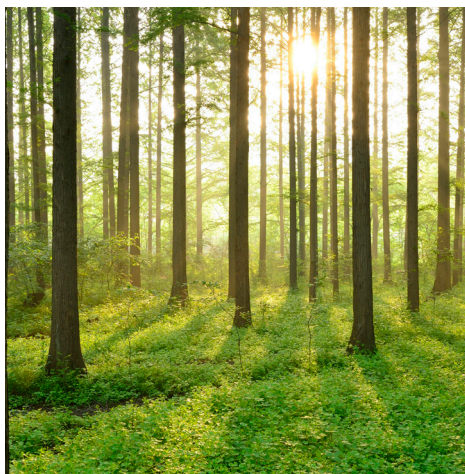


BERGEROSION I SPILLFÅROR

RAPPORT 2018:532



Bergerosion i spillfårar

Kunskapssamling kring erosion av berg nedströms
utskov

JONAS PERSSON OCH PER ERIKSSON

ISBN 978-91-7673-532-9 | © Energiforsk oktober 2018 | Omslagsfoto: Norconsult

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

”Bergerosion i spillfåror – en kunskapssamling kring erosion av berg nedströms utskov” är ett projekt som initierats utifrån ett identifierat behov vid ett antal anläggningar. Detta behov har sedan projicerats på hela industrins behov av att belysa frågan och föreliggande rapport är ett första steg att ge dammägare i Sverige en kunskap om problemet och en inriktning för fortsatt arbete.

I projektet har en kunskapssammanställning gjorts baserad på litteraturstudie och kontakter med initierade i branschen, även internationellt, där framförallt de s.k. Indexmetoderna studerats och granskats. Relevansen av dessa metoder har värderats och slutsats dragits av dess tillämplighet. Dessutom har en enkät genomförts där dammägare fått redovisa sina erfarenheter av problemet med bergerosion vid sina anläggningar, samt att en detaljerad studie gjorts vid ett mindre urval av dessa dammar.

Studien har utförts av Norconsult, med framförallt Jonas Persson och Per Eriksson som utförare. Till projektet har en referensgrupp bestående av Mats Persson/Vattenfall, Anders Sjödin/Statkraft, Linda Ormann/Fortum och Anders Isander/Uniper funnits.

Projektet har ingått i Energiforsks Dammsäkerhetstekniska utvecklingsarbete med medverkan av vattenkraftsindustrin.

Författarna ansvarar för rapportens innehåll.

Kungälv oktober 2018

Anders Isander, Uniper

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet och publiceringen innebär inte att Energiforsk har tagit ställning till innehållet.

Sammanfattning

Uppdragets ursprungliga utformning gav som uppgift att verifiera tillförlitligheten hos Erosionsindex (Annandale, 1995). Erosionsindex är ett internationellt utformat index som möjliggör bedömning av erosionsrisk av geomaterial i hydrauliska miljöer.

Ytterligare önskades att om möjligt finjustera gränslinjen för erosion i indexet för nationellt frekvent förekommande förhållanden, och om möjligt utvärdera vilka av parametrarna i indexet som hade störst vikt för utfallet. Förhoppningen var att en verifiering av metoden kunde ge upplägg för påbjudna rekommendationer gällande utvärdering och hantering av frågeställningar kring erosionssäkerhet vid hydrauliska byggnadsverk.

För ägare av hydrauliska byggnadsverk är frågeställningen kring tröskelvärden för erosion intressant då det vid några av våra dammanläggningar uppstått stora erosionsskador i spillfåror, vilket föranlett oro för dammsäkerheten samt större ombyggnadsprojekt.

Utvärdering av Erosionsindex har skett genom insamling av erfarenheter från respektive kraftbolag som önskade delta i studien, platsbesök från 13 av våra kraftstationers spillfåror, utvärdering av tidigare spillhistorik som mått på hydraulisk belastning samt grundliga litteraturstudier. Bedömningen utifrån detta är dock att utveckling eller användandet av just Erosionsindex eller liknande index-metoder inte kan ge en vederhäftig förutsägelse av erosion och bör därför inte användas för att basera nationella riktlinjer på. Orsakerna är flertaliga och beskrivs ingående i rapporten.

Detta innebär inte att det i dagsläget saknas en kunskapsbas för att förutsäga erosion av bergmassor på. Istället för nyttjandet och utvecklingen av Erosionsindex föreslås en alternativ utvecklingslinje där prognostiseringen av erosion bygger på rent mekaniska förhållanden mellan egentygder hos bergblock och trycköverförings-koefficienter på samma block via bergmassans spricksystem från strömmande vatten.

Visst arbete efter denna utvecklingslinje är redan utfört, och en modell för att beräkna lyftkrafterna på typblock skulle idag kunna ställas upp och nyttjas vid erosionsutvärderingar. Vi anser dock att utökade laboratoriestudier bör utföras vars mål skulle vara att fastslå karaktäristiska trycköverföringskoefficienter för frekvent förekommande sprickvidder för vår berggrund. På denna grund kunde sedan en mer realistisk modell för prognostisering av erosion byggas än vad som är möjligt idag.

Utöver rekommendationen om att bygga en utvärderingsmodell för erosion efter mekaniska principer och påbjudna rekommendationer i regelverk och riktlinjer kopplade till denna ges några rekommendationer på hur ägare till hydrauliska byggnadsverk skall hantera frågan kring erosion i dagsläget och hur uppföljning vid enskilda hydrauliska byggnadsverk bör ske.

Summary

The original emphasis of this project was to verify the reliability of the Erodibility Index Method (EIM), developed by Annandale (1995). The EIM is an internationally developed index that enables assessment of the erosion risk of geological material in hydraulic environments.

Furthermore, it was desirable to, if possible, fine-tune the erosion threshold in the EIM to better suite common national conditions. It was also desirable to evaluate which parameters that have the most influence on the result. The prospect was that a verification of the method could enable recommendations regarding assessment and management of questions related to erosion-safety at hydraulic structures.

The question regarding erodibility threshold is interesting to dam owners, since large-scale erosion has occurred at some of our dam facilities. This has spurred concerns regarding dam-safety and generated a number of extensive dam-safety projects.

After collecting data and experiences from all the major dam-owners in Sweden, evaluating 13 spillway channels by visiting them and evaluating their historical discharge patterns and an extensive literature study - it has been concluded that usage nor development of the EIM or similar index methods can give sufficient predictions of rock erosion and should therefore not be used to found national guidelines. The reasons are several and are described exhaustively in the report.

However, this does not mean that it in the present time a knowledge base to predict rock erosion is lacking. Instead of using and developing the EIM, an alternative development line is proposed; where the forecasting of erosion is founded on purely mechanical conditions considering the submerged weight of the blocks and pressure coefficients from flowing water on the same blocks transferred via the joints of the rock mass.

Some of the research along the proposed development line has already been conducted, and a model that estimates the uplift of a typical block could be set up and be used for evaluations of erosion potential. However, we believe that extended laboratory studies are required, with the aim to establish characteristic pressure coefficients for joint spacings that are common within our bedrock. From this research ground, more realistic model for erosion forecasting can be developed.

In addition to the recommendation regarding developing a forecasting model from mechanical principles, and recommendations for guidelines, a few recommendations are given regarding how dam-owners should handle erosion issues in the present time and how follow-up and monitoring should be performed.

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Motiv och mål	8
2	Projektbeskrivning	10
2.1	Projektorganisation	10
2.2	Genomförande och upplägg	10
2.3	Kommentar kring uppbyggnaden av studien	11
3	Beskrivning av bergerosion	12
3.1	Sveriges geologi och våra kraftverks geografiska placering	12
3.2	Orsaker till bergerosion	15
3.3	System för att bedöma erosion av berg	16
3.3.1	Historisk utveckling av prognostiseringsverktyg	18
3.3.2	Index-metoder och vår berggrunds särskilda beskaffenhet	19
3.3.3	Uppbyggnad av erosionsindex	20
3.3.4	Hydraulisk last på undergrunden	24
4	Sammanställning av anläggningsdata och erosionserfarenheter	35
4.1	Ingående kraftbolag och intressenter	35
4.2	Resultat, sammanställning	35
4.3	Urval av anläggningar för analys	36
5	Analys av utvalda anläggningar	37
5.1	Fältstudier och analys	37
5.1.1	Letsi	39
5.1.2	Messaure	44
5.1.3	Porjus	48
5.1.4	Harsprånget	53
5.1.5	Seitevare	58
5.1.6	Akkats	63
5.1.7	Ligga	67
5.1.8	Båtfors	72
5.1.9	Finnfors	78
5.1.10	Grytfors	83
5.1.11	Rengård	89
5.1.12	Krångfors	94
5.1.13	Selsfors	100
5.2	Kommentarer	106
5.3	Erosionsindex-diagram	106
5.4	Sammanfattning av erosionserfarenheter och indikerat erosionsindex	107
5.5	Diskussion kring metodkänsligheter	108
6	Slutsatser och rekommendationer	114

6.1	Slutsatser	114
6.2	Rekommendationer	115
7	Tillkännagivanden	120
8	Publicerade arbeten kring erosion av berg	121
8.1	Arbete rörande hydraulisk belastning	121
8.2	Internationellt arbete rörande erosion av berg	122
8.3	Nationellt arbete rörande erosion av berg	124
8.4	övriga källhänvisningar	125
8.5	kraftbolagens interna dokument	125

Bilagor:

1. Tekniska egenskaper för svensk natursten
2. Sammanställning av anläggningsdata och erosionserfarenheter

1 Inledning

Bakgrund till studien samt dess mål beskrivs i respektive kapitel nedan.

1.1 BAKGRUND

Svenska dammanläggningar består generellt av ett antal dammar av jordfyllning eller av betong som dämmer ett magasin. Utöver dammarna finns intag till kraftstation för elproduktion. Magasinet får regleras mellan bestämda vattennivåer. Dämningsgränsen (DG) är den högsta tillåtna vattennivån under normala driftförhållanden. Vid höga flöden kan en högre vattennivå tillåtas, och dessa bestämmelser finns sammanställda i varje anläggnings vattendom.

Regleringsdammen är den damm där "överflödigt vatten" s.k. "spill" avbördas, t.ex. om tillrinningen till magasinet överstiger kraftstationens avbördningskapacitet (slukförmåga). Regleringsdammen består för svenska förhållanden vanligen av ett antal utskovsluckor med tillhörande skibord över vilka vattnet spills. Direkt nedströms skiborden följer oftast en kanal bestående av rå bergyta som tidigare utgjort älvmåra, alternativt en kanal utsprängd ur berg.

Erosion av spillfåror som utgörs av naturlig eller schaktad bergyta har i någon mån skett vid många av våra svenska vattenkraftsanläggningar. Denna sker företrädesvis genom plockning och transport av intakta block från bergmassan. Omfattning av erosion, skadegraden, skiljer erfarenhetsmässigt avsevärt mellan anläggningar. I vissa fall har den erosion som upplevts och noterats varit trivial eller bedömts som icke-existerande medan det vid andra anläggningar inträffat skador på berggrunden som bedömts som allvarliga för dammsäkerheten. Svenska exempel på den senare företeelsen är kraftverken i Porjus, Midskog, Harsprånget, Ligga och Ramsele. För dessa anläggningar har storskaliga åtgärdsprogram genomförts för att motverka ytterligare erosion.

1.2 MOTIV OCH MÅL

Till följd av att våra utbyggda älvar har stora magasineringsmöjligheter, finns det många anläggningar där spill krävs i endast mycket liten utsträckning. Därav är det möjligt att erosionsproblematik förbisetts då avsaknaden av betydande spillvolymer lämnat bergmassan oförändrad sedan idrifttagandet av anläggningen. Av samma anledning saknas den motivering för att få till stånd en utredning kring erosionspotentialen hos bergmassan, när det finns få eller inga drifterfarenheter.

Progressiv erosion skulle potentiellt kunna avlägsna stabiliserande bergmassa nedströms utskovskonstruktionen och därmed betydligt öka risken för glidstabilitetsbrott hos en eller flera av utskovsmonoliterna. Vid de få tillfällen då det förekommer extremt höga flöden kommer förmodligen också erosionen att ge störst följdskadeverkningar. Även scenarier där underminering av ledmurar kan tänkas där en ledmur avgränsar utskovskanalen från en jordfyllningsdamm med tät funktion mot en reservoar. Ytterligare faror för dammsäkerheten kan vara

vallbildning av lösgjorda bergblock mot ledmurar eller brofästen. Vallen av bergblock åstadkommer därefter överspolning och därmed erosion av bakomliggande jordfyllnadsdammar, slänter, vägbankar och dylikt.

Hitintills har inga nationella riktlinjer eller dokument över samlad kunskap om fenomenet erosion i spillfåror som givits ut till vattenkraftsindustrins gagn. Detta arbete är ett försök till att utöka kunskapen kring fenomenet med syfte att på denna kunskapsbas bygga nationella riktlinjer i frågan. Ett mål på lång sikt kan vara att införa en rekommendation och/eller tillämpningsvägledning i Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, RIDAS, avseende tillståndskontroll av spillfåror och säker avbördning m.a.p. potentiell bergerosion i spillfåror.

I denna rapport redovisas:

1. Nuvarande kunnande om orsakerna till erosion av en hård kristallin bergmassa.
2. En sammanställning görs över spillhistorik och självskattad skadegrad på berget vid en mängd svenska kraftverk.
3. Detaljerade geologiska observationer från platsbesök på 13 svenska kraftverk.
4. Detaljstudier rörande spillhistorik på samma 13 svenska anläggningar
5. Råd rörande ytterligare studier som behöver utföras för att göra kunskapsbasen så komplett att riktlinjer kan utfärdas.

2 Projektbeskrivning

Här presenteras projektets organisation samt genomförande och upplägg.

2.1 PROJEKTORGANISATION

Arbetet i projektet utförs av Norconsult AB, med stöd av en referensgrupp som består av representanter från några av de större kraftbolagen.

Uppdragsledare och teknikansvarig Hydraulik:	Jonas Persson
Teknikansvarig Geologi:	Per Eriksson
Kvalitetsgranskning, Hydraulik:	Nils Johansson
Kvalitetsgranskning, Geologi:	Rolf Christiansson

Referensgrupp:

Anders Isander, Uniper
Mats Persson, Vattenfall Vattenkraft
Anders Sjödin, Statkraft Sverige
Linda Ormann, Fortum Sverige

2.2 GENOMFÖRANDE OCH UPPLÄGG

Projektets ursprungliga syfte var att utvärdera erosion enligt erosionsindex (Annandale, 1995), och föreslå utveckling och anpassning för svenska (nordiska) förhållanden. Detta föreslogs bli utfört genom sammanställning av data m.a.p. relevanta parametrar för svenska anläggningar samt genom fältinventering och efterföljande analys av ett antal anläggningar. Detta skulle då ge ett utökat dataunderlag för erosionsindex (Annandale, 1995), jämfört med befintlig publicerad modell, med en tydligare koppling till dokumenterad skadegrad.

Under projektets gång ändrades dess inriktning till att inte endast begränsa sig till utveckling och anpassning av Erosionsindex, utan till att även samla kunskap generellt om kunskapsläget inom bergerosion i spillfärar. Detta gjordes genom litteraturstudier och kontakter med utländska aktörer (anläggningsägare och konsulter).

Arbetet i projektet kan delas in i följande delar:

1. *Inledande del, skrivbordsinventering.* Sammanställning av data från anläggningar i svenska älvar.
2. *Fältinventering och utvärdering av utvalda anläggningar.* Analys av nuvarande metod med erosionsindex och rekommendationer till metodutveckling.
3. *Litteraturstudier och kontakter med utländska aktörer.* Sammanställning av kunskapsläget kring bergerosion i spillfärar och översyn om det finns goda alternativ till Erosionsindex.

Den inledande delen omfattade datainsamling av relevanta parametrar, för svenska anläggningar och sedan sammanställning och redovisning av utfallet. Tanken var att samla in data från 50–100 st anläggningar från våra tio största

reglerade älvar (totalt ca 200 st). Denna sammanställning användes sedan för att välja ut lämpliga anläggningar för vidare utredning.

Inför den andra delen, analysdelen, valdes ett antal anläggningar ut baserat på utfallet i den inledande sammanställningen, och utvärderades med nuvarande metod med Erosionsindex (Annandale, 1995). Utifrån detta utfördes sedan en utvärdering av Erosionsindex-metoden m.a.p. svenska förhållanden, samt att slutsatser och rekommendationer slutligen gavs.

Analys av nuvarande metod utförs genom att, efter genomförd utvärdering per anläggning:

- komplettera erosionsindex-diagrammet (Annandale, 1995) med utfallet för dessa anläggningar
- dra slutsatser om metodens giltighet för svenska förhållanden utifrån kännedom om skadegrad samt ge rekommendationer om hur metoden kan utvecklas.

2.3 KOMMENTAR KRING UPPBYGGNADEN AV STUDIEN

Den prognosticerande delen av studien har ursprungligen som ovan beskrivits byggts upp kring erosionsindex (Annandale 1995). Detta har historiska orsaker då just Annandales erosionsindex kommit att användas nationellt (e.g. Mören 2005, Mören & Sjöberg 2007). Det finns som visas nedan ett flertal möjligheter till denna typ av index-studier, samt kinematiska metoder att prognosticera erosion med. Vattenkraftsindustrien bör därför inte låta sig låsas fast kring en specifik metodik i det fortsatta arbetet av denna typ av historiskt materialistiska orsaker. Det vetenskapliga forskandet kring erosion av berg åtnjuter internationellt för närvarande stort intresse. Dess resultat bör komma arbetet med nationella riktlinjer till gagn.

3 Beskrivning av bergerosion

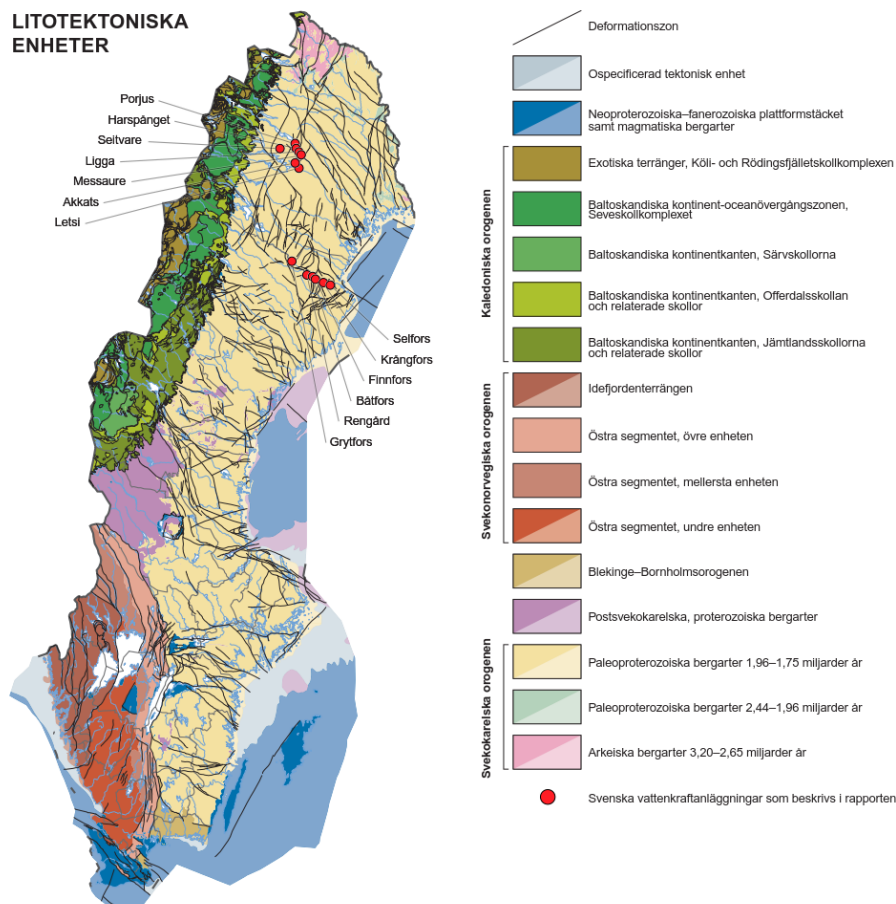
Erosion i den betydelse den avser i denna rapport utgör plockning och transport av intakta block ur en redan av naturförhållandena given uppsprucken bergmassa. Drivkrafterna för erosionen har funnits bestå av tre typer av hydrauliskt inducerade tryck med sin härstamning från turbulent strömmande vatten.

Endast magmatiska eller metamorfa bergarter behandlas i studien, vilket innebär att övriga geologiska erosionsprocesser som ger upphov till nednötning av bergmaterialet funnits överflödigt att behandla.

En exakt härledning av de hydrauliska lasterna eller brottshypotesen ges inte i denna rapport, istället hänvisas till källhänvisningarna i litteraturstudien som utförts i ämnet och som ligger som grund för ovan och nedan beskrivna uppfattning. Litteraturstudien presenteras i kapitel 8.

3.1 SVERIGES GEOLOGI OCH VÅRA KRAFTVERKS GEOGRAFISKA PLACERING

Sveriges berggrund kan delas upp i fråga om ålder och typ i tre större litotektoniska enheter och en mindre där den mindre och yngsta utgör det Neoproterozoiska–fanerozoiska plattformstäckets och omfattar Siljansringen, några partier mellan och runt Vättern och Vänern, Gotland, Öland och södra Skåne (Lundqvist et al. 2011, Bergman et al. 2012). Detta täcke utgörs av huvudsakligen sedimentära bergarter och en mindre del magmatiska. De tre övriga, större enheterna, innefattar provinser som i stora drag karaktäriseras av den Kaledonska orogenen, Svekonorvegiska orogenen och Svekokarelska orogenen. De två sistnämnda, och alltså äldsta enheterna består av kristallina bergarter med mycket god inre mekanisk sammanhållning i varierande grad av sammansmältning. Dessa två enheter utgör urbergsskölden. Det är också i dessa två enheter som majoriteten av våra svenska vattenkraftsanläggningar är belägna.



Figur 1 Geologisk översiktskarta över Sveriges berggrund. De tre största litotektoniska enheterna framställs tillsammans med de 13 besökta anläggningarna i denna studie.

Den Kaledonska orogenen omfattar fjällkedjan norr om Dalarna och utgörs huvudsakligen av metamorfa ekvivalenter till sedimentära bergarter. Även här är den inre mekaniska sammanhållningen betydligt högre än för sedimentära bergarter till följd av en omkristallisering av ingående mineral i de forna sedimenten. Uppsprickningen av metasedimenten sker inte enbart längs sprickplan skapade vid orogenerna som för de magmatiska bergarter utan även längs svaghetsplan definierade av bergartens textur, som till varierende grad är direkt övertagna från de forna sedimenten.

Tabell 1 Silikatbergarter. Översiktlig indelningsnyckel över magmatiska bergarter, i huvudsak förekommande i urbergsskölden.

Bergart	Huvudmineral	Struktur	Bildningssätt
Granit	Fältspat, Kvarts, Glimmer	Massformig, fin- medelkornig	Magmatisk
Ortognejs	Fältspat, Kvarts, Glimmer	Ådrig, folierad, fin- grovkornig	Helt rekrytalliserade magmatiska intrusivbergarter
Paragnejs	Fältspat, Kvarts, Glimmer	Ådrig, folierad, fin- grovkornig	Helt rekrytalliserade sedimentära bergarter
Ådergnejs	Fältspat, Kvarts, Glimmer	Mineralogin helt segregerad i breda ådror, medel- grovkornig	Höggradigt omarbetad orto- eller paragnejs
Diabas	Plagioklas, Pyroxen, Glimmer	Massformig, finkornig	Magmatisk gångbergart
Gabbro	Plagioklas, Pyroxen, Glimmer	Massformig, medel- grovkornig	Magmatisk

Tabell 2 Silikatbergarter. Översiktlig indelningsnyckel över metamorfa bergarter, i huvudsak förekommande i Kaledonska fjällkedjan.

Bergart	Huvudmineral	Struktur	Bildningssätt
Amfibolit	Amfibol, Plagioklas	Folierad, Förskiffrad, medel- grovkornig	Metamorfa mafiska bergarter
Grönskiffer	Klorit, Epidot, Amfibol	Förskiffrad, finkornig	Metamorfa mafiska bergarter
Leptit	Fältspat, Kvarts	Massformig, finkornig	Metamorf vulkanit
Fyllit	Klorit, Glimmer	Förskiffrad, utbildade förklyftningsplan, fin- medelkornig	Metamorf sand & lersten
Glimmerskiffer	Glimmer, Klorit	Förskiffrad, utbildade förklyftningsplan, fin- medelkornig	Metamorf sand & lersten
Kvartsit	Kvarts	Bandformig, finkornig	Metamorf sandsten
Kvartsitskiffer	Kvarts, Fältspat, Glimmer	Skiffrig, förklyftad, finkornig	Metamorf sand & lersten

Gemensamt för de inom nationen förekommande kristallina bergarterna som omfattar alla de tre större enheterna är att frostsprängning och nednötning från strömmande vatten är av mindre betydelse, se även tabell i bilaga 1.

Frostsprängning i skvalpzonen strax ovanför medelvattenytan kan ge ytliga skador även på kristallint berg. Frostsprängning kan även ha en uppluckrande effekt på mycket småblockigt berg med bred förekomst av sprickfyllnad eller krossmaterial.

Då vi primärt är intresserade av mekaniska drivkrafter av sådan storlek att lager av block i en storblockig ovittrad magmatisk bergmassa kan bortforslas av överströmmande vatten har det funnits överflödigt att även samtidigt behandla frostsprängning.

Samma förhållande kan inte antas gälla vid erosion av de sedimentära bergartstyperna där nednötning av en *in situ* intakt bergmassa till följd av strömmande vatten kan få betydande omfattning enligt internationella referenser.

Det finns betydande skillnader i fråga om blockstorlek och planparallelskiktning mellan fjällkedjans bergarter och urbergsskölden där fjällkedjans bergmassor kan bestå av små block i decimeterskala sprungna ur en stratigrafiskt uppdelad, tidigare sedimentär, bergmassa. En tätt uppsprucken bergmassa är ovanligt i urbergsskölden annat än runt storskaliga strukturer så som sprick- och skjuvzoner. I tektoniserade bergspartier som i fjällkedjans skollor eller över sprickzoner i urberggrunden fylls ofta sprickorna av vittringsprodukter och finkrossat berg, för urberggrunden även sprickfyllnad, vilket lämnar möjlighet för frostsprängning och lösgöring av block från bergmassan. I en älvfåra torde en sådan bergmassa karaktäriseras av många öppna sprickor i ytan, i en sprängd kanal torde öppna sprickor kunna åstadkommas över tid.

En annan skillnad från urberggrunden är den planförskiffring som följer med några av fjällkedjans bergarter så som amfiboliter, metaråvackor och lågmetamorfa skiffrar. Vilket innebär att de uppträder som är planförskiffrade eller starkt folierade massor där hela massan består av långsmala block i små dimensioner tätt sammanpackade till en sammanhängande massa. Denna typ av bergmassor kan trots den relativt ynkliga blockstorleken som massa vara mindre hydraulisk konduktiv än en bergmassa bestående av en storblockig granit.

3.2 ORSAKER TILL BERGEROSION

Till följd av den höga interna sammanhållningen i kristallina bergarter måste erosion av denna typ av bergmassor ske genom lossning och borttransport av intakta block ur en redan uppsprucken bergmassa så som den förekommer *in situ*. Kristallina bergarters tryck- och draghållfasthet är hög i förhållande till den tryckhöjd som kan åstadkommas vid tappning av spillvatten för nationella förhållanden, se kapitlet ovan. Därmed saknas tillgänglig kraft för undanpressning eller nedslipning av en bergmassa som endast består av fullkomligt passade bergblock. Hela erosionsfenomenet pågår istället i sprickplanen mellan blocken.

Det har medelst laboratorieförsök visats att turbulensen i energiomvandlarbassänger ger upphov till tryckfluktuationer som kan överlagra varandra. Där det tryck som utverkas på ett blocks ovansida längs bassängens gränsyta inte behöver ha samma magnitud eller polaritet som de tryck vilka överförs via blockets omgivande sprickor in under bottenytan på blocket. Differensen i våghastighet mellan tryck som utverkas i öppna utrymmen och de i slutna gör att tryckavlastning inte sker samtidigt, med resulterande lyftkrafter (Liu et al., 1998). Även vid strömmande vatten har det visats att för ett uppstickande block blir det dynamiska tryck som utverkas på blockets ovansida lägre än det tryck som förs ned via blockets omgränsande sprickplan till blockets undersida (Reinius, 1968).

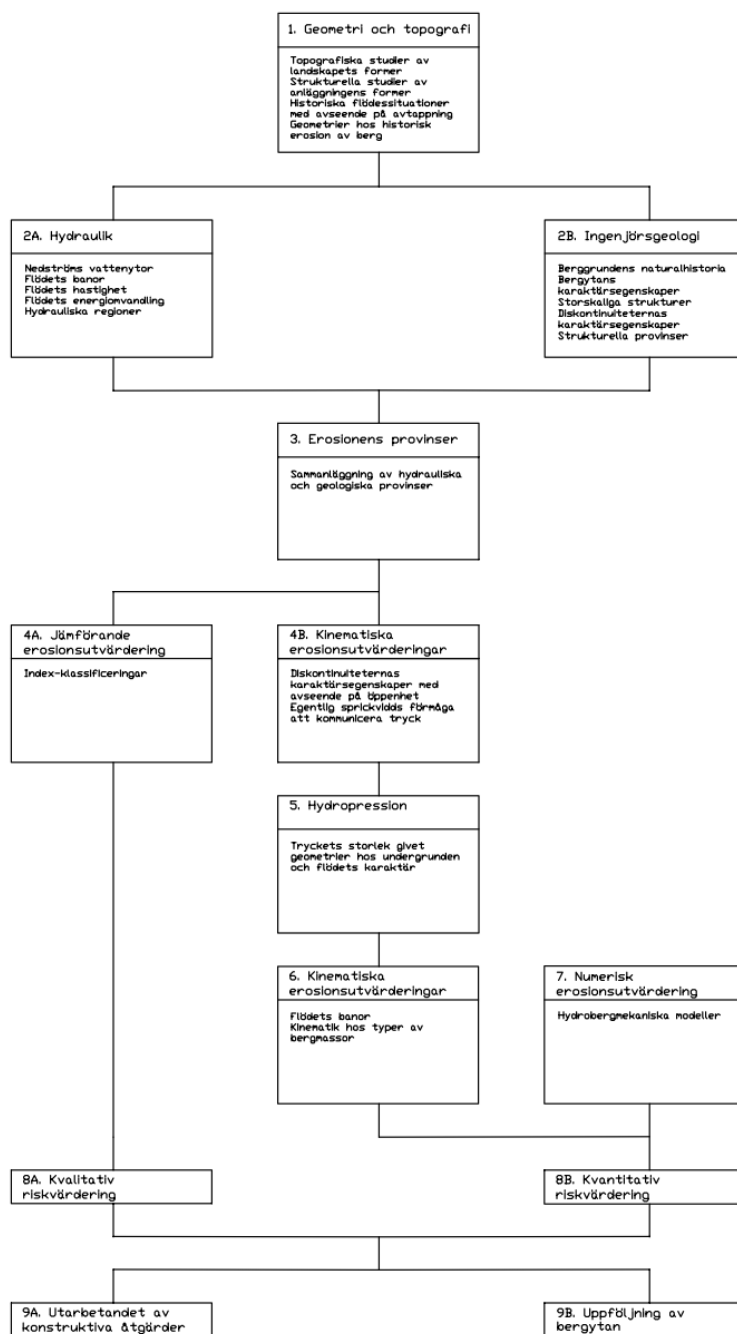
Teorierna som beskriv av bland annat av Liu et al. (1998) och Reinius (1968) skall inte ses som analoga. Liu et al. (1998) beskriver tryck orsakade av turbulens i en bassäng omgiven av en principiellt slät gränssyta. Typexempel är betongklädda energiomvandlarbassänger med fallande vattenstrålar eller vattensprång som tryckskapande process. Reinius (1968) beskriver strömmande vatten och visar i vilken grad dynamiska tryck överförs till en stiliserad bergyta. Då flödet inte är laminärt bör det även för Reinius fall utöver det dynamiska trycket finnas en underordnad turbulens som ger upphov till fluktuerande tryck. Vare sig Liu et al.'s (1998) modell eller Reinius (1968) modell kan ej nyttjas rakt av för prognostisering av erosion vid nationellt frekvent förekommande förhållanden. Detta beskrivs mer ingående i kapitel 3.3.4 där också en fysikalisk modell som möjliggör beräkning av sammanlagd lyftkraft skisseras.

För att rörelse av blocket skall kunna ske behöver dock passningen av bergblocken understiga sprickråheten i både liten och stor skala runt blocket. Förekomst av sprickfyllnad utgör ett specialfall. Sådan förekommer i hård och mjuk form och behöver för att rörelse av blocket ska kunna ske, vara bredare än sprickråheten för fallet där blocket pressar gentemot sprickfyllnaden. För hård sprickfyllnad så som bergflisor, sand, kalcit, klorit, kvarts, epidot, pyrit, gips, adaluria gäller att kraftöverföringen behöver vara högre än sprickfyllnadens tryckhållfasthet, vilket är ett förhållande som ytterligare behöver utvärderas. För mjuk sprickfyllnad så som olika former av lermineral och möjligen viss förekomst av adaluria gäller att denna kan tänkas spolats ur sprickplanen. Detta gäller speciellt vid förekomst av sprickzoner med uppkrossade partier och tillhörande sprickfyllnad och där kvarlämna illa passade bergblock mot sprickzonens begränsningsyta. Tjock sprickfyllnad är förhållandevis ovanligt för urberggrunden som helhet utan förekommer i enskilda sprickzoner eller förkastningar, undantaget runt malmer, och utgör därmed ett specialfall att behandla som en enskild enhet.

Givet denna utläggning postuleras därmed att det är en dålig passning av bergblocken i bergmassan som utgör huvudorsaken till erosion av bergmassan och som medför att hydraulisk last kan överföras till blocken och därmed slita bort dem från bergmassan. De faktiska egenskaperna hos passningen, sprickfyllnaden och sprickytan samt processerna som överför tryck från det strömmande vattnet till sprickplanen och i vilken grad detta tryck kan kommuniceras genom bergmassans sprickor är därav av hög vikt att undersöka för att bedöma erosionsrisken.

3.3 SYSTEM FÖR ATT BEDÖMA EROSION AV BERG

För att behandla ingenjörsvetenskapliga frågor kring hydrauliska byggnadsverks förmåga att inducera erosion i en bergmassa krävs sammanlagd lärdom från en mängd vetenskapsgrenar. I figur 2 redovisas en principfigur över vetenskapsgrenar och hur de är beroende av varandra för att möjliggöra en kvalitativ eller kvantitativ riskvärdering av erosion i berggrund.



Figur 2 Principfigur över vilka vetenskapsgrenar som behöver nyttjas för att kunna utföra prognosticerande kvalitativa eller kvantitativa studier av erosionspotential hos bergmassor. Fritt efter egna efterforskningar.

För att bygga en nationellt tillämpbar metodik för kvantitativ utvärdering av risken för erosion behövs i första hand utökad kännedom om sprickviddens betydelse för att fortplanta de tryck som strömmande vatten ger upphov till. I andra hand krävs utökad kännedom om de hydraulisk inducerade tryck som uppkommer över varierande geometrier hos undergrunden och av flödets typ. Orsakerna finns beskrivna i kapitlet nedan.

Bedömning av karterade anläggningar enligt kvalitativa studier, se figur 2, behandlas i denna rapport genom Annandale's erosionsindex (1995) i enlighet med projektets ursprungliga beskrivning. Bedömning av karterade anläggningar enligt kvantitativa metoder, se figur 2, behandlas inte i denna studie.

Som figur 2 antyder finns två möjligheter till utvärdering av erosion:

- Indexmetoder
- Kinematiska metoder

Vid nyttjandet av indexmetoder klassas energiförluster vid olika fall av strömning över en undergrunds yta gentemot ett geologiskt index över samma undergrunds yta. Undergrunden behöver inte nödvändigtvis bestå av berg då en del författare även behandlar jordarter och komplexa jordmaterial. Fortsättningsvis används beteckningen index-metoder för denna typ av erosionsutvärdering.

Den andra typen av metod bygger på kinematiska studier på typblock av berg. Lyftkrafterna orsakas av strömmande eller fallande vattens förmåga att skapa tryckregioner där trycken dels utverkar sig på blockets överyta och dels kommuniceras genom öppna sprickor som omsluter blocken. Fortsättningsvis används beteckningen kinematiska metoder för denna typ av erosionsutvärdering.

Historisk utveckling av undersökningar kring erosion för vattenbyggnadsändamål, prognostisering med index-metoder och kinematiska metoder behandlas nedan.

En metod som är under utveckling är "3D-blockteori", vilken kortfattat innebär en metodik där de mest flyttbara blocken identifieras ("låsblock", eng. "key-block"), potentiella felmoder bestäms samt att blockstabiliteten utreds. Det antas att det finns ett låsblock i den undersökta delen av bergmassan, och att erosionen startar med att låsblocket flyttas från sitt läge d.v.s. eroderar. Ett kriterium för att erosion skall kunna ske är med andra ord att låsblocket eroderar. En beskrivning av denna metodik finns i George (2012).

3.3.1 Historisk utveckling av prognostiseringsverktyg

Med ett undantag behandlas erosion av berggrunden vid hydrauliska strukturer vetenskapligt endast i internationell litteratur. Översiktligt har den internationella historiska utvecklingen gått från undersökningar av bergmaterialet, till utarbetandet av index-metoder till utarbetandet av kinematiska metoder.

De tidiga internationella publicerade studierna har tenderat att vara systembyggare där bergmaterialet men ej vattenflödet undersökts på varierande sätt. Undersökningarna har utförts vid hydrauliska strukturer, företrädesvis vattenkraftverk där erosion har skett. Se Woodward (1985), REMR-GT-3 (1988–1998), Pitsiou (1990) och Cato (1991). Som en tidig förelöpare till att även intressera sig för den hydrauliska lasten måste Reinius (1968) nämnas. Reinius presenterar arbeten utförda av Montgomery (1984) där tryck runt block utvärderas för en bergmassa som utsätts för strömning parallellt med bergytan. Resultaten är intressanta och utgör nyckeln till hur kinematiska studier av erosion måste hanteras. Utöver detta är dessa de enda vetenskapliga studier av naturföreteelsen som utförts nationellt. Woodward (1985) kan även nämnas där han anger en högre

sprickfrekvens än 4 sprickor per meter samt en högre hydraulisk konduktivitet än 5 Lugeon hos berggrunden som kvalifikationer för eroderbarhet.

Index-metoderna utarbetades från 1980-talet till 2000-talet av först Kirsten (1982, 2000) sedermera Annandale (1995, 2006). Se även Dooge (1993). Denna metodik skiljer sig från tidigare systembyggare genom att koppla ett geologiskt index till uppskattad energiförlust främst över de bägge principiella flödessituationerna fallande vattenstråle eller fullt utvecklat vattensprång. Annandale (1995, s. 474, se även fig. 2) rättfärdigar användandet av energiförlust som hydraulisk drivkraft med att "magnituden av tryckfluktuationerna ökar med energiförlusten", efter att ha citerat undersökningar av tryckfluktuationer i vattensprång av Fiorotto (1992a).

Efterföljande de tidiga index-metoderna har ett flertal utvecklingar skett. I rapport ERDC/GST TR-08-22 har Annandale's (1995) erosionsindex nyttjats och utvärderats genom statistiska metoder med underlag från ett stort antal konstaterade fall av erosion i USA. I rapporten presenteras en metodik som möjliggör att förutsäga graden av erosion som en funktion av volym och tid av spillvattenflöde mot Annandale's (1995) geologiska index.

Ett sentida tillskott till index-metoderna presenteras av Pells (2016, 2017). I Pells (2017) presenterar ett geologiskt index uppbyggt från strukturgeologi och GSI (Marinos 2005) med utvärderingar från ett stort antal vattenkraftverk i Australien, Sydafrika och USA. Pells (2016, 2017) undersöker även graden av erosion och sin metodiks skattning mot andra tänkbara geologiska klassificeringssystem. Pells (2017) ger även jämförelser mot andra författares skiljelinjer för erosion och en diskussion kring lämpligheten med att utvärdera erosion efter energiförluster i strömning. Diskussionerna i både avhandlingen och publikationen är väl värda att gå igenom.

Pells (2016, 2017) system är utvecklat för hård kristallin berggrund och inriktar sig på den storskaliga strukturgeometrin istället för bergmassans hårdhet, sprickavstånd och sprickytornas egenskaper. Detta begränsar starkt möjligheterna till alternativa tolkningar vid geologisk kartering.

Den senare delen av Pells (2016) avhandling återgår till samma typer av studier som utförts av Montgomery (1984) och Reinius (1986). Där faktorer för tryck utverkade på typblock i olika positioner tas fram.

3.3.2 Index-metoder och vår berggrunds särskilda beskaffenhet

Den internationella forskningen som lett fram till index-metodernas behändiga potensfunktioner som används av Annandale (1995), Kirsten (2000) och Pells (2016, 2017a) har som sina fördelar sina voluminösa laboratorieresurser samt tillgång till fallstudier från ett stort antal anläggningar grundlagda på högst varierande geologisk historia, främst från Nordamerika, Sydafrika och Australien. Från ett nationellt perspektiv blir ett direkt övertagande av ett sådant system vanskligt. Speciellt kan här hänvisas till det rika bildmaterial som ges av Pells (2016) där det framgår att bergmassorna vid mer än en station måste karaktäriseras som hydrauliskt genomsläpplig. Detta är inte fallet med berggrunden hos de 13 besökta anläggningarna undantaget de anläggningar som består av med bankningsplan försedd naturlig älvfåra.

I den svenska berggrunden finns normalt 3–4 sprickgrupper som förekommer med varierande frekvens. De brantstående sprickgrupperna följer ofta landskapets topografi, t ex parallellt med älvdalarna. Sprickfrekvensen inom brantstående sprickgrupper är tämligen homogen utanför större deformationszoner. Flacka sprickor förekommer normalt också, men med högre frekvens i den övre delen av berggrunden (så kallade bankningssprickor). Därmed finns minst två sprickgrupper som kan orsaka erosion av strömmande vatten. Speciellt de flacka bankningsplanen kan ha stor utbredning, men avslutas oftast mot större brantstående sprickor (Carlsson, 1979).

Därmed finns speciella geologiska förutsättningar i Skandinavien (främst utanför Fjällkedjan) som inte alltid återfinns internationella studier.

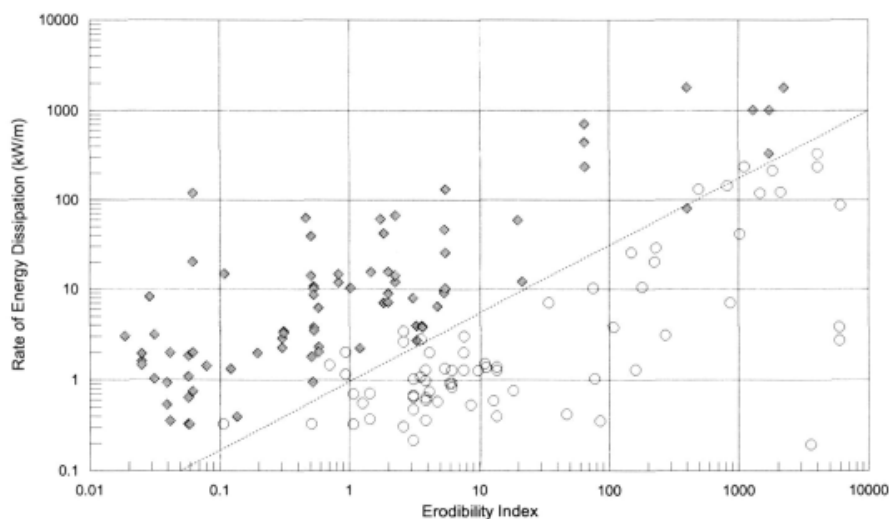
3.3.3 Uppbyggnad av erosionsindex

Erosionsindex beskrivs för att utöka läsarens förståelse av systemets uppbyggnad. En diskussion angående osäkerheter i systemets hydrauliska utvärdering finns i kapitel 5.5 nedan. Se även kapitel 3.3.2 ovan angående hydraulisk konduktivitet i bergmassan.

Erosionsindex söker koppla den energiförlust som sker vid strömning av vatten gentemot ett geologiskt index. För ett stort antal klassificerade anläggningar bildar sedan observerade erosionsskador en skiljelinje mellan vilka berggrunder eller komplexa jordmaterial klassade enligt det geologiska indexet som motstår den hydrauliska last som energiförlusten är indikativ på.

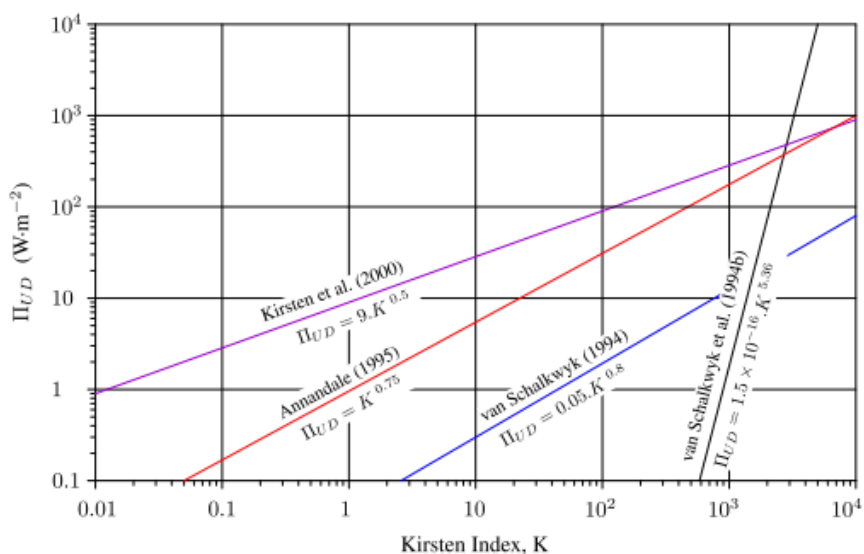
Detaljer kring uppbyggnaden och den hydrauliska lasten hos Annandale's (1995) erosionsindex finns att tillgå i Annandale (2006), kap 4 & 5. De ingående faktorerna i det geologiska indexet, masstyrketalet, sprickgruppstalet, sprickråheten, omvandlingstalet och strukturtalet är dock direkt övertagna från Kirsten (1982).

I figur 3 visas det ursprungliga erosionsindexdiagrammet från Annandale (1995). Den höga graden av predicering över ett geologiskt spann som sträcker sig från finkorniga jordarter till hårda kristallina bergmassor övertygade både författarna och torde även ha övertygat andra läsare om metodens förträfflighet.



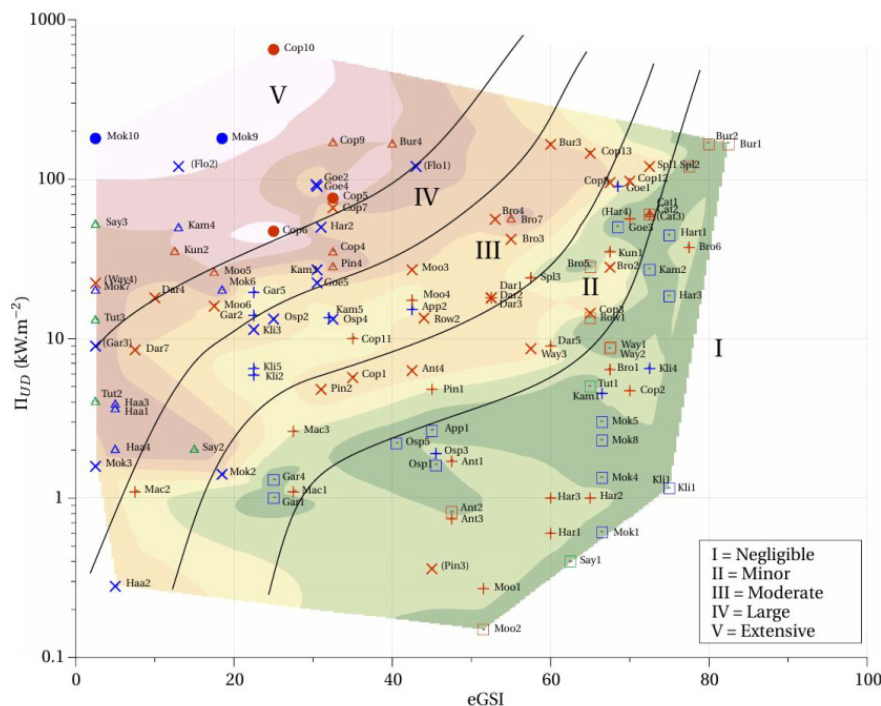
Figur 3 Annandales erosionsindex från Annandale (1995).

En jämförelse med andra författares skiljelinjer mellan erosion och energiförlust vid index-studier för sina undersökta anläggningar visas i figur 4. Som synes är graden av samstämmighet låg.



Figur 4 Jämförelse mellan skiljelinjer för erosion av jordarter, komplexa jordmaterial och bergmassor för andra författare. Vi saknar tillgång till van Schalkwyks publikationer. Figuren tagen från Pells (2017).

Pells index-metod skiljer sig som tidigare nämnt från de andra index-metoderna, och diagrammet har ett annorlunda utseende, eftersom det är uppdelat (färgkodat) efter skadegrad, beroende på att eGSI används som geologiskt index. Se figur 5 nedan.



Figur 5: Pells eGSI-diagram motsvarande Erosionsindex. (Pells, 2017).

Erosiv effekt från vattnet

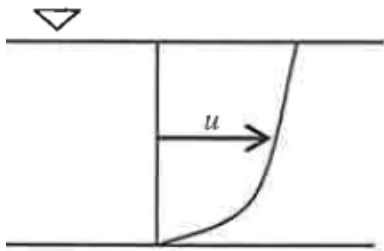
Den erosiva effekten i vattnet beskrivs genom de energiförluster som utverkas på det strömmande eller fallande vattnet över en sträcka. Den allmänna definitionen beskrivs genom.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} \quad [\text{kW/m}^2]$$

där ΔE är den energiförlust som sker över den aktuella ytan, som har längden L (i strömriktningen). γ och g är konstanter enligt:

$\gamma = 9820 \text{ kg/m}^2\text{s}^2$	vattnets tunghet
$q = 1000 \text{ kg/m}^3$	vattnets densitet
$g = 9,82 \text{ m/s}^2$	tyngdaccelerationen

Närmast botten, i gränsskiktet mellan vatten och berg eller betong, uppstår alltid ett turbulent skikt. Detta p.g.a. av ojämnheter i bottenytan, d.v.s. ytråheten (Annandale, 2006). Turbulensen ger upphov till tryckfluktuationer, men om det turbulenta skiktet endast är en mycket liten del av vattendjupet är dessa tryckfluktuationer små. Då består belastningen från vattnet på bottenytan endast av skjuvkrafter p.g.a. av hastighetsfördelningen över vattendjupet, d.v.s. att hastigheten är närmast noll vid botten och ökar sedan, se figur 6.



Figur 6: Typisk hastighetsfördelning över djupet, vid kanalströmning (Annandale, 2006).

Om det turbulenta skiktet istället utgör en relativt stor del av vattendjupet, kan stora tryckfluktuationer uppstå. Belastningen från vattnet är då generellt mycket högre än då mindre turbulens förekommer. Turbulens är därmed en indikator på energiomvandling, d.v.s. belastning på undergrunden.

Under senare tid har kritik framförts i litteraturen gentemot användandet av just energiförluster som mått på hydraulisk last. Detta beskrivs ytterligare i kapitel 3.3.4, hydraulisk last på undergrunden.

Undergrundens hållfasthet

Undergrundens hållfasthet för bergmassor beskrivs genom matematiskt genom faktorer för sex bergmekaniska storheter. I formen.

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s$$

Där M_s är en empiriskt framtagen numerär för den interna sammanhållningen hos bergarten. För bergarterna som undersöks i denna rapport kan masstyrketalet beräknas genom linjär interpolation och ställas upp som en linjär funktion där $M_s = 70 + 1,9811 \times n \leq 280$ där n är tryckhållfastheten i bergarten i antal megapascal över 106 MPa. Blockstorlekstalet K_b beskrivs som en kvot av den allmänt förekommande bergmekaniska storheten RQD och ett sprickgruppsnummer som beskriver antalet spricksystem i bergmassan J_n . Numerärerna för J_n är direkt övertagna från Kirsten (1982).

Sprickyornas egenskaper K_d beskrivs av en kvot av de bergmekaniska storheterna sprickyornas råhet J_r och sprickbeläggningen karaktär J_a . För sprickbeläggningens karaktär listas även numerärer för sprickfyllnadstalet beroende på graden öppenhet hos sprickyorna, vilket även möjliggör karaktärisering av bergmassans hydrauliska öppenhet. Den sista faktorn J_s anger dominerande sprickgrupps riktning i förhållande till vattenflödets riktning och dominerande sprickgrupps skalförhållande till sekundär sprickgrupp. Numerärerna är övertagna från Kirsten (1982).

Sammantaget kan det geologiska indexet för bergmassor skrivas.

$$K = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

Numerärer för faktorerna samt faktorprodukten finns att tillgå i Annandale (1995, 2006).

Genom att det geologiska indexet beskrivs genom faktorer blir dess produkt, det geologiska indexet, nödvändigtvis logaritmiskt. Detta medför speciellt krav gällande ett lämpligt omfång av stationsutfall att basera en skiljelinje mellan tillräcklig energiförlust från det strömmande vattnet för att utbilda erosion och otillräcklig. I.e. för en gynnsam studie skulle krävas stationsutfall med låg till hög grad av erosion från ett vitt spann av geologiska index. Index-metodernas funktionssätt diskuteras vidare i kapitel 5.5.

3.3.4 Hydraulisk last på undergrunden

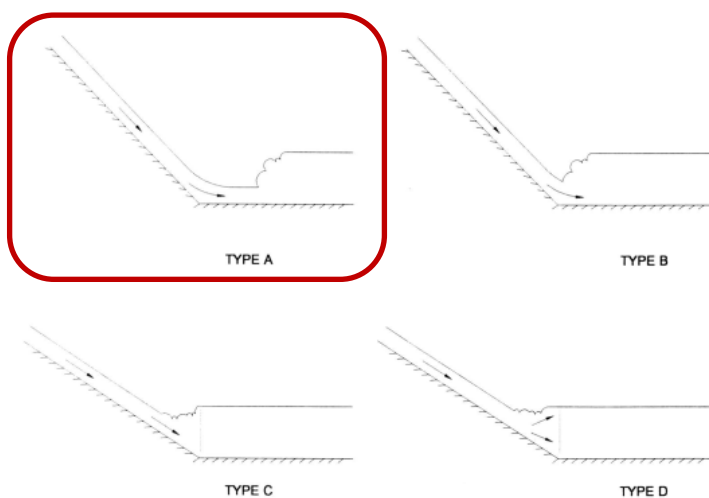
Index-metoderna söker korrelera energiförluster vid olika strömningsförhållanden mot ett geologiskt index (se speciellt Pells (2017, s. 3) för en diskussion kring energiförluster). Sätt att beräkna energiförluster för typfallen "vattensprång", "fallande vattenstråle", "plötslig riktnings-förändring" och "kanalströmning" beskrivs nedan. Dessa utgör sätt att definiera den erosiva lasten på undergrunden enligt konventionell metodik för index-metoderna (Kirsten, 1982; Annandale, 1995; Pells, 2017). Beräkningar och figurer är tagna från (Annandale 1995, 2006).

Sist i kapitlet diskuteras lämpligheten i att använda just energiförluster som mått på hydraulisk last.

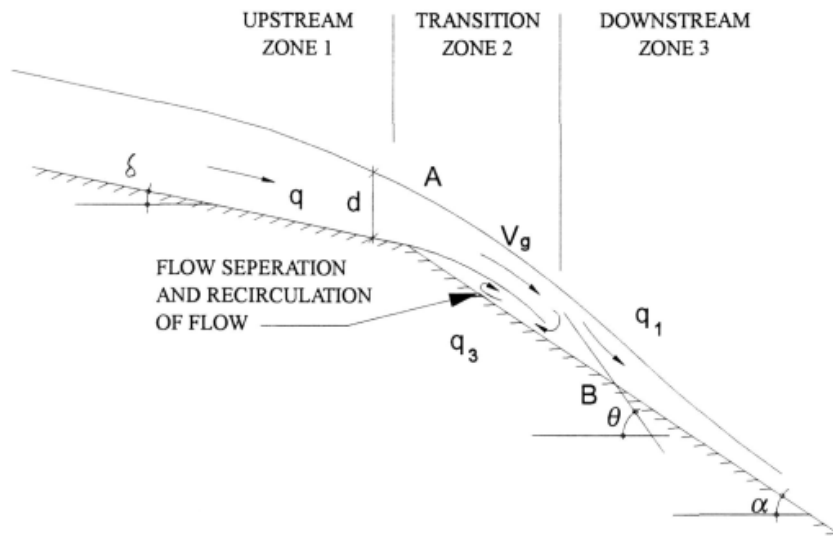
Energiförluster

Vid fallen vattensprång och fallande vattenstråle åtgår en stor del av tillgänglig energi som energiförlust emedan strömningsmotståndet vid kanalströmning endast utgör en mindre del av tillgänglig energi.

Figur 7 visar principskisser för vattensprång, olika typer, beroende på hur högt nedströmsvattenstånd som antas råda. Typ A är det som används i Erosionsindex, d.v.s. det finns ett härlett samband för energiförlusten över vattensprång typ A. Men, det är naturligtvis möjligt att härleda motsvarande uttryck för de andra typerna.



Figur 7: Principskiss för vattensprång, olika typer. Typ A är det som används i Erosionsindex (Annandale, 1995).



Figur 9: Principskiss för plötslig riktningsförändring (Annandale, 1995).

$$P_{erosiv} = \gamma q \left(\left(\frac{1 - \cos(\theta - \alpha)}{1 + \cos(\theta + \alpha)} \right) K_1 \frac{v_g^2}{2g} + s_f L \right) \quad \text{ekv.3}$$

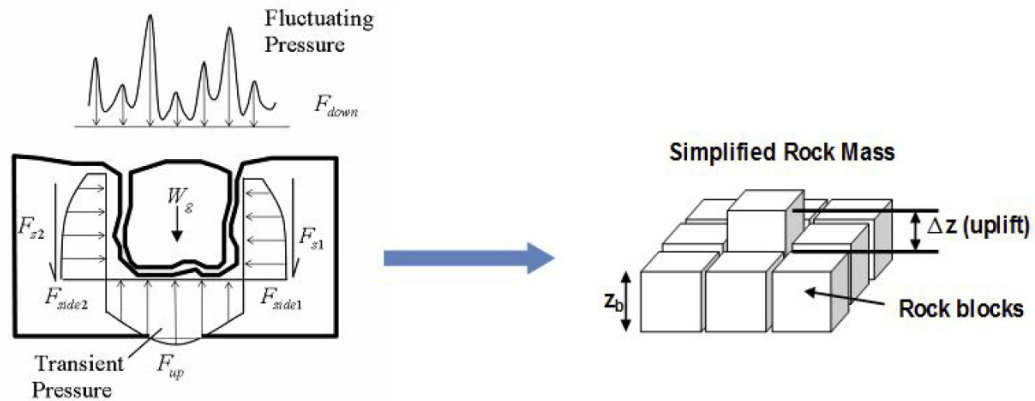
Erosion genom plötslig riktningsförändring används inte vid utvärdering i detta projekt, eftersom det inte förekommer sådana fall.

Kanalströmning innebär i detta fall strömning parallellt med botten, med små inslag av turbulens, d.v.s. det turbulenta skiktet är endast en liten del av vattendjupet. Endast viss ytråhet antas finnas, d.v.s. ingen storskalig råhet eller oregelbunden geometri. Typfallet är en kanal med slät yta (betong) eller med ett vattendjup betydligt större än den absoluta råheten. Den erosiva effekten i vattnet vid kanalströmning beräknas därefter genom.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = \gamma q s_f = \gamma q \frac{v_1^2}{M^2 R^{4/3}} \quad \text{ekv. 4}$$

där s_f är friktionslutningen, d.v.s. lutningen på energilinjen.

För fallande vattenstrålar har mycket arbete utförts av Bollaert (2003a, 2003b). Där illustreras en erosionsprocess till följd av tryckfluktuationer, i en bergmassa där det förekommer sprickor. Figur 10 är generell och visar vilka krafter som verkar på ett block vid belastning av fluktuerande tryck.



Figur 10: Fluktuerande tryck från strömmande eller fallande vatten över en uppsprucken bergmassa. Trycken introduceras i sprickorna. (Annandale, 2006)

Om det transienta flödet i sprickan leder till tryck som överstiger vattentrycket ovanför blocket, blockets egentynghet och friktionskrafterna längs sprickan, kommer blocket att förflyttas.

Bollaert (2002) tog fram ett uttryck för att beräkna huruvida ett block kan flyttas från sitt läge i en matris av block i en uppsprucken bergmassa, d.v.s. block som avskiljs av sprickor, till följd av en tryckimpuls (eng. "dynamic impulsion"). Detta gjordes för en fallande vattenstråle, inte för några andra strömnings-förhållanden.

Det gjordes genom att sätta upp kraftbalansen mellan alla ingående krafter som verkar på blocket, se figur 10: de pulserande krafterna p.g.a. fluktuerande tryck i sin tur p.g.a. turbulent strömning, blockets vikt och friktionskrafterna vid blockets sidor (beror av ytråhet m.m.).

Höjden som blocket kan lyftas till följd av tryckimpulsen kan uttryckas som:

$$h_{up} = \frac{v_{\Delta t}^2}{2g} \text{ [m]}$$

där $v_{\Delta t}^2$ är medelhastigheten (vertikal) hos blocket under den korta tiden Δt som impulsens verkar.

Det kan visas att den effekt som krävs för att lyfta blocket detta avstånd är:

$$\frac{E}{\Delta t} = \frac{\left(\int_0^{\Delta t} (F_{up} - F_{down} - W_g - F_{s1} - F_{s2}) dt \right) \cdot h}{\Delta t} = F_{\Delta t} \cdot \frac{h}{\Delta t} = F_{\Delta t} \cdot v_{\Delta t}$$

Efter vidare härledning, där uttryck för dynamiska tryck infogas, kan ett uttryck för lyfthöjden h_{up} tas fram:

$$h_{up} = \left[2 \frac{(x_b + 2z_b)^2}{c} \right]^2 \cdot \frac{1}{2g \cdot x_b^4 \cdot z_b^2 \cdot \rho_s^2} \cdot \left[C_I \cdot \phi \cdot \gamma \cdot \frac{V_j^2}{2g} \cdot x_b^2 - (\gamma_s - \gamma) \cdot x_b^2 \cdot z_b - F_{sh} \right]^2$$

där $x_b = y_b$ och z_b anger blockets geometriska mått, γ_s och γ anger enhetsvikt för berg respektive för vatten, V_j är vattenhastigheten in i bassängen. F_{sh} är den totala

skjuvkraften på sidorna om blocket. C_I och ϕ är konstanter som beror på turbulens och på möjlighet för tryck att kunna kommuniceras i sprickorna.

Bollaert (2002) har sedan tagit fram kriterier för att bestämma om block i uppsprucken bergmassa kommer att förflyttas ur sin position, med andra ord om erosion kommer att ske eller inte, se figur 11.

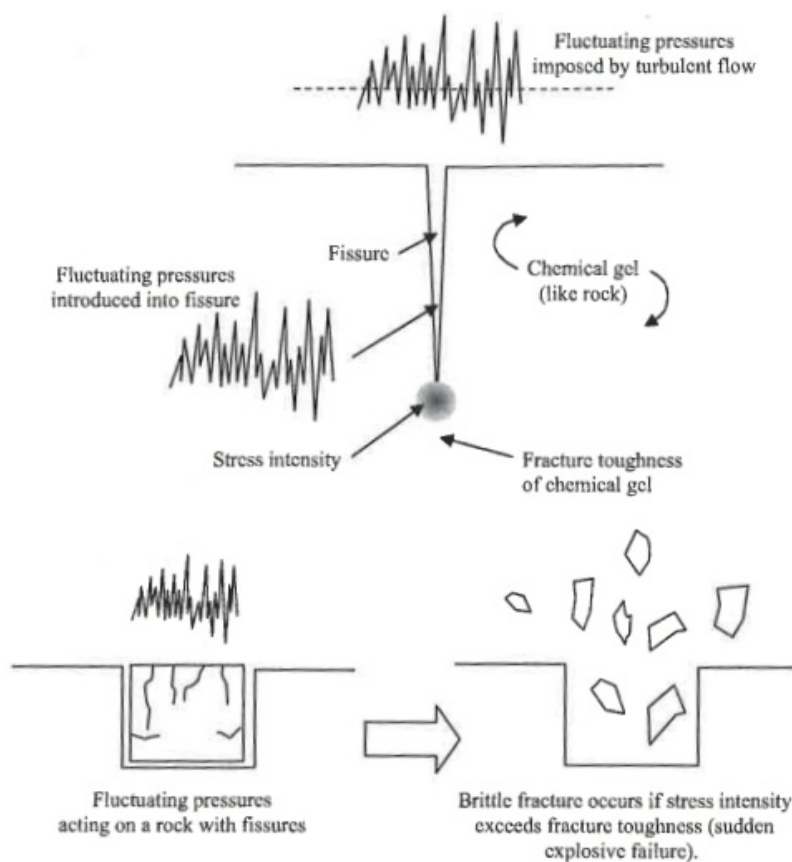
$\frac{h_{up}}{z_b} \leq 0.1$	Rock block remains in place.
$0.1 < \frac{h_{up}}{z_b} < 0.5$	Rock block vibrates and most likely remains in place.
$0.5 \leq \frac{h_{up}}{z_b} < 1.0$	Rock block vibrates and is likely to be removed, depending of ambient flow conditions.
$\frac{h_{up}}{z_b} \geq 1.0$	Rock block is definitely removed from its matrix.

Figur 11: Kriterier för att bedöma potentiell erosion till följd av tryckimpuls (Bollaert, 2002).

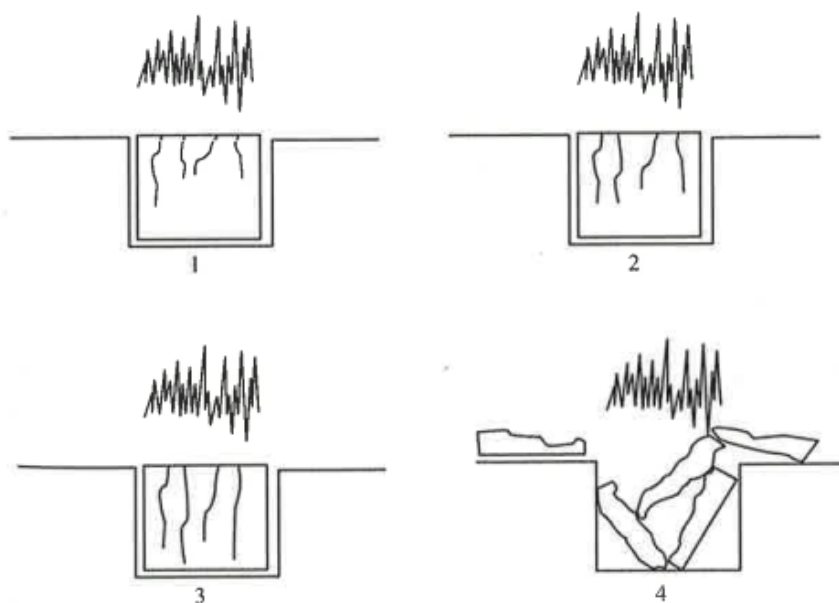
Det är viktigt att nämna att detta är framtaget för strömningsförhållandet "fallande vattenståle", och gäller endast för det.

I en energiomvandlarbassäng (eng. "plunge pool") kan det under beroende på vattendjup uppstå resonans, som leder till en förstärkning av trycket i bergsprickor. Detta kan då leda till uppsprickning av bergmassan. Beroende på tryckets storlek, kan bergmassan gå till brott enligt de två nedanstående förloppen, vilka illustreras nedan i figur 12 och figur 13.

- "Sprött brott i bergmassan" (eng. *brittle fracture*), figur 12, som innebär en plötslig uppsprickning av ett block - ett närmast explosionsartat förlopp, liknande när glas krossas eller gjutjärn brister.
- "Utmattning av bergmassan" (eng. *fatigue failure*), figur 13, som sker genom successiv nedbrytning av bergmassan genom ökad sprickbildning över tid. Då bergmassans tröskelvärde för hållfasthet har överskridits, delas blocket upp i flera delar.



Figur 12: Erosion genom s.k. "sprött brott i bergmassa", som sker som en plötslig uppsprickning av ett block ("brittle fracture"), (Annandale, 2006).



Figur 13: Utmattning av bergmassan till följd av fluktuerande tryck över tid ("fatigue failure"). (Annandale, 2006).

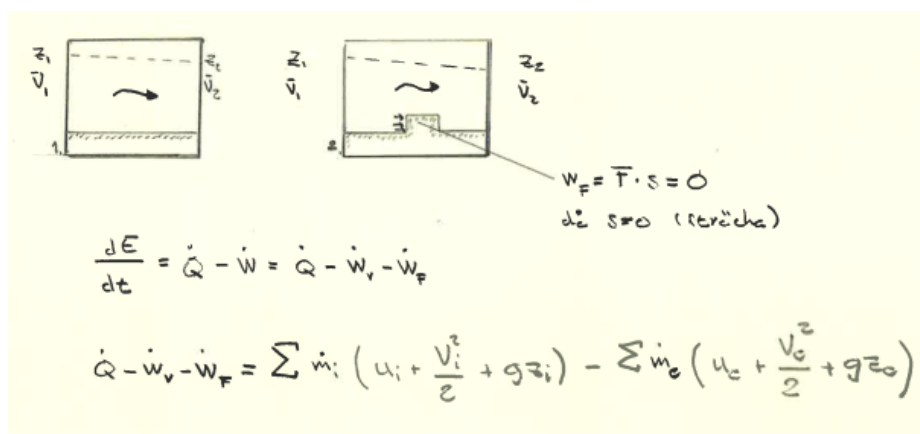
Diskussion om lämpligheten med energiförlust-måttet

Vid strömning över oregelbunden yta, där en del av det dynamiska trycket (hastighetshöjden) belastar bergytan, är det turbulenta skiktet en stor del av vattendjupet, upp till hela vattendjupet. Där bör en del av hastighetshöjden belasta bergytan. Det har förslagits att den erosiva effekten i vattnet då kan beskrivas genom (George, 2018).

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = \gamma q k \frac{v_1^2}{2g} \quad \text{ekv. 5}$$

Andelen av hastighetshöjden ansätts genom ett värde på förlustfaktorn k (0–1), men denna blir svår att ansätta *a priori*. Detta innebär att man skulle ta hänsyn till dynamiska effekter vid kanalströmning. Vi kommer nedan att återkomma till en alternativ metodik att utföra detta på.

Mått på fallförluster i svenska kraftverkstunnlar s_f finns framtagna. En direkt användning av dessa skulle ändå bli fysikaliskt tveksamt då strömningsmotståndet avser det interna motstånd i en vätska mot rörelse samt motståndet mot rörelse längs dess gränsyta. Motståndet är avhängigt vätskans viskositet samt begränsningsytans råhet över en sektion. Strömningsmotstånden sammanfogas över en sträcka av en kanal som strömningsförluster, vilka kan betecknas $s_f = I \times L$ där I är dimensionslöst tal för förlust per meter och L är längd på sektionen i meter. Idealistiskt kan strömningsförlusten liknas vid en energiåtgång som krävs för förflyttning av en mängd vatten nedströms, vilket resulterar i en sänkning av energinivån. Energiförlusterna åtgår principiellt i värmeproduktion, inte i arbete sprunget ur förflyttning av undergrunden.



Figur 14 Principfigur för energibevaring inom en kontrollvolym.

Principerna kan ställas upp enligt den generella ekvationen för energibevaring i en kontrollvolym. Arbete som utförs av strömmande vatten kan delas upp i visköst arbete som utförs av vätskan vid rörelse samt eventuellt mekaniskt arbete som utförs, till exempel vid förflyttning av block, eller rotation av ett skovelhjul.

Ytråheten som redovisas nedan i figur orsakar turbulens (en källa till erosion) och alltså ytterligare visköst arbete (vilket ger högre fallförlust s_f) emedan belastningen på blocket inte ger något utslag på fallförlusterna s_f då inget arbete utförs på blocket inom kontrollvolymen.

Detta implicerar att den hydrauliska lasten på undergrunden inte enbart kan utvärderas från ett medeltal på energiförluster över en kanalsträcka. För en oregelbunden undergrund måste en term även behandla dynamiska effekter.

Ett förslag till hur detta skulle kunna ske skisseras nedan genom att beskriva flödestillståndet med hjälp av Bernoullis strömningsmekaniska ekvation för strömning relativt en referensnivå.

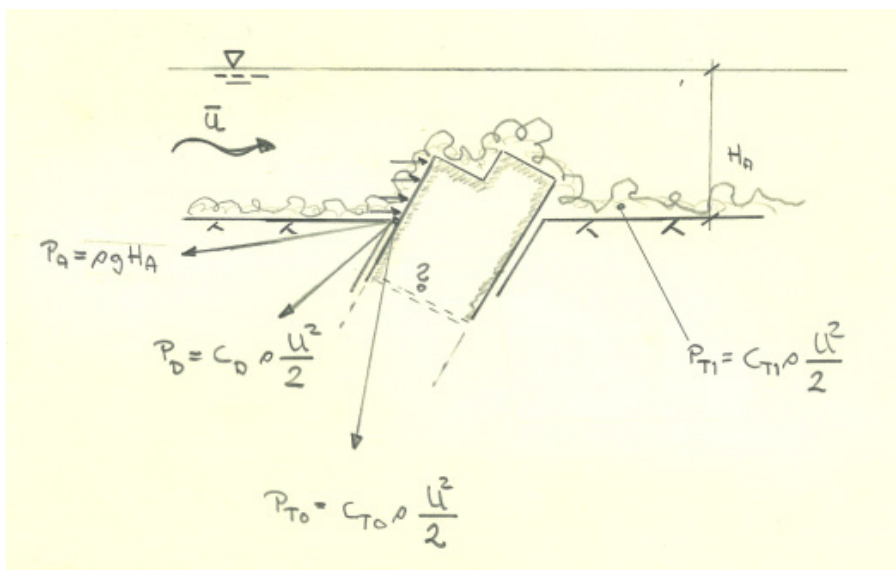
$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + z_2 + s_f$$

För två punkter längs en strömningslinje kan det statiska och dynamiska trycket beskrivas som ovan.

Ett block som sticker upp ur bergytan omgärdad av öppna sprickor som därmed är tillgängligt för utverkandet av hydrauliska tryck torde då inte enbart belastas av den turbulensproduktion mot begränsningsytan som strömningsförlusterna (s_f) är ett uttryck för. Utan, i högre grad, beroende av läge belastas av tryck sprungna ur det dynamiska trycket då flödet interagerar med blockets topografi. Det så kallade dynamiska trycket (e.g. Reinius 1986). Blocket belastas även i samtliga fall av det statiska trycket.

En kinematisk modell för rörelse kan ställas upp för ett enskilt block givet att blocket omgärdas av sprickor så breda att hydrauliskt inducerade tryck kan kommuniceras samt att blocket kan röra på sig utan skjuvning längs sprickytan. För utvärdering av erosionspotential bör man kunna anta att de största värdena av samtliga tryck överlagras varandra. De tryck som kommer verka på blockets undersida utgörs då av ett statiskt tryck (P_A), ett dynamiskt tryck (P_D) samt tryck från fallförlusternas turbulensproduktion (P_T). Trycket från turbulensen antas verka utan tidsförskjutning vid blockets bågiga sidor. Blockets ovansida antas vara trycklöst ($P_A + P_D = 0$). Största verkande tryck beskrivs då av.

$$P = P_A + P_D + P_T \quad [Pa]$$



Figur 15 Principfigur över tryckbelastningar på block. Oavsett geometri kommer bärrighetstryck (P_A), dynamiskt tryck P_D och turbulenstryck P_T kunna fortplantas via en spricköppning.

Det statiska trycket beskrivs av.

$$P_A = \rho \times g \times H_A \text{ [Pa]}$$

Det dynamiska trycket, beror på bergytans geometri och flödets bana gentemot denna geometri och måste tas fram experimentellt. Det dynamiska trycket som inträder i spricksystemen beskrivs ofta genom en tryckkoefficient C_D , från vilket det dynamiska trycket sedan beräknas ur.

$$P_D = C_D \times \rho \times \frac{\bar{U}^2}{2} \text{ [Pa]}$$

För strömmande vatten finns faktorer publicerade av Reinius (1986), Coleman (2003) och Pells (2016), se även Bollaert (2010). För fallande vatten finns faktorer publicerade av Melo (2006), Borghei (2008) och Manso (2009). För vattensprång finns faktorer publicerade av Toso & Bowers (1988) och Fiorotto (1992a).

Turbulenstrycket bör mätas och definieras i samma försök som det dynamiska trycket utvärderas i. Förslagvis efterföljande Pells (2016) vilken använder standardavvikelsen för det fluktuerande trycket. Andra avgränsningar är även möjliga.

$$P_T = C_T \times \rho \times \frac{\bar{U}^2}{2} \text{ [Pa]}$$

Ett alternativt sätt att uppskatta deras storhet kan dock göras efterföljande Reinius (1968). Reinius utgår från Darcy–Weisbach ekvation för strömningsförluster i rör. Denna ekvation används ofta även för kanalströmning. Reinius anger även uppmätta värden på friktionsmotstånd f från bergtunnlar, vilka kan användas för att uppskatta trycken från turbulensproduktionen. Darcy–Weisbach ekvation relaterar flödeshastighet U mot en friktionsfaktor f .

$$U = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{R s_f}$$

Där R är hydraulisk radie och s_f är friktionsförlust. Ekvationen kan skrivas om.

$$s_f = f \frac{1}{4R} \frac{U^2}{2g}$$

För en prismatisk kanal med stationärt flöde kan skjuvmotståndet mot gränssytan beskrivas som.

$$\tau_0 = \rho g R s_f$$

Skriver vi om ges.

$$\tau_0 = \rho f \frac{U^2}{8}$$

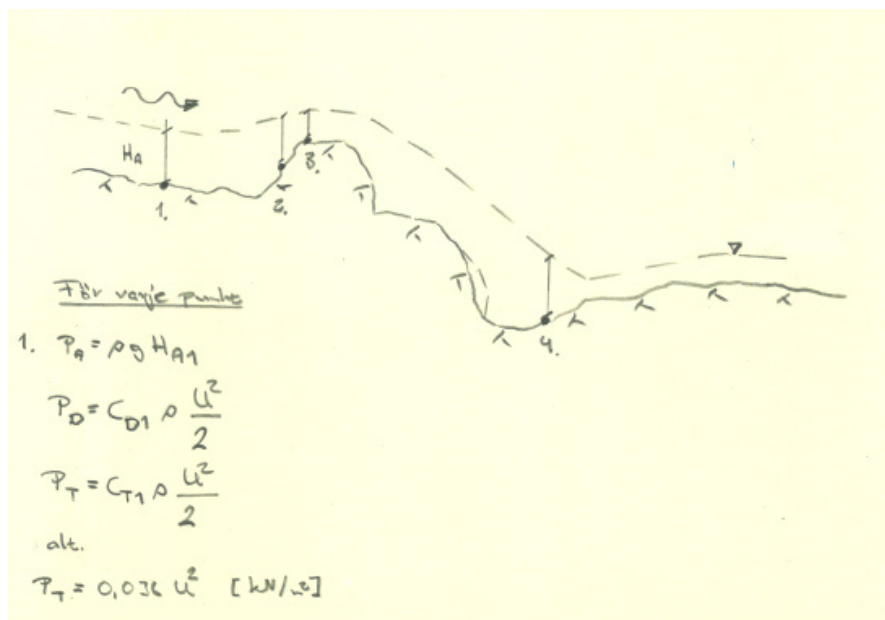
Strömningsmotståndet mot begränsningsytan ger upphov till turbulens vars resulterande tryck har definierats i olika studier (e.g. Blake 1970, Schewe 1983) som $p \text{ [Pa]} = \pm(3,2 - 3,6)\tau_0$. Detta ger då resulterande högsta tryck.

$$P_T = \pm 3,6\tau_0 = \pm 0,45\rho f U^2$$

Av Reinius angivna friktionsfaktorer $0,03 \leq f \leq 0,08$ och densiteten $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ges då tryck upp till.

$$P_T = \pm 0,036 U^2 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Där medelhastigheten $U \text{ [m/s]}$.



Figur 16 Principfigur för olika geometrier för vilka dynamisk och turbulent tryckfaktor behöver tas fram.

För att möjliggöra prognostisering av totaltrycket enligt denna modell med tre tryckinducerande processer behöver ytterligare arbete med att ta fram faktorer för det dynamiska trycket utföras, företrädesvis på horisontella bergytter. Utförda studier finns presenterade av Reinius (1968) och Pells (2016), se även Bollaert (2010). De studier som har utförts har använt olika spaltvidder mellan laboratorierepresentation av block och bergyta. Spaltvidden har betydelse för storleken på lyftkrafterna vilket visas av en studie på lyftkrafter inducerade under plattor (Frizell 2007).

4 Sammanställning av anläggningsdata och erosionserfarenheter

Enligt projektbeskrivningen i avsnitt 2.2 utfördes en inledande sammanställning av erosionserfarenheter genom insamling av information och anläggningsdata. I bilaga 2 finns en sammanfattning av den tabell som skickades ut till anläggningsägare för ifyllnad.

De mest relevanta (grundläggande) parametrarna är:

- geologi (bergart, sprickfördelning)
- fallhöjd över utskov (indirekt potentiell hydraulisk last)
- typ av avbördningsanordningar (skibord, "fritt fall", bottenutskov m.fl.)
- möjlighet till att sprida spillenergin över bergytan (reducera belastningen)
- uppgifter om ev. befintlig installerad energiomvandling (bassäng m.m.)

Det mesta av erforderliga data fanns redan tillgängligt hos anläggningsägarna men var innan projektet inte sammanställt för det aktuella syftet. En del data har bearbetas - t.ex. fanns uppgifter om fallhöjd över utskov endast indirekt i form av nivåer uppströms och nedströms utskovet.

Nämnvärt är att nämna att ifyllnad av anläggningsdata görs subjektivt, d.v.s. bakgrund och erfarenhet m.m. hos den person som fyller i tabellen, har sannolikt präglat resultatet i någon mån. Detta är högst naturligt. Exempelvis kan det vara så att om personen som fyller i tabellen inte känner till att någon erosion skett, kanske denne fyller i att "Ingen erosion har skett", fast erosion faktiskt kan ha skett. Detta är en effekt som är svår att helt eliminera, vid datainsamling.

4.1 INGÅENDE KRAFTBOLAG OCH INTRESSETER

De anläggningsägare som bidragit med uppgifter om sina anläggningar är Fortum, Uniper, Vattenfall och Statkraft, Skellefteå Kraft och Vattenregleringsföretagen. Några andra anläggningsägare tillfrågades, men hade inte möjlighet att delta. Alla anläggningsägare som finansierar Energiforsk följer dock detta projekt.

4.2 RESULTAT, SAMMANSTÄLLNING

Resultatet av sammanställningen sammanfattas i bilaga 2. Tillräckligt många anläggningars uppgifter samlades in – ambitionen var på förhand 50–100 stycken och 140 stycken inkom, från 21 stycken olika vattendrag.

Värt att nämna är att det för ca 50 stycken anläggningar svarades att ingen skadegrad fanns, samt att det för ytterligare ca 40 stycken svarades att skadegraden är okänd eller lämnade inget svar. Vidare var det ca 90 stycken som inte har någon energiomvandling alls installerad och även ca 90 stycken som inte har någon installerad bergförstärkning i utskovskanalen.

De flesta anläggningar har en enda vattenväg där spill sker (ca 120 stycken) och resterande har minst två separerade vattenvägar. För ca 35 stycken anläggningar

spills det normalt endast vid funktionsprov, medan vid ca 95 stycken förekommer det spillperiod(er) varje år.

4.3 URVAL AV ANLÄGGNINGAR FÖR ANALYS

Efter utförd sammanställning gjordes ett urval av anläggningar för besök och vidare analys. Följande urvalskriterier användes:

- Anläggningarna har en inspekterbar bergyta i utskovskanalen, d.v.s. möjlig att inspektera och kartera.
- Det finns spillhistorik för anläggningarna, så att en eventuell observerad skadegrad kan kopplas till spillhistoriken.
- Utvalda anläggningar har likvärdiga förhållanden för en aspekt (t.ex. likvärdig geologi) men skiljer sig för en annan aspekt (t.ex. fallhöjd), så att jämförelser kan göras.
- Ägarna till de preliminärt utvalda anläggningarna ha möjlighet att ta emot oss, med allt vad det innebär, samt att en effektiv och praktisk logistik kan åstadkommas under fältarbetet.

Utifrån dessa kriterier gjordes följande urval, där fältarbetet delades upp på två veckor:

Vecka 1: Luleälven (Vattenfall) – Letsi, Messaure, Seitevare, Akkats, Porjus, Harsprånget och Ligga.

Vecka 2: Skellefteälven (Skellefteå Kraft) – Båtfors, Finnfors, Grytfors, Rengård, Krångfors och Selsfors.

Resultatet av fältbesökens efterföljande analys redovisas i avsnitt 5 nedan.

5 Analys av utvalda anläggningar

I den andra delen av projektet, analysdelen, utvärderades den nuvarande metoden genom att: besöka ett antal anläggningar och utvärdera erosionsbenägenheten vid dessa, och då komplettera Erosionsindex-diagrammet med dessa anläggningar, samt att göra en känslighetsanalys avseende ingående parametrar.

Inför utvärdering av utvalda anläggningar studerades spillhistorik, sammanställning av befintlig dokumentation (foton, erosionshistorik och skadegrad m.m.), utöver resultatet från fältarbetet.

5.1 FÄLTSTUDIER OCH ANALYS

Karterade anläggningar beskrivs översiktligt hydraulisk och geologiskt. Den karterade bergmassan utvärderas enligt Annandale's (1995) erosionsindex i enlighet med projektets ursprungliga beskrivning.

Geologi

Samtliga anläggningar ligger i berggrund som tillhör Svekokarelska orogenen. Bergmassorna består av väl sammansmälta bergarter och relativt sett täta, undantaget ytliga delar av de bergmassor som karaktäriseras av bankningsplan. Speciellt med avseende på bankningsplan kan en sammanställning som nedan utföras.

Station	Bankningsplan	Sprickvidd bankningsplan	Självskattad erosion	Karterad erosion
Letsi	Nej	-	Nej	Nej
Messaure	Nej	-	Ja	Nej
Porjus	Ja	½-3cm	Ja	Ja
Harsprånget	Ja	½-5cm	Ja	Ja
Seitevare*	Ja	1-5cm	Ja	Nej
Akkats	Ja	1-2cm	Ja	Ja
Ligga	Ja	½-3cm	Ja	Ja
Båtfors	Ja	< ½cm	Ja	Ja
Finnfors	Ja	< ½ cm	Ja	Nej
Grytfors	Delvis	< ½ cm	Ja	Nej
Rengård	Ja	< 2 mm	Nej	Ja

Station	Bankningsplan	Sprickvidd bankningsplan	Självskattad erosion	Karterad erosion
Krångfors	Nej	-	Nej	Nej
Selsfors	Delvis	< ½ cm	Ja	Ja

* I Seitevare finns en smal sprängd kanal där bankningsplan ej med lätthet kan lossgöras.

Slutsatser som kan dras från ovanstående tabell är att de få anläggningar som saknar bankningsplan över undersökt spillyta också saknar tydliga indikationer på erosion i fält samt att eventuella erosionsskador angivits som icke-existerande eller små i självskattningen. Se respektive stations kapitel nedan.

Stationer där det är känt att större erosion har skett är Porjus, Harsprånget och Ligga, vilka alla kännetecknas av stora ytor med bankningsplan med stor sprickvidd. Akkats och Seitevare utgör specialfall där mycken bergförstärkning är installerad i Akkats och Seitevare avbördar genom en sprängd, smal kanal.

Skellefteåälvens stationer utgör ett mellanläge där bankningsplan förekommer i vissa partier, alternativt inte kan karaktäriseras som en huvudsprickgrupp. De självskattade stationserfarenheterna av erosion är också låg.

Sprickvidderna för bankningsplanen skiljer sig också åt mellan Luleåälven stationer där bankningsplanen skiljs åt av mycket stora sprickvidder och Skellefteåälvens stationer där observerade sprickvidder är mindre.

Erosiv effekt från vattnet

Den erosiva effekten från vattnet beräknas enligt Annandale (1995), beskrivet i kapitel 3.3.3. Två olika hydrauliska förhållanden utvärderas generellt: likformig (parallell) strömning med friktionsförluster och ett fullt utvecklat vattensprång. Detta dels eftersom de hydrauliska förhållandena förändras längs en utskovskanal, och dels eftersom förhållandena kan vara utmanande att uppskatta. Genom att utvärdera olika flödesförhållanden fås ett spann på möjliga erosiva effekter.

För vissa anläggningar faller vattnet fritt ett antal meter från en position längs skibordet, som en följd av installerade bottenutskov under skiborden. Se foton för t.ex. Messaure. För sådana utskov utvärderas just det hydrauliska förhållandet "fritt fall", som oftast ger en större erosiv effekt än ett vattensprång.

För tappningar då luckan ligger i vattenstrålen introduceras en ökad energiförlust, vilket reducerar vattenhastigheten, men det tas inte hänsyn till det i analysen, d.v.s. vattenhastigheten överskattas i någon mån, och därmed även den erosiva effekten. Det är svårt att uppskatta hur mycket vattenhastigheten reduceras av att luckan ligger i vattnet, och små lucköppningar tas inte med i analysen, eftersom risken är stor att vattenhastigheten överskattas alltför mycket. En möjlig väg är att beräkna vilken fiktiv vattennivå i magasinet som krävs att det aktuella flödet ska kunna avbördas fritt, d.v.s. utan att luckan tar i vattnet. Denna fiktiva vattennivå innebär en reducerad fallhöjd, och därmed en lägre vattenhastighet.

Driftstatistik har erhållits för de analyserade anläggningarna, i form av spill per utskov, antingen som dygns- eller timvärden. I analysen motsvarar beteckningen "årsmax" det maximala värdet på tappningen under perioden för den erhållna driftstatistiken. Detta ska symbolisera en sannolikt årligen återkommande maxtappning, som kan ha en varaktighet i storleksordningen dagar eller veckor. Om det finns identifierad skadegrad, kan den sedan kopplas till denna tappning, utöver koppling till eventuellt kända höga flöden och provtappningar.

Observerad skadegrad

För många anläggningar är maxavbördningen vid utförd provtappning den största avbördningen som upplevts. Men, en provtappning varar dock under kort tid (totalt minuter), och erosionsmekanismer kan kräva mer tid, varför skadegraden är svårt att koppla till Erosionsindex (Annandale, 1995) för ett specifikt tillfälle.

Berget kan ha belastats med liten omfattning, men under lång tid, och ett "tröskeltillstånd" för erosion kan vara nära. Då kan det räcka med en liten avbördning för att gå över tröskelvärdet, vilket blir missvisande för skadegraden i erosionsindex.

Nedan redovisas resultaten från fältbesök och analys för de besökta anläggningarna.

5.1.1 Letsi

Geologi

Berggrunden tillhör Svekokarelska orogenen och utgörs av en medelkornig paragnejs med flyt- eller foliationsstrukturer. Denna utgörs av en större lätt röd granitisk kropp med grov- och finkorniga pegmatiter samt ställvis större och mindre enklaver av finkornig amfibolit. Inga diabasgångar noterades vid fältbesöket. Bergarterna är väl sammansmälta och håller höga $\geq 100 \text{ MPa}$ tryckhållfastheter. Sprickyterna är undulerande med $1 - 2 \text{ cm}$ per $1 - 30 \text{ cm}$. Sprickyterna är i regel skrovliga och rena utan sprickfyllnad. Fogningen mellan blocken var tät. Samtliga karterade sprickor är diskontinuerliga över en längd på 10 m . Antal sprickgrupper bedöms efter kartering till maximalt två. Sprickgrupperna skär egentligen inte varandra utan utgörs av områden med en sprickgrupp inklusive några oregelbundna

Bergmassan karterades i vänstra utskovskanalen ca 12 m från skibordets avslut. Inga horisontella bankningsplan noterades utan fanns endast representerade i bergets överyta, långt ovanför botten på den spränga utskovskanalen.

Enligt Annandale's (2006) index bör den geologiska klassificeringen vara som nedanstående. Bergartshårdheten sätts till $M_s = 108$ då bergarternas exakta hållfasthet är okänd men förutsätts ej understiga 125 MPa .

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

$$K = 108 \times \frac{100}{1.50 - 1.83} \times \frac{3.0}{0.75 - 1.00} \times 1.24 = 36\,000 - 22\,000$$



Figur 17 Letsi. Fotografi över utskovskanalen. Notera den röda granitiska bergarten, den mörka mafiska. Avsaknaden av horisontella bankningsplan. Den relativt korta spårlängden av sprickor som inte utgör bergartsgränser.



Figur 18 Letsi. Översiktsbild över utskov och lägre energiomvandlarbassäng.



Figur 19 Letsi. Mafisk bergart samt sliror av granitisk bergart.

Hydrauliska förhållanden och erosiv effekt

Utskovskanalen i Letsi inleds i uppströmsänden med en skibordsförlängning i betong, för båda de två utskoven, denna är längre för vänster utskov. Sedan övergår den som sprängd kanal, med gjutna ledmurar och en del utjämningsgjutningar, och avslutas med ett fall ner i en energiomvandlarbassäng.

Kanalen kröker till vänster och ledmurar har tidigare höjts för att undvika överspolning, samt att bassängen har byggts om för att ge tillräcklig energiomvandling. Kanalen har en tillräcklig lutning för att superkritisk strömning ska råda, och ett vattensprång utvecklas därmed inte.

På grund av att kanalens krökning, skapas sannolikt lokala belastningar på berget längs en del av de högra ledmurarna. Figur 20 visar utskovskanalens uppströmsdel. Kanalen kröker omedelbart nedströms skiborden, och vid spill i höger utskov pressas vattnet mot högra kanalväggen. I det området, omedelbart nedströms skibordsförlängningen sker gissningsvis relativt stora belastningar från vattnet. Figur 21 visar provtappning genom båda utskoven (WSP, 2005), då totalt 1045 m³/s spilldes, vilket kan jämföras med 1560 m³/s, som är maximal avbördning vid dämningens gräns. Det dimensionerande klass 1-flödet är 1910 m³/s, och det krävs alltså en viss överdämning för att avbörda flödet.

Spillhistorik från 1998–2017 visar att utskoven inte används i någon stor utsträckning: 1-2 st spillperioder per år, vilka i sin tur typiskt består av flera avskilda mindre spillperioder om några dagar i följd. Årsmax under dessa perioder varierar mellan ca 100-350 m³/s (dygnsmedel), d.v.s. en liten andel av den maximala avbördningskapaciteten.



Figur 20: Letsi utskovskanal. Notera att kanalen lutar och kröker påtagligt. Foto: Norconsult (2017).



Figur 21: Provtappning i Letsi 2005, genom båda två utskoven, totalt 1045 m³/s. Notera uppspolningen längs de högra ledmurarna (t.v. i bild). Foto: WSP (2005).

Fallhöjden över skibordet är 16 m och kanalbredden är ca 33 m, vilket ger en vattenhastighet v_1 på 15–17 m/s där vattnet lämnar skibordet, beroende på tappning. Vattenhastigheten och kanalbredden ger ett vattendjup y_1 vid skibordets nedströmsände på minst 2 m och ett Froudetal F_{r1} på ca 3–4, beroende på tappning. Ytråheten ansätts till ett Manningtal $M=20$, vilket är relativt lågt. Detta för att inte underskatta den erosiva effekten.

Enligt Annandale (1995) beräknas den erosiva effekten i vattnet enligt nedanstående. Beräkningar har gjorts för två olika flödesfall: "maximal utskovsavbördning under provtappningen 2005" (1480 m³/s) och "maximal utskovsavbördning vid DG" (1560 m³/s). Beräkningarna som gav de högsta värdena på den erosiva effekten, redovisas nedan. Övriga beräknade värden sammanställs, tillsammans med värden från de andra analyserade anläggningarna, i avsnitt 5.3.

$\rho=1000 \text{ kg/m}^3$	vattnets densitet
$g=9,82 \text{ m/s}^2$	tyngdaccelerationen
$\gamma=\rho g=9820 \text{ kg/m}^2\text{s}^2$	vattnets tunghet

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 1877 \text{ kW/m}^2$$

vid ett fullt utvecklat vattensprång,
gäller för maxavbördning vid DG

$$P_{erosiv} = \gamma q s_f = 70 \text{ kW/m}^2$$

vid likformig strömning med
friktionsförluster, gäller
maxavbördning vid DG

Observerad erosion och skadegrad

Inga kända erosionsproblem. Storskalig provtappning utfördes 2005 (WSP, 2005), dock ej fullt öppna luckor.

5.1.2 Messaure*Geologi*

Berggrunden tillhör Svekokarelska orogenen och utgörs av gabbro eller dioritoid vilken är mafiska motsvarigheter till graniter. Berggrunden är mörk, finkornig och håller hög tryckhållfasthet $\geq 150\text{MPa}$. Direkt nedströms utskoven i Messaure ligger en bassäng över en sprängd utskovskanals hela bredd samt kanske 100m av dess längd. Bergmassan på vänster och höger vägg karterades från håll.

Två till tre sprickgrupper kan identifieras, en brant som skär utskovskanalen nära vinkelrätt och som är parallell med en sprickzon som skär kanalen över den vänstra skibordstån. Flacka grupper finns representerade i överytan samt nära sprickzonen på bägge sidor av utskovskanalen. Längre ned i stratigrafien är de flacka sprickorna inte lika tydligt representerade. Troligen finns även en tredje grupp parallell med utskovskanalen. Energiomvandlarbassängen omöjliggör dock fullständig kartering. Sprickytorna i sprickzonen är skrovliga, undulerande med 25 – 75cm på 2 – 3m och öppna med 1 – 3cm. Krossmaterial kunde finnas i några av de branta sprickorna. Övriga sprickgrupper har skrovliga, plana eller undulerande sprickytor, samtliga täta i nivå med utskovstån.

Enligt Annandale's (1995) erosionsindex bör den geologiska klassificeringen vara som nedanstående. Bergartshårdheten sätts till $M_s = 157$ då bergarternas exakta hållfasthet är okänd men förutsätts ej understiga 150MPa.

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

$$K = 157 \times \frac{80}{2.24} \times \frac{3.0}{0.75 - 4.00} \times 1.24 = 5\,200 - 28\,000$$



Figur 22 Messaure. Översiktsbild över vänster vägg nedströms Messaures tre utskov.



Figur 23 Detalj av vänster vägg. Notera sprickzonen, bergmassans oregelbundna karaktär, de flacka bankningsplanen mot bergets överyta.



Figur 24 Messaure. Översikt över höger vägg. Notera sprickzonen med betonglagning. Den relativa avsaknaden av branta sprickor till höger om sprickzonen. Samt de flacka sprickorna.

Hydrauliska förhållanden och erosiv effekt

Utskovskanalen i Messaure är utsprängd i berg och inleds i uppströmsänden nedströms skiborden med en ca 100 m lång bassäng av okänt djup. Bassängen är sannolikt inte designad som en fullvärdig energiomvandlarbassäng, eftersom den troligen är för grund. Men viss energiomvandling sker naturligtvis. Kanalen fortsätter sedan rakt ca 50 m och kröker sedan åt höger. Sedan fortsätter den ca 2 km, innan den går samman med utloppskanalen från kraftstationen. Figur 25 visar utskovskanalens uppströmsdel, som är den del som är i fokus i denna studie.

Utskovspartiet har tre ytutskov, med samma tröskelnivå och fria bredd samt samma lucktyp. Under utskovet i mitten finns tre avstängda bottenutskov som användes för förbiledning av vatten under byggtiden. Detta innebär att skibordet för detta ytutskov har ett annorlunda utseende än de två övriga, där vattnet kastas ut i ett fall på uppskattningsvis 6–7 m och landar troligen i uppströmsänden av bassängen. Där sker troligen den största belastningen från vattnet.



Figur 25: Utskovskanalen i Messaure, uppströmsdelen närmast utskoven. Utsprängd bassäng närmast.
Foto: Norconsult, 2017.

Ett vattensprång uppstår sannolikt vid tappning, p.g.a. av att bassängen bromsar vattnet så att energiomvandling sker. Figur 26 visar foto från provtappning (2004), då det maximalt spilldes ca 1390 m³/s totalt genom alla tre utskov, till synes jämnt fördelat mellan dessa. Detta kan jämföras mot högsta avbördning på 1790 m³/s vid dämningensgräns. Ett vattensprång sker nära nedströms skiborden, och där sker en stor del av energiomvandlingen.



Figur 26: Provtappning i Messaure. Aktuell tappning är 1280 m³/s, jämfört mot maxavbördning 1790 m³/s vid DG. Källa: Vattenfall

Spillhistorik från 1998–2017 visar att utskoven inte används i någon stor utsträckning: oftast en enda spillperiod per år, typiskt maximalt vecka i följd. Årsmax under denna period varierar mellan ca 100–200 m³/s (dygnsmedel), d.v.s en liten del av den maximala avbördningskapaciteten (ca 5–10 %).

Fallhöjden över skibordet är 23 m och kanalbredden är ca 50 m i kanalens uppströmsdel, vilket ger en vattenhastighet v_1 på ca 20 m/s där vattnet lämnar skibordet, beroende på tappning. Vattenhastigheten och kanalbredden ger ett vattendjup y_1 vid skibordets nedströmsände på 1–2 m och ett Froudetal Fr_1 på ca 4–6, beroende på tappning. Ytråheten ansätts till ett Manningtal $M=20$.

Enligt Annandale (1995) beräknas den erosiva effekten i vattnet enligt nedanstående. Beräkningar har gjorts för två flödesfall: "maximal avbördnings under provtappningen 2004" (1390 m³/s) och "maximal avbördnings vid DG" (1790 m³/s). Beräkningarna som gav de högsta värdena på den erosiva effekten, redovisas nedan. Övriga beräknade värden sammanställs, tillsammans med värden från de andra analyserade anläggningarna, i avsnitt 5.3.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 3913 \text{ kW/m}^2 \quad \text{vid ett fullt utvecklat vattensprång, gäller för maxavbördnings vid DG}$$

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 3404 \text{ kW/m}^2 \quad \text{vid ett fullt utvecklat vattensprång, gäller för maxavbördnings under provspillet 2004}$$

Observerad erosion och skadegrad

Enstaka block har lossnat, dock oklart var längs kanalen. Storskalig provtappning utfördes 2004 (Vattenfall, 2004), dock ej fullt öppna luckor.

5.1.3 Porjus

Geologi

Berggrunden tillhör Svekokarelska orogenen och utgörs av en grå till djupröd ryodacit. Ryodaciten är medelkornig och massformig med viss flytstryktur. Bergarten skiljer sig från granit endast i förhållandet av kalifältspat mot plagioklas där graniter innehåller mer än förhållandet 1:1 av kalifältspat. Tryckhållfastheten hos bergarten bör vara mycket god $\geq 150 \text{ MPa}$.

Vid Porjus kraftstation finns nedströms utskoven en grund bassäng där botten på denna är gjuten ovan berg. Berggrunden karterades 25 m nedströms bassängen i linje med det vänstra utskovet. Karaktäristiskt för berggrunden i Porjus är att den utgörs av naturlig bergyta. Möjligen detaljschaktad i överytan närmast utskoven i samband med byggnation av stationen 1910–1914. En betydande mängd bergförstärkning från mitten av förra seklet har installerats. Även äldre bergförstärkning från byggnationen 1910–1914 finns representerad. Platta block har alltså slitits loss från bergytan. Spricksystemet är storskaligt med spårlängder på 25 – 50 m och utgörs av en brant sprickgrupp nästan parallell med strömriktningen, en vinkelrät mot strömriktningen. Flacka bankningsplan i tunna

skivor finns allestädes representerade mellan de storskaliga sprickorna. De brantstående sprickgrupperna har råa, undulerande och täta sprickplan medan bankningsplanen har råa öppna sprickytor på 1/2 – 3cm.

Enligt Annandale's (2006) index bör den geologiska klassificeringen vara som nedanstående. Bergartshården sätts till $M_s = 157$ då bergarternas exakta hållfasthet är okänd men förutsätts ej understiga 150MPa.

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

$$K = 157 \times \frac{100}{2.73} \times \frac{3.0}{0.75 - 4.00} \times 1.09 = 3\,200 - 17\,000$$



Figur 27 Porjus. Översiktsbild över utskovskanalen. Notera att bergytan utgör naturlig överyta.



Figur 28 Porjus. Detalj av berggrunden nedströms utskovet. Notera de flacka tunna bankningsplanen och den storskaliga stängliga strukturen parallell med strömriktningen.



Figur 29 Porjus. Detalj över berggrunden. Notera de flacka bankningsplanen som avskärs av den sprickgrupp som skär flödesriktningen vinkelrätt (från vänster i bild). Notera lösgjorda block och bergförstärkningen.



Figur 30 Porjus. Bra översiktsbild på höger sida av utskovskanalen över bergmassans karaktär.

Hydrauliska förhållanden och erosiv effekt

Utskovskanalen i Porjus är i uppströmsänden rak och flack, och inleds med en grund bassäng i betong med en avslutande stötvägg. Längst uppströms närmast skiborden begränsas kanalen av ledmurar. Nedströms ledmurarna breddas kanalen kröker svagt höger. Utskovspartiet består av två lika utskov (samma bredd och tröskelnivå), med en flack skibordsförlängning ner mot bassängen. Figur 27 ovan visar utskovskanalens uppströmsdel, inklusive bassängen.



Figur 31: Porjus utskovsparti. Skibordsförlängning ner i bassäng med stötvägg. Foto: Norconsult, 2017.

Utifrån bassängens geometri och dess stötvägg, kan slutsatsen dras att ett vattensprång bör framtvingas vid bassängens nedströmsända. Figur 31 visar skibordsförlängningen ner i bassängen.

Figur 32 visar foto från provtappning vid fördjupad inspektion (Vattenfall, 2015), då höger utskov var fullt öppet, vilket vid DG motsvarar ca 975 m³/s. Ett kraftigt vattensprång framtvingas vid bassängens nedströmsände, med stor energiomvandling där. Nedströms bassängen är vattenhastigheten reducerad, men relativt mycket turbulens förekommer ändå där, med tryckfluktuationer och vågaktivitet som följd.



Figur 32: Provtappning under fördjupad inspektion 2015, höger utskov fullt öppet. Källa: Vattenfall.

Spillhistorik från 1998–2017 visar att utskoven generellt används i mycket liten utsträckning: det är inte säkert att någon större tappning sker varje år. Om så sker, är det oftast en enda spillperiod per år. Spill har dock skett flera dagar i följd vid ett antal tillfällen. Årsmax under denna period som mest ca 400 m³/s (dygnsmedel), genom ett av utskoven. Detta är ca 40 % av avbördningskapaciteten vid DG för ett av utskoven. Anledningen till att det spills lite är sannolikt att Sourvamagasinet uppströms är ett årsmagasin samt att Porjusmagasinet är relativt stort, och dämpar tillrinningar.

Fallhöjden över skibordet är ca 16 m och kanalbredden är ca 30 m i dess uppströmsdel (mellan ledmurarna), vilket ger en vattenhastighet v_1 på 16–17 m/s där vattnet lämnar skibordet, beroende på tappning. Vattenhastigheten och kanalbredden ger ett vattendjup y_1 vid skibordets nedströmsände på ca 2 m och ett Froudetal F_{r1} på ca 3–4, men beror på tappning. Ytråheten ansätts till ett Manningtal $M=20$.

Enligt Annandale (1995) beräknas den erosiva effekten i vattnet enligt nedanstående. Beräkningar har gjorts för *ett* flödesfall: "maxavbördning under provtappningen 2015" (ca 975 m³/s) som är lika med maxavbördning för höger utskov. Det är dock svårt att beräkna den kvarvarande erosiva effekten från vattnet på berget, efter att energiomvandling via bassängen har skett. I examensarbetet av Mören (2005) gjordes en grov uppskattning att den tillgängliga fallhöjden över utskovet, reduceras 5–10 m till följd av energiomvandlingen via bassängen. En reduktion på 5 m används här.

Beräkningarna som gav de högsta värdena på den erosiva effekten, redovisas nedan. Övriga beräknade värden sammanställs, tillsammans med värden från de andra analyserade anläggningarna, i avsnitt 5.3.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 721 \text{ kW/m}^2$$

vid ett fullt utvecklat vattensprång,
gäller för maxavbördning vid DG och
reducerad fallhöjd med 10 m

Den erosiva effekten från vattnet på berget nedströms bassängen, skulle vara i storleksordningen tre gånger större utan bassängen.

Observerad erosion och skadegrad

Enstaka block har lossnat, dock oklart var längs kanalen. Kanalens geometri modifierades i ett dammsäkerhetsprojekt (2006), då uppstickande partier plansprängdes och murar (stötväggar) uppfördes i kanalen, för att skapa energiomvandling. Storskalig provtappning utfördes 1997, ingen information från den har funnits tillgänglig i detta projekt. Provtappning utfördes även i samband med fördjupad inspektion (Vattenfall Vattenkraft, 2015).

5.1.4 Harsprånget

Geologi

Berggrunden tillhör Svekokarelska orogenen och utgörs av en grå till röd granit. Graniten är medelkornig och har tydlig flytstruktur. Grovkorniga pegmatiter och finkorniga apliter finns representerade. Bergarten är väl sammansmält och torde hålla hög tryckhållfasthet $\geq 100 \text{ MPa}$. Berggrunden nedströms utskovet är mycket väl blottad till följd av utskovskanalens bredd. Närmast utskovet utgörs bergytan av naturlig bergyta för att därefter övergå i en schaktad kanal. Bergmassan är storblockig. Den dominanta sprickgruppen utgörs av flacka sprickor, troligen bildade dels vid avisningen dels vid bildandet av den sprickzon som övertvårar utskovskanalen. Övergjutningar på bergytan närmast utskoven har utförts samt bergförstärkning. En del flacka block har sedermera slitits loss vid nyttjandet av utskovskanalen och ligger samlade nedströms.

Två karteringar utfördes, en 20m nedströms vänster utskov direkt mot ledmuren till vänster samt en 20m nedström pelaren mellan center och höger utskov. I den första noterades två sprickgrupper, i den andra tre sprickgrupper. Sprickytorna är råa och undulerande med 10cm på 2m eller råa och plana. De branta sprickgrupperna varierar i sprickavstånd mellan 1/2 – 4m. Bankningsplanen

varierar däremot med 10 – 50cm eller 60 – 120cm. Bankningsplanen är öppna med 1/2 – 5cm, övriga sprickor täta till något öppna. Ingen sprickfyllnad noterades.

Enligt Annandale's (2006) index bör den geologiska klassificeringen vara som nedanstående. Bergartshårdheten sätts till $M_s = 108$ då bergarternas exakta hållfasthet är okänd men förutsätts ej understiga 100MPa.

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

$$K = 108 \times \frac{100}{1.83 - 2.73} \times \frac{3.0}{0.75 - 4.00} \times 1.05 = 3\,100 - 24\,700$$



Figur 33 Harsprånget. Översiktsbild över utskovskanalen. Notera betongpålägningarna direkt nedströms utskovet utförda i svackor. Sprickzonen samt berggrundens storblockiga karaktär.



Figur 34 Harsprånget. Höger strandkant. Rektangulärt uppsprucken bergmassa samt bergförstärkning.



Figur 35 Harsprånget. Uppströms vy över vänster utskov. Notera de flacka sprickorna, spricköppningen samt avslitna block (syns på den brunfärgade vittringens avtagande in i blocken).



Figur 36 Harsprånget. Detalj över rektangulärt block samt bergförstärkning. Notera även vittringen på de bortslitna sidorna av blocket.

Hydrauliska förhållanden och erosiv effekt

Utskovskanalen i Harsprånget är i uppströmsänden flack, och t.o.m. ett litet motlut, för att sedan falla undan mer och böja av åt vänster. Figur 37 visar detta motlut. En ledmur finns till vänster, och följer fåran ca 150 m. Längre nedströms breddas kanalen och går ihop med den naturliga älvfåran. Figur 33 visar utskovskanalens uppströmsdel.

Figur 38 visar foto från provtappning (Vattenfall, 1997), då det maximalt spilldes ca 1400 m³/s, som antas vara jämnt fördelade mellan de tre utskoven. Ett vattensprång framtvingas ett tiotal meter nedströms skiborden p.g.a. kanalens motlut. Längs sträckan från skiborden och över vattensprånget sker troligen den största belastningen från vattnet, p.g.a. turbulent strömning med stora tryckfluktuationer som följd.



Figur 37: Harsprångets utskovsparti och kanal, från höger sida. Motlut i kanalen markerat med röd pil. Foto: Norconsult, 2017.



Figur 38: Foto från provtappning 1997, 1400 m³/s, som antas vara jämnt fördelat mellan de tre utskoven. Källa: Vattenfall.

Spillhistorik från 1998–2017 visar att utskoven generellt används i mycket liten utsträckning: maximalt en enda spillperiod per år, vilken i sin tur typiskt består av några dagar i följd. Årsmax under denna period som mest ca 100 m³/s (dygnsmedel), d.v.s vilket är endast ca en tiondel av avbördnings-kapaciteten vid DG för ett av de tre utskoven. Anledningen till att det spills mycket lite är troligen

dels att Porjusmagasinet är stort, och dämpar tillrinningar, och dels att Harsprånget har mycket stor utbyggnads-vattenföring i kraftstationen.

Fallhöjden över skibordet är 13 m och kanalbredden är ca 70 m i kanalens uppströmsdel (3 st utskovsbredder), vilket ger en vattenhastighet v_1 på 14 m/s där vattnet lämnar skibordet, beroende på tappning. Vattenhastigheten och kanalbredden ger ett vattendjup y_1 vid skibordets nedströmsände på 1-2 m och ett Froudetal F_{r1} på 3-4, men beror på tappning. Ytråheten ansätts till ett Manningtal $M=20$.

Enligt Annandale (1995) beräknas den erosiva effekten i vattnet enligt nedanstående. Beräkningar har gjorts för *två* flödesfall: "maxavbördning under provtappningen 1997" (ca 1400 m³/s) och "dimensionerande flöde" (1980 m³/s). Beräkningarna som gav de högsta värdena på den erosiva effekten, redovisas nedan. Övriga beräknade värden sammanställs, tillsammans med värden från de andra analyserade anläggningarna, i avsnitt 5.3.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 1137 \text{ kW/m}^2$$

vid ett fullt utvecklat vattensprång,
gäller för dimensionerande flöde (1980 m³/s)

$$P_{erosiv} = \gamma q s_f = 63 \text{ kW/m}^2$$

vid likformig strömning med
friktionsförluster, gäller för
dimensionerande flöde (1980 m³/s)

Observerad erosion och skadegrad

Kanalens geometri uppges ha förändrats p.g.a. bergerosion, enligt ägaren Vattenfall Vattenkraft, via ifyllnaden av tabellen i del 1 i detta projekt. Storskalig provtappning utfördes 1997 (Vattenfall Hydropower, 1997), ingen information från den har funnits tillgänglig i detta projekt, förutom foton.

5.1.5 Seitevare

Geologi

Berggrunden tillhör Svekokarelska orogenen och utgörs av en grå till ljus röd granit. Graniten är medelkornig och massformig. Tryckhållfastheten hos bergaren är god $\geq 100 \text{ MPa}$. Bergmassan nedströms utskovet karterades över en sträcka av 10 – 15 m. En sprickzon löper längs kanalen. I denna finns uppkrossade linsformiga partier samt ett flertal tunna aplitgångar. Graniten finnes starkt rödfärgad närmast sprickzonen samt planförskiffrad.

Bankningsplan finns representerade ända ned till botten av den sprängda utskovskanalen. Bankningsplanen finnes öppna med 1 – 5 cm öppning. Sprickplanen på samtliga sprickgrupper är raa och undulerande med 2 cm på 10 – 50 cm, för sprickzonen är amplituderna långt större. Bankningsplanens sprickyor är helt raa utan beläggning. Övriga sprickor är täta ställvis med röd tunn fyllnad, troligen adaluria. Sprickorna är i övrigt mycket täta.

Enligt Annandale's (1995) index bör den geologiska klassificeringen vara som nedanstående. Bergartshårdheten sätts till $M_s = 108$ då bergarternas exakta hållfasthet är okänd men förutsätts ej understiga 125 MPa.

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

$$K = 108 \times \frac{100}{2.73} \times \frac{3.0}{0.75 - 4.00} \times 1.20 = 3\,500 - 19\,000$$



Figur 39 Seitevare. Utskovskanalen närmast utskovet. Notera sprickzonen. Rödfärgning närmast sprickzonen. Horisontella bankningsplan.



Figur 40 Seitevare. Vänster vägg och sula i utskovskanalen nära ($< 25\text{ m}$) slutet på skibordet. Notera de urfallna blocken i väggen. De flacka sprickorna i sulan.

Hydrauliska förhållanden och erosiv effekt

Utskovskanalen i Seitevare inleds i uppströmsänden med en skibordsförlängning i betong. Sedan övergår den som en rak sprängd kanal, och ca 150 m nedströms finns en utsprängd bassäng där bottenutskovets tunnel ansluter. Nedströms bassängen kröker kanalen kraftigt åt höger och fortsätter därefter rakt ca 160 m, då den faller ner och kröker kraftigt vänster. Sedan går den under vägbro och ut den gamla naturliga älvfåran. Figur 41 visar utskovskanalens uppströmsdel.

Kanalens övre del är rak och har en tillräcklig lutning för att superkritisk strömning ska kunna råda hela den första raksträckan. Dess geometri är dock relativt oregelbunden, vilket skapar en storskalig råhet och det är svårt att bedöma om det uppstår ett vattensprång eller om det till stor del är superkritisk strömning med skummande vatten. Skibordet smalnar även av nedströms åt, vilket komprimerar vattenstrålen.



Figur 41: Seitevare utskovskanal, skibordet för ytutskovet och övre delen av kanalen. Foto: Norsoncult, 2017.

Figur 42 visar foto från provtappning (WSP, 2010), då det maximalt spilldes ca 870 m³/s totalt genom båda utskoven, varav ca 340 m³/s genom ytutskovet. I området omedelbart nedströms skibordsförlängningen, och längs den efterföljande raksträckan uppströms bassängen, sker gissningsvis de största belastningarna från vattnet. Ytutskovets maximala avbördning vid dämmningsgränsen är 370 m³/s, och det är endast ytutskovet som kommer analyseras här.



Figur 42: Provtappning 2010 i Seitevares ytutskov, ca 340 m³/s. Källa: WSP

Spillhistorik från 1998–2017 visar att utskoven inte används i någon stor utsträckning: maximalt en enda spillperiod per år, vilken i sin tur typiskt består av flera avskilda mindre spillperioder om några dagar i följd. Årsmax under dessa perioder varierar mellan ca 100–200 m³/s (dygnsmedel), d.v.s som mest ca hälften av den maximala avbördningskapaciteten.

Fallhöjden över skibordet är 13 m och kanalbredden är ca 10 m i kanalens uppströmsdel, vilket ger en vattenhastighet v_1 på 14–15 m/s där vattnet lämnar skibordet, beroende på tappning. Vattenhastigheten och kanalbredden ger ett vattendjup y_1 vid skibordets nedströmsände på ca 2,5 m och ett Froudetal Fr_1 på ca 3, men beror på tappning. Ytråheten ansätts till ett Manningtal $M=20$.

Enligt Annandale (1995) beräknas den erosiva effekten i vattnet enligt nedanstående. Beräkningar har gjorts för *ett* flödesfall: "maxavbördning under provtappningen 2010" (340 m³/s) d.v.s. nära maxavbördning vid DG. Beräkningarna som gav de högsta värdena på den erosiva effekten, redovisas

nedan. Övriga beräknade värden sammanställs, tillsammans med värden från de andra analyserade anläggningarna, i avsnitt 5.3.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 1090 \text{ kW/m}^2$$

vid ett fullt utvecklat vattensprång,
gäller för maxavbördning under
provtagningen 2010 (340 m³/s)

$$P_{erosiv} = \gamma q s_f = 52 \text{ kW/m}^2$$

vid likformig strömning med friktions-
förluster, gäller för maxavbördning
under provtagningen 2010 (340 m³/s)

Observerad erosion och skadegrad

Storskalig provtagning har utförts 1998 och 2010 (WSP, 2010), enligt ägaren Vattenfall Vattenkraft. Det uppges av Vattenfall att enstaka block har lossnat genom åren, dock oklart var längs kanalen detta skett.

5.1.6 Akkats

Geologi

Berggrunden tillhör Svekokarelska orogenen och består av en ljusgrå fin-medelkornig granit med tydlig flytstruktur. Bergarten är väl sammansmält och torde hålla hög hållfasthet $\geq 100 \text{ MPa}$. Småskaliga enklaver eller sliror av mafiskt material finns i bergarten. Rödfärgning utstrålar från sprickytor i begränsad omfattning runt sprickytan. Utskoven är grundlagda direkt på naturlig bergyta vilken avslöjas av de rundade formerna på hållarna. Bankningsplanen i Akkats är tunna och skapar små rektangulära block med dimensionerna $20 \times 20 \text{ cm}$ eller $60 \times 120 \text{ cm}$ och ett djup av $20 - 60 - 100 \text{ cm}$. Sprickorna längs bankningsplanen är öppna med $1 - 2 \text{ cm}$. Rikligt med bergförstärkning från mitten av förra seklet finns installerad. Ställvis har block slitits loss. Uppsprickningen är relativt välordnad, vilket kan åskådas i fotografierna nedan. Bergmassan på vänster sida av höger utskov karterades. Bergmassan uppvisar två branta sprickgrupper som skär varandra, samt en flack grupp av bankningsplan. Sprickytorna är råa med mycket tunn sprickfyllnad av troligen adaluria. Sprickytorna undulerar med 10 cm på 2 m .

Enligt Annandale's (1995) index bör den geologiska klassificeringen vara som nedanstående. Bergartshårdheten sätts till $M_s = 108$ då bergarternas exakta hållfasthet är okänd men förutsätts ej understiga 125 MPa .

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

$$K = 108 \times \frac{100}{2.73} \times \frac{3.0}{0.75 - 4.00} \times 1.09 = 3\,200 - 17\,000$$



Figur 43 Akkats. Översiktsbild från vänster utskov.



Figur 44 Akkats. Detalj över bergytan direkt nedströms höger utskov. Notera den rikliga bergförstärkningen samt de flacka sprickplanen.



Figur 45 Akkats. Detalj av bergytan direkt nedströms vänster utskov. Flödesriktning från vänster i bild.



Figur 46 Akkats. Detalj av graniten. Mafiska enklaver i den ljusgrå graniten som har oxiderat sin omgivning vid granitkroppens anbringande.

Hydrauliska förhållanden och erosiv effekt

Utskovskanalen i Akkats är rak och flack, och övergår efter knappt 50 m i vattenfylld (djupare) fåra. Kanalen begränsas på bredden av ledmurar, dess uppströmsdel. Figur 43 och figur 44 visar utskovskanalens uppströmsdel, fotat från vänster respektive från höger utskov.

Utskovspartiet består av två utskov, med låga flacka utskov, och relativt höga luckor. De två utskoven är till synes identiska, avseende fri bredd och tröskelhöjd. Utskoven benämns här som vänster och höger. Kanalens ganska trånga geometri indikerar att vattenytan nedströms blir relativt hög vid stora tappningar, och ett vattensprång bör framtvingas relativt långt uppströms.

Figur 47 visar foto från provtappning (Vattenfall, 2006), då båda luckorna var fullt öppna, d.v.s. 1670 m³/s (vid DG). Ett vattensprång framtvingas 20–30 meter nedströms skiborden. Längs sträckan från skiborden och över vattensprånget sker troligen den största belastningen från vattnet, p.g.a. turbulent strömning med stora tryckfluktuationer som följd.



Figur 47: Provtappning Akkats 2006, båda luckorna fullt öppna. Källa: Vattenfall.

Spillhistorik från 1998–2017 visar att utskoven generellt används under spillperiod under sommarmånaderna (vårflod), vilken i sin tur typiskt består av flera kortare perioder på några dagar i följd. Årsmax under denna period är som mest ca 400 m³/s (dygnsmedel), vilket är ca en fjärdedel av avbördningskapaciteten vid DG. Detta fördelas normalt mellan de två utskoven i någon mån, men det har förekommit att allt har tappats genom en av luckorna. Sedan 2002 har omfattande ombyggnationer av kraftstationen pågått, varför det har spillts i större utsträckning än annars.

Fallhöjden över skibordet är ca 14 m och kanalbredden är ca 30 m i kanalens uppströmsdel (mellan ledmurarna), vilket ger en vattenhastighet v_1 på 14 m/s där vattnet lämnar skibordet, beroende på tappning. Vattenhastigheten och kanalbredden ger ett vattendjup y_1 vid skibordets nedströmsände på 2–4 m och ett Froudetal F_{r1} på ca 2, men beror på tappning. Ytråheten ansätts till ett Manningtal $M=20$.

Enligt Annandale (1995) beräknas den erosiva effekten i vattnet enligt nedanstående. Beräkningar har gjorts för två flödesfall: "maxavbördning under provtappningen 2006" antaget lika med maxavbördning vid DG (1670 m³/s) och "normalt årsmax genom ett av utskovet" (400 m³/s). Beräkningarna som gav de högsta värdena på den erosiva effekten, redovisas nedan. Övriga beräknade värden sammanställs, tillsammans med värden från de andra analyserade anläggningarna, i avsnitt 5.3.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 1015 \text{ kW/m}^2$$

vid ett fullt utvecklat vattensprång,
gäller för maxavbördning vid DG

$$P_{erosiv} = \gamma q s_f = 43 \text{ kW/m}^2$$

vid likformig strömning med friktions-
förluster, gäller för maxavbördning
vid DG

Observerad erosion och skadegrad

Storskalig provtappning har utförts 2001 och 2006 (Vattenfall, 2006), båda gångerna med båda luckorna fullt öppna. Det uppges av Vattenfall att enstaka block har lossnat genom åren. I rapport från bergbesiktning (J&W, 2001), utförd både före och efter provtappning, står det: "Det finns vissa tecken på att bergerosion förekommer. Omfattningen är dock liten. De bultar som är satt är av dålig kvalitet. Ett flertal brickor har lossnat och ingjutningen är undermålig. Detta kan resultera i att bergerosionen kommer att öka kommande år om inte bultarna kompletteras med nya bult". Det står även att bergmassor påträffats längre nedströms i älvfåran, och att dessa troligen härrör från området närmast skiborden.

5.1.7 Ligga

Geologi

Berggrunden tillhör Svekokarelska orogenen och består paragnejs. Detta avslöjas av att den dominerande medelkorniga graniten med tydlig planfoliationstextur övergår i distinkta band av mörk amfibolit, även denna med tydlig planfoliation samt partier av leptit. Bergarterna är planfolierade men väl sammansmälta och torde hålla höga hållfastheter $\geq 100 \text{ MPa}$. Karaktäristiskt för berggrunden i Ligga är förekomsten av tunna flacka bankningsplan ned långt under botten på den spränga utskovskanalen. Speciellt leptiten tenderar att ha ett mycket sprött brottbeteende, vilket kan vara en del av orsaken till denna bildning. Bergmassan karterades nedströms det vänstra utskovet nära betongpågjutningen. Bergmassans karaktär är mycket storskalig med en brantstående sprickgrupp som sammanfaller med planfoliationen hos bergarten med spårlängder på $> 50 \text{ m}$. En brantstående sprickgrupp ungefär vinkelrät den första och flacka bankningsplan.

Bankningsplanen håller spårlängder på 1 – 5m. Sprickytorna fanns råa och utan sprickfyllnad. Sprickplanen undulerar med 5cm på 1m. Bankningsplanen fanns öppna med 1/2 – 3cm.

Enligt Annandale's (1995) index bör den geologiska klassificeringen vara som nedanstående. Bergartshårdheten sätts till $M_s = 108$ då bergarternas exakta hållfasthet är okänd men förutsätts ej understiga 125 MPa.

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

$$K = 108 \times \frac{100}{2.24 - 2.73} \times \frac{3.0}{0.75 - 4.00} \times 1.09 = 3\,200 - 21\,000$$



Figur 48 Ligga. Översiktsbild över utskovsfåran.



Figur 49 Ligga. Uppström vy över vänster utskov. Notera de flacka bankningsplanen som sträcker sig ned till botten av den sprängda kanalen samt bankningsplanens relativa tunnhet.



Figur 50 Ligga. Bra bild över förekommande bergarter i utskovskanalen. Grå granit övergår i leptit i partier. I centrum av bilden ligger ett lager av amfibolit (mörkt band). Denna utgör inte en gångbergart. Notera planfoliationen i bergarten och de flacka bankningsplanen.

Hydrauliska förhållanden och erosiv effekt

Utskovskanalen i Ligga är flack i dess uppströmsdel, och kröker i en lång högerkurva. Inga uppstickande partier finns i dess uppströmsdel, sedan ett tidigare dammsäkerhetshöjande projekt utfördes, med bl.a. plansprängning av kanalen. Vattenvägar har sprängts ut för respektive utskov. Figur 48 visar utskovskanalen.

Utskovspartiet består av tre likadana utskov d.v.s. samma fria bredd, tröskelnivå och lucktyp. Skiborden är låga och flacka, och luckorna är relativt höga. Luckorna benämns här som höger, mitten och vänster. Skiborden är förlängda närmast horisontellt, så att de avslutas ca 30 m nedströms luckorna.

Sedan är det en nivåskillnad mellan skibordsförlängningen på 1–8 m längs bredden, eftersom kanalen lutar från vänster till höger (doserad). Ingen konstruerad energiomvandling finns installerad. Kanalens flacka geometri bör framtvinga ett vattensprång vid spill. Figur 51 visar skibordsförlängningen och övergången ner till berget.



Figur 51: Ligga skibordsförlängning, foto från höger sida. Foto: Norconsult, 2107.

Figur 52 visar foto från tappning i vänster utskov (Vattenfall, 2017), okänd tappning. Ett vattensprång framtvingas nedströms skibordsförlängningen, på berget. Strömningen är turbulent längs kanalen, troligen med relativt stora tryckfluktuationer som följd.



Figur 52: Tappning i vänster utskov i Ligga, okänd tappning. Ett vattensprång bildas nedströms skibordsförlängningen. Källa: Vattenfall (2017)

Spillhistorik från 1998–2017 visar att utskoven generellt en, ibland två, spillperioder per år (oftast kring vårflod). Dessa perioder varar ett antal dagar i följd. Årsmax varierar mellan ca 200–400 m³/s (dygnsmedel). Detta är som mest drygt hälften av avbördningskapaciteten vid DG för ett av utskoven.

Fallhöjden över skibordet är ca 13 m och kanalbredden är ca 70 m i kanalens uppströmsdel (mellan ledmurarna), vilket ger en vattenhastighet v_1 på 14–15 m/s där vattnet lämnar skibordet, beroende på tappning. Vattenhastigheten och kanalbredden ger ett vattendjup y_1 vid skibordets nedströmsände på ca 2 m och ett Froudetal F_{r1} på ca 3, men beror på tappning. Ytråheten ansätts till ett Manningtal $M=20$.

Enligt Annandale (1995) beräknas den erosiva effekten i vattnet enligt nedanstående. Beräkningar har gjorts för *två* flödesfall: "maxavbördning under provtappningen 2007 (1500 m³/s) och "maxavbördning vid DG" (2225 m³/s) och "normalt årsmax genom ett av utskovet" (400 m³/s). Beräkningarna som gav de högsta värdena på den erosiva effekten, redovisas nedan. Övriga beräknade värden sammanställs, tillsammans med värden från de andra analyserade anläggningarna, i avsnitt 5.3.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 1134 \text{ kW/m}^2$$

vid ett fullt utvecklat vattensprång,
gäller för maxavbördning vid DG

$$P_{erosiv} = \gamma q s_f = 59 \text{ kW/m}^2$$

vid likformig strömning med friktionsförluster, gäller för maxavbördning vid DG

Observerad erosion och skadegrad

Vattenfall uppger att utskovskanalens geometri har förändrats p.g.a. bergerosion orsakat av spill. Erosionsskador uppstod direkt nedströms skibordet 1993, vilket resulterade i att betong gjöts där (förlängning av skibord). Ett projekt avseende dammsäkerhetshöjande åtgärder utfördes sedan 2006, som resulterade i att kanalen jämnades ut (plansprängdes) på vissa ställen, för att minska belastningen från vattnet samt att en del fördjupades. Ingen rapport från det projektet har funnits tillgängligt i detta projekt.

Storskalig provtappning har utförts 2007 (Vattenfall Power Consultant, 2007), där det konstaterades att ingen erosion skedde direkt nedströms skiborden, men dock till vänster och i mitten av kanalen längre nedströms.

5.1.8 Båtfors

Geologi

Berggrunden tillhör Svekokarelska orogenen och består av ryodacit. Bergarten är svåridentifierad, planförskiffrad men väl sammansmält och torde hålla hög hållfasthet $\geq 125 \text{ MPa}$. Utskoven är grundlagda direkt på naturlig bergyta vilket avslöjas genom förekomsten av rundade hållar, jättegrytor och spår från horisontell detaljschakt. Berggrunden är till följd av en stor vattenspegel över hela utskovskanalens bredd svår att kartera.

Under vänster ledmur närmast utskovstån har block bortslitits, flacka bankningsplan visar sig ställvis. Lutningen på de flacka planen verkar variera över utskovskanalens från horisontell till 20° och verkar uppträda företrädesvis mellan sprickzoner. Bergmassan karterades 70m nedströms skibordet där en större bergyta fanns tillgänglig. Karteringen visade på två till tre sprickgrupper en som skär utskovskanalens snett och en sprickgrupp som skär den första vinkelrätt samt bankningsplan. Sprickytor fanns antingen täta eller något öppna $< 5\text{mm}$, råa undulerande eller plana och ställvis med tunn hård sprickfyllnad. Förutom den första dominerande sprickgruppen som skär utskovskanalens uppträder övriga strukturer något oregelbundet.

Enligt Annandale's (1995) index bör den geologiska klassificeringen vara som nedanstående. Bergartshårdheten sätts till $M_s = 108$ då bergarternas exakta hållfasthet är okänd men förutsätts ej understiga 125 MPa .

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

$$K = 108 \times \frac{70 - 100}{1.83 - 2.73} \times \frac{2.0}{2.0} \times 1.20 = 3\,300 - 7\,000$$



Figur 53 Båtfors. Utskovskanalen nedströms utskoven i Båtfors. Notera att spillvattnet har börjat undergräva ledmuren ungefär vid stegens läge.



Figur 54 Båtfors. Detalj av berggrunden direkt till höger om vänster utskovs skibordsläpp. Notera den dominanta sprickgruppen som skär kanalen, de flacka sprickplanen på höger sida av berghällen.



Figur 55 Båtfors. Vy mot vänster utskov. Notera bortslitna flacka block under ledmuren samt den dominerande sprickgruppen som bildar ryggar i vattenspegeln.

Hydrauliska förhållanden och erosiv effekt

Utskovskanalen i Båtfors är rak i uppströmsdelen ned till ca 100m och kröker sedan åt höger. Utskovspartiet består av tre ytutskov, med ungefär samma bredd. Utskoven i mitten och till höger (segmentluckor) har även samma tröskelnivå, och har därmed samma avbördningskapacitet (ca 365 m³/s vid DG). Vänster utskov (sektorlucka) har en högre tröskelnivå, och därmed lägre kapacitet (ca 190 m³/s vid DG). Alla tre utskov har skibordsförlängningar, som för utskoven i mitten och till höger normalt ligger under vatten, eftersom kanalen är lite djupare i dess uppströmsdel (0,5– 1m).

Figur 56 visar utskovskanalen, sett från dammen, vid vänster utskov. Det faktum att kanalen är djupare i dess uppströmsände, innebär troligen att ett vattensprång uppstår kring övergången från vattenspegeln till torrfåra, ca 20m nedströms det vänstra utskovets nedströmsände. Kanalen smalnar även av något från skiborden till denna övergång, vilket komprimerar vattnet och bidrar till att framtvinga ett vattensprång, speciellt vid höga flöden då alla tre utskov är öppna.



Figur 56: Båtfors utskovskanal, foto från dammen, vid vänster utskov. Kanalen är först rak och kröker sedan åt höger. Vattenspiegel uppstår i uppströmsdelen p.g.a. högre nivåer ca 20 m nedströms. Foto: Norconsult (2017).

Inget tyder på att ett vattensprång bildas så mycket längre uppströms än den nämnda övergången, vid stor tappning i ett av utskoven, eftersom kanalen är grund och saknar konstruerad energiomvandling (bassäng). Detta innebär att strömningen troligen är superkritisk fram till den nämnda övergången, där ett vattensprång troligen bildas och där de största belastningarna från vattnet troligen sker. Vid stor tappning fler än ett utskov stiger troligen vattenytan relativt mycket och ett vattensprång framtvingas längre uppströms, närmare utskoven.

Nedströms vänster utskov bedöms vattenhastigheten vara störst, eftersom skibordets angreppsvinkel mot berget är flack, och hastigheten kan bibehållas längre nedströms än för de två andra utskoven.

Nedströms mittenutskovet bedöms belastningarna från vattnet bli stora och mycket energiomvandling sker där med mycket turbulens och tryckfluktuationer som följd. Detta eftersom vattnet faller fritt ett antal meter och angreppsvinkeln mot berget är relativt brant. Ett vattensprång förväntas ske relativt nära skibordet för detta utskov.

Nedströms höger utskov bedöms belastningarna också bli relativt stora, eftersom angreppsvinkeln mot berget är något brant. Ett vattensprång förväntas ske relativt en bit nedströms detta utskov. Figur 57 visar foto på utskovspartiet från höger sida, där vattnets troliga angreppsvinkel för de tre utskoven är inritade.



Figur 57: Utskovspartiet i Båtfors. Ungefärliga angreppsvinklar för vattnet, mot kanalen visas med blå pilar. Foto: Norconsult, 2017.

Figur 58 visar foto från provtappning i vänster utskov (Vattenfall R&D), oklart vilken tappning. Fotot visar att ett vattensprång bildas där kanalen övergår till torrfåra, med uppstickande bergpartier.



Figur 58: Avbördning genom vänster utskov i Båtfors, oklart vilken tappning. Vattensprång bildas vid övergång till torrfåra ca 20 m nedströms skibordet. Källa: Vattenfall R&D.



Figur 59: Avbördning genom alla tre utskov i Båtfors, uppskattad tappning 700 m³/s. Källa: Skellefteå Kraft AB.

Spillhistorik från 2008–2017 visar att det oftast förekommer en enda spillperiod per år, ibland två, typiskt maximalt en vecka sammanhängande. Årsmax under dessa perioder varierar mellan ca 100–320 m³/s (timvärden), d.v.s som mest ca en tredjedel av den maximala avbördningskapaciteten.

Fallhöjden över skiborden Δz är 17,5 m och kanalbredden är ca 50 m, vilket ger en vattenhastighet v_1 på ca 18 m/s där vattnet lämnar skibordet, beroende på tappning. Vattenhastigheten och kanalbredden ger ett vattendjup y_1 vid skibordets nedströmsände på ca 1 m och ett Froudetal Fr_1 på ca 5, beroende på tappning. Ytråheten ansätts till ett Manningtal $M=20$.

Enligt Annandale (1995) beräknas den erosiva effekten i vattnet enligt nedanstående. Beräkningar har gjorts för *två* olika flödesfall: "maxavbördning vid DG för en av segmentluckorna" (365 m³/s) och "maxavbördning alla tre utskov vid DG" (950 m³/s). Beräkningarna som gav de högsta värdena på den erosiva effekten, redovisas nedan. Övriga beräknade värden sammanställs, tillsammans med värden från de andra analyserade anläggningarna, i avsnitt 5.3.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 1817 \text{ kW/m}^2$$

vid ett fullt utvecklat vattensprång, gäller för maxavbördning vid DG för en av segmentluckorna

$$P_{erosiv} = \gamma q s_f = 145 \text{ kW/m}^2$$

vid likformig strömning med friktionsförluster, gäller för maxavbördning vid DG för alla tre utskoven

Observerad erosion och skadegrad

I Skellefteå Krafts sammanställning avseende bergerosion inför detta Energiforsk-projekt (2017) står det: "Skador på erosionsskydd. Mycket små skador på berg". I rapport

från fördjupad dammsäkerhetsutvärdering (FDU) 2013 står det att *"Erosionsskador vid skibordsanslutningar mot berg och vänster ledmurs grundläggning mot berg kan vid långvarig tappning befaras"*. I Skellefteå Krafts sammanställning står det, som kommentar till rapportering av utförd provtappning vid fördjupad inspektion (FI) 2016: *"Inga kommentarer om skador"* och *"Inga kända erosionsskador nedströms dammen"*.

5.1.9 Finnfors

Geologi

Berggrunden tillhör Svekokarelska orogenen och består av väl sammansmält metagråvacka. En tydlig bandning syns i berggrunden med företrädesvis finkornig metagråvacka genombruten av ett enskilt band av kvartsrik metagråvacka. Metagråvackan bör på grund av sin väl sammansmälta karaktär samt dess finkornighet hålla hög hållfasthet $\geq 75 \text{ MPa}$. Utskoven är grundlagda på naturlig bergyta vilken avslöjas av jättegrytor och rundade hållar. Möjligen har bergytan nedströms mittenutskovet schaktats av något vid byggnationen. Bergytan nedströms mittenutskovet har karterats. Bandningen utgör en sprickgrupp, utöver det finns flacka bankningsplan mellan banden i oregelbunden ordning. Sprickytorna är raa och plana med en mycket storskalig undulering. Enstaka bergförstärkning finns installerad.

Enligt Annandale's (1995) index bör den geologiska klassificeringen vara som nedanstående. Bergartshårheten sätts till $M_s = 55$ då bergarternas exakta hållfasthet är okänd men förutsätts ej understiga 75 MPa .

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

$$K = 50 \times \frac{80}{1.83} \times \frac{2.0}{2.0} \times 1.20 = 2\,600$$



Figur 60 Finnfors. Översikt från vänster utskov. Notera planfoliationen hos bergarten samt det ljusa bandet.



Figur 61 Finnfors. Vy mot höger utskov.



Figur 62 Finnfors. Detalj av flacka bankningsplan. Notera spricköppningen som finns ojämnt fördelad över bergytan.



Figur 63 Finnfors. Uppströms vy över mittenutskovet. Notera den ställvis i plan tätt uppspruckna karaktären hos bergmassan.

Hydrauliska förhållanden och erosiv effekt

Utskovskanalen i Finnfors är rak omedelbart i dess uppströmsdel, men smalnar av mycket ner under den vägbro som finns där. Utskovspartiet består av fyra utskov,

där de två högra har närmast identisk utformning av luckor och skibord, med en kort skibordsförlängning. Utskovet längst till vänster har en lång skibordsförlängning, från vilket vattnet faller ett antal meter ned i fåran. Utskovet till höger om detta har också en skibordsförlängning som också avslutas med ett fall ett antal meter. Det förväntas inte ske några vattensprång i området närmast dessa utskov, och erosionsrisken där bedöms som mycket liten. I detta arbete fokuseras därför på de två högra utskoven, där berg finns relativt nära nedströms utskoven (torrfåra).

De två högra utskoven har samma tröskelnivå och bredd, och har därmed samma avbördningskapacitet (235 m³/s vid DG). Ledmuren till höger kröker kraftigt till vänster, vilket sannolikt skapar relativt stora lokala belastningar från vattnet där vattenstrålen träffar ledmuren och energiomvandling sker. Bergkanalen faller sedan ner och ansluter till fåran som är gemensam för alla utskov. Figur 64 visar utskovskanalen nedströms de två högra utskoven.



Figur 64: Utskovskanalen i Finnfors, området närmast nedströms höger utskov, med en kraftigt krökande ledmur. Foto: Norconsult, 2017.

Anläggningen saknar konstruerad energiomvandling (bassäng el. dyl.). Detta innebär att strömningen troligen är superkritisk generellt i områdena närmast skiborden, med några undantag där vattnet koncentreras.

Figur 65 visar foto från provtappning i höger utskov (FDU, 2014), med fullt öppen lucka. Fotot visar att ett vattensprång bildas där vattenstrålen möter höger ledmur och vattenstrålen koncentreras.



Figur 65: Full tappning genom höger utskov i Finnfors. Vattensprång och komprimering av vattenstrålen längs den högra ledmuren. (Källa: Skellefteå Kraft, FDU 2014).

Spillhistorik från 2008–2017 visar att det oftast förekommer ca 1–2 st spillperioder per år, typiskt ca en vecka sammanhängande. Årsmax under dessa perioder varierar mellan ca 200–400 m³/s (timvärden), vilket är som mest ca 40 % av den maximala avbördningskapaciteten (ca 980 m³/s). Årsmax för samtidig tappning i varierar mellan ca 150–250 m³/s, vilket är ca hälften av den maximala avbördningskapaciteten för dessa två tillsammans (ca 470 m³/s).

Fallhöjden över skiborden är 11 m och kanalbredden för de två högra utskoven är ca 40 m, vilket ger en vattenhastighet v_1 på ca 14 m/s där vattnet lämnar skibordet, beroende på tappning. Vattenhastigheten och kanalbredden ger ett vattendjup y_1 vid skibordets nedströmsände på ca 0,5–1 m och ett Froudetal Fr_1 på ca 5, beroende på tappning. Ytråheten ansätts till ett Manningtal $M=20$.

Enligt Annandale (1995) beräknas den erosiva effekten i vattnet enligt nedanstående. Beräkningar har gjorts för *två* olika flödesfall: "normal årstappning genom de två högra utskoven" (250 m³/s) och "maxavbördning vid DG för ett av de två högra utskoven" (235 m³/s). Beräkningarna som gav de högsta värdena på den erosiva effekten, redovisas nedan. Övriga beräknade värden sammanställs, tillsammans med värden från de andra analyserade anläggningarna, i avsnitt 5.3.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 621 \text{ kW/m}^2$$

vid ett fullt utvecklat vattensprång, gäller för maxavbördning vid DG för de två högra utskoven.

$$P_{erosiv} = \gamma q s_f = 73 \text{ kW/m}^2$$

vid likformig strömning med friktionsförluster, gäller för normal årstappning för de två högra utskoven.

Observerad erosion och skadegrad

I Skellefteå Krafts sammanställning avseende bergerosion inför detta Energiforsk-projekt (2017) står det: "Viss erosion i vänster bergvägg samt i vänster anslutning till skibord för lucka 4". I rapport från dammsäkerhetsbesiktning 2008 står det att "Mindre erosionsskada finns i berg vid skibordets nedströmskant", vilket gällde höger utskov. I FDU-rapport från 2014 kommenteras återigen den synliga erosionen i vänster bergvägg.

5.1.10 Grytfors

Geologi

Berggrunden tillhör Svekokarelska orogenen och består av grönsten. Troligen metamorf andesit. Bergarten är tydligt planfolierad, små hålrum samt tjock sprickfyllnad av kvarts förekommer ställvis. I övrigt brun oidentifierad sprickfyllnad. Majoriteten av sprickorna saknar sprickfyllning utan är endast befläckade av rost. Breda zoner av förskiffrad berggrund utbytes mot mer homogen berggrund, troligen återupprepar sig detta mönster. Grönstenen är väl sammansmält men går att repa med kniv. Slagtest med hammare utfördes inte vid karteringen. Bergartens planfoliering utgör den dominerande sprickgruppen. Skiktstorleken varierar från 1 – 5cm till 25 – 100cm Flacka släppor förekommer endast lokalt och sporadiskt, speciellt anslutande kring förskiffringszoner. Bergytan var delvis täckt av snö vid karteringen men att döma av strukturerna har ingen erosion skett. En sprickgrupp vinkelrät med huvudsprickgruppen förekommer med korta spårlängder < 1m – 5m. Utskovet är grundlagd på naturlig berghäll vilket avslöjas av rundade hållar, jättegrytor samt ett fåtal horisontella borrhåll där topografin avjämnats. Sprickytorna är plana och raa och stegande alternativt undulerande och raa. Sprickorna fanns täta till något öppna < 5mm. Bergmassan karterades 25m nedströms vänster skibords tunga. Ingen bergförstärkning finns installerad.

Enligt Annandale's (1995) index bör den geologiska klassificeringen vara som nedanstående. Bergartshården sätts till $M_s = 8.39$ då bergarternas exakta hållfasthet är okänd men går att repa med kniv. Detta motsvarar en tryckhållfasthet på 13.2 MPa enligt Kirstens index, vilket verkar lågt. I brist på bättre vetenskap används tabellvärdet för bergartshården.

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

$$K = 8.39 \times \frac{10 - 100}{1.50 - 1.83} \times \frac{3.0}{2.0 - 4.0} \times 1.26 = 40 - 100$$



Figur 66 Grytfors. Översiktsbild över vänster del av utskovskanalen. Notera den dominerande strukturen tvärs kanalen samt de enstaka längre sprickorna längs kanalen.



Figur 67 Grytfors. Detalj av släppa eller bankningsplan, 2,5m nedströms vänster skibords tunga.



Figur 68 Grytfors. Detalj av förskiffrad berggrund vid vänster skibords tungas slut.

Hydrauliska förhållanden och erosiv effekt

Utskovskanalen i Grytfors avgränsas av ledmurar och är rak omedelbart i dess uppströmsdel. Höger ledmur kröker åt vänster ca 30 m nedströms skiborden, och kanalen smalnar då av. Nedströms ledmurarna breddas sedan kanalen.

Utskovspartiet består av två utskov, som har närmast identisk utformning av luckor och skibord, med en skibordsförlängning på ca 10 m. Utskoven benämns här som vänster och höger.

Bergkanalen nedströms skibordsförlängningen är flack och relativt plan d.v.s. utan uppstickande partier, vilket innebär att vattenhastigheten bibehålls en längre sträcka nedströms skiborden och superkritisk strömning råder. Det förväntas inte ske några vattensprång i området närmast utskoven, och belastningen från vattnet är troligen relativt liten där. Närmast ledmurarna sker troligen de största belastningarna från vattnet, speciellt där höger ledmur kröker till vänster, och vattenstrålen koncentreras så att ett vattensprång framtvingas. Figur 69 visar skibordsförlängningen och utskovskanalen nedströms de två utskoven.



Figur 69: Grytfors utskovskanal. Höger ledmur kröker åt vänster. Foto: Norconsult, 2017.

Anläggningen saknar konstruerad energiomvandling (bassäng el. dyl.). Detta innebär att strömningen är superkritisk närmast skiborden.

Figur 70 visar foto från provtappning (fördjupad inspektion, 2013, för vänster utskov. Fotot visar att inget vattensprång bildas nära skibordet, utan istället längre nedströms där höger ledmur har börjat kröka åt vänster och minskat kanalbredden, så att vattenstrålen koncentreras.

Figur 71 visar foto från samma provtappning men för höger utskov med fullt öppen lucka. Fotot visar att inget vattensprång bildas nära skibordet, utan istället längre nedströms där vattenstrålen möter höger ledmur och vattenstrålen koncentreras. Där sker troligen de största belastningarna från vattnet.



Figur 70: Provtappning i Grytfors vid inspektion 2013, vänster utskov. Källa: Skellefteå Kraft.



Figur 71: Provtappning i Grytfors vid inspektion 2013, höger utskov. Källa: Skellefteå Kraft.

Spillhistorik från 2008–2017 visar att det oftast förekommer ca 1–2 st spillperioder per år (vår- och höstspill), typiskt ca 1–2 veckor sammanhängande, och oftast spills det i en lucka i taget. Årsmax under dessa perioder är ca $180 \text{ m}^3/\text{s}$ (timvärden), vilket är ca halva den maximala avbördningskapaciteten för ett utskov, med undantag för något år då årsmax var ca $300 \text{ m}^3/\text{s}$ då det spilldes i båda utskoven samtidigt.

Fallhöjden över skiborden är 18 m och kanalbredden för de två högra utskoven är ca 27 m, vilket ger en vattenhastighet v_1 på som mest ca 18 m/s där vattnet lämnar skibordet, beroende på tappning. Vattenhastigheten och kanalbredden ger ett vattendjup y_1 vid skibordets nedströmsände på ca 1–1,5 m och ett Froudetal Fr_1 på ca 4, beroende på tappning. Ytråheten ansätts till ett Manningtal $M=20$.

Enligt Annandale (1995) beräknas den erosiva effekten i vattnet enligt nedanstående. Beräkningar har gjorts för *två* olika flödesfall: "normal årstappning genom ett av de två högra utskoven" (180 m³/s) och "maxavbördning vid DG för ett utskov" (360 m³/s). Beräkningarna som gav de högsta värdena på den erosiva effekten, redovisas nedan. Övriga beräknade värden sammanställs, tillsammans med värden från de andra analyserade anläggningarna, i avsnitt 5.3.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 2314 \text{ kW/m}^2$$

vid ett fullt utvecklat vattensprång, gäller för maxavbördning vid DG för ett utskov (360 m³/s)

$$P_{erosiv} = \gamma q s_f = 119 \text{ kW/m}^2$$

vid likformig strömning med friktionsförluster, gäller för maxavbördning vid DG för ett utskov (360 m³/s)

Observerad erosion och skadegrad

I Skellefteå Krafts sammanställning avseende bergerosion inför detta Energiforsk-projekt (2017) står det citerat från besiktningsrapport från 2003: "*Eroderingsproblem noteras också i berget i området nedströms det vänstra utskovet där en bakåtskridande erosion påbörjats och riskerade underminera skibordet, vidare eroderingsproblem fanns för berget n/s höger ledmur*". Efter detta anlades en skibordsförlängning nedströms. I FI-rapport från 2013 står det: "*Vid en lucka öppen kunde ingen noterbar erosion av nedströmsområdet observeras...*" och "*Höger ledmur – lokal underspolning. I anslutning till berget observerades en lokal underspolning*".

5.1.11 Rengård

Geologi

Berggrunden tillhör Svekokarelska orogenen och består av en granitoid av oklart ursprung. Granitoiden är genomlupen av tunna sprickor (riss) utöver strukturerna. Under intagsdelen består berggrunden av en mörk finkornig leptit med mycket hög hållfasthet, 150 – 200 MPa. Utskovskanalen domineras dock av vad som synes vara en medelkornig granitoid med tydliga flytstrukturer, alternativt en porfyrisk leptit, med hög hållfasthet 150 MPa. Utskovskanalen utgörs närmast utskoven av naturlig bergyta vilket avslöjas av de rundade formerna. Femtiotalet meter nedströms är berggrunden schaktad i en grund kanal nedströms vänster utskov. Bergförstärkning har installerats i höger kanalsida i den schaktade kanalen, dock har majoriteten av de block som förankrats slitits loss. Flacka bankningsplan avslöjas över kanalväggarna och når ned till skärningens hela djup, 2 – 3 m. Bankningsplanen är täta till något öppna < 2mm. Berggrunden domineras av en sprickgrupp som skär utskovskanalen, den har ställvis i ytan något öppna sprickor < 5mm. Bergmassan karterades 25m nedströms mittpelaren mellan vänster och

höger utskov. Sprickytorna saknar helt sprickfyllnad. Sprickytorna är råa och undulerande till råa och plana.

Enligt Annandale's (1995) index bör den geologiska klassificeringen vara som nedanstående. Bergartshården sätts till $M_s = 157$ då bergarternas exakta hållfasthet är okänd men förutsätts ha en tryckhållfasthet som inte understiger 150 MPa . Måttet RQD är svårbestämt då bergarten är genomlupen av riss och bör få ett mycket lågt värde $RQD = 10 - 25$. För att det skall gälla gäller dock att blocken faller sönder längs rissen, vilket de ställvis verkar göra, se fotografi nedan. Då blocken endast är systematiskt ordnade längs de storskaliga strukturerna och förefaller hela i fält finns även möjlighet för att sätta $RQD = 100$.

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

$$K = 157 \times \frac{10 - 100}{1.83 - 2.24} \times \frac{1.5 - 3.0}{0.75 - 1.0} \times 0.55 = 570 - 19\,000$$



Figur 72 Rengård. Översikt över utskovskanalen inklusive schaktad kanal som tar vid ungefär vid ledmurens slut. Notera den dominerande strukturen tvärs kanalen.



Figur 73 Rengård. Notera den dominerande strukturen tvärs kanalen samt lokalt försvunna block (avslöjas av isspeglarna)



Figur 74 Rengård. Dominerande spricksystem tvärs kanalen med ställvis öppna sprickor. Notera även rissen samt färskta brottytor längs rissen. Notera även det bortslitna blocket till höger om knivskäftet.

Hydrauliska förhållanden och erosiv effekt

Utskovskanalen i Rengård avgränsas till vänster av en lång ledmur, i uppströmsdelen. Ledmuren följer torrårans sträckning och kröker svagt till höger. Kanalen/torråran kröker sedan svagt till vänster.

Utskovspartiet består av två utskov, som har närmast identisk utformning av luckor och skibord, med en skibordsförlängning på ca 12 m. Utskoven benämns här som höger och vänster. Längs skibordsförlängningen löper en ledmur till höger och nedströms detta breddas fåran.

Bergkanalen nedströms skibordsförlängningen är flack och relativt plan men med den del uppstickande partier. Anläggningen saknar konstruerad energiomvandling (bassäng el. dyl.). Detta innebär att vattenhastigheten sannolikt bibehålls en viss sträcka nedströms skiborden och superkritisk strömning råder där. Ett vattensprång framtvingas dock troligen ett stycke nedströms, speciellt vid stora tappningar, då vattenytan nedströms troligen stiger relativt mycket p.g.a. den flacka fåran. Figur 75 visar skibordsförlängningen och utskovskanalen nedströms de två utskoven. För vänster utskov är en separat kanal utsprängd från ca 40 till 120 m nedströms skibordsförlängningen.



Figur 75: Utskovskanalen i Rengård, foto från vänster utskov. Foto: Norconsult, 2017.

Vid FDU 2012 genomfördes fullskalig provtappning med fri avbördning genom båda utskoven, d.v.s. luckan hade släppt vattnet, se figur 76.



Figur 76: Provtappning i Rengård, med fri avbördning genom båda utskoven (Foto: Skellefteå Kraft).

Spillhistorik från 2008–2017 visar att det oftast förekommer en, ibland två, längre spillperioder per år (vår- och höstspill), typiskt i storleksordningen en vecka sammanhängande, och det spills ungefär lika ofta i båda samtidigt som i en lucka i taget. Årsmax under dessa perioder är ca 400 m³/s (timvärden), vilket då fördelats på båda utskoven i någon mån. Detta är knappt 40 % av avbördningskapaciteten vid DG. Det har som mest spillts ca 250 m³/s då endast ett utskov använts (höger). Detta är knappt halva avbördningskapaciteten vid DG för ett utskov. Avbördningskapaciteten vid DG är 1080 m³/s, 540 m³/s per utskov.

Fallhöjden över skiborden är 17 m och kanalbredden för de två högra utskoven är ca 40 m i uppströmsdelen närmast utskoven, vilket ger en vattenhastighet v_1 på som mest ca 17 m/s där vattnet lämnar skibordet, beroende på tappning. Vattenhastigheten och kanalbredden ger ett vattendjup y_1 vid skibordets nedströmsände på ca 1–1,5 m och ett Froudetal Fr_1 på ca 4–5, beroende på tappning. Ytråheten ansätts till ett Manningtal $M=20$.

Enligt Annandale (1995) beräknas den erosiva effekten i vattnet enligt nedanstående. Beräkningar har gjorts för två olika flödesfall: "normal årstappning genom ett av de två högra utskoven" (250 m³/s) och "maxavbördning vid DG" (1080 m³/s). Beräkningarna som gav de högsta värdena på den erosiva effekten, redovisas nedan. Övriga beräknade värden sammanställs, tillsammans med värden från de andra analyserade anläggningarna, i avsnitt 5.3.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 1989 \text{ kW/m}^2$$

vid ett fullt utvecklat vattensprång,
gäller för maxavbördning vid DG
(1080 m³/s)

$$P_{erosiv} = \gamma q s_f = 112 \text{ kW/m}^2$$

vid likformig strömning med friktionsförluster, gäller för maxavbördning vid DG (1080 m³/s)

Observerad erosion och skadegrad

I Skellefteå Krafts sammanställning avseende bergerosion inför detta Energiforsk-projekt (2017) står det: "Inga kända kommentarer om bergerosion".

5.1.12 Krångfors

Geologi

Berggrunden tillhör Svekokarelska orogenen och består av en finkornig skiffer av mafiskt ursprung. Bergarten var tydligt folierad och väl sammansmält. Reptest med kniv eller slagtest med hammare dessvärre utfördes inte. Med avseende på bergartens ålder, sammanhållning och klingfasthet bedöms ändå hållfastheten som hög. Den torde uppvisa enaxiell tryckhållfasthet på $> 75 \text{ MPa}$. Bergmassan uppvisar en väl utvecklad linsform som löper längs utskovskanalen och domineras av en brant sprickgrupp som löper tvärs kanalen. Utskovet är grundlagd på naturlig bergyta vilket avslöjas av glacialt rundade hällar samt jättegrytor. Den djupare utskovsfåra är inte en schaktad kanal, utan består även den av naturlig bergyta. Linsformerna bildar naturliga bankningsplan mot överytan. Block som avskärs dels av linsformen dels av den dominerande sprickgruppen har slitits loss från bergförstärkning installerad vid samma årtionde som kraftverket är byggt. Sprickfyllnad saknas eller består av tunn rost. Sprickytorna är råa och undulerande till mycket råa och mycket undulerande vad gäller linsformerna.

Enligt Annandale's (1995) index bör den geologiska klassificeringen vara som nedanstående. Bergartshården sätts till $M_s = 70$ enligt tabellvärde i Annandale (2006) då bergarternas exakta hållfasthet är okänd men förutsätts ha en tryckhållfasthet som inte understiger 75 MPa .

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

$$K = 70 \times \frac{100}{1.83} \times \frac{3.0}{1.0 - 4.0} \times 0.55 = 1\,570 - 6\,300$$



Figur 77 Krångfors. Översiktsbild över höger och mittenutskovet. Berggrundens linsiga form syns väl avslöjat av snötäcket. Notera även den dominerande sprickgruppen tvärs kanalen. Bergytan direkt nedströms utskoven är delvis övergjuten.



Figur 78 Krångfors. Översiktsbild över vänster sida av utskovsfåran för mittutskovet. Notera speciellt linsformerna som accentueras väl av snötäcket.



Figur 79 Krångfors. Bergytan nedströms höger utskov utan snötäcke. Notera de öppna bankningsplanen som följer linsformerna högs upp i bild, här i synfältet längs linsaxeln. Notera även foliationen och de bortslitna blocken till höger samt bergförstärkning.



Figur 80 Krångfors. Bergytan nedströms höger utskov sedd från vänster in mot ledmuren. Notera de avhuggna linsformerna samt jättegrytorna.

Hydrauliska förhållanden och erosiv effekt

Utskovskanalen i Krångfors avgränsas i uppströmsdelen av ledmurar både till höger och till vänster. Det finns en djupfåra nedströms de två vänstra utskoven.

Kanalen smalnar av ner under vägbro. Figur 81 visar en översikt av utskovskanalen.

Utskovspartiet består av tre utskov, där de två till höger har närmast identisk utformning av luckor och skibord, medan utskovet till vänster är smalare och har ett längre och flackare skibord (sektorlucka, tidigare flottningsutskov). Mittenutskovets skibord är kort, eftersom det under skibordet finns ett bottenutskov med tre öppningar, som dock inte är i drift. Tröskeln för bottenutskovet sträcker sig ca 10 m nedströms skibordet och vattnet från ytutskovet landar där.

Höger utskovs skibord övergår i berg, men med en hel del igjutningar. En hög ledmur finns på höger sida, och ca 15 m nedströms skibordet kröker ledmuren och bergväggen vinkelrätt åt vänster. Utskoven benämns här som vänster, mitten och höger. Figur 82 visar området nedströms höger utskov.



Figur 81: Översikt, Krångfors utskovskanal. Foto: Norconsult, 2017.



Figur 82: Området nedströms höger utskov i Krångfors. Vinkelrätt krök för vattnet, där det möter bergväggen. Foto: Norconsult, 2017.

Anläggningen saknar konstruerad energiomvandling (bassäng el. dyl.). Längs sträckan uppströms vägbron är kanalen flack och relativt trång och med en del uppstickande partier. Detta innebär troligen att ett vattensprång framtingas nedströms de två utskoven till vänster, speciellt vid stora tappningar, då vattenytan nedströms troligen stiger relativt mycket. Ett vattensprång framtingas även nedströms höger utskov, eftersom bergväggen nedströms bromsar vattnet kraftigt. Sträckan från skibordet fram till bergväggen utsätts troligen för stora belastningar vid stora tappningar, p.g.a. att mycket energiomvandling sker där med mycket turbulens och tryckfluktuationer. Figur 83 visar foto från provtappningen vid FDU 2015, höger utskov, då det spilldes ca 240 m³/s.

Spillhistorik från 2008–2017 visar att det oftast förekommer 1–2 st lite längre spillperioder per år (vår- eller höstspill), typiskt i storleksordningen en vecka sammanhängande, och det spills relativt ofta i fler än ett utskov samtidigt. Det har spillts mest i vänster utskov.

Årsmax under dessa perioder är som mest ca 400 m³/s (timvärden), vilket då fördelades på de två högra utskoven. Detta är drygt halva avbördningskapaciteten vid DG. Det har som mest spillts ca 200 m³/s i ett utskov (mitten), förutom provtappningar, som normalt varar i storleksordningen 10 minuter. Motsvarande värde för de andra två utskoven är ca 150 och 170 m³/s, för höger respektive vänster. Avbördningskapaciteten vid DG är ca 750 m³/s, fördelat som ca 170, 290 och 290 m³/s på utskoven från vänster till höger.



Figur 83: Provtappning i höger utskov i Krångfors, i samband med FDU (2015). Källa: Skellefteå Kraft.

Det fokuseras på höger utskov i denna studie, eftersom området nedströms normalt är torrt, till skillnad mot de andra två utskoven, varför skadegraden är möjlig att uppskatta.

Fallhöjden över höger utskovs skibord är ca 20 m och kanalbredden är ca 20 m, vilket ger en vattenhastighet v_1 på som mest ca 19 m/s där vattnet lämnar skibordet, beroende på tappning. Vattenhastigheten och kanalbredden ger ett vattendjup y_1 vid skibordets nedströmsände på ca 0,5–1 m och ett Froudetal Fr_1 på ca 7, beroende på tappning. Ytråheten ansätts till ett Manningtal $M=20$.

Enligt Annandale (1995) beräknas den erosiva effekten i vattnet enligt nedanstående. Beräkningar har gjorts för två olika flödesfall: "maxavbördning provtappning 2015 för höger utskov" (240 m³/s) och "maxavbördning vid DG för höger utskov" (290 m³/s). Beräkningarna som gav de högsta värdena på den erosiva effekten, redovisas nedan. Övriga beräknade värden sammanställs, tillsammans med värden från de andra analyserade anläggningarna, i avsnitt 5.3.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 1796 \text{ kW/m}^2$$

vid ett fullt utvecklat vattensprång,
gäller för maxavbördning vid DG för
höger utskov" (290 m³/s)

$$P_{erosiv} = \gamma q s_f = 199 \text{ kW/m}^2$$

vid likformig strömning med friktions-
förluster, gäller för maxavbördning
vid DG för höger utskov" (290 m³/s)

Observerad erosion och skadegrad

I Skellefteå Krafts sammanställning avseende bergerosion inför detta Energiforsk-projekt (2017) står det: "Möjlig bergerosion i spillfåra vid spill 2015. Ska kontrolleras till

våren/sommaren med ekolodning alt. laserskanning". Vid en ytterligare (uppföljande) mätning, efter ett spill, kan detta följas upp. Från provtappning med vänster utskov under FDU rapporterades det: "Efter tappningen konstaterades att sten och grus hade anhopats en bit ned..." och "Berget är rösigt och lättvittrat och stenmaterialet kommer troligen från eroderat berg i botten av energiomvandlaren. Det är möjligt att bergvittringen fortsätter så eventuellt kan samma problem uppstå igen med uppspolning av sten och block vid framtida större tappningar". Ingen erosion noterades nedströms mittenutskovet vid samma provtappning.

Från samma provtappning, men för höger utskov, noterades: "Ingen bergerosion längs slänterna observerades. Vid en eventuell tappning genom alla utskov samtidigt så går det inte att utesluta risk för att skador kan uppstå".

5.1.13 Selsfors

Geologi

Berggrunden tillhör Svekokarelska orogenen och består av en finkornig kvartsit i band mellanlagrad av väl sammansmält sandsten eller skiffer. Bergarterna var ej repbara med kniv. Med avseende på bergartens ålder, sammanhållning och klingfasthet bedöms hållfastheten som mycket hög. Den torde uppvisa enaxiell tryckhållfasthet på $> 150 - 200 \text{ MPa}$. Utskoven är grundlagda på naturlig bergyta vilket avslöjas av de rundade hållarna samt de många jättegrytor som förekommer i bergartskontakterna längs banden. Bergmassan domineras av en brant sprickgrupp som löper längs utskovskanalen, en annan som löper tvärs samt flacka bankningsplan, vilka företrädesvis framträder nedströms högra delen av utskovskanalen. Den sprickgrupp som löper tvärs utskovskanalen verkar påverka uppsprickningen av den bandade partiet i mindre utsträckning än det mer homogena till höger, vilket spricker upp i kvadratiske block. De branta sprickyrtorna är undulerande och plana medan de flacka är råa och undulerande. Sprickfyllnad saknades, dock förekom rikligt med rost. Öppenheten i sprickplanen varierar allt från mycket täta till öppna $< 5 \text{ mm}$.

Enligt Annandale's (1995) index bör den geologiska klassificeringen vara som nedanstående. Bergartshårdheten sätts till $M_s = 157$ då bergarternas exakta hållfasthet är okänd men förutsätts ha en tryckhållfasthet som inte understiger 150 MPa .

$$K = M_s \times K_b \times K_d \times J_s = M_s \times \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times J_s$$

$$K = 157 \times \frac{70 - 100}{2.24 - 2.73} \times \frac{2.0 - 3.0}{1.0 - 4.0} \times 0.72 = 1\,450 - 15\,000$$



Figur 84 Selsfors. Berggrunden under snötäcke som accentuerar landformerna. Notera den långsträcka bandningen längs utskovskanalen nedströms mittenutskovet samt den storblockiga karaktären nedströms höger utskov.



Figur 85 Selsfors. Detalj av berggrunden nedströms mittenutskovet. Notera kvartsiten till höger samt bandningen av amfibolitband i mitten som är översållad med jättegrytor i de svagare bergartskontaktarna.



Figur 86 Selsfors. Detalj av berggrunden direkt nedströms mittenutskovet. Notera den mjuka karaktären hos de branta sprickytorna, bankningsplanen och jättegrytorna.

Hydrauliska förhållanden och erosiv effekt

Utskovskanalen i Selsfors avgränsas i uppströmsdelen av ledmurar både till höger och till vänster. Kanalen är flack och smalnar av de första ca 80 m, där den kröker åt höger. Figur 81 visar en översikt av utskovskanalen.

Utskovspartiet består av tre utskov, där de två till höger har närmast identisk utformning av luckor och tröskelnivå, medan utskovet till vänster är smalare och har ett längre och flackare skibord (sektorlucka, tidigare flottningsutskov). Mittenutskovets skibord är kort, eftersom det under skibordet finns ett bottenutskov. De två högra utskoven har ingen skibordsförlängning, medan vänster utskov har en med plomberingsgjutningar försedd bergyta nedströms skibordet.

Mittenutskovets skibord avslutas med en relativt brant angreppsvinkel mot berget, p.g.a. bottenutskovet under. Höger utskovs skibord övergår i berg, där en naturlig bassäng finns. Det är oklart om bassängen har bildats p.g.a. erosion. Skibordet avslutas något brant, jämfört mot vad som vore önskvärt. En hög ledmur finns på höger sida, vilken kröker åt vänster. Figur 87 visar området nedströms vänster utskov.

Utskoven benämns här som vänster, mitten och höger. Figur 84 visar området nedströms mittenutskovet. Figur 88 visar området nedströms höger utskov.



Figur 87: Utskovskanalen nedströms vänster utskov i Selsfors. Foto: Norconsult, 2017.



Figur 88: Utskovskanalen nedströms höger utskov i Selsfors. Foto: Norconsult, 2017.

Anläggningen saknar konstruerad energiomvandling (bassäng, stötbotten el. dyl.). På grund av att kanalen är flack, och smalnar av den första sträckan, framtvings troligen ett vattensprång speciellt vid stora tappningar.

Nedströms vänster utskov bedöms vattenhastigheten vara störst, eftersom skibordets angreppsvinkel mot berget är flack samt att kanalen är relativt jämn, med få uppstickande partier. Superkritisk strömning råder då troligen en sträcka

nedströms, med mycket turbulens och stora tryckfluktuationer som följd, vilket ökar risken för erosion.

Nedströms mittenutskovet bedöms belastningarna från vattnet bli stora och mycket energiomvandling sker där med mycket turbulens och tryckfluktuationer som följd. Detta eftersom vattnet faller fritt ett antal meter och angreppsvinkeln mot berget är relativt brant. Ett vattensprång förväntas ske relativt nära skibordet för detta utskov.

Nedströms höger utskov bedöms belastningarna också bli relativt stora, eftersom angreppsvinkeln mot berget är något brant. Ett vattensprång förväntas ske en bit nedströms detta utskov. Figur 89 visar foto på utskovspartiet från höger sida, där vattnets troliga angreppsvinkel för de tre utskoven är inritade. Detta är f.ö. liknande förhållandena för Båtfors.



Figur 89: Selsfors utskovsparti, foto från höger strand nedströms. Blå pil visar angreppsvinkel för vattnet för mittenutskovet. Foto: Norconsult, 2017.

Spillhistorik från 2008–2017 visar att det oftast förekommer 1–2 st lite längre spillperioder per år (vår- och höstspill), typiskt i storleksordningen 1–2 veckor sammanhängande. Generellt verkar det spillas i ett enda utskov för tappningar upp till ca 200 m³/s, och för högre tappningar fördelas tappningen på flera utskov.

Årsmax under dessa perioder är som mest ca 440 m³/s (timvärden), vilket då fördelades på alla tre utskov. Detta är knappt 70 % av avbördningskapaciteten vid DG. Det har som mest spillts ca 180 m³/s i ett utskov (gäller alla tre), förutom vid provtappningar, som normalt varar i storleksordningen 10 minuter.

Avbördningskapaciteten vid DG är ca 640 m³/s, fördelat som ca 180, 230 och 230 m³/s på utskoven från vänster till höger. Det har med andra ord varit full lucköppning i vänster utskov under någon period.

Figur 90 visar foto från provtappning, som redovisades i FDU-rapport från 2002. Tappningens storlek är okänd.



Figur 90: Foto från provtappning i Selsfors, redovisad i FDU-rapport från 2002. Tappning i alla tre utskoven, med okänt flöde. Källa: Skellefteå Kraft.

Fallhöjden över utskovens skibord Δz är ca 16 m och kanalbredden är ca 60 m omedelbart nedströms skiborden, men smalnar av till ca 50 m, ca 80 m nedströms. Detta ger en vattenhastighet v_1 på som mest ca 17–18 m/s där vattnet lämnar skibordet, beroende på tappning. Vattenhastigheten och kanalbredden ger ett vattendjup y_1 vid skibordets nedströmsände på ca 0,5–1 m och ett Froudetal Fr_1 på 5–7, beroende på tappning. Ytråheten ansätts till ett Manningtal $M=20$.

Enligt Annandale (1995) beräknas den erosiva effekten i vattnet enligt nedanstående. Beräkningar har gjorts för *två* olika flödesfall: "maxavbördning vid DG" (ca 640 m³/s) och "dimensionerande flöde" (1284 m³/s), som kräver en överdämning på ca 1,8 m. Beräkningarna som gav de högsta värdena på den erosiva effekten, redovisas nedan. Övriga beräknade värden sammanställs, tillsammans med värden från de andra analyserade anläggningarna, i avsnitt 5.3.

$$P_{erosiv} = \gamma q \frac{\Delta E}{L} = 1923 \text{ kW/m}^2$$

vid ett fullt utvecklat vattensprång, gäller för dimensionerande flöde

$$P_{erosiv} = \gamma q s_f = 151 \text{ kW/m}^2$$

vid likformig strömning med friktionsförluster, gäller för maxavbördning vid DG

Observerad erosion och skadegrad

I Skellefteå Krafts sammanställning avseende bergerosion inför detta Energiforsk-projekt (2017) står det: "Mycket små kända skador". I FDU-rapport (2002) står det: "Erfarenheten från de senaste årens flöden är att erosionsskador inte har uppträtt

nedströms...” och ”Erosionsskador vid skibordsanslutningar mot berg/stötbotten befaras vid långvariga tappningar. I dagsläget konstateras endast mindre erosion...”. Från FI-rapport (2014) finns foton på trolig erosion under skibordet för vänster utskov samt under vänster ledmur för mittenutskovet.

5.2 KOMMENTARER

Den erosiva effekten kan vara högre vid avbördning genom *ett* utskov, än vid för alla utskov samtidigt. Detta beror på att flödet per breddmeter kan vara större vid tappning endast i en lucka, samt att vattendjupet nedströms då är lägre, men mindre dämpande effekt.

Ur erosionssynpunkt är det därmed bättre att fördela tappningen på fler utskov, även med tanke på att vid tappning med ej fullt öppen lucka, introduceras en strömningsförlust då luckan ligger i vattnet. Detta reducerar vattenhastigheten och därmed den erosiva effekten.

5.3 EROSIONINDEX-DIAGRAM

Beräknade värden på geologiskt index samt på erosiv effekt, för de analyserade anläggningarna, redovisas nedan i tabell 3.

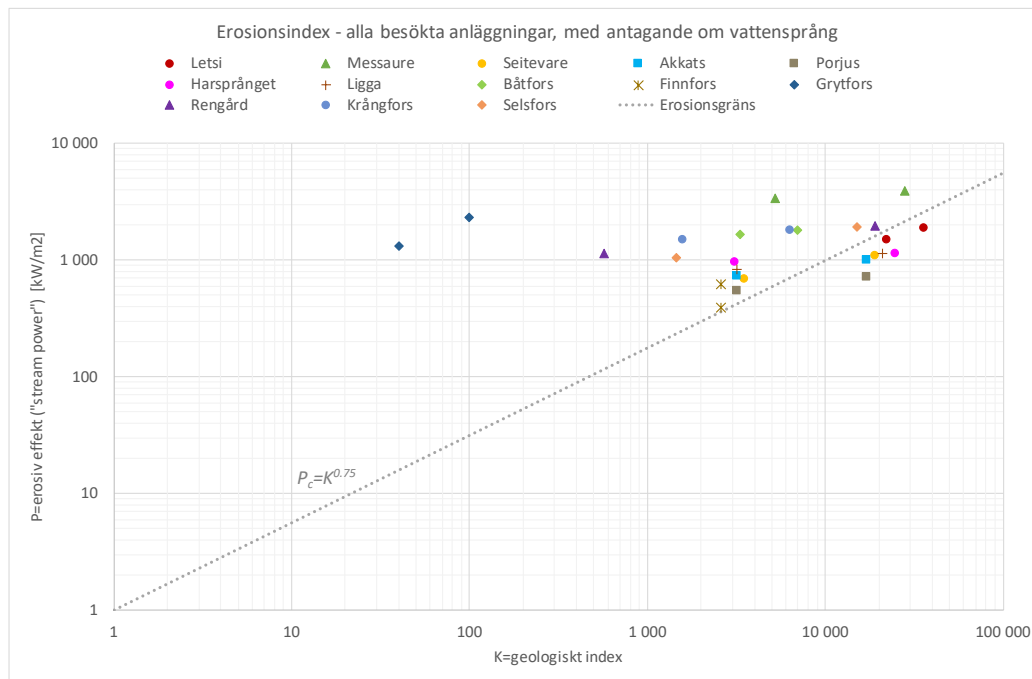
Tabell 3: Beräknade värden på geologiskt index och erosiv vatteneffekt. Två olika antagna strömningsförhållanden, och två olika typer av geologiska förhållanden.

Anläggning	Erosiv vatteneffekt P [kW/m ²]				Erosionsindex K_h	
	Kanalströmning		Vattensprång		Högst	Lägst
	Högst	Lägst	Högst	Lägst		
Letsi	75	70	1 877	1 493	36 000	22 000
Messaure	195	173	3 913	3 404	28 000	5 200
Seitevare	78	52	1 090	696	19 000	3 500
Akkats	46	43	1 015	735	17 000	3 200
Porjus	39	36	721	548	17 000	3 200
Harsprånget	70	63	1 137	967	24 700	3 100
Ligga	59	58	1 134	831	21 000	3 200
Båtfors	145	136	1 817	1 670	7 000	3 300
Finnfors	91	73	621	394	2 600	2 600
Grytfors	132	119	2 314	1 314	100	40
Rengård	139	112	1 989	1 143	19 000	570
Krångfors	205	199	1 796	1 507	6 300	1 570
Selsfors	151	137	1 923	1 048	15 000	1 450

Nedan redovisas plottade värden för de analyserade anläggningarna (13 st) i ett diagram enligt Erosionsindexmetoden. Diagrammet plottas mot log-log-skala, för att skiljelinjen $P=K^{0,75}$ ska kunna plottas linjärt, vilket ger en tydligare illustration. Skiljelinjen utgör ”erosionsgränsen”, som tidigare beskrivits. Värden ovanför erosionsgränsen indikerar att erosion sker vid given belastning (erosiv effekt P) och geologiskt index (K -värde).

För varje anläggning har två punkter plottats – för högsta respektive lägsta geologiska index, eftersom minst två geologiska index togs fram per anläggning.

För alla plottade värden har ett antagande om att ett fullt utvecklat vattensprång sker nedströms utskoven, vilket är mer eller mindre konservativt.



Figur 91: Erosionsindex-diagram för alla besökta anläggningar, med antagande om att vattensprång sker för alla, men två olika geologiska index per anläggning.

För vissa av anläggningarna hamnar två punkterna på varsin sida om erosionsgränsen, och för de andra hamnar de två på samma sida.

En slutsats som kan dras från diagrammet är att för de flesta anläggningarna indikeras att erosion bör ske vid de belastningar (tappningar) som undersökts. De undersökta anläggningarna bör kunna anses vara en representativ delmängd av alla svenska anläggningar. Detta kan uppfattas som att det finns en omfattande problematik för svenska anläggningar, varför det har utförts en känslighetsanalys på utfallet, avseende på antaganden och valda parametervärden. Detta redovisas i avsnitt 5.5.

För en del av anläggningarna har erosion observerats, medan för en del andra finns inga noteringar, vilket kan bero på att ingen erosion har skett eller på att det inte fokuserats på att dokumentera bergerosion. Dessutom kan skadegraden mellan olika anläggningar variera stort, och även tappningsmönster (spillhistorik).

5.4 SAMMANFATTNING AV EROSIONSERFARENHETER OCH INDIKERAT EROSIONSINDEX

Av de 13 kraftverk som besökts har storskaliga åtgärdsprogram utförts för Porjus, Ligga och Harsprånget. Samtliga av dessa kraftverk kännetecknas också av en spröd bergmassa och allestädes förekomst av bankningsplan åtskilda av större eller mindre sprickvidder. Bankningsplan finns även i Seitevare, här utgörs dock utskovskanalen av en relativt trång, sprängd kanal där lossgörande av block i den dimensionen bankningsblocken håller blir svåra att lösgöra. Även höger sida av

utskovskanalen av Rengårds kraftstation är belagd med bankningsblock. Enligt fältbesiktningen har viss, mindre erosion av dessa block skett.

Givet resultaten från Frizell (2007) där tryck från strömmande vatten tillåts ledas in under plattor, vilket även blir samstämmigt med den mellersta termen i den modell med tre tryckinducerande processer beskrivet i kapitel 3.3.4 blir den enskilt viktigaste geologiska observationen att fastställa om det finns bankningsplan och om spricköppningarna är slutna eller öppna. För en berggrund som har bankningsblock i lämpliga dimensioner samt öppna sprickor emellan bankningsblocken kan erosion befaras. För övriga fall bör en viss försiktighet med tolkning av resultaten från antingen index-studier eller kinematiska studier antas.

Som tidigare nämnt i kapitel 3.3.2 befaras att internationella studier utförts i berggrund som inte utsatts för nedisning och därmed i högre grad är hydrauliskt konduktiv än den berggrund vi i allmänhet har nationellt, undantaget bergmassor med bankningsplan. Den hydrauliska konduktiviteten eller spaltvidden hos sprickorna har stor betydelse för resulterande lyftkrafter vilket visas av Frizell (2007). Utökade laboratoriestudier av dessa fenomen föreslås.

5.5 DISKUSSION KRING METODKÄNSLIGHETER

Här diskuteras metodkänsligheten hos Erosionsindex (Annandale, 1995), utifrån dess uppbyggnad och de antaganden som krävs.

Geologiska förhållanden

Möjliga handhavandefel när det geologiska indexet skall utvärderas diskuteras här. Det enskilt största diskrepansen mellan modell och verklighet vid beräkning av K rör måttet RQD (Deere 1964). Detta mått är utarbetat för att beskriva borrhärdar och utgörs av kvoten.

$$RQD = \left(\frac{\text{Totalt längd av kärnbitar över 100mm}}{\text{Total längd kärna}} \right) \times 100 [\%]$$

Korrekt använt skulle en bergmassa med sprickfrekvens av ~ 9 sprickor per meter, jämt fördelade, hålla samma RQD på 100% som en bergmassa med en sprickfrekvens av ≤ 1 spricka per meter. Måttet blir okänsligt för verklig blockstorlek vilken som exempel kan variera från block på $D = 11\text{cm}$ till $D \geq 5\text{m}$ utan att förändra det geologiska indexet. Annandale (2006) refererar även till Palmström's (1982) samband mellan volymetrisk sprickfrekvens J_v och RQD vilket inte ger samma förhållande som beskrivet ovan utan sjunker med antalet sprickor. RQD -måttet kommer således bero på den geolog som gör bedömningen. Osäkerheterna gäller både ingångsdaten till erosionsindex uppbyggnad samt fältbedömningen vid enskilda kraftverk där erosionsindex skall utvärderas. Även för antalet sprickgrupper finns svårigheter när urbergsskölden behandlas. Stora granitkroppar verkar sällan vara uppspruckna i genomgående spricksystem över hela volymen, det kan finnas 3 eller 4 sprickgrupper representerade över ett område där dominerande sprickgrupp alternerar över varje delområde. Detta är inte alltid fallet men utgör ett återkommande problem vid strukturkartering av granitintrusioner. En konservativ geolog skulle i det fallet räkna med det större

antalet sprickgrupper medan en mer realistisk skulle vara böjd att välja lägre antal. Valet har stor påverkan på det geologiska indexet.

Vid utvärdering av Kirstens geologiska index för våra 13 stationer ges Grytfors damm värden $40 \leq K \leq 100$ vilka är avsevärt lägre än för övriga stationer. Orsaken är skattningen av masstyrketalet M_s vilken enligt Kirstens skala skall sättas till maximalt 8,39 vid bergarter som kan skrapas med kniv, vilket är fallet för Grytfors berggrund. Fältkarteringen ger inte indikationer på att någon erosion skulle ha skett, vilket det låga geologiska indexet antyder mot spillvattnets energiförlust, se kapitel 5.1.10. Mjuka bergarter påträffas internationellt i olika typer av stratifierade sedimentära bildningar. Dessa kännetecknas förutom av sin mjukhet även av en hydraulisk öppenhet när det gäller sandstenar av olika slag. Avsaknaden av sentida nedisningsperioder påverkar också hållfastheten hos bergarterna då ytberget tenderar att vittra och sönderbrytas över geologisk tid. Berggrunden vid Grytfors damm är enligt fältkartering mycket tät och verkar sakna horisontella bankningsplan över hela sin utsträckning, vilket troligen är en följd av bergartens mjukhet. Även uppsprickningen kan kommenteras. Bergarten är planfolierad till förskiffrad och varierar i mått av RQD från 10–100%. Det lägre värdet skulle antyda högre erosionskänslighet enligt Kirstens index emedan det högre värdet på RQD lägre erosionskänslighet. Den observerade tätheten från fältkarteringen av det förskiffrade området antyder tvärt om att detta parti skulle vara mer motståndskraftigt mot erosion än de flacka block som ligger strax nedström där RQD är 100%.

Alla system har sina inre motsägelser, ovanstående utläggning tjänar till att belysa viss problematik med användandet av Annandale's (1995) erosionsindex.

Önskar man använda index-metoder föreslås istället att möjligheten att utvärdera geologin enligt Pells (2017) index undersöks. Pells geologiska index undviker användandet av de två faktorerna M_s och RQD . Användandet av GSI och vinkel på den förhärskande strukturen ger betydligt mindre utrymme för alternativa tolkningar av berggrundens egenskaper. Det bör dock observeras att denna studie inte utvärderat anläggningarna enligt Pells (2017) metodik. Det kan därför inte sägas om resultaten är samstämmigare gentemot drifterfarenheterna.

Hydrauliska förhållanden

Annandale (2006) redovisar beräkning av erosiv vatteneffekt för några olika hydrauliska förhållanden, t.ex. "likformig kanalströmning", "fritt fallande vatten" och "fullt utvecklat vattensprång". För många anläggningar (i Sverige och i världen) sker inget fullt utvecklat vattensprång, utan istället kanske ett svagt vattensprång eller t.o.m. inget alls, men dock superkritisk strömning med kraftig turbulens och därmed stora tryckfluktuationer.

Det finns idag inget härlett samband för erosiv vatteneffekt avseende kraftigt turbulent strömning. Detta innebär att sambandet för vattensprång oftast används och ger därmed en överskattning av den erosiva vatteneffekten i någon mån. Används istället sambandet för likformig strömning, d.v.s. där strömningen är parallell med älvbotten med endast lite turbulens, underskattas istället den erosiva vatteneffekten troligen mycket.

En annan viktig notering är att då fri avbördning ej råder, d.v.s. då luckan inte släppt vattnet, introduceras en energiförlust som ger en lägre vattenhastighet nedströms jämfört mot fri avbördning. Detta kan uttryckas som att den tillgängliga fallhöjden över utskovet då är lägre jämfört mot när fri avbördning råder. Detta beskrivs inte i Erosionsindexmetoden, varför det är troligt att de flesta analyser för tappningar med ej fullt öppna luckor, överskattar den erosiva vatteneffekten i någon mån.

Viktigt i sammanhanget är då att de tappningar som uppstår under ett normalt driftår, och de lucköppningar som då krävs, oftast är just delöppningar (ej fullt öppna). De flesta skador som observerats, och då kopplats till de flöden som uppstått, är alltså associerade med delöppningar. Om det då utförts utvärderingar med Erosionsindexmetoden för dessa, finns det en risk att den erosiva vatteneffekten har överskattats ur den aspekten.

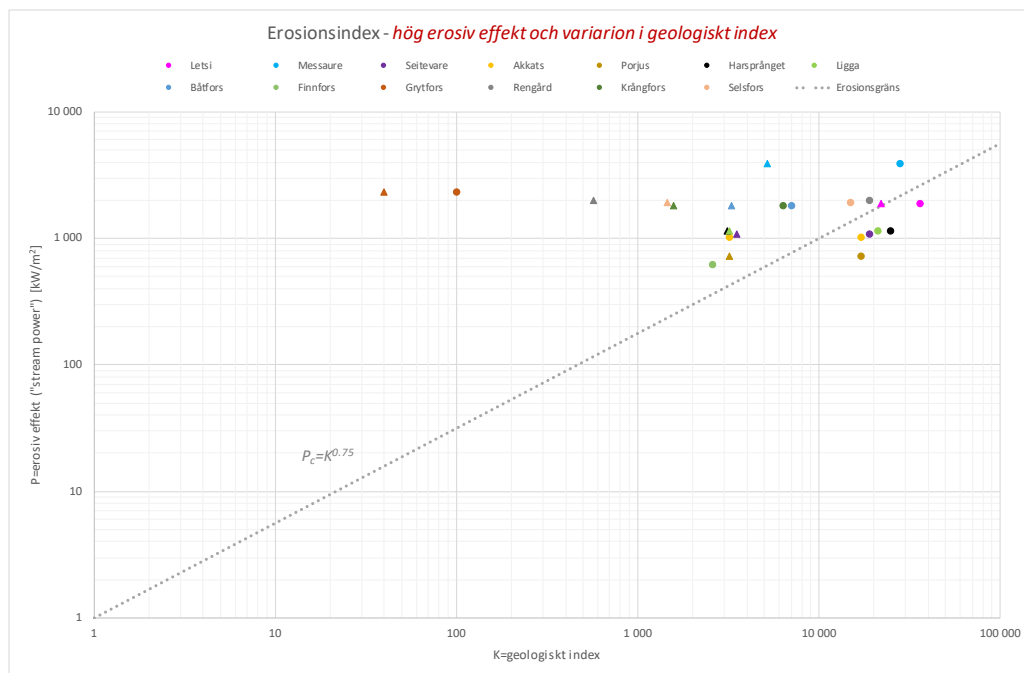
Sammantaget innebär detta att det dels finns begränsningar i metoden i sig, att den erosiva vatteneffekten framförallt kan bli överskattad, och dels att varje analys är en ytterst subjektiv bedömning som påverkar resultatet mycket.

Tidigare studier avseende vattensprång har visat på ett linjärt samband mellan tryckfluktuationernas standardavvikelse och erosiv vatteneffekt. Kanske kan detta användas för att härleda samband för erosiv vatteneffekt för andra turbulenta strömningsförhållanden än vattensprång.

Jämförande diagram Erosionsindex

Nedan görs några illustrativa jämförelser med hjälp av diagram, med syftet att påvisa vissa osäkerheter som är behäftade med Erosionsindexmetoden.

I figur 92 är alla besökta anläggningar plottade, och utvärderade utifrån antagandet att ett vattensprång sker nedströms, men för olika antagande gällande geologin.

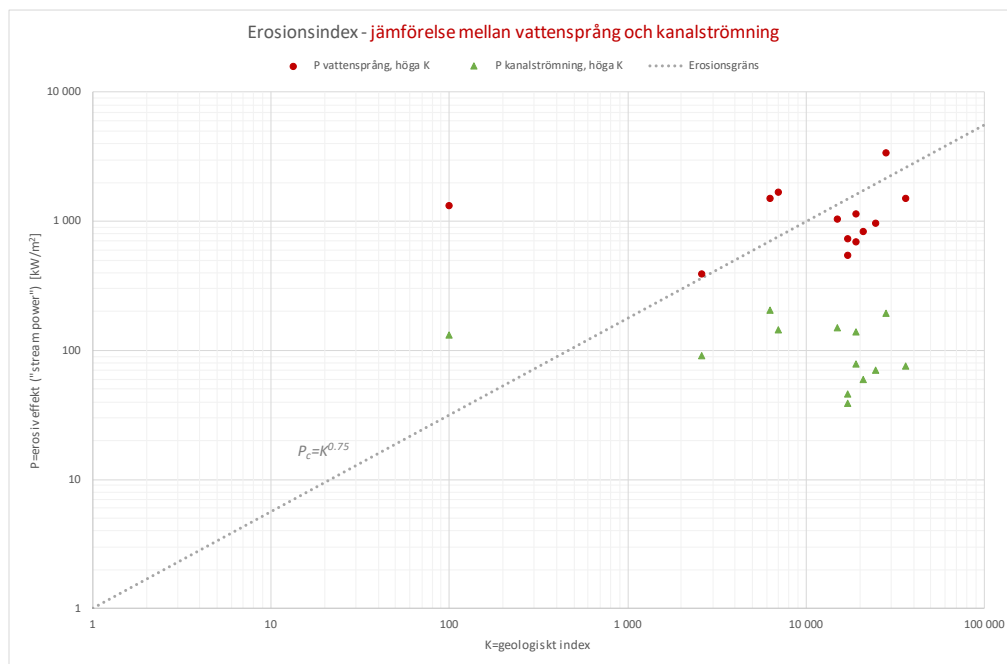


Figur 92: Jämförande diagram med erosiv effekt för vattensprång men olika geologiska förhållanden för samma anläggning.

I diagrammet ses att vissa anläggningar ligger punkterna över erosionsgränsen oavsett antagna geologiska förhållanden (högt eller lågt K-värde), och för andra hamnar en punkt över och en under erosionsgränsen. Detta kan ge upphov till osäkerhet kring hur resultatet ska tolkas, huruvida det föreligger risk för skadlig erosion.

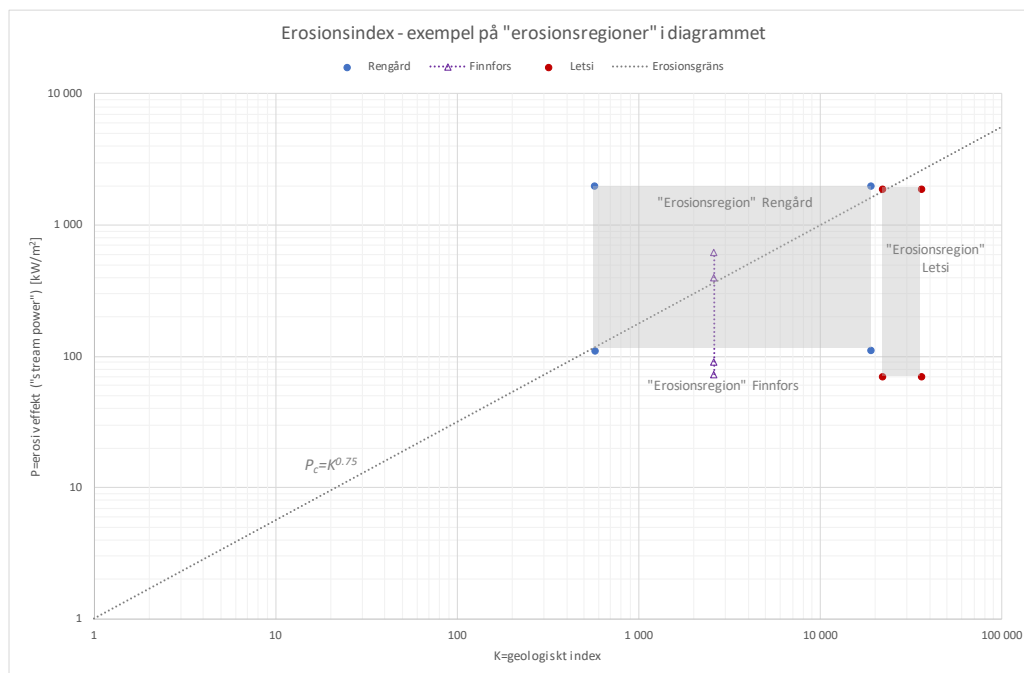
I figur 93 jämförs erosiv effekt för vattensprång och för kanalströmning, för de analyserade anläggningarna. Detta visar att om kanalströmning antas indikeras allt som oftast att erosion *inte* sker, förutom ett undantag bland dessa. Detta är dock förväntat, eftersom likformig kanalströmning ger erkänt små belastningar på ytan den strömmar över.

Ett antagande om kanalströmning (likformig strömning) ger dock i de allra flesta fall en underskattning av belastningen, eftersom relativt mycket turbulens oftast förekommer i spillfåror, med tryckfluktuationer och högre belastning som följd. Ett antagande om att ett fullt utvecklat vattensprång sker kan i många fall istället vara en överskattning av belastningen (den erosiva effekten), och sanningen ligger ofta mellan dessa två.



Figur 93: Jämförelse av erosiv effekt för vattensprång och för kanalströmning, för de analyserade anläggningarna.

I figur 94 visas exempel för några av de besökta anläggningarna, där "erosionsregioner" visas för dessa, d.v.s. punkterna kan ligga inom dessa regioner, beroende på vilka antaganden som görs. Detta visar på en osäkerhet i metoden.



Figur 94: Jämförande diagram, som visar erosionsregioner för några anläggningar. Inom dessa regioner kan punkterna ligga.

För exemplet Rengård ses tydligt att erosionsregionen är stor och sträcker sig lika mycket över som under erosionsgränsen. För exemplet Letsi ligger i princip hela

regionen under erosionsgränsen. För exemplet Finnsfors kunde endast ett geologiskt index (K-värde) fås fram, varför regionen representeras av en linje snarare än en yta.

En slutsats av detta kan vara att endast om hela regionen befinner sig på en av sidorna av erosionsgränsen, bör det användas som en indikator på erosion. Detta gäller för exemplet Letsi, men inte för de två andra.

6 Slutsatser och rekommendationer

En av de viktigaste slutsatserna rör hanteringen av den hydrauliska lasten som används i samtliga index-metoder. Denna måste bedömas som otillräcklig för våra syften. Detta har lett oss till att föreslå en alternativ modell för att utvärdera erosion samt nödvändiga arbeten för att definiera denna.

Nedan diskuteras under slutsatser främst de upplevda tillkortakommanden som Erosionsindex för med sig. Under rekommendationer summeras sedan i kortfattad form de rekommendationer och arbeten som är nödvändiga för att ersätta index-metoderna.

6.1 SLUTSATSER

En av de viktigaste slutsatserna rör hanteringen av den hydrauliska lasten i Erosionsindex. Annandale (1995) rättfärdigar användandet av energiförlust som hydraulisk last med att "magnituden av tryckfluktuationerna ökar med energiförlusten", efter att ha citerat undersökningar av tryckfluktuationer i vattensprång utförda av Fiorotto (1992a).

Även om ovanstående citat är riktigt, kan inte framtvingad turbulens och därmed följande tryckfluktuationer i vattenmassan vara den enda källan till kraftöverföring till undergrunden. Ett block i en energiomvandlarbassäng torde utsättas för ett bärighetstryck och ett dynamiskt tryck, utöver tryck skapade från turbulens. Detta visas genom en undersökning av förekommande tryck och energiförluster vid kanalströmning i kapitel 3.3.4 ovan. Mått på energiförlust kan endast ge indikationer på vilka hydrauliska krafter som verkar på undergrunden.

Vi bedömer givet utläggningen i kapitel 3.3.4 ovan, att utvärdering av erosionspotential via skattning av energiförluster inte ensamt kan användas som indikator på erosionspotential.

Uppdraget hade som uppgift att undersöka om Erosionsindex kunde verifieras och utvecklas för att anpassas till nationella förhållanden (se kapitel 2.1). Vi bedömer att det är osäkert om denna utvecklingslinje bör drivas, och detta av flera skäl. Dels är det att den är *indikativ*, och speciellt för fall med kanalströmning är användningen av energiförluster som mått på hydraulisk belastning fysikaliskt tveksam. Bedömningen av vilka strömningsförhållanden som råder, är ytterst subjektiv, och påverkar därmed resultatet starkt. Dels är det en avsaknad av goda nationella exempel på erosion i olika grad att bygga upp ett index på, vilket visas i kapitel 4.

Metoden fångar inte upp skadegraden, d.v.s. alla punkter i Erosionsindex-diagrammet vilka indikerar erosion, och där erosion har skett, kan representera helt olika skadegrad. Detta gör det svårt att bedöma om det förväntas "skadlig erosion" eller inte. Detta, tillsammans med osäkerheten kring uppskattning av den erosiva effekten p.g.a. subjektiva bedömningar, leder till en stor osäkerhet i resultatet.

Vi saknar även tillgång till internationella författares utvärderingar av både det geologiska indexet samt utvärderingen av energiförlusterna som de utvärderar sina gränslinjer efter. Utan en komplett egen nationell serie att bygga ett erosionsindex på eller tillgång till mycket detaljerade uppgifter från andra författares erosionsindex så kommer detta arbete inte kunna slutföras.

Ett geologiskt irritationsmoment rör måttet RQD vid beräkning av det geologiska indexet K . Korrekt använt skulle en bergmassa med sprickfrekvens av ~ 9 sprickor per meter, jämt fördelade, hålla samma RQD på 100% som en bergmassa med en sprickfrekvens av ≤ 1 spricka per meter. Måttet blir okänsligt för verklig blockstorlek vilken som exempel kan variera från block på $D = 11\text{cm}$ till $D \geq 5\text{m}$ utan att förändra det geologiska indexet. RQD -måttet kommer således bero på den geolog som gör bedömningen. Osäkerheterna gäller både ingångsdaten till erosionsindex uppbyggnad samt fältbedömningen vid enskilda kraftverk där erosionsindex skall utvärderas.

Index-metoderna är utvecklade på internationell berggrund som inte utsatts för nedisning under kvartärgeologisk tid. Det kan både befaras och konstateras att den berggrund som utvärderats för index-metoderna är hydraulisk öppen relativt urberggrunden där majoriteten av våra kraftverk finns grundlagda. Det kan därför befaras att utfallet i index-metoderna inte är representativt för urberggrunden. Detta gäller undantaget bergmassor med tydliga bankningsplan. För slutsatser och rekommendationer gällande bergmassor som karaktäriseras av tydliga bankningsplan, se nedan.

Index-metoderna nyttjar energiförlust vid olika strömningsförhållanden som mått på hydraulisk last på undergrunden. Det är dock svårt att uppskatta energiförlusten korrekt, eftersom de härledda formler för detta som finns att tillgå avser några få typiska strömningsförhållanden. Ofta råder inget av dessa, varför energiförlusten kan över- eller underskattas. Varje utskovskanal har en unik geometri, med unika strömningsförhållanden. Bedömningen (beräkningen) av energiförlusten är därmed behäftad med tolkningssvårigheter och blir ytterst subjektiv.

Index-metoderna ger vid beräkning av den hydrauliska lasten en enskild numerär på erosiv vatteneffekt (energiförluster), en medeleffekt, som vid kanalströmning får antas gälla för hela utskovskanalen, åtminstone hela det område i utskovskanalen som analyseras. Den hydrauliska lasten kan dock variera i detta område, vilket visas i kapitel 3.3.4, och stora lokala belastningar kan förekomma.

Som visat i litteraturstudien så finns det en del intressant forskningsarbete utfört internationellt. En gemensam forskningsinriktning vore önskvärd i form av konferenser, workshops m.m. inom detta ämne.

6.2 REKOMMENDATIONER

Nedan listas de rekommendationer som kan hänföras till arbete i detta projekt.

1. **Index-metoder bör inte som enda urvalsgrund användas för prognostisering av erosion och som beslutsunderlag för åtgärder för nationellt förlagda hydrauliska strukturer.**

Bergmassor med tydlig förekomst av bankningsplan är bättre lämpad att behandlas enligt metodik av Frizell (2007) där upplyftande krafter kan kvantifieras för flackt liggande rektangulära block. Övriga bergmassor bör behandlas med kinematiska studier med trycköverföringskoefficienter framtagna för förekommande sprickvidder.

2. **Kraftverksägare som i dagsläget är intresserade av erosionsutvärderingar bör i första hand inventera geologin efter förekomst av bankningsplan i kombination med avskärande branta sprickplan.**

Bankningsplan är en tydlig indikation på erosionsrisk, se kapitel 5.1. Uppskattningar av hydrauliska laster för breda sprickvidder kan göras med nuvarande kunskap om dynamiskt tryck (se speciellt Frizell, 2007).

3. **Laboratorieförsök liknande de i Frizell (2007) bör utföras med spaltvidder som liknar naturligt förekommande sprickvidder.**

En kortare förstudie över vilka sprickvidder som förekommer vid våra vattenkraftsanläggningar bör utföras som ingång till laboratoriestudierna.

4. **Önskar man använda index-metoder för en kvalitativ utvärdering föreslås att det tittas närmare på metodik enligt Pells (2017).**

Pells (2017) anger att både GSI och Q' kunde korreleras mot erosion. Kirstens index K gav inte en bättre representation av erosion i magmatiska bergmassor. Pells (2017) föreslagna modifikation av GSI , $eGSI$, är väl lämpad för urberggrunden och fjällkedjans berggrund.

Användandet av GSI begränsar starkt de geologiska tolkningsmöjligheterna som annars är fallet med mått som RQD , antalet sprickgrupper och speciellt förhärskande struktur. Utöver det kan det befaras att Kirsten's (1982) masstyrketal har liten om någon betydelse för tröskelvärdena för erosion.

5. En nationell anpassning eller utarbetandet av en nationell index-metod bör överges.

Nationellt saknar vi goda exempel för påvisad erosion annat än för berggrund som tydligt karaktäriseras av förekomst av bankningsplan. Den hydrauliska lasten som index-metoderna baserar sig på bygger på energiförluster vilket utesluter dynamiska effekter. Detta gör kraftanalysen fysikaliskt tveksam. Då vi till stor del saknar egna drifterfarenheter, en lämplig fysikalisk utvärderingsmodell för strömmande vatten samt internationella författares underlag kommer arbete kring en nationell tillämpning eller modifiering av existerande index-metoder inte kunna slutföras.

Alternativ metodik i rapporten benämnd som kinematisk metodik finns redan tillhanda där dynamiska effekter från strömmande vatten kan definieras och fullt ut tillämpas för nationella förhållanden.

6. En nationell utarbetning av kinematisk metodik bör tas fram som påbjuden metodik enligt nationella riktlinjer. För att åstadkomma en sådan föreslås en studie över hur ramverket i en sådan metodik skulle se ut. Utöver det en litteraturstudie över internationellt presenterade faktorer för dynamiskt tryck på typblock som första ansats till en dimensioneringsvägledning. Utöver det en studie i vilka sprickvidder som naturligt sett förekommer vid våra kraftstationer, se även punkt 3.

Spaltvidder i laboratorieförsök på dynamiska tryck för typblock befaras och kan i vissa studier konstateras vara långt bredare än naturligt förekommande sprickvidder för urberggrundens bergmassor, möjligen undantaget bergmassor med bankningsplan där analoga laboratoriestudier utförts av Frizell (2007). Spaltvidden har stor betydelse för vilka dynamiska tryck som kan kommuniceras.

7. Laboratorieförsök på typblock bör utföras med spaltvidder som liknar naturligt förekommande sprickvidder.

I dagsläget saknas kunskap om storleken på de dynamiska tryck som kan kommuniceras i allmänt förekommande berggeometriers sprickplan, alltså andra sprickorienteringar än horisontella.

8. Numeriska modeller för att utvärdera bergerosion har visat sig vara användbara vid utarbetande av åtgärder, men bör användas med försiktighet till dess att en mer fullständig bild över drivkrafterna föreligger.

Då en korrekt prediktiv modell för bergerosion i dagsläget inte föreligger föreslås att utökad kraft läggs på tillståndskontroller samt kunskapsdelning kraftägarna emellan istället för mot numeriskt arbete.

9. Tillståndskontroll med laserskanning eller fotogrammetri via drönarflygning rekommenderas.

Detta för att kunna följa en eventuell skadeutveckling samt för att bygga på kunskapen kring och kännedomen om förekomst av bergerosion i spillfåror. Inmätta ytor vid olika tillfällen kan jämföras mot varandra.

Det är svårt att ge en rekommendation på ett lämpligt tidsintervall för detta – det bör åtminstone övervägas vid varje FDU, och kanske tätare för anläggningar med misstänkta problem. Efter stora och/eller långvariga tappningar kan vara en annan rekommendation.

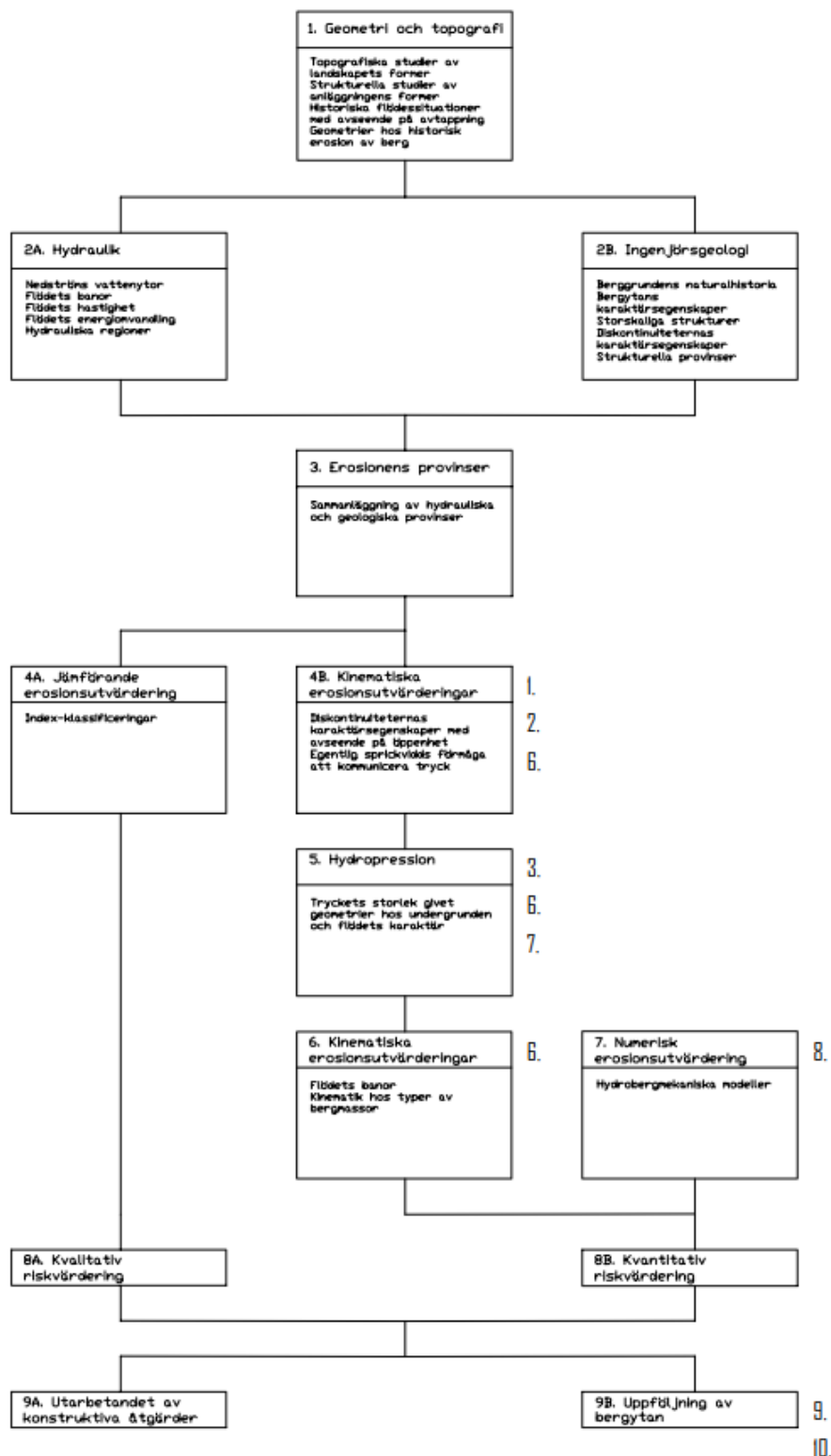
Tillståndskontrollen bör även innefatta kontroll av frostsprängningens inverkan på bergpartier som kan befaras uppluckras av frostsprängning. Detta gäller för mycket småblockig bergmassa med bred förekomst av sprickfyllnad och krossmaterial.

10. Jämföra andra länders praxis gällande praktiska hantering och förebyggande bergerosion.

Hur hanterar andra länder erosionsproblematik i berg praktiskt? Utför man löpande tillståndskontroller (inmätningar, inspektioner o. dyl.)? Förebygger man erosion genom vissa vanligt förekommande åtgärder (skibordsförlängningar av betong eller glacis, bassäng, ski-jump eller annat)? En sammanställning av detta kan vara till nytta för den svenska vattenkraftsbranschen.

Ovanstående rekommendationer kan hänföras till figur 2 från kapitel 3.3 där vi systematiskt beskrev vilka delar som krävs för att komma fram till en kvalitativ eller kvantitativ riskvärdering av erosion.

Se figur 94 nedan, som är en utveckling av figur 2. Vårt förslag önskar överge en nationell anpassning av index-metoderna för en kinematisk modell som möjliggör kvantitativ, inte enbart kvalitativ riskvärdering för bergerosion. Figuren visar även att en del kunskap samt ramverk för en sådan gångbar modell saknas.



Figur 95 Principfigur över vilka vetenskapsgrenar som behöver nyttjas för att kunna utföra prognosticerande kvalitativa eller kvantitativa studier av erosionspotential hos bergmassor tillsammans med sifferbeteckningar för rekommenderade arbeten enligt kapitel 6.2. Denna figur ger anvisningar om var tyngdpunkten för vidare arbeten bör läggas.

7 Tillkännagivanden

Tack till Energiforsk AB som helt har finansierat detta projekt. Tack till referensgruppen, som har bidragit med värdefull återkoppling under projektets gång. Tack till kraftbolagen Fortum Sverige AB, Skellefteå Kraft AB, Statkraft Sverige AB, Uniper, Vattenfall AB, och Vattenregleringsföretagen, vilka har bidragit med värdefulla anläggningsdata.

Tack till Anders Eurenus som har tillverkat figurer. Tack till Carl-Oscar Nilsson (Uniper) som har stöttat författarna i deras kunskapssökande. Tack till Mats Billstein och James Yang, båda vid Vattenfall R&D, vilka har bidragit med underlag i form av tidigare utredningar.

8 Publicerade arbeten kring erosion av berg

Litteratur som utgör bakgrundskunskap för den uppfattning som presenteras i detta dokument gällande principerna för bergerosion och föremålen för kunskapssökande presenteras nedan. Samtliga arbeten finns inte direkt hänvisade till i rapportens prosa.

8.1 ARBETE RÖRANDE HYDRAULISK BELASTNING

Nedan listade arbeten är publicerade för allmänheten. De är av vikt för detta arbete och avhandlar hydraulisk belastning på berg och konstruktioner.

Aihua L. & Peiqing L. (2010) Mechanism of rock-bed scour due to impinging jet, Journal of Hydraulic Research 48:1, pp. 14-22.

Blake W. K. (1970) Turbulent boundary-layer wall-pressure fluctuations on smooth and rough walls, Journal of Fluid Mechanics 44:4, pp. 637-660.

Bollaert E, Schleiss A. (2003a) Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review. Journal of Hydraulic Research, 41:5, pp. 451-464

Bollaert E. & Schleiss A. (2003b) Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part II: Experimental results of dynamic pressures at pool bottoms and in one-and two-dimensional closed end rock joints. Journal of Hydraulic Research, 41:5, pp. 465-480.

Bollaert E.F.R. (2010) Numerical Modeling of Scour at Bridge Foundations on Rock, International Conference on Scour and Erosion (ICSE-5), pp. 767-776.

Borghei S.M. & Zarnani P. (2008) Jet impact geometry and plunge pool dimensions effects on dynamic pressures at pool sidewalls, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 35, pp. 408-417.

Bowers C. E. & Toso J. (1988) Karnafuli project, model studies of spillway damage. Journal of Hydraulic Research, 114:5, pp. 469-483.

Coleman S. E., Melville B. W., Gore L. (2003) Fluvial Entrainment of Protruding Fractured Rock, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 129, No. 11, pp. 872-884.

Discussion of "Fluvial Entrainment of Protruding Fractured Rock" by Stephen E. Coleman, Bruce W. Melville, and Lance Gore November 2003, Vol. 129, No. 11, pp. 872-884. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(2): 142-143

Fiorotto V. & Rinaldo A. (1992a) Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps, Journal of Hydraulic Research, 30:4, pp. 499-520.

- Fiorotto V. & Rinaldo A. (1992b) Fluctuating uplift and lining design in spillway stilling basins, *Journal of Hydraulic Research*, 118:4, pp. 578-596.
- Frizell W. (2007) Uplift and crack flow resulting from high velocity discharges over open offset joints—Laboratory Studies, Bureau of Reclamation, DSO-07-07, 63 pp
- 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*, 36:1, pp. 55-68.
- Manso P.A., Bollaert E.F.R., & Schleiss A.J. (2009) Influence of Plunge Pool Geometry on High-Velocity Jet Impact Pressures and Pressure Propagation inside Fissured Rock Media, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, No. 10, pp. 783-792.
- Melo J.F., Pinheiro A.N. & Ramos C.M. (2006) Forces on Plunge Pool Slabs: Influence of Joints Location and Width. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 1, pp. 49-60.
- Montgomery R. A. (1984) Investigations into rock erosion by high velocity water flows, M.Sc. thesis, University of Washington, 107 pp.
- Müller G., Wolters G., Cooker M. J. (2003) Characteristics of pressure pulses propagating through water-filled cracks, *Coastal Engineering*, 49, pp. 83-98.
- Peiqing L. & Aihua L. (2007) Fluctuating uplift acting on rock blocks at the bottom of river bed and estimation of the limiting scour depth, *Journal of hydraulic Research* 45:4, pp. 478-485.
- Reinius E. (1986) Rock erosion, *Water Power & Dam Construction*, June 1986, 6 pp.
- Schewe G. (1983) On the structure and resolution of wall-pressure fluctuations associated with turbulent boundary-layer flow, *Journal of Fluid Mechanics* 134, pp. 311-328.
- Toso J. & Bowers C. E. (1988) Extreme pressures in hydraulic-jump stilling basins. *Journal of Hydraulic Research*, 114:8, pp. 829-843.

8.2 INTERNATIONELLT ARBETE RÖRANDE EROSION AV BERG

Bland för allmänheten publicerade arbeten som avhandlar frågor kring erosion av berg kan nämnas.

Annandale G. W. (1995) Erodibility, *Journal of Hydraulic Research*, 33:4, pp. 471-494.

Annandale G. W. (2006) *Scour Technology*, McGraw-Hill, 430 pp.

- Cato, K. D. (1991) Performance of geological material under hydraulic stress, Thesis PhD, Texas A&M University, 272 pp.
- Dooge, N. (1993) Die hidrouliese erodeerbaarheid van rotsmassas in onbelynde oorlope met spesiale verwysing na die rol van naatvulmateriaal, Thesis MSc, University of Pretoria, 281 pp.
- Firoozfar A. R. (2014) Rock scour in hydraulic laboratory analog scour models, Thesis PhD, University of Iowa, 153 pp.
- George M. F. (2015) 3D block erodibility: Dynamics of rock-water interaction in rock scour, Thesis PhD, University of California, 462 pp.
- George M. Sitar N. (2012), Block theory application to scour assessment of unlined rock spillways report No. UCB GT 12-02, Dept. of Civil & Environmental Engineering at University of California
- George M. F., Sitar N. (2016) System reliability approach for rock scour, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 85, pp. 102–111.
- Kirsten H. A. D. (1982) A classification system for excavation in natural materials, Die Siviele Ingenieur in Suid Afrika, Julie 1982, pp. 293-308.
- Discussion of A classification system for excavation in natural materials, Die Siviele Ingenieur in Suid Afrika, July 1982, pp. 293-308. The civil engineer in South Africa, January 1983, pp. 30-34.
- Kirsten, H. A. D., Moore, J. S., Kirsten, L. H. & Temple, D. M. (2000) Erodibility Criterion for Auxiliary Spillways of Dams, International Journal of Sediment Research, Vol. 15, No. 1, pp. 93-107.
- Pells S.E., Douglas K., Pells P.J.N., Fell R., Peirson W.L. (2017) Rock Mass Erodibility, Journal of Hydraulic Engineering 143:5, 8 pp.
- Pells S.E., Douglas K., Fell R., Peirson B. (2017b) UNSW Spillway Erosion Project, International Workshop on overflowing erosion of dams and dikes 11–14th December 2017, Aussois, France.
- Pells S.E. (2016) Erosion of rock in spillways, Thesis PhD, Civil & Environmental Engineering, Faculty of Engineering, UNSW, Australia, 1982 pp.
- Pitsiou, S. (1990) The effect of discontinuities on the erodibility of rock in unlined spillways of dams, Thesis MSc, University of Pretoria, 202 pp.
- Villanueva E. & Wibowo J. L. (2008) Risk Assessment of Rock Surface Spillway Erosion Using Parametric Studies, USAE, ERDC/GSL TR-08-22, 62 pp.
- Woodward, R. C. (1985) Geological factors in spillway terminal structure design. Engineering Geology 22, pp. 61-70.

Woodward, R. C. (1992) The geology of dam spillways. *Engineering Geology* 32, pp. 243-254.

Technical report REMR-GT-3

Cameron, C. P., Cato K. D., McAneny, C. C. & May, J. H. (1986) Geotechnical aspects of rock erosion in emergency spillway channels, Report 1, Technical report REMR-GT-3, US Army Corps of Engineers, 142 pp.

Cameron, C. P., Patrick, D. M., Bartholomew, C. O., Hatheway, A. W. & May, J. H. (1988) Geotechnical aspects of rock erosion in emergency spillway channels, Report 3, Technical report REMR-GT-3, US Army Corps of Engineers, 68 pp.

Cameron, C. P., Patrick, D. M., Cato K. D. & May, J. H. (1988) Geotechnical aspects of rock erosion in emergency spillway channels, Report 2, Technical report REMR-GT-3, US Army Corps of Engineers, 60 pp.

Cameron, C. P., Patrick, D. M., May, J. H., Palmerton, J. B., McAneny, C. C., Hatheway, A. W., Bartholomew, C. O., Mathewson C. C. & Cato, K. D. (1990) Geotechnical aspects of rock erosion in emergency spillway channels, Report 5, Technical report REMR-GT-3, US Army Corps of Engineers, 33 pp.

Mathewson C. C. & Cato, K. D. (1998) Geotechnical aspects of rock erosion in emergency spillway channels, Report 5, Technical report REMR-GT-3, US Army Corps of Engineers, 44 pp.

May, J. H. (1989) Geotechnical aspects of rock erosion in emergency spillway channels, Report 4, Technical report REMR-GT-3, US Army Corps of Engineers, 138 pp.

8.3 NATIONELLT ARBETE RÖRANDE EROSION AV BERG

Bland för allmänheten tillgängliga publicerade verk rörande svenska vattenkraftsanläggningar kan nämnas.

Billstein, M., Carlsson, A., Söder, P.E., & Lorig, L., (2003), Midskog gets physical and numerical, *International Water Power & Dam Construction*, Volume 55, No. 12, pp. 22-26.

Billstein, M., Hellstadius, K., Johansson, N., Söder, PE. (2006) Midskog Dam in Sweden: Spillway Erosion in Rock, Basis for Remedial Works. Commission Internationale des Grand Barrages, Barcelona 2006.

Ekström, I., Yang, J., Mören, L. & Cederström, M. (2007) Adapting Ligga to higher design flood, spillway channel modification through physical & numerical modeling. *International Conference Waterpower XV*, Chattanooga, Tennessee, July 2007.

Mörén, L., (2005), Bergerosion i utskovskanaler, Examensarbete, Uppsala Universitet, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala, 91 ss.

Mörén, L., & Sjöberg, J. (2007) Rock Erosion in Spillway Channels — A Case Study of the Ligga Spillway in The Second Half Century of Rock Mechanics (Proceedings, 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics, Lisbon, July 2007), Vol. 1, pp. 87-90.

8.4 ÖVRIGA KÄLLHÄNVISNINGAR

Bergman S., Stephens M.B., Andersson J., Kathol B. & Bergman T. (2012) Sveriges berggrund, skala 1:1 miljon. Sveriges geologiska undersökning K 423.

Carlsson A (1979) Characteristic features in a superficial rock mass in central southern Sweden - Horizontal and sub-horizontal fractures and fracture infillings. Striae. Vol 11. Uppsala

Deere, D. U. (1964) Technical description of rock cores for engineering purposes, Felsmechanik und Ingeniurgeologie, Volume 1, pp. 16-22.

George M. (2018-04-12), e-postkonversation

Lundqvist J., Lundqvist T., Lindström M., Calner M., & Sivhed U. (2011) Sveriges geologi från urtid till nutid, Studentlitteratur AB, 628 pp.

Marinos V., Marinos P. & Hoek, E. (2005) The geological strength index: Applications and limitations, Bulletin of Engineering Geology and the Environment 64, pp. 55-65.

Palmström, A. (1982) The volumetric joint count – A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing, IV Congress International Association of Engineering Geology, volume 2, pp. V.221-V.228.

8.5 KRAFTBOLAGENS INTERNA DOKUMENT

För allmänheten icke tillgängliga dokument rörande svenska vattenkrafts- anläggningar som använts som källmaterial till denna rapport utgörs av följande.

J&W (2001), Akkats kraftstation – Besiktning av berget nedströms utskoven

Skellefteå Kraft (2017), Sammanställning av erfarenheter relaterade till erosion i spillfåror

Skellefteå Kraft (2016), Båtfors kraftverk DTU-manual

Skellefteå Kraft (2017), Finnfors kraftverk DTU-manual

Skellefteå Kraft (2016), Grytfors kraftverk DTU-manual

Skellefteå Kraft (2009), Krångfors kraftverk DTU-manual

Skellefteå Kraft (2001), Rengårds kraftverk DTU-manual

Skellefteå Kraft (2003), Selsfors kraftverk DTU-manual

Vattenfall Hydropower (1997), Provtappning i Harsprångets kraftstation

Vattenfall Power Consultant (2007), Provspill i Ligga

Vattenfall Vattenkraft (2006), Akkats kraftstation - Foton från provtappning 2006-06-21

Vattenfall Vattenkraft (2004), Messaure provspill

Vattenfall Vattenkraft (2015), Porjus FI 2015 (fotobilaga från provspill)

WSP (2005), Letsi kraftstation – provtappning 2005

WSP (2010), Seitevare kraftverk – Provspillstappning

BERGEROSION I SPILLFÅROR

Frågor kring tröskelvärden för erosion är intressant för vattenkraftägare eftersom det finns exempel på svenska dammanläggningar som har råkat ut för stora erosionsskador i spillfårorna.

Den här kunskapssammanställningen kring erosion av berg nedströms utskov, är baserad på litteraturstudier och kontakter med branschen såväl i Sverige som internationellt. Målet har varit att granska de så kallade Indexmetoderna och att verifiera tillförlitligheten av ett internationellt utformat erosionsindex som gör det möjligt att bedöma risken för erosion i geomaterial i hydrauliska miljöer.

Dessutom har dammägare via en enkät redovisat sina erfarenheter av bergerosion i anläggningarna. Detaljerade studier har också gjorts vid ett mindre urval av dessa dammar.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk