen för golfare. Längre ned på högerkanten finns en grupp av riktigt stora block, med volymen kring 6 m³ per block. Den övre delen av kanalen är relativt fri från block men några spridda block förekommer. Ett par block har även fastnat kring betongvallarna.

Kanalens bergmassa kan delas upp i tre olika typer enligt Figur VIII.1 i Bilaga VIII:

- Plana hållar med få sprickor.
- Bankningsplan med tvärgående vertikala sprickor.
- Sprucket parti med mycket skivigt berg.

Fotografierna som togs över kanalerna finns beskrivna i Bilaga IX.

Omfattningen av bergerosionen i kanalen undersöktes även här genom att studera gamla fotografier. I fotografier från 1980 ses att berget precis nedströms energiomvandlargropen är något högre än idag. Bergets skivighet syns tydligt och det verkar som många av dessa skivor har brutits loss med tiden. Det är svårt att avgöra hur djupt erosionen har gått då erosionsskyddet på kanalens högerkant är ombyggt, men en uppskattning av erosionsdjupet är 0,5-1 meter. Berget är i dag kantigare och blockigare utan samma tydliga skivighet just i detta område, jämför Figur 6.9 och Figur 6.10. I vänstra delen av kanalen kan ingen större erosion upptäckas. I fotografier från 1983 ses att den sprickzon som går ut från utskoven har djupnat med tiden. I de gamla fotografierna är denna spricka inte lika djup som idag.

Under provspillet 1997 dokumenterades bergerosion som enligt rapport skedde inom ett 100 m^2 stort område mitt i spillfåran nedanför energiomvandlaren (Vattenfall Hydro-power AB, 1997). Vissa utav de block som eroderade bort ligger kvar än idag. De har ändrat position lite, men har inte förflyttats väsentligt sedan dess. Under provspillet deponerades även block nedströms. Vid provspillet var maximala tappningen $1525 \text{ m}^3/\text{s}$ innan spillet avbröts. Efter provspillet 1997 tycks blockigheten ha ökat något. Det är dock svårt att peka ut exakta block som tillkommit utifrån de bilder som finns tillgängliga.

Kanalen i Porjus är tunnskivig av bankningsplan, i synnerhet i dess övre del. Vid spill är det vanligt med stora vågfluktuationer. Detta gör det troligt att erosionsmekanismen i Porjus oftast är ett fluktuerande tryck vid botten som skapar tillräckliga lyftkrafter för att det tunnskiviga berget ska lossna. Gropen efter skibordet har dock minskat vågorna något och ledmurarna verkar också ha både en ledande och energidödande effekt, något som framgår då en video från provspillet år 1997 studeras. En del av de block som ligger lösa i kanalen är relativt fyrkantiga, vilket tyder på att erosionskrafterna har varit stora. Detta kan även indikera att erosionsmekanismen kan vara en annan. Överstjälpning genom påtryckande krafter från det forsande vattnet skulle kunna vara en bidragande erosionsorsak



Figur 6.9 Fotografi över Porjus utskovskanal från 1980. Högra delen av kanalen närmast energiomvandlargropen ser högre ut än idag.



Figur 6.10 Fotografi över Porjus utskovskanal från 2004. Området närmast energiomvandlargropen verkar vara något förändrad jämfört med 1980.

6.2.5 Seitevare

Seitevare kraftstation är belägen i ett biflöde till Lilla Luleälv och stod klar 1967. Kanalen är utsprängd i granit, ca 10-20 meter djup, med vertikala kanter. Efter 80 meter från det övre utskovet stupar kanalen lodrät ungefär 10 meter där en vattenfylld grop är sprängd för det nedre utskovet. Kanalen fortsätter sedan 250 meter till. Där har dock inte kanalen undersökts närmare eftersom det inte fanns någon möjlighet att komma ner i den delen av kanalen. I dagsläget kan inte både nedre och övre utskovet vara öppet samtidigt. Erosionen skulle då bli för stor nedströms och en bro som ligger över slutet av kanalen skulle riskera att gå söder (Johansson, 1998).

Den utsprängda kanalen går genom en skjuvzon, så längs hela den undersökta delen av utskovskanalen går en skjuvspricka i botten, ca 0,5-2m bred, se Figur 6.11. Delar av den högra väggen består av sprickplanet till skjuvsprickan. En karta över huvudsprickgrupperna visas i Bilaga X. Utspritt över hela den vänstra väggen finns en sub-horisontell sprickgrupp. Denna återfinns även på övre delen av högra väggen. Sprickavståndet är mellan 0,2-2 meter. Det finns även sprickgrupper som korsar hela kanalen. Hos dessa grupper varierar stupningen från vertikal till 50°. Dock märks skjuvsprickan i botten väl då de korsande sprickorna inte finns på båda väggarna. Mellan 30-40 meter från utskovsluckorna finns ett parti sprucket berg med litet sprickavstånd, 1-10 mm. Troligen hör även dessa till skjuvsprickan i botten.



Figur 6.11 Övre delen av utskovskanalen i Seitevare.

Kanalen kan generaliseras till att ha två typer av bergkvalitéer (se Figur X.1 i Bilaga X):
a) Tre huvudsprickgrupper varav bankningssprickorna har minst sprickavstånd.
b) Två huvudsprickgrupper där bankningssprickorna och en vertikal sprickgrupp bildar block.

Fotografierna som togs över kanalen finns beskrivna i Bilaga XI.

Det finns mycket lite tidig dokumentation av kanalen i Seitevare men under provtappningen 1998 dokumenterades kanalen noggrant. Då skedde ingen märkbar erosion av övre delen av utskovskanalen. Det gick då ca $157 \text{ m}^3/\text{s}$ vatten i övre delen av kanalen vilket är mindre än hälften så mycket som vid full tappning. År 1995 gjordes en full tappning (ca $370 \text{ m}^3/\text{s}$) men inte heller då eroderade den övre delen av utskovskanalen (Johansson, 1998).

Sedan provspillet 1998 har det inte gjorts några större spill och därför är erosions-skadorna under denna tid få. Det finns dock risk för glidningserosion då många övre block har svagare zoner under sig, se Figur 6.12.



Figur 6.12 Ett exempel på ett svagare lager i bergmassan i Seitevares kanal.

7 BEDÖMNING AV RISKEN FÖR EROSION

7.1 INLEDNING

Bedömning av risken för erosion i de kanaler som ingick i fältstudien gjordes genom att använda Annandales erosionsindex. Denna metod valdes eftersom de parametrar som ingår i erosionsindex ger uttryck för de viktigaste bergfaktorerna som påverkar blockerosionen i en bergmassa, nämligen blockstorlek, sprickriktning, hållfasthet på bergmassan och skjuvhållfasthet i sprickorna, enligt Kapitel 2. Det verkar därför troligt att erosionsindexmetoden skulle kunna förutspå en bergmassas erosionsbenägenhet. Metoden är dessutom lätt att använda om en kartering av bergmassan utförts över det område som ska undersökas. Erosionsindexmetoden har verifierats på många ställen i USA men har ännu inte provats på svenska kanaler. För att undersöka om metoden kan tillämpas under svenska förhållanden har erosionsindex bestämts för tre olika områden från fältundersökningen där erosion registrerats. Därefter har även erosionsindex beräknats för de övriga områdena som fältundersökningen innefattade för att en vidare bedömning av erosionsindexmetoden och erosionsrisken ska kunna göras.

7.2 BESTÄMNING AV EROSIONSINDEX

Från tre av de kanaler som ingick i fältundersökningen finns information om tillfällen med inträffad erosion och samtidig observation av vattenflöden. Det är vid provtappning av Porjus och Harsprånget 1997 som blockerosion observerats och där flödesmängden noterats. I Seitevare skedde en provtappning 1998 där ingen blockerosion noterades i övre delen av kanalen. För att undersöka om erosionsindexmetoden är tillämpbar i dessa fall beräknades erosionsindex för kanalerna och effekten på vattnet vid dessa tappningar. Erosionsindex bestämdes även för kanalerna i Satisjaure och Ligga. Detta gjordes för att kunna jämföra dessa kanalers erosionsbenägenhet med de andra.

Eftersom erosionsindex skulle beräknas för berget i kanalerna, delades respektive kanal upp i olika bergtyper med liknande egenskaper, se avsnitt 6.2. Bedömningarna av de olika bergtyperna skedde därefter separat. Med hjälp av informationen från karteringen kunde parametrarna för de olika bergtyperna bestämmas. Sprickparametrarna bestämdes för den sprickgrupp på respektive område som hade minst sprickavstånd. Ett exempel från Satisjaure på hur parametrarna bestämdes beskrivs nedan.

Bergmassan i kanalen i Satisjaure kan delas upp i tre typer. Erosionsindex för typ a, se Figur II.1 i Bilaga II, bestämdes genom att först uppskatta bergets hållfasthetsvärde, M_s , enligt tabell I.4 i Bilaga I, som bedömdes på plats till 70. Det medför att bergmassans enaxiella tryckhållfasthet uppskattas till 50-100 MPa. RQD -värdet var svårt att uppskatta på plats då valet av den tänkta borrhäns plats var avgörande för resultatet. Därför gjordes två olika skattningar med resultaten $RQD=62$ och $RQD=85$. Medelvärdet av dessa skattade värden är 73,5. En beräkning av RQD -värdet baserat på karteringsmaterialet gjordes också för att undersöka rimligheten av de på plats skattade RQD -värdena. Beräkningen skedde enligt ekvation (4.4), d v s $RQD = 105 - (10/D)$ där D är medeldiametern på blocken. Det beräknade RQD -värdet blir då 79,5 och det uppmätta medelvärdet verkar alltså vara rimligt.

Sprickgruppstalet, J_n , bestämdes på plats till 3,34 enligt Tabell I.1 i Bilaga I. Detta medför ett värde på parametern för bergmassans blockstorlek, $K_b=73,5/3,34=22$.

På den sprickgrupp som har minst sprickavstånd på området har parametern för skjuvhållfastheten, K_d , bestämts till 0,75 enligt J_r/J_a med värden ur Tabell I.2 och Tabell I.3 i Bilaga I.

Parametern för sprickornas riktning i förhållande till strömriktningen, J_s , bestämdes med hjälp av Tabell I.5 i Bilaga I. En vertikal sprickgrupp med stupningsriktning i flödesriktningen har minst sprickavstånd, 0,2 m. Nästa sprickgrupp har sprickavstånd, 0,3 m. Värdet på J_s blir då mellan 1,14 och 1,2, enligt Tabell I.5 i Bilaga I.

Med dessa parametervärden får erosionsindex värdet:

$$K_h = 70 \times 22 \times 0,75 \times 1,14 \approx 1317,$$

enligt ekv (4.6). På samma sätt bestämdes parametervärden för de indelade bergmasstyperna i de undersökta kanalerna. Varje kanal fick då ett par olika index för sin bergmassa. Resultatet visas i Tabell 7.1.

Tabell 7.1 Erosionsindex och parametrar för bergtyperna på platserna som ingick i fältundersökningen.

Plats och typ	M_s	RQD	J_n	J_r	J_a	J_s	K_b	K_d	K_h
Satisjaure typ a	70	73,5	3,34	1,5	2	1,14	22,0	0,75	1317
Satisjaure typ b	70	86,0	3,34	1,5	1	1,20	25,7	1,50	3244
Satisjaure typ c	70	28,7	2,73	3,0	6	1,39	10,5	0,50	511
Harsprånget typ a	280	94,0	4,09	1,5	2	0,55	23,0	0,75	2655
Harsprånget typ b	280	100,0	3,34	1,5	2	0,71	29,9	0,75	4464
Harsprånget typ c	280	97,9	4,09	1,5	2	0,63	23,9	0,75	3167
Porjus typ a	280	93,1	3,34	1,5	1	1,09	27,9	1,50	12761
Porjus typ b	280	86,2	4,09	1,5	1	0,72	21,1	1,50	6373
Porjus typ c	280	79,5	4,09	1,0	6	0,61	19,4	0,17	553
Ligga typ a	280	79,5	3,34	0,5	1	0,61	23,8	0,50	2033
Ligga typ b	280	94,2	3,34	1,5	2	0,77	28,2	0,75	4561
Ligga typ c	280	98,0	2,73	2,0	0,75	0,56	35,9	2,67	15010
Seitevare typ a	280	75,6	3,34	1,5	2	1,09	22,6	0,75	5181
Seitevare typ b	280	80,0	2,24	1,5	2	1,09	35,7	0,75	8175

Satisjaure har den sämsta bergkvaliteten varför också erosionsindex för denna kanal är lägst. Den bergmassa i Porjus som kallas typ c har också ett mycket lågt värde på erosionsindex. Området i Porjus med bergmasstyp c är ett parti med mycket uppsprucken bergmassa nära utskovet och energiomvandlargropen, se Figur VIII.1 i

Bilaga VIII. Harsprånget och Ligga har liknande värden på erosionsindex. Seitevare verkar vara den kanal som uppvisar bäst bergkvalité av de undersökta kanalerna.

7.3 BERÄKNING AV EFFEKTEN I VATTNET

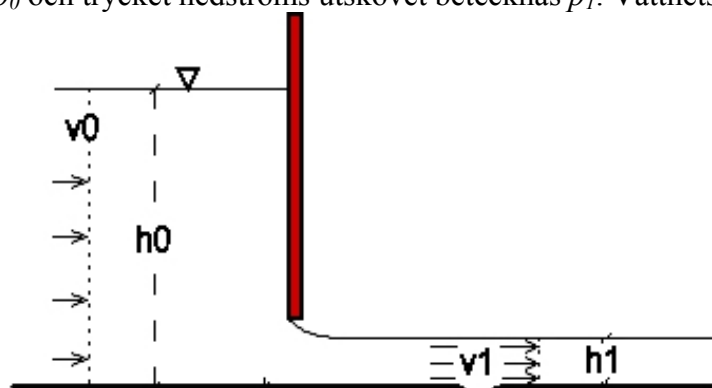
För att ta reda på hur stor erosionskraft som vattnet innehar i de olika kanalerna användes Annandales (1995) metod för att beräkna effekten i vattnet. För detta behövs uppgifter på vattenflöde, vattnets tunghet och energilinjens lutning, d v s ändringen av energin i vattnet. För att uppskatta energilinjens lutning kan Mannings formel användas:

$$Q = MAR^{2/3} S_0^{1/2}, \quad (7.1)$$

där Q är flödet i m^3/s , M är Mannings tal, R är den hydrauliska radien och $S_0 = \Delta E$ är energilinjens lutning (Häggström, 1999). Den tillgängliga information som finns om vattenförhållandena i kanalerna är vattenflödets storlek och bredden på kanalerna. Därför används först Bernoullis ekvation:

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{v_0^2}{2} + gh_0 = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1, \quad (7.2)$$

för att uppskatta djupet och hastigheten på vattnet nedströms (Häggström, 1999). Fyra av storheterna i ekvation (7.2) beskrivs i Figur 7.1. Trycket uppströms utskovet betecknas p_0 och trycket nedströms utskovet betecknas p_1 . Vattnets densitet betecknas ρ .



Figur 7.1 Schematisk skiss över ett utskov.

För en utskovskanal är trycket det samma både uppströms och nedströms utskovet och hastigheten på vattnet uppströms antas vara försumbar. Detta ger det förenklade sambandet:

$$h_0 = \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \quad (7.3)$$

Vattendjupet uppströms antas vara djupet vid dämningssgränsen i den aktuella dammen. För att beräkna hastigheten på vattnet gissades ett antal olika djup på vattnet nedströms varpå vattenhastigheten för dessa djup beräknades. Därefter användes ekvation (7.3) för

att bestämma vilket djup som var troligt. I det förenklade sambandet, ekvation (7.3), antas dock att det inte sker några energiförluster genom utskoven. Antagandet medför att energin nedströms överskattas något vilket innebär att även vattnets beräknade effekt blir något högre än den verkliga effekten.

Djupet och hastigheten på det strömmande vattnet kan sedan användas för att beräkna energilinjens lutning genom en omskrivning av Mannings formel:

$$\Delta E = \frac{v_1^2}{M^2 R^{4/3}} \quad (7.4)$$

Den hydrauliska radien kan för breda kanaler approximeras med vattendjupet.

I flacka kanaler kommer ett hydrauliskt språng att bildas nedströms utskoven. Energiförlusten blir då betydligt större eftersom turbulensen är mycket stor i ett hydrauliskt språng. Energiförlusten för ett sådant språng kan uppskattas enligt Annandale (1995) som:

$$\Delta E = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{h_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) - \frac{4v_1^2}{2g \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right)^2}, \quad (7.5)$$

där Fr_1 är Froudes tal uppströms språnget som beräknas enligt:

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gh_1}} \quad (7.6)$$

Eftersom nästan alla av de undersökta kanalerna kommer att få ett hydrauliskt språng relativt nära dammtån (Billstein, 2004) används denna ekvation för att beräkna energiförlusterna och effekten i vattnet i Harsprånget, Ligga, Porjus och Seitevare. Dessa värden jämförs även med friktionsförlusterna vid enbart superkritiskt flöde. Mannings tal antogs vara lågt, 20, för att inte underskatta vattnets effekt (Häggström, 1999). Effekten av friktionsförlusterna blir som väntat lägre än effekten vid ett hydrauliskt språng.

I Porjus finns en cementerad grop i slutet av skibordet som en energidämpande åtgärd på spillvattnet. För att ta hänsyn till denna minskades skillnaden mellan h_0 och h_1 med 5 m (Johansson, 2004). Antagligen är den beräknade effekten från vattnet i Porjus ändå något högre än i verkligheten. Därför görs även en beräkning med en 10 meters minskning av skillnaden mellan h_0 och h_1 , kallad Porjus alternativ 2 i Tabell 7.2. Detta är då troligtvis en underskattning av vattnets effekt.

Satisjaure har en strålyftare och vattnet kommer därför som en fallande stor stråle. Eftersom kanalen är under ombyggnad görs inga beräkningar av effekten i denna vattenstråle utan istället approximeras effekten som orsakas av friktionsförluster om kanalen bara varit utsprängd, ekvation (7.4). Detta ger en underskattning av vattnets effekt men en fingervisning om hur erosionen blivit om endast en fördjupning av kanalen gjorts som energidämpande åtgärd. I Ligga blir vattnets effekt något

överskattad eftersom ingen hänsyn har tagits till den lilla betonggrop som finns i slutet av skibordet.

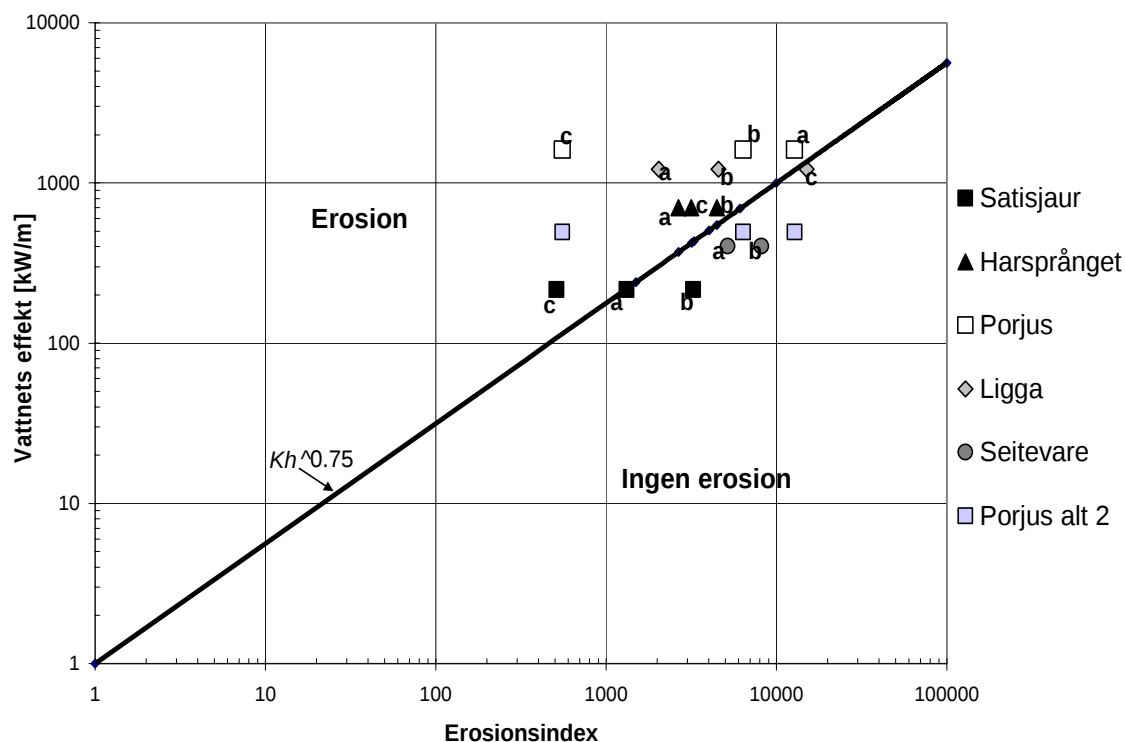
Den beräknade effekt som erhöles, enligt ekvation (4.6) på sid 19, för de olika kanalerna visas i Tabell 7.2. Det vattenflöde som användes vid beräkningarna var för kanalerna i Porjus, Harsprånget och Seitevare noterade vattenflöden vid provspill då det registrerats huruvida erosion skett i kanalerna eller inte. I Satisjaure beräknades effekten för det dimensionerande maximala flödet och i Ligga antogs ungefär samma flöde som användes vid beräkningen av effekten i Porjus och Harsprånget. Ligga ligger nedströms båda dessa dammar och bör kunna avbörda ett minst lika stort flöde som avbördas genom kanalerna uppströms.

Tabell 7.2 Beräknad effekt i vattnet i de olika utskovskanalerna.

Plats	Flöde [m ³ /s]	Beräknad effekt, P [kW/m]
Harsprånget	1421	700,5
Porjus	1525	1607,8
Porjus alt 2	1525	495,0
Ligga	1500	1215,8
Satisjaure	800	216,6
Seitevare	157	402,7

7.4 KONTROLL AV EROSIONSGRÄNS

Genom att avsätta erosionsindex för de olika bergtyperna från kanalerna mot den beräknade effekten av vattnet i de olika kanalerna kan erosionsgränsen undersökas, se Figur 7.2.



Figur 7.2 Erosionsgräns för de undersökta utskovskanalerna. De olika punkterna för respektive utskovskanal representerar de olika bergtyperna, markerade med a-c.

I Porjus och Harsprånget har erosion observerats vid de vattenflöden som användes för beräkning av vattnets effekt i dessa kanaler. Av Figur 7.2 framgår att alla fall för dessa dammar ligger över erosionsgränsen. Detta indikerar att erosion sker under dessa förhållanden. I Porjus är dock den beräknade vattneffekten något överskattad så punkterna för Porjus borde troligtvis ligga längre ned. Med vattneffekten beräknad enligt alternativ 2 i Porjus hamnar fortfarande bergtyp c långt över erosionsgränsen, trots att vattnets effekt då är underskattad. Även bergtyp b ligger nära gränsen under dessa förhållanden. Erosionsindexmetoden verkar alltså överrensstämma med verkligheten i dessa fall.

Vid Seitevares provtappning 1998 släpptes $157 \text{ m}^3/\text{s}$ vatten genom det övre utskovet. Då registrerades ingen erosion av kanalen. Vid en jämförelse av erosionsindex för den övre delen av kanalen med vattnets effekt vid detta flöde framgår att punkterna ligger under erosionsgränsen, se Figur 7.2. Detta innebär alltså att ingen erosion borde ske, vilket inte heller var fallet. Även i Seitevare verkar alltså erosionsindexmetoden fungera i dessa fall. Jämförs värdena på erosionsindex med vattnets effekt vid full tappning genom det övre utskovet, $370 \text{ m}^3/\text{s}$, indikerar erosionsgränsen inte heller då att erosion skulle uppkomma i Seitevares kanal.

I Satisjaure är det dimensionerande maximala flödet $800 \text{ m}^3/\text{s}$. Vattnets beräknade effekt vid detta flöde är, som redan nämnts, en underskattning av vattnets verkliga effekt och en fingervisning om hur effekten varit utan energiomvandlande åtgärder. Bergtyp c och a i Satisjaure ligger ovanför respektive på erosionsgränsen vilket påvisar att bergerosion troligtvis skulle ha skett vid det dimensionerande maximala flödet om de energiomvandlande och förstärkande åtgärderna inte vidtagits.

För ett flöde på $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ i Ligga hamnar erosionsindex för bergtyperna a och b ovanför erosionsgränsen. Detta indikerar att blockerosion är trolig under dessa förhållanden. Det är bara i de områden i kanalen som klassats som bergtyp c där risken för erosion troligtvis är liten. Vattnets effekt är troligen något överskattad men erosionsindex påvisar en risk för erosion i kanalen.

8 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

I svensk berggrund är den vanligaste ytliga sprickgrupp subhorisontell med relativt litet sprickavstånd, så kallade bankningssprickor. En utskovskanal som innehåller en sådan sprickgrupp och som utsätts för forsande vatten har goda förutsättningar för blockerosion. Tryckskillnader bildas då mellan övre och undre ytan på blocken som kan skapa tillräckliga lyftkrafter för att block ska lossna. Detta har framgått då alla platser som besöktes under fältundersökningen hade dessa subhorisontella ytliga sprickor. I Ligga, Harsprånget och Porjus är dessa bankningssprickor dominerande och det finns tydliga spår efter stora, plana block som flyttats. Berggrunden är på dessa platser granitisk men trots detta har erosionen varit omfattande, framförallt i Ligga och Harsprångets kanaler.

Kanalen i Satisjaure skiljer sig lite från de övriga undersökta kanalerna. Bergarten är fältspatsandsten som har en betydligt lägre hållfasthet än granitisk berggrund och med högre sprickfrekvens. De vertikala väggarna gör kanalen extra känslig mot urspolning av undre lager. De ombyggnationer som utförts har dock tagit hänsyn till bergets dåliga kvalité och kanalen bör nu tåla det dimensionerande maximala flödet.

De huvudsakliga faktorer som styr bergerosionen kan sammanfattas i följande punkter:

- **Sprickavstånd, sprickighet och sprickriktning.** Sprickavståndet påverkar storleken på eventuella block som kan lösgöras. Sprickfyllnadsmaterial inverkar på sprickornas skjuvhållfasthet. Sprickriktningen inverkar på hur stora lyftkrafterna kan bli. Detta framkom även i den numeriska modellanalysen.
- **Geometri på kanalen.** Kanalens geometri påverkar vattenhastigheten och storleken på vattnets bottenbelastning, d v s hur turbulent vattnet blir.
- **Kanalens material.** Bergmassans densitet och hållfasthet påverkar storleken på den kraft som krävs för att blockerosion ska ske.
- **Vattenflöde och ytfluktuation.** En annan påverkande faktor för bergerosionen är naturligtvis vattenflödet storlek och storleken på den belastning som vattnet medför på bergmassan. Tryckvariationerna i sprickor är starkt beroende av flödets storlek.

Framförallt verkar erosionen begränsas av bergmassans materialegenskaper men även av spricktätheten i bergmassan. Orsaken till att inverkan av bergmassans material inte har studerats närmre är främst att bergmassan i de kanaler som finns i Sverige i regel består av granitisk eller gnejsig berggrund. Skillnaden är då inte så stor att erosionen i olika kanaler skiljer på grund av bergmaterialet. Stupning och riktning av sprickgrupperna har däremot större betydelse. Dessutom torde erosionen i intakt granitiskt eller gnejsigt berg vara näst intill obefintlig då dessa bergarter har mycket hög hållfasthet.

I den numeriska analysen framgick en skillnad i vilken utsträckning vatten och tryckökning i sprickorna påverkade de olika profilerna. Profiler med horisontella och svagt lutande sprickgrupper var mer känsliga för vatten och tryckökningar i sprickorna. Den numeriska analysen var statisk vilket innebar att profilerna inte utsattes för varierande laster och därmed inget forsande vatten. Trots detta bör resultaten vara rimliga eftersom den numeriska modellen kan anses simulera hur erosionsmekaniserna startar. Det som först händer vid blockerosion är att sprickorna vidgas av ökat

vattentryck. Det som studeras i denna numeriska analys är just hur sprickvidden ändras vid ökad belastning. Den profil som påverkas mest av en tryckökning borde alltså ha en större risk för att erosionsmekanismen i denna sätts igång.

Horisontella och nästan horisontella sprickgrupper i en bergmassa gör som nämnts bergmassan mindre tålig mot erosion. I både Harsprånget och Liggas kanaler har de subhorisontella sprickgrupperna ett litet sprickavstånd varför erosionen på dessa platser blivit stor. Blocken som flyttats har här varit mycket stora, upp till 48 m^3 , se Figur 8.1. Troligtvis behövs inte ett lika stort tryck i sprickorna för att flytta ett tunt block med stor area jämfört med ett tjockare block som har mindre area och samma vikt, eftersom lyftkraften blir större ju större area som trycket kan verka på.



Figur 8.1 Block flyttat i Harsprånget.

Ett mycket enkelt sätt att utreda om vattnets ytfluktuationer kan skapa erosion är att beräkna bankningsplanens tjocklek i förhållande till vattnets ytfluktuationer. Då antas att trycket höjs i sprickorna med lika många meter vattenpelare som vattenytan fluktuerar. Om vågorna varierar mellan t ex 1 m och 4 m kan ett övertryck på 3 mVp skapas i sprickorna. Trycket i sprickorna skulle då kunna lyfta $3/2,65 = 1.13 \text{ m}$ tjocka block. Då antas att bergmassan väger 2650 kg/m^3 och att vattnets densitet är 1000 kg/m^3 . Denna mycket enkla ansats kan vara ett första steg för att se hur trolig en erosion är i en kanal som har subhorisontella bankningsplan. En kanal som är tunnskivig på grund av bankningsplan och vars vattenyta fluktuerar stort vid spill skulle då ha en stor risk för blockerosion. Det är på detta sätt möjligt att på ett tidigt stadium bedöma om erosionsrisken ska utredas ytterligare.

Utredningar av en potentiell erosionsrisk kan baseras på låsstensteorin, de numeriska metoderna CFD och DI, erosionsindex eller fysikaliska och numeriska modellförsök av

den specifika plats man vill utreda. Låsstensteorin tar hänsyn till de svagaste områdena i en bergmassa, men hittills finns bara beräkningsmetoder för hur statiska krafter påverkar dessa svagare områden. I utskovskanaler med höga stötvisa flöden belastas bergmassan främst av dynamiska krafter vilket medför att låsstensteorin i dessa fall kan vara missvisande. Däremot skulle den troligtvis vara bra om en beräkningsmetod för dynamiska krafter istället kunde användas. Man kan anta att erosionen först sker i de svagaste områdena av en bergmassa där den är mest känslig för belastningar.

Med de numeriska metoderna CFD och DI som bygger på fysikaliska samband kan en mycket bra prognos av både plötslig och tidsberoende erosion fås. Den bygger dock på att det finns mycket bra information om bergets och vattnets egenskaper på platsen och vattnet måste komma som en stråle genom ett överfall. De flesta svenska dammars utskovströsklar är i regel rundade och har en strömlinjeformad del nedströms, så kallade skibord. Detta medför att vid avbördning kommer vattnet att rinna längs skibordet. Vattnets egenskaper är då inte desamma som vid ett överfall med en fri vattenstråle, varför denna metod inte kan tillämpas på alla utskovskanaler i Sverige. Beräkningsmetoderna är också ganska svåra att använda och ett flertal beräkningssteg måste utföras. För att resultatet ska bli rättvisande krävs relevant indata, d v s att man måste ha tillgång till riklig information om både vattnet strömning och bergmassan som belastas. I regel finns inte så noggrann information om en kanal och ett en mängd antaganden måste i så fall göras. Beräkningsresultatet blir då inte särskilt tillförlitligt och fördelen med metodens noggrannhet går på så sätt förlorad.

En bättre lämpad metod att göra en noggrann utredning av erosionsrisk och erosionsdjup då mycket relevant indata finns tillgänglig är modellförsök och numerisk analys, med hjälp av dator programmet *UDEC*. Detta gjordes vid en analys av erosionsrisken i utskovskanalen i Midskog och det visade sig fungera mycket bra. Analysen krävde en hel del förarbete med kartering och modellförsök. Metoden bygger på att den numeriska modell som byggs görs så platsspecifik som möjligt där t ex tryckvariationer på botten tas från modellförsök och sprickgrupper och dylikt tas från en kartering. *UDEC* verkar vara ett väl fungerande datorprogram för att simulera erosionsmekanismer och det kan även förutspå erosionsdjup då modellen gjorts platsspecifik. Detta är den noggrannaste metoden för erosionsriskbedömning som jag har studerat i detta arbete och den kan även användas när olika åtgärdsalternativ ska utredas. Men metoden är som sagt tidskrävande och blir därför kostsam. Om det inte är av vikt att erosionen utreds i detalj borde det troligtvis räcka med att tillämpa erosionsindexmetoden.

Erosionsindexmetoden är en semiempirisk metod som tar hänsyn till både underlagets egenskaper och vattnets kraft. De parametrar som bestämmer erosionsindex baseras på blockstorlek, bergmassans hållfasthet, sprickornas skjuvhållfasthet samt på riktningen av sprickor i förhållande till flödet. Metodens fördelar är:

- + Den uppskattar bergmassans erosionsbenägenhet bra då erosionsindex innehåller de parametrar för bergfaktorer som inverkar mest på erosionen.
- + Erosionsindex är lätt att ta fram då en kartering utförts av bergmassan.
- + Det är systematiskt sätt att uppskatta erosionsbenägenheten som lätt kan upprepas av andra.
- + Den är verifierad i USA.
- + Tre fallstudier i detta arbete visar att den är tillämplig även på svenska kanaler.

En liten svårighet i metoden är att beräkna vattnets effekt på de olika platserna. I regel finns bara flödet registrerat vid spill vilket innebär att en del antaganden måste göras vid den beräkningen. Vissa antaganden ger rätt stor påverkan på resultatet av vattnets effekt men eftersom erosionsgränsen ritas i ett log-diagram så krävs riktigt stora förändringar på vattnets effekt för att placeringen då den avsätts mot erosionsindex i diagrammet ska förändras nämnvärt. Däremot är det stor skillnad på effekten i vattnet vid ett hydrauliskt språng och vid t ex energiförluster i en superkritisk strömmande kanal. Det är alltså avgörande för att metoden ska fungera att rätt strömförhållande väljs. Det vill säga att man väljer att räkna med det strömförhållande som råder på de platser i kanalen som man vill undersöka. Det kan vara svårt i vissa kanaler att bedöma vilket strömförhållande som kan komma att råda vid ett visst flöde.

En bedömning av erosionsindexmetodens tillförlitlighet i svenska kanaler är svårt att göra grundat på bara tre observationer. Men de observationer som gjorts i denna studie tyder i alla fall på att metoden är tillämpbar i svenska kanaler. För att ytterligare kunna verifiera erosionsindexmetoden skulle fler praktikfall behövas. De tidigare dokumentationerna av kanalerna har varit dålig varför det är svårt att få information om platser med dokumenterad erosion och registrerat flöde. En förhoppning är att detta examensarbete är en början till mer dokumentering av utskovskanalerna och till en utökad utredning om erosionsindexmetoden kan tillämpas på svenska utskovskanaler.

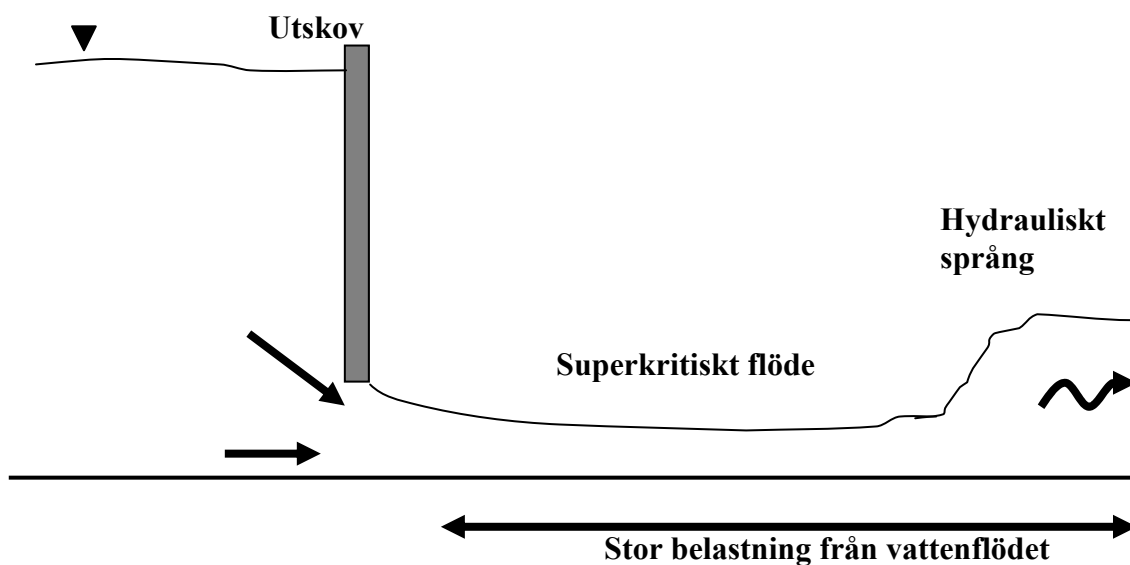
9 REKOMMENDATIONER OCH ÅTGÄRDSFÖRSLAG

För att minimera risken för blockerosion i en kanal kan olika energidämpande åtgärder vidtas. I en energiomvandlargrop kommer belastningen på bergmassan att vara mycket stor eftersom turbulensen i vattnet i denna blir stor, därför måste gropen i regel vara förstärkt. En energiomvandlargrop är mycket effektiv och stor del av vattnets energi reduceras här varför vattenströmningen blir betydligt lugnare nedströms en sådan grop.

En annan effektiv energidämpande metod är att spränga en kanal i en mängd trappsteg. Energin i vattnet minskar då snabbt och vattenytans fluktuationer minimeras. Genom att förse en kanals väggar med sprutbetong ökar stabiliteten på väggarna. För att stabilisera enskilda områden kan delar av bergmassan bultas fast. Denna metod fungerar dock inte alltid. I Harsprånget fanns flera exempel på lösa block som varit fastbultade men där bultarna gått av.

Om vattnet från utskoven kommer genom ett överfall som en stor vattenstråle skapas tryckvariationer i botten som sprids in i sprickorna och har kapacitet att bryta isär sprickor samt skapa upplyftning av block. En effektiv energiomvandlargrop som är tillräckligt djup förebygger inte bara direkt påverkan av vattenstrålen utan minskar även tryckfluktuationerna vid botten. Även luftinblandning av vattenstrålen minskar det dynamiska medeltrycket. Huruvida detta påverkar tryckfluktuationerna är dock ännu inte klarlagt. Stor luftinblandning i vattnet i en energiomvandlargrop kan dock generera cykliska förstärkningar av trycket i sprickorna vilket kan leda till ytterligare uppsprickning av bergmassan. Avbördning från utskoven genom överfall som infallande vattenstrålar bör därför undvikas så långt som möjligt i en kanal.

Den sträcka som framförallt behöver skyddas mot erosion är från utskovet till slutet på det hydrauliska språnget, se Figur 9.1. Det är här energiomvandlingen och turbulensen i vattnet är som störst och alltså även belastningen på bergmassan.



Figur 9.1 Schematisk skiss över vattenflödet från ett utskov.

De energidämpande åtgärder som vidtagits i Harsprånget och Satisjaure har varit nödvändiga för att dessa utskovskanaler ska klara ett ökat dimensionerande maximalt flöde. I Satisjaure är bergmassan som redan nämnts väldigt uppsprucken och något mindre hållfast än i en kanal av granitiskt berg. Därför har förstärkningsåtgärderna varit omfattande med både strållyftare, betongplatta i botten och sprutbetong på väggarna. Sådana omfattande åtgärder är troligtvis inte nödvändiga för de flesta andra kanaler i Sverige. I Harsprånget har kanalen sprängts djupare så att vattendjupet ökar snabbare och det hydrauliska språnget kommer närmare dammen.

I Ligga där erosionen varit omfattande har inga åtgärder gjorts hittills för att motverka ytterligare erosion. Den lagning som skett av berg som eroderat har till viss del gjorts energidämpande. Den stora grop som bildades kring 1980 har klätts med betong varför nu hela området nedströms utskoven är betongklädd. Gropen som gjordes fungerar nu som en liten ”energiomvandlargrop”. Enligt erosionsindexmetoden kommer bergmassan i Ligga att erodera vid spill större än $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Detta innebär att blockerosion kan komma att ske i kanalen vid större spill. Man bör alltså överväga att vidta energidämpande åtgärder i kanalen, t ex att utöka energiomvandlargropen eller spränga ut trappsteg i övre delen av kanalen.

I Seitevare är inte risken för blockerosion särskilt stor i den övre delen av kanalen, men väggarna innehåller en del block som är instabila. Dessa bör därför fastsättas för att undvika ras, ett arbete som dock redan har påbörjats. Den begränsande faktorn för vattenflödet i Seitevare är en bro som ligger i slutet av den utsprängda kanalen. Området där skulle behöva breddas och göras djupare för att mer vatten ska kunna avbördas. Man borde också överväga en flytt av bron. Den erosion som sker i slutet av kanalen är främst jorderosion varför även mer erosionsskydd bör läggas ut för att minimera eventuella skador.

De fem kanaler som fältundersökningen omfattade är nu väl dokumenterade. Detta gör det lättare att vid ett senare tillfälle, efter större spill i kanalerna, undersöka erosionen i dessa närmare. För att verifiera erosionsindexmetoden ytterligare krävs fler observationer och den dokumentation som gjorts i detta arbete kan ligga till grund för det. En del av dokumentationen av kanalerna har skett genom noggrann fotografering. Detta innebär dock att en bedömning av eventuell inträffad erosion efter spill måste ske visuellt genom att jämföra fotografierna med kanalens aktuella utseende. Detta kan vara lite svårt och den erosion som kan ha skett måste vara omfattande för att kunna upptäckas.

Nedan följer några förslag på förbättringar för en bättre bedömning av erosionsrisk i en utskovskanal:

- **En mer noggrann dokumentationsmetod av kanalerna genom t ex inmätning av kanalerna med laserscanning.** En kanals höjdnivåer kan då dokumenteras och användas till att skapa en tredimensionell bild kanalen. En ytterligare inmätning av kanalen efter ett spill skulle då ge exakt information om var erosion skett och hur mycket bergmassa som eroderat.
- **En ytterligare verifiering av erosionsindexmetodens tillämplighet i svenska kanaler.** Erosionsindexmetoden är en systematisk och relativt lättanvänd metod varför den skulle kunna tillämpas på en mängd kanaler.
- **En utveckling av erosionsindexmetodens sätt att beräkna effekt i vattnet.** Metoden skulle vara ännu enklare att använda om effekten i vattnet kunde

beräknas genom att endast använda vattenflödet och geometrin på kanalen. Det behövs i så fall utvecklade ekvationer för hur effekten skulle beräknas i olika former på kanalerna t ex för en bred flack kanal, för en djup flack kanal och en bred starkt lutande kanal.

- **En vidareutveckling av kraftvillkoren till låsstensteorin.** Det som krävs är hitta kraftvillkor som anpassats till forsande vatten och som överrensstämmer med ett dynamiskt flöde. Med dessa dynamiska kraftvillkor i låsstensteorin torde metoden fungera bra i utskovskanaler.

En möjlig fortsättning på detta arbete kan vara att, som ett första steg, ytterligare verifiera erosionsindexmetodens tillämplighet i svenska kanaler. Dokumenteringen av utskovskanalerna skulle även kunna utökas, helst genom inmätning av samtliga större utskovskanaler. När erosionsindexmetoden är verifierad skulle en kartering av en stor del av de utskovskanaler som finns kunna utföras. Sedan kan det utredas ifall någon kanal behöver förstärkas för att klara dess dimensionerande maximala flöde. På detta sätt skulle en översiktlig erosionsriskbedömning av alla stora kanaler åstadkommas. Detta medför att man enkelt kan bedöma vilken kanal som först behöver åtgärdas. För några av de kanaler där erosionsindexet visat att en stor erosionsrisk råder skulle man sedan kunna göra modellförsök och numeriska modellanalyser för att utreda vilka åtgärder som krävs för att minska erosionsrisken.

10 REFERENSER

Annandale, G.W. (1994). Taking the Scour out of Water Power, *International Water Power & Dam Construction*, **46**, sid 46-49.

Annandale, G. W. (1995). Erodibility, *Journal of Hydraulic Research*, **33**, sid 471-494.

Annandale, G. W., Wittler, R., Scott, G. A. (1998). *Prototype Validation of Erodibility Index for Scour in Fractured Rock Media*, websida: Engineering and Hydro systems Inc.

<http://www.enghydro.com/references/pubs/Prototype%20Validation%20of%20Erodibility%20Index%20for%20Scour%20in%20Fractured%20Rock%20Media.pdf>
(2004-11-09).

Annandale, G. W., Wittler, R., Scott, G. A. (2004). *Scour Downstream of Dams*, websida: Engineering and Hydrosystems Inc.

<http://www.enghydro.com/references/pubs/Scour%20Downstream%20of%20Dams.pdf>
(2004-10-25).

Barton, N. (2002). Some New Q-value Correlations to Assist in Site Characterization and Tunnel Design, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, **39**, sid 185-216.

Bergström, S. (1999). *Höga vattenflöden i reglerade älvar*, websida: SMHI
<http://www.smhi.se/sgn0102/n0205/vatten.pdf> (2004-11-25).

Billstein, M (2004). *Muntlig kommunikation*, Vattenfall Utveckling AB, Älvkarleby.

Billstein, M., Carlsson, A., Johansson, N., Söder, P. E. (2003). Midskog gets Physical...and Numerical, *International Water Power & Dam Construction*, **55**, sid 22-26.

Billstein, M. (2002). *Modellförsök Midskogskraftstation 2002 – anpassning till nya dimensionerande flöden*, Rapport till SwedPower AB, Rapportnummer U 02:52, Vattenfall Utveckling AB, Älvkarleby.

Bollaert, E. (2004). A Comprehensive Model to Evaluate Scour Formation in Plunge Pools, *The International Journal of Hydropower & Dams*, **11**, sid 94-101.

Bowers, C. E., Tsai, F. Y. (1969). Fluctuating Pressures in Spillway Stilling Basins, *Journal of the Hydraulics division*, **95**, sid 2071-2079.

Cato, K. D., Mathewson, C. (1990). Rock Material Performance during Emergency Spillway Flows, *Proceeding of the 1990 Annual Symposium on Engineering Geology & Geotechnical Engineering*, Idaho State University, Pocatello, ID, USA, sid 29.1-29.15.

Cundall, P. A. (1971). A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems, *Proceedings Symposium International Sociation Rock Mechanics*, Nancy, USA, paper II-8.

- Firotto, V., Rinaldo, A. (1992). Fluctuating Uplift and Lining Design in Spillway Stilling Basins, *Journal of Hydraulic Engineering*, **118**, sid 578-596.
- Flödeskommitén (1990). *Riktlinjer för bestämning av dimensionerade flöden för dammanläggningar*, Statens Vattenkraftverk, Svenska Kraftverksföreningen, Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Stockholm.
- Fox, R.W., McDonald, A.T. (1994). *Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley and Sons, Inc., New York, USA.
- Goodman, R., Hatzor, Y. (1991). *Safety of Dam Deficiencies due to Overtopping: Results of Preliminary Analysis of Abutment Stability based on Block Theory and the critical Key Block Concept*, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, USA.
- Goodman, R., Shi, G. (1985). *Block Theory and Its Application to Rock Engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Häggström, S. (1999). *Hydraulik för V-teknologer*, Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för vattenbyggnad, Göteborg.
- Itasca (2004). *UDEC, Version 3.1 Manual*, Itasca Company Group, Inc., Minneapolis, USA.
- Johansson, S., Mill, O., Fridolfsson, T., Hammar, L. (2003). *Kompetensförsörjning inom älv- och dammsäkerhet– En behovsstudie av högskoleutbildning och forskning*, Rapport 03:28, websida: Värmeforsk
http://www.svk.se/upload/3556/Kompetensforsorjning_alv_och_dammsakerhet.pdf
 (2004-11-04)
- Johansson, N. (1998). *Seitevare provtappning 1998 08 26*, Rapport till Vattenfall Vattenkraft AB, Rapportnummer: 5588-001, Vattenfall hydropower AB, Älvkarleby.
- Johansson, N. (2004). *Muntlig kommunikation*, Swedpower AB, Älvkarleby.
- Jokkmokks Turistbyrå (2004). websida:
<http://www.turism.jokkmokk.se/se/porjus.shtml> (2005-01-20).
- Kirsten, H.A.D. (1982). A Classification System for Excavation in Natural Material, *The Civil Engineer in South Africa*, **24**, sid 292-308.
- Kirsten, H.A.D. (1988). Case Histories of Groundmass Characterization for Excavability, *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, ASTM, STP 984, L. Kirkaldie (Ed.), sid 102-120.
- Lindfors, U., Sjöberg, J., Perman, F. (2003). *Karaktärisering och klassificering av berg-underlag för projekteringshandbok*, Rapport till Banverket järnvägssystem, Rapportnummer: 1685000-1, SwedPower AB, Luleå.

Liu, P. Q. Dong, J.R., Yu, C. (1998). Experimental Investigation of Fluctuation Uplift on Rock Blocks at the Bottom of the Scour Pool Downstream of Three-Gorges Spillway, *Journal of Hydraulic Research*, **36**, sid 55-68.

Lorig, L.(2002). *Numerical Modelling of Spillway Erosion at Midskog Dam in Sweden*, Rapport till Swedpower AB, Itasca, Santiago, Chile.

Montgomery, R. (1984). *Investigations into Rock Erosion by High Velocity Water Flows*, Institutionen för vattenbyggnad, Kungliga tekniska högskolan, Stockholm

Nordlund, E., Rådberg, G., Sjöberg, J. (1998). *Bergmekanikens grunder*, Luleå tekniska universitet, Luleå.

Reinius, E. (1986). *Rock Erosion*, Institutionen för vattenbyggnad, Kungliga tekniska högskolan, Stockholm

Rocscience (2004). *DIPS, Version 5.1, Manual*, Rocscience Inc., Toronto, Kanada.

Schleiss, A.J., Bollaert, E. (2003). Workshop on Rock Scour Focuses on Future Research, Anon, *The International Journal of Hydropower & Dams*, **10**, sid 59-61.

Sjöberg, J. (2004). *Muntlig kommunikation*, SwedPower AB, Luleå.

Svensk Energi (2001). *Vattenkraft*, websida:
http://www.svenskenergi.se/skolan/underlag/vatt1_15.pdf (2005-01-17)

Söder, PE (2004). *Muntlig kommunikation*, SwedPower AB, Ludvika.

Söder, PE (2003). *Bergmemo – Satisjaure*, Internrapport, SwedPower AB, Ludvika.

US Department of Agriculture (1997). *National Engineering Handbook- Part 628 Dams*, Chapter 52 Field procedures Guide for the Headcut Erodibility Index, Washington, USA, websida: USDA
<http://www.info.usda.gov/CED/ftp/CED/neh628-ch52.pdf> (2004-11-09).

Vasiliev, O.F., Bukreyev, V.I. (1967). Statistical Characteristics of Pressures Fluctuations in the Region of Hydraulic Jump. *Proceeding, 12th Congress, International Association of Hydraulic Research*, London, **2**, sid 1-8.

Vattenfall (2002). *Vattenfall AB elproduktions certifierade miljövarudeklaration för el från Luleälv*, websida:
http://www.vattenfall.se/downloads/produktion/VF_epd_lule_alv.pdf (2005-01-17).

Vattenfall Hydropower AB (1997). *Rapport provtappning Porjus kraftverk*, Rapportnummer 4887, Luleå.

Vattenfall Hydropower AB (1997). *Rapport provtappning Harsprångets kraftverk*, Rapportnummer 4887, Luleå.

Wittler, R.J., Annandale, G. W., Abt, S.R., Ruff, J. F. (1998). New Technology for Estimating Plunge or Spillway Scour, *Proceedings of the Annual Conference of the Association of State Dam Safety Officials*, October 11-14, Las Vegas, NV, USA, websida: Engineering and Hydro systems Inc.
<http://www.enghydro.com/references/pubs/New%20Technology%20for%20Estimating%20Plunge%20or%20Spillway%20Scour.pdf> (2004-11-09)

Woodward, R. C. (1992). The Geology of Dam Spillways, *Engineering Geology*, **32**, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, sid 243-254.

BILAGA I. TABELLER FÖR BESTÄMNING AV PARAMETERVÄRDEN VID KARTERING

Tabell I.1 Parametervärden för J_n (Annandale, 1995).

Sprickgruppstal, J_n	Beskrivning	J_n
A	Massivt berg, inga eller få sprickor.	1.00
B	En sprickgrupp.	1.22
C	En sprickgrupp samt slumpvisa sprickor.	1.50
D	Två sprickgrupper.	1.83
E	Två sprickgrupper samt slumpvisa sprickor.	2.24
F	Tre sprickgrupper.	2.73
G	Tre sprickgrupper samt slumpvisa sprickor.	3.34
H	Fyra sprickgrupper.	4.09
J	Fler än fyra sprickgrupper, kraftigt uppsprucket berg, "sockerbitsberg".	5.00

Tabell I.2 Parametervärden för J_r (Lindfors et al, 2003).

Sprickrâhetstal, J_r	Beskrivning	J_r
a) Bergkontakt vid skjuvning, samt b) Bergkontakt uppnås före 10 cm skjuvdeformation		
A	Diskontinuerliga sprickor.	4
B	Råa eller ojämna, vågformiga (böljande) sprickor.	3
C	Släta, vågformiga (böljande) sprickor.	2.0
D	Glatta (blankslag), vågformiga (böljande) sprickor.	1.5
E	Råa eller ojämna, plana sprickor.	1.5
F	Släta, plana sprickor.	1.0
G	Glatta (blankslag), plana sprickor.	0.5
c) Ingen bergkontakt uppnås vid skjuvdeformation		
H	Lermineralhaltiga zoner, med tillräcklig tjocklek för att förhindra bergkontakt.	1.0
J	Zon med sandigt, grusigt eller krossat bergmaterial med tillräcklig tjocklek för att förhindra bergkontakt.	1.0

- Notera: (i) Beskrivningen syftar på, i följande ordning, småskaliga egenskaper och mellanskaliga egenskaper.
- (ii) Lägg till 1.0 om medelavståndet av betydande sprickgrupper är större än 3 m.
- (iii) $J_r = 0.5$ kan användas för plana, glatta sprickor som har stänglighet, förutsatt att stänglighetens orientering ger minsta möjliga hållfasthet.
- (iv) Klassificeringen av J_r och J_a görs för den sprickgrupp eller diskontinuitet som är minst gynnsam för stabiliteten med avseende på både orientering och skjuvmotstånd, τ [där $\tau \approx \sigma_n \tan^{-1} (J_r/J_a)$].

Tabell I.3 Parametervärden för J_a (Lindfors et al, 2003).

Sprickomvandlingstal, J_a	Beskrivning	$\phi_r [^\circ]$	J_a
a) Bergkontakt vid skjuvning (inga fyllnadsmineral, endast ytbeläggning)			
A	Tät, läkt, hård, ej deformationsmjuknande, impermeabel fyllning, d v s kvarts eller epidot.	-	0.75
B	Opåverkade (ej omvandlade) spricktor, endast missfärgning av sprickytan (beläggning).	25-35	1.0
C	Svagt omvandlade spricktor. Ej deformationsmjuknande mineralbeläggning, sandiga partiklar, lerfritt krossat berg, etc.	25-30	2.0
D	Siltig eller sandig lerbeläggning, låg lerfraktion (ej deformationsmjuknande).	20-25	3.0
E	Deformationsmjuknande eller lågfriktionsbeläggning av lermineral, d v s kaolin och glimmer. Även klorit, talk, gips, och grafit, m m, och små kvantiteter av svällande lera.	8-16	4.0
b) Bergkontakt uppnås före 10 cm skjuvdeformation (tunn mineralfyllning)			
F	Sandiga partiklar, lerfritt sönderdelat berg, etc.	25-30	4.0
G	Kraftigt överkonsoliderad, ej deformationsmjuknande lermineralfyllning (kontinuerlig, < 5 mm tjocklek).	16-24	6.0
H	Medel- eller lågt överkonsoliderad, deformationsmjuknande, lermineralfyllning (kontinuerlig, < 5 mm tjocklek).	12-16	8.0
J	Fyllning av svällare, d v s montmorillonit (kontinuerlig, < 5 mm tjocklek). Värdet av J_a beror på andel (%) av svällande lerpartiklar och tillgång till vatten, etc.	6-12	8-12
c) Ingen bergkontakt uppnås vid skjuvning (tjock mineralfyllning)			
KLM	Zoner eller band av krossat eller sönderdelat berg och lera (se G, H, J för beskrivning för lerförhållanden).	6-24	6, 8, eller 8-12
N	Zoner eller band av siltig eller sandig lera (ej deformationsmjuknande).	-	5
OPR	Tjocka, kontinuerliga zoner eller band av lera (se G, H, J för beskrivning för lerförhållanden).	6-24	10, 13 eller 13-20

Tabell I.4 Parametervärden för bergmassans hållfasthet, M_s
(Lindfors et al, 2003).

Beskrivning	Fältobservation	Ungefärligt intervall på enaxiell tryckhållfasthet (MPa)	Hållfasthetspara- meter, M_s
Extremt svagt berg	Märks av tumnagel	0.25-1.0	0,87
Mycket svagt berg	Smulas sönder vid fasta slag med den smala änden av geologhammare; kan skalas med fickkniv	1.0-3.3 3.3-5.0	1,86 3,95
Svagt berg	Skalas med svårighet av fickkniv, grunda märken görs av fasta slag med den smala änden av geolog- hammare.	5.0-13.2 13.2-25.0	8,39 17,7
Medelstarkt berg	Kan inte skrapas eller skalas med fickkniv; bergprov kan spräckas med ett hårt slag med geologhammare	25-50	35
Starkt berg	Bergprov kräver mer än ett slag med geologhammare för att spräckas	50-100	70
Mycket starkt berg	Bergprov kräver många slag med geologhammare för att spräckas	100-250	280
Extremt starkt berg	Bergbitar kan endast flisas med geologhammare	>250	280

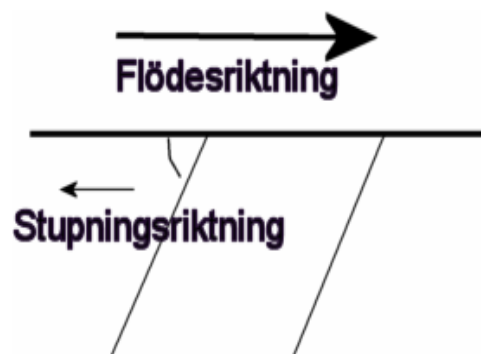
Tabell I.5 Parametervärden för J_s enligt Kirstens grävbarhetsindex
(1982 & 1988).

Stupningsriktning på sprickgrupp med minst sprickavstånd (grader)	Stupning på sprickgrupp med minst sprickavstånd (grader)	Förhållande mellan sprickavstånd på de två tätaste sprickgrupperna			
		1:1	1:2	1:4	1:8
180/0	90	1.14	1.20	1.24	1.26
I flödesriktningen enligt Figur I.1	89	0.78	0.71	0.65	0.61
	85	0.73	0.66	0.61	0.57
	80	0.67	0.60	0.55	0.52
	70	0.56	0.50	0.46	0.43
	60	0.50	0.46	0.42	0.40
	50	0.49	0.46	0.43	0.41
	40	0.53	0.49	0.46	0.45
	30	0.63	0.59	0.55	0.53
	20	0.84	0.77	0.71	0.67
	10	1.25	1.10	0.98	0.90
	5	1.39	1.23	1.09	1.01
	1	1.50	1.33	1.19	1.10
0/180	0	1.14	1.09	1.05	1.02
Mot flödesriktningen enligt Figur I.2	-1	0.78	0.85	0.90	0.94
	-5	0.73	0.79	0.84	0.88
	-10	0.67	0.72	0.78	0.81
	-20	0.56	0.62	0.66	0.69
	-30	0.50	0.55	0.58	0.60
	-40	0.49	0.52	0.55	0.57
	-50	0.53	0.56	0.59	0.61
	-60	0.63	0.68	0.71	0.73
	-70	0.84	0.91	0.97	1.01
	-80	1.26	1.41	1.53	1.61
	-85	1.39	1.55	1.69	1.77
	-89	1.50	1.68	1.82	1.91
180/0	-90	1.14	1.20	1.24	1.26

För den sprickgrupp som har minst sprickavstånd undersöks först om dess stupning är riktad med eller mot flödesriktningen, jämför Figur I.2 och Figur I.1. Därefter kontrolleras stupningen för att kunna avläsa värdet på J_s .

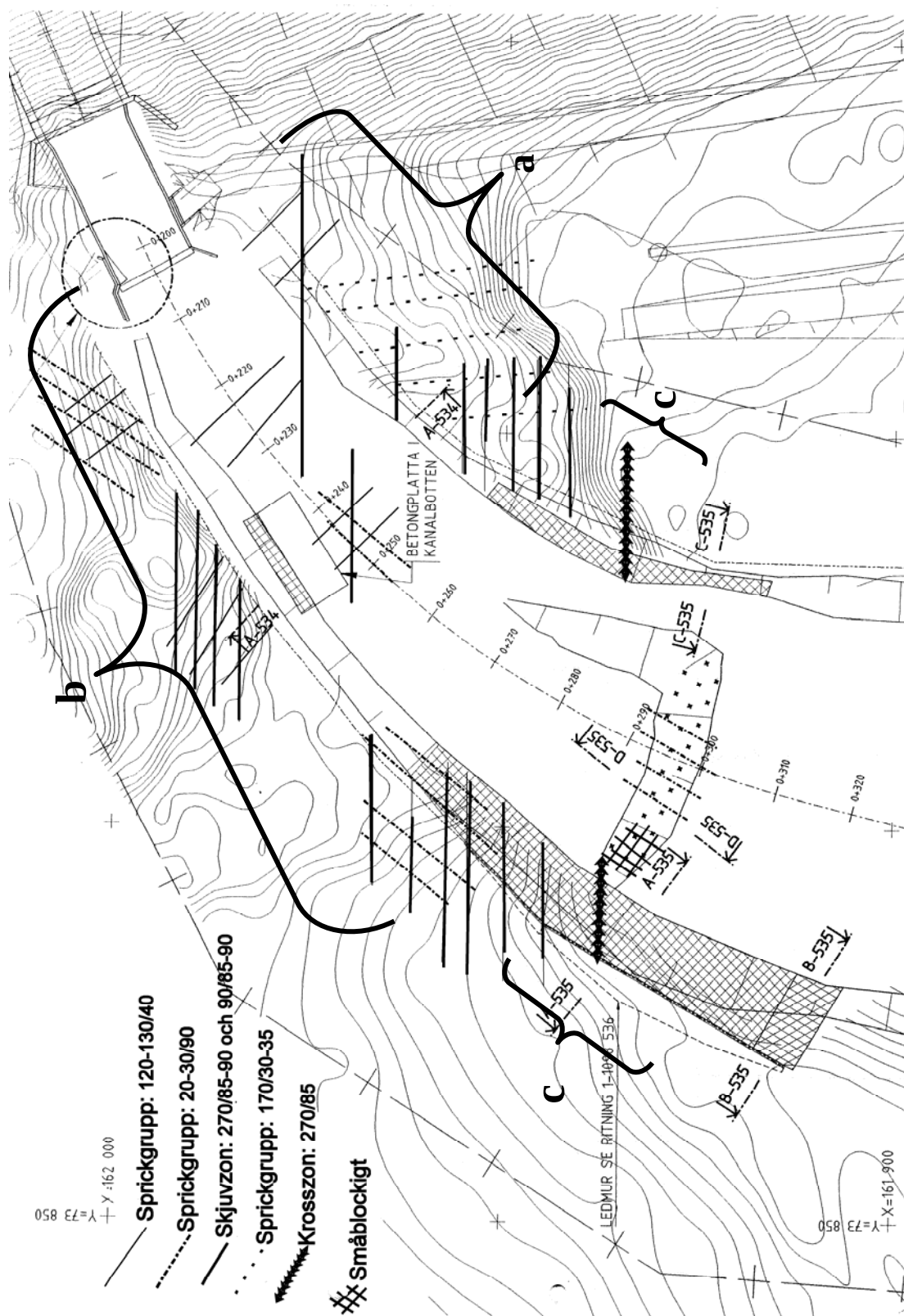


Figur I.1 Stupningsriktning i flödesriktningen.



Figur I.2 Stupningsriktning mot flödesriktningen.

BILAGA II. HUVUDSPRICKGRUPPER I SATISJAURE



Figur II.1 Karta över huvudsprickgrupperna i Satisjaure med de olika bergmassetyperna markerade.

BILAGA III. FOTOGRAFERINGSBESKRIVNING FRÅN SATISJAURE

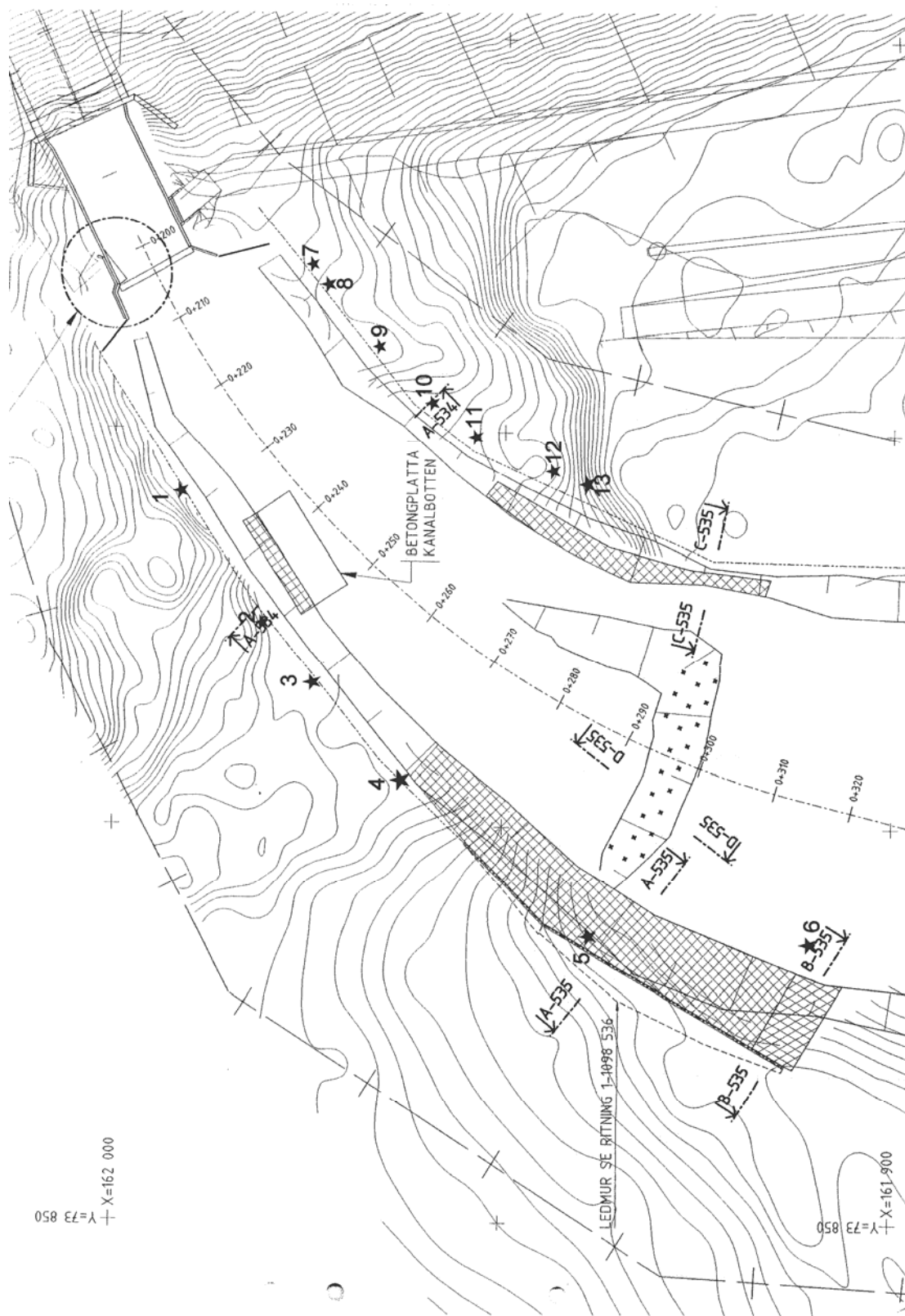
Översiktsbilderna är tagna från kanterna av kanalen. Exakt placering av fotograferings platserna finns markerad på utskovskanalens ritning, se Figur III.1. En beskrivning av platserna finns i Figur III.1. Fotografierna togs den 31 augusti 2004 och förvaras hos SwedPower AB i Luleå.

Tabell III.1 Beskrivning av fotograferingsplatserna.

Fotograferingsplats	Placeringsbeskrivning	Fotografinummer
Högersidan av kanalen:		
1	21m från ledmuren	1-2
2	20m från fotoplat 1	3
3	10m från fotoplat 2	4
4	16m från fotoplat3	5-6
5	30m från fotoplat 4	7-8
I kanalen:		
6	26m från energigropsväggen	9-11
Vänstersidan av kanalen:		
7	7m från ledmuren	12
8	3m från fotoplat 7	13
9	10m från fotoplat 8	14
10	9m från fotoplat 9	15
11	7m från fotoplat 10	16-17
12	11.5 m från fotoplat 11	18
13	4.5 m från fotoplat 12	19-20

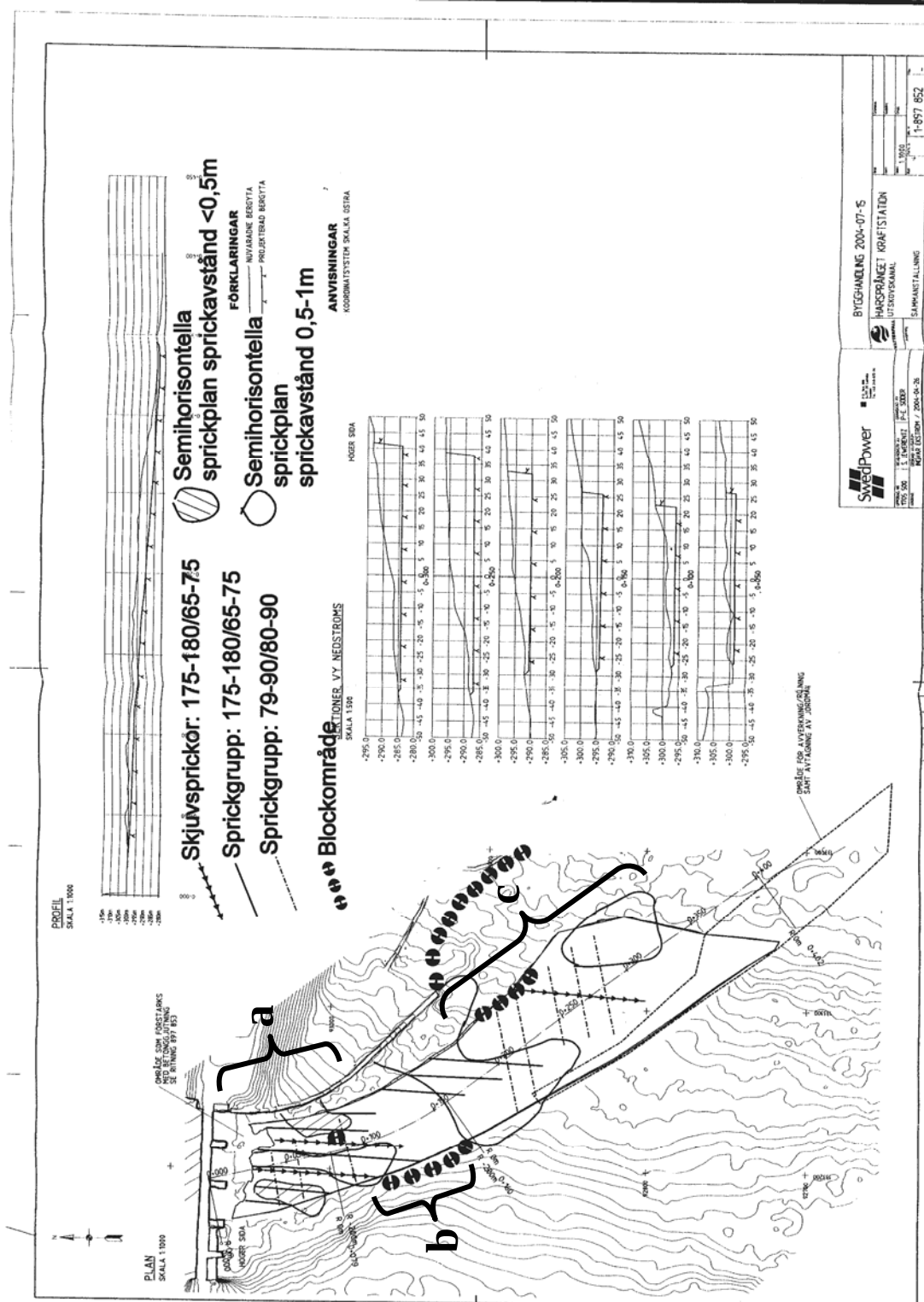
Fotografering av delsträckorna av väggarna i kanalen, höger respektive vänster, skedde från motstående vägg ståendes i centrum av delsträckan. Det vill säga för delsträcka 220-230 m togs bilden från 225 m i botten av kanalen. Delsträckorna fotograferades den 1 september 2004.

Energigropsgaveln (foto 42-45) är fotad från snitt 280m i centrum av kanalen. Foto 46 och 47 är tagna från enegigropskanten vid centrumlinjen.



Figur III.1 Karta över fotograferingsplatserna i Satisjaure. De numrerade stjärnorna markerar fotograferingsplatserna.

HUVUDSPRICKGRUPPER I HARSPRÅNGET



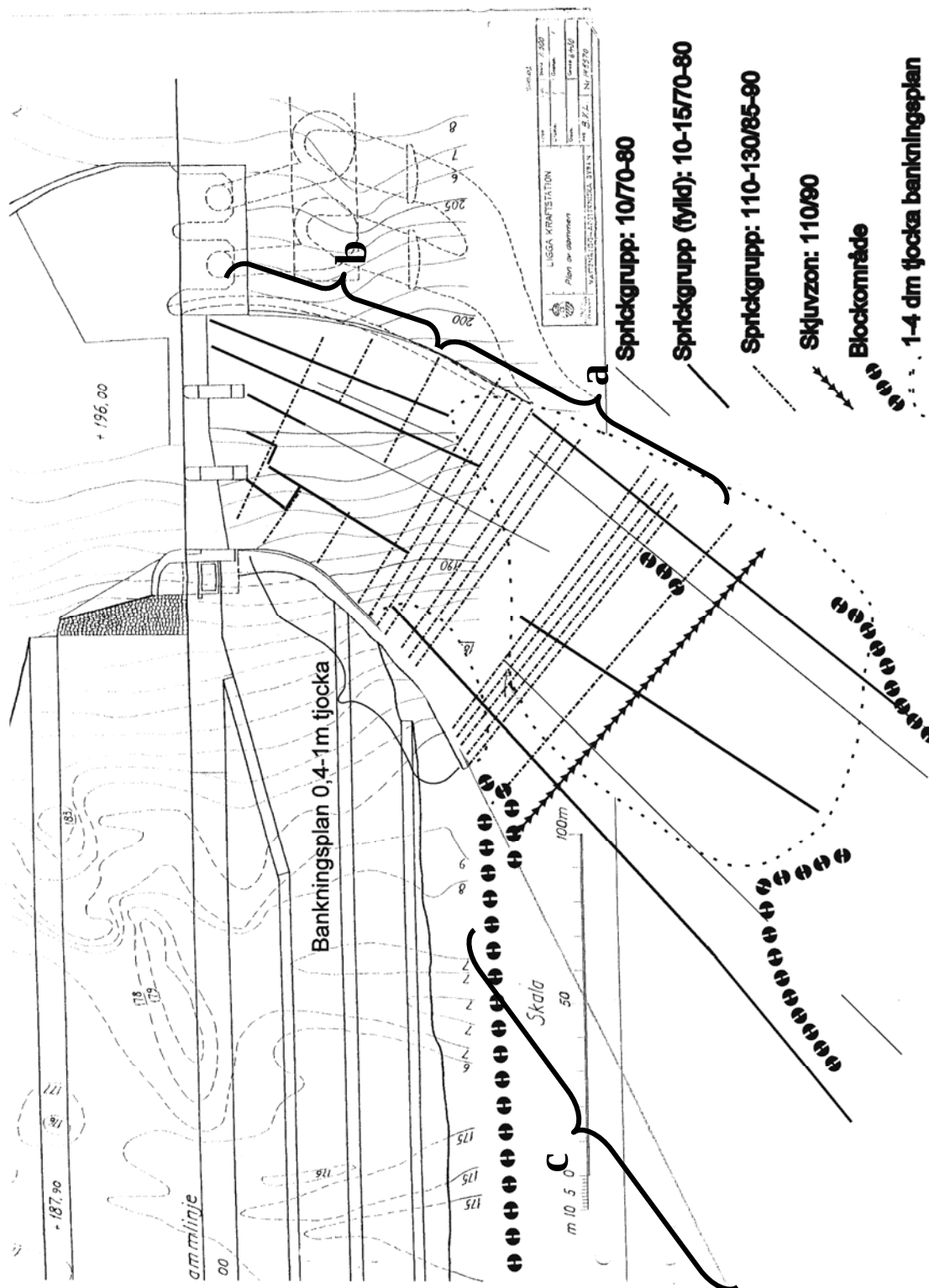
Figur IV.1 Karta över huvudsprickgrupper i Harsprånget med de olika bergmassetyperna markerade.

BILAGA V. FOTOGRAFERINGSBESKRIVNING FRÅN HARSPRÅNGET

Översiktsbilderna är tagna både från kanterna av kanalen, från utskoven och i kanalen. Exakt placering av fotograferingsplatserna finns markerad i Figur V.1. Beskrivning av fotograferingsplatserna visas i Tabell V.1. Fotografierna togs den 6-7 september 2004 och de förvaras hos SwedPower AB i Luleå. Där finns även de fotografier som togs på lösa block i kanalen.

Tabell V.1 Beskrivning av fotograferingsplatserna.

Fotograferingsplats	Placeringsbeskrivning	Fotografinummer
Från dammkropp (på utskoven):		
2	Ovanför lucka C i högra kanten 20 m från fotoplat 1	7-8
3	Mitt ovanför lucka A 10 m från fotoplat 2	9-10
4	Mitt ovanför lucka B 16 m från fotoplat 3	11-12
Högersida av kanalen:		
5	Vid byggnad	13-14
6	23 m från utskovslucka B	15-17
7	33 m från huset	18-20
8	17 m från fotoplat 7	21-23
9	30 m från fotoplat 8	24-26
10	25 m nedströms ledmurens slut	27-32
I kanalen:		
11	3 m från fotoplat 10	33-34
13	123 m nedströms utskovet	39-41
Vänster sida av kanalen:		
12	Mitt emot fotoplat 11	35-38
14	Mitt emot fotoplat 8	42-47
15	Mitt emot fotoplat 6 högt upp på kanten	48
1	Ovanför reservutskovet	1-6
16	På vägen till avloppstunneln	49
17	På vägen till avloppstunneln	50-51



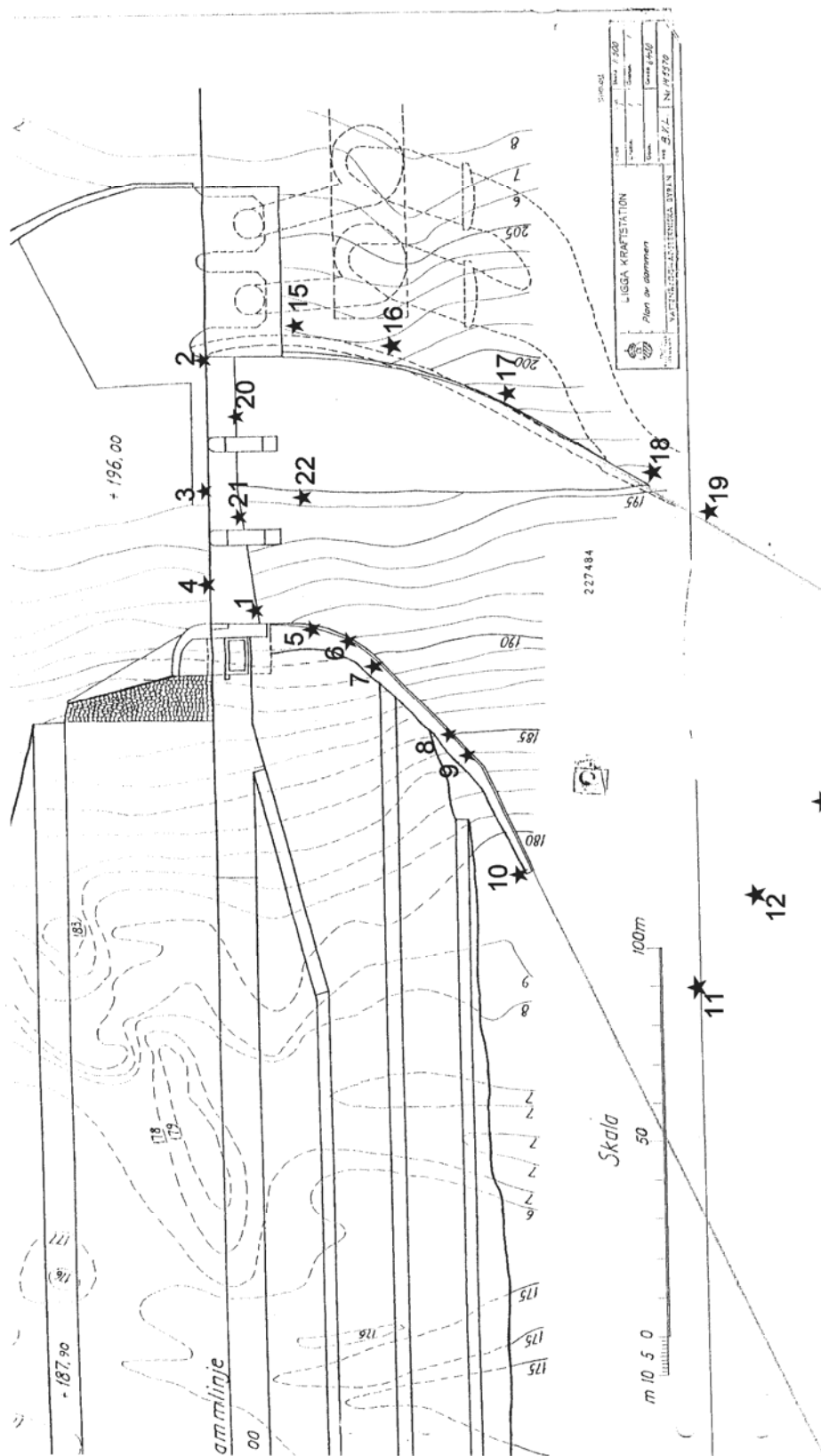
Figur VI.1 Huvudsprickgrupper i Ligga med de olika bergmassetyperna markerade.

BILAGA VII. FOTOGRAFERINGSBESKRIVNING FRÅN LIGGA

Översiktsbilderna är tagna både från kanterna av kanalen, från utskoven och i kanalen. Exakt placering av fotograferingsplatserna finns markerad i Figur VII.1. Beskrivning av fotograferingsplatserna visas i Tabell VII.1. Fotografierna togs den 9-10 september 2004 och de förvaras hos SwedPower AB i Luleå. Där finns även de fotografier som togs på lösa block i kanalen.

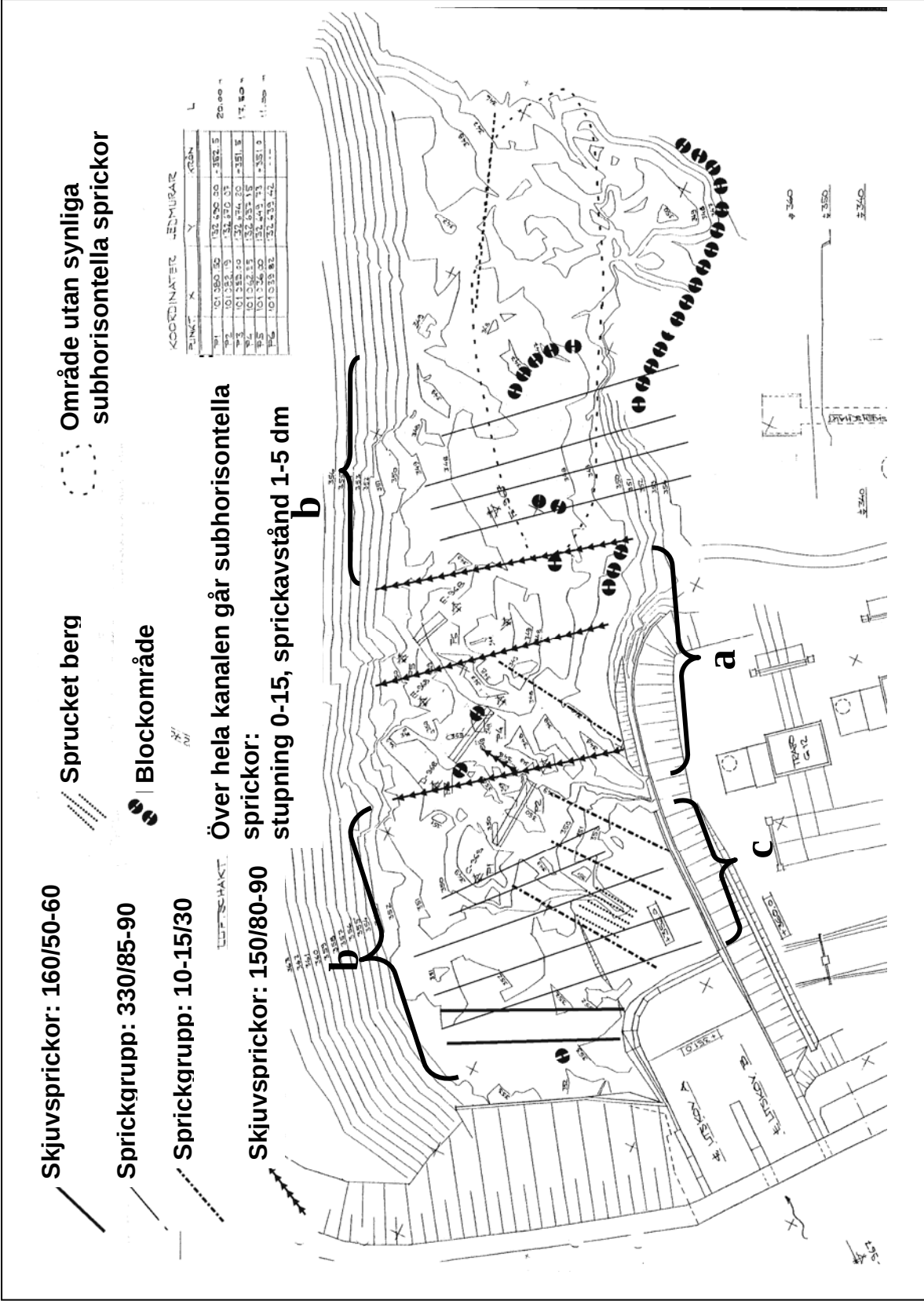
Tabell VII.1 Beskrivning av fotograferingsplatser i Ligga.

Fotograferingsplats	Placeringsbeskrivning	Fotografinummer
1	Enligt ritning i Figur VII.1	1-5
2	På dammen, enligt ritning	6-7
3	På dammen, enligt ritning	8-9
4	På dammen, enligt ritning	10-11
5	11.5 m från pelare	12-14
6	6.5 m från plats 5	15-16
7	13 m från plats 6	17-19
8	24 m från plats 7	20-23
9	5 m från plats 8	24-25
10	Enligt ritning i Figur VII.1	26-29
11	50 m från höger ledmur	30-34
12	25 m från plats 11	35-37
13	30 m från plats 12	38-41
14	Enligt ritning i Figur VII.1	42-46
15	Enligt ritning i Figur VII.1	47
16	21 m från plats 15	48-50
17	30 m från plats 16	51-55
18	25 m från plats 17	56-57
19	15 m från plats 18	58-60
20	På skibordet, enligt ritning	61-63
21	På skibordet, enligt ritning	64-67
22	Enligt ritning i Figur VI.1	68-70



Figur VII.1 Ritning över fotograferingsplatser i Ligga. De numrerade stjärnorna markerar fotoplatserna.

BILAGA VIII. HUVUDSPRICKRIKTNINGAR I PORJUS



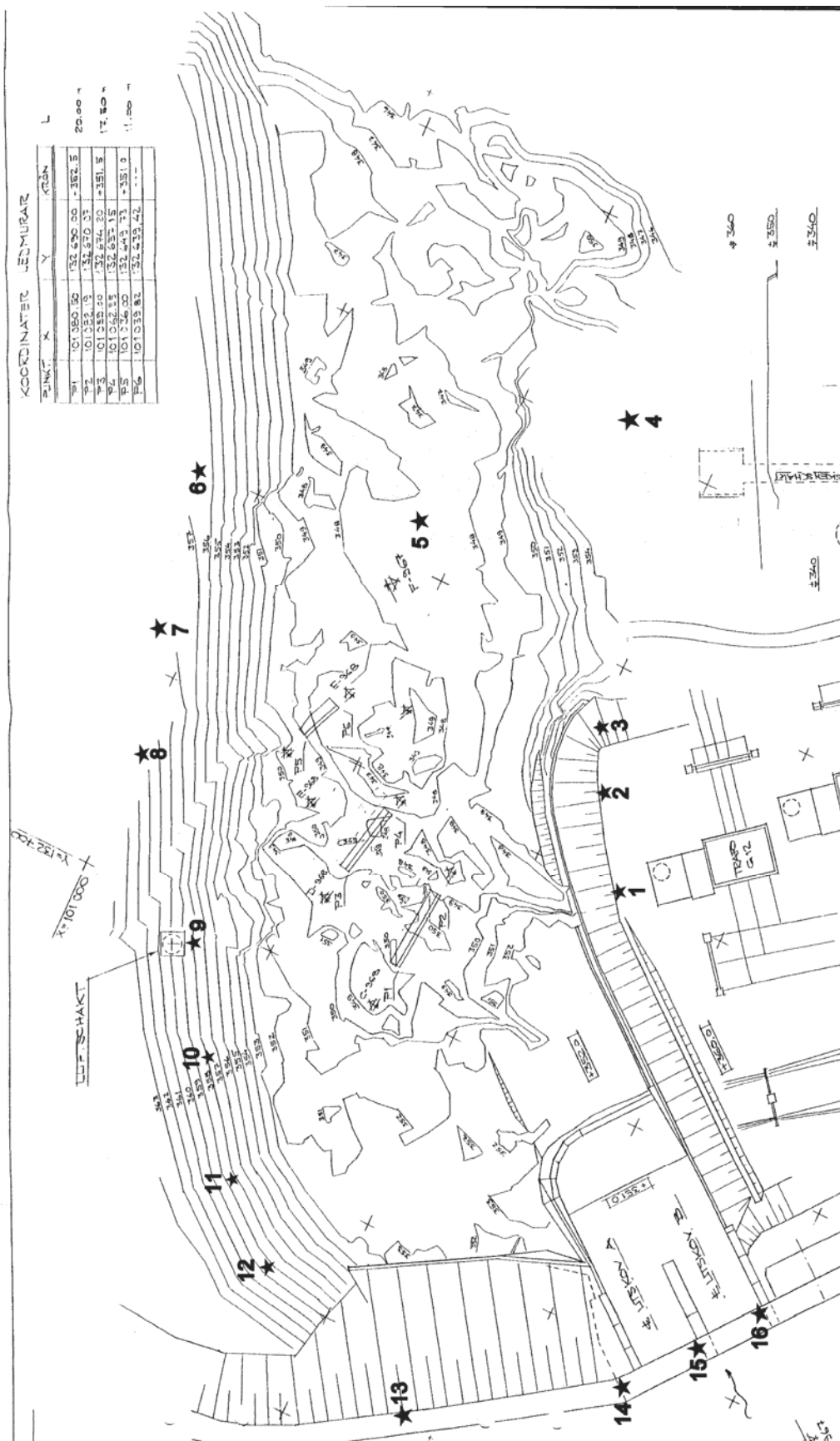
Figur VIII.1 Huvudsprickriktningar i Porjus.

BILAGA IX. FOTOGRAFERINGSBESKRIVNING FRÅN PORJUS

Översiktsbilderna är tagna både från kanterna av kanalen, från utskoven och i kanalen. Exakt placering av fotograferingsplatserna finns markerad i Figur IX.1. Beskrivning av fotograferingsplatserna visas i Tabell IX.1. Fotografierna togs den 13 september 2004 och de förvaras hos SwedPower AB i Luleå. Där finns även de fotografier som togs på lösa block i kanalen.

Tabell IX.1 Beskrivning av fotograferingsplatser i Porjus.

Fotograferingsplats	Placeringsbeskrivning	Fotografinummer
1	Enligt ritning i Figur IX.1	1-4
2	22.5 m från plats 1	5-9
3	15 m från plats 2	10-14
4	Vid golfutslag nr 5	15-19
5	Mitt på gångvägen	20-22 uppströms, 23 nedströms
6	2/3 uppe på trappan	24-28
7	Nedanförför golfutslag	29-31
8	Enligt ritning i Figur IX.1	32-33
9	2 m nedanförför luftschakt	34-36
10	Enligt ritning i Figur IX.1	37-39
11	Enligt ritning i Figur IX.1	40-41
12	18.5 m från mur	42-43
13	52 m från hus	44-45
14	4 m från hus	46-47
15	Enligt ritning i Figur IX.1	48-49
16	Enligt ritning i Figur IX.1	50-52



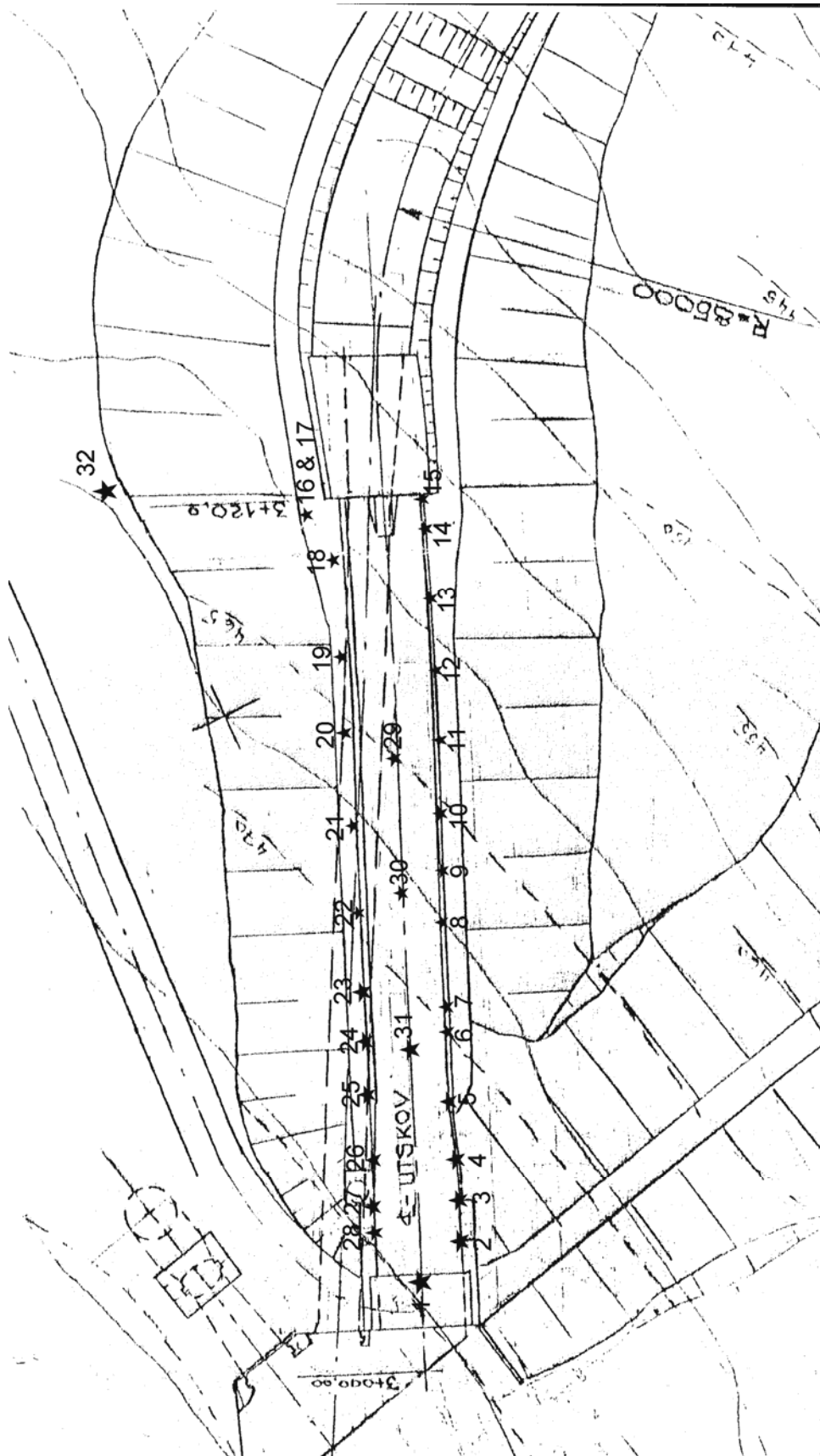
Figur IX.1 Fotograferingsplatser i Porjus. De numrerade stjärnorna markerar fotograferingsplatserna.

BILAGA XI. FOTOGRAFERINGSBESKRIVNING FRÅN SEITEVARE

Fotografierna är framförallt tagna ståendes i kanalen. Några foton togs i slutet av den nedsprängda kanalen. Exakt placering av fotograferingsplatserna finns markerad i Figur XI.1. Beskrivning av fotograferingsplatserna visas i Tabell IX.1. Fotografierna togs 16-17 september 2004 och de förvaras hos SwedPower AB i Luleå.

Tabell XI.1 Beskrivning av fotograferingsplatserna i Seitevare.

Fotograferingsplats	Placeringsbeskrivning	Fotografinummer
1	Mitt på betongsula	1, 38
Höger sida av kanalen:		
2	4 m från betongsulan	2
3	6 m från plats 2	3
4	6 m från plats 3	4
5	8 m från plats 4	5
6	9 m från plats 5	6
7	4 m från plats 6	7
8	10 m från plats 7	8
9	6 m från plats 8	9
10	8 m från plats 9	10
11	9 m från plats 10	11
12	25 m från plats 11	12
13	30 m från plats 12	13
14	10 m från plats 13	14
15	4 m från plats 14	15-19
Vänster sida av kanalen:		
16	Mitt emot plats 15	20-21
17	Samma som plats 16	22-23
18	10 m från plats 17	24
19	15 m från plats 18	25
20	12 m från plats 19	26
21	11 m från plats 20	27
22	12 m från plats 21	28
23	8 m från plats 22	29
24	9 m från plats 23	30
25	8 m från plats 24	31
26	10 m från plats 25	32
27	10 m från plats 26	33
28	6 m från betongsulan	34
Mitt i kanalen:		
29	20 m nedströms från plats 30	35
30	23 m nedströms från plats 31	36
31	32 m nedströms från betongsulan	37
På kanalkanten:		
32	På vänster sida ovanför nedre utskovet	39
I slutet av kanalen:		
33	Ovanför stege vid luckorna	40
34	3 m nedströms från plats 33	41
35	Mitt på bron	42-43



Figur XI.1 Fotograferingsplatser i Seitevare. De numrerade stjärnorna markerar fotograferingsplatserna.