

BERGEROSION I SPILLFÅROR – ETAPP 2

RAPPORT 2020:644



Bergerosion i spillfårar – etapp 2

JONAS PERSSON OCH PER ERIKSSON

ISBN 978-91-7673-644-9 | © Energiforsk januari 2020

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

Förord

”Bergerosion i spillfåror – etapp 2” är en fortsättning på Energiforsk-projektet ”Bergerosion i spillfåror – kunskapssamling kring erosion av berg nedströms utskov”, som presenteras i rapport 2018:532. Här presenteras en metodik för hur arbete med bergerosion i spillfåror kan bedrivas. Vidare presenteras även förslag på hur kunskapsluckor kan fyllas genom fortsatt forskning inom området.

Studien har utförts av Norconsult med Jonas Persson och Per Eriksson som utförare. Till projektet har en referensgrupp bestående av Linda Ormann (Fortum), Anders Isander (Uniper), Mats Persson (Vattenfall), Anders Sjödin (Statkraft) och Viktor Carlsson (Skellefteå kraft) funnits.

Projektet har genomförts inom det dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogrammet som drivs av Energiforsk där vattenkraftindustrin och Svenska kraftnät medverkar.

Författarna ansvarar för rapportens innehåll.

Sammanfattning

Detta projekt har behandlat området "bergerosion i spillfårar", en fortsättning på projekt VK12113, presenterat i rapport 2018:532. Syftet med projektet har varit:

- Att sammanfatta internationell praxis och byggnadstekniska riktlinjer.
- Att sammanfatta bergteknisk karaktäristik hos typiska svenska spillfårar, speciellt avseende sprickvidd.
- Att föreslå en arbetsgång, som eventuellt kan arbetas in i en framtida tillämpningsvägledning i RIDAS.
- Att presentera forskningsförslag för hur kunskapsluckor ska fyllas, främst kring tryckutbredning i mycket tunna sprickor.

Kontakter har etablerats med internationella aktörer så som dammägare, forskare och konsulter i Kanada, Norge och Australien. Ett antal frågor har ställts till dessa avseende nationell praxis och byggnadstekniska vägledningar/riktlinjer. Detta har sedan sammanfattats i denna rapport. I Kanada och Norge råder i princip samma kunskapsläge som i Sverige, och aktuell praxis är också likvärdig. Gällande vägledning/riktlinjer är läget också likvärdigt mellan dessa tre länder, vilket i praktiken innebär en avsaknad av sådana.

Den australiensiske konsulten Steven Pells, som har doktorerat inom bergerosion i spillfårar, har tagit fram en vägledning till hur arbete med bergerosion i spillfårar bör bedrivas. Denna verkar lovande, varför den delvis har implementerats i det förslag till vägledning för svenska förhållanden som presenteras i denna rapport.

De har identifierats kunskapsluckor, vilka behöver fyllas för att bättre kunna förutsäga bergerosion och för att skapa en mer välgrundad dimensioneringsgrund för skyddsåtgärder. De identifierade kunskapsluckorna rör främst hur tryckpulsationer propagerar i mycket tunna bergsprickor – om det är så att tryckvågor dämpas p.g.a. att sprickorna är just mycket tunna i kombination med sprickråheten. I denna rapport har det presenterats förslag på försöksuppställningar där detta skulle kunna utredas. Sådana bör utföras i ett hydrauliskt laboratorium med gedigen kunskap och erfarenhet av modellförsök inom vattenbyggnadshydraulik.

De föreslagna modellförsöken föreslås vara nästa steg i forskningsarbetet kring bergerosion i spillfårar för svenska förhållanden, tillsammans med aktivt deltagande i lämpliga internationella sammanhang för att hämta hem viktig kunskap. Förutom deltagande på de traditionella konferenserna (*ICOLD*, *DSIG*, *Hydrovision*, *IAHR* m.fl.) finns även en nyligen etablerad arbetsgrupp: *International Working Group on Overflowing and Overtopping Erosion (IWGOOE)*, med en undergrupp *Overflowing erosion of bedrock downstream of concrete dams and overflowing erosion of spillways*, där flera nyckelpersoner inom det aktuella området deltar. Det pågår även internationell forskning inom det aktuella området, där ett svenskt deltagande skulle kunna medföra ett viktigt utbyte av kunskap. I nuläget planerar kanadensiska Hydro Quebec att lägga stora resurser på detta. Även statliga franska EDF har visat ett stort intresse för frågan kring bergerosion.

Summary

This project has treated rock erosion in unlined spillways and is a continuation of project VK12113 presented in report 2018:532. The purpose of the project has been:

- **To summarize international praxis and build code guidance.**
- **To summarize properties for typical national unlined spillways, especially concerning fracture widths.**
- **To propose a statement of method for potential implementation into an appliance guideline in RIDAS.**
- **To present research proposals, especially concerning pressure transmission properties in thin fractures.**

Contacts has been established with international industry peers such as dam owners, scientists and consultants from Canada, Norway and Australia. Questionnaires has been sent to these participants regarding national praxis and build code guidance. The results have been summarized in this report. The general knowledge in Canada and Norway is about the same as in Sweden, and praxis is also comparable. Code guidelines is also comparable between these three countries, which means a deficiency of such.

The Australian consultant Steven Pells, PhD in rock erosion in unlined spillways, has proposed a statement of method on how dam owners should work with rock erosion in unlined spillways. This statement of method seems promising wherefore it has been partially implemented in a statement of method for national conditions which is presented in this report.

A number of identified knowledge gaps needs to be addressed to better forecast rock erosion and more importantly to create a method for dimensioning rock support measures. The identified knowledge gaps mainly concern how pressure pulses propagate in thin fractures. Whether pressure pulse attenuation takes place in thin, rugged fractures. In this report suggestions for model laboratory work is presented where this phenomenon could be investigated. These experiments should be performed in a hydraulic laboratory with sound knowledge and experience in hydraulic model experiments.

The proposed model experiments as described in the report are suggested to be the next step in research to improve the understanding of rock erosion in the national fleet of unlined spillways. In coordination with the research efforts an active participation in suitable international associations is proposed. In addition to the regular established conferences (*ICOLD, DSIG, Hydrovision, IAHR*, etc.) there is also a newly established working group: *International Working Group in Overflowing and Overtopping Erosion (IWGOOE)* with a sub-committee on *Overflowing erosion of bedrock downstream of concrete dams and overflowing erosion of spillways*, where several key persons in the research area participate. International research where Swedish participation could induce exchange of knowledge has been identified. The Canadian hydro power company Hydro Quebec has shown interest for the subject as does the French state own electricity company Électricité de France (EDF).

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte	8
1.3	Projektbeskrivning	8
2	Utblick	10
2.1	Erfarenheter och aktuell praxis	10
2.1.1	Från Norge	10
2.1.2	Från Kanada	15
2.1.3	Från konsult	17
3	Inblick	22
3.1	Vanligt förekommande spillfåra i den nationella urberggrunden	23
4	Vägledning för framtagande av tillämpningsvägledning	29
4.1	Förslag till arbetsgång	29
4.1.1	Inledande utredning - situationsanalys avseende bergerosion	31
4.1.2	Kontrollprogram – övervakning och tillståndskontroll	33
4.1.3	Utredning avseende erosionspotential	35
4.1.4	Utredning avseende skyddsåtgärder	47
4.1.5	Utformning och dimensionering av skyddsåtgärder	47
4.2	Vägledning för framtagande av dimensioneringsgrund	51
4.2.1	Beskrivning av tryckbildning från strömmande vatten	51
4.2.2	Sprickvidder i urberggrunden och dess uppmätning	56
4.2.3	Skenbar hydraulisk sprickvidd	57
4.2.4	Förekommande sprickviddsintervall	58
4.2.5	Rekommendationer gällande vetenskapliga insatser	58
4.2.6	Förslag till hydraulisk laboratorieundersökning av tunna spalter	62
5	Slutsatser och rekommendationer	65
6	Referenslista	67

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Under år 2018 utfördes Energiforsk-projektet *Bergerosion i spillfåror – kunskapssamling kring erosion av berg nedströms utskov* (V12113). Detta projekt kan benämnas som "Ettapp 1" och det projekt som rapporteras här kan benämnas "Ettapp 2".

Det primära syftet med ettapp 1 var att utvärdera Annandales erosionsindex (1995). Dess tillförlitlighet i allmänhet och dess lämplighet för svensk berggrund.

Ytterligare önskades att om möjligt finjustera gränslinjen för erosion i indexet för svenska 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 konstruktioner. För ägare av hydrauliska konstruktioner 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 Annandales erosionsindex skedde genom insamling av erfarenheter från respektive kraftbolag som önskade delta i studien, platsbesök vid 13 st av våra svenska kraftstationers spillfåror, utvärdering av spillhistorik som stöd vid bedömning av skadegrad kopplat till hydraulisk belastning samt grundliga litteraturstudier.

Bedömningen utifrån detta var att utveckling eller användandet av just Annandales erosionsindex eller liknande indexmetoder inte kan ge en vederhäftig förutsägelse av erosion och bör därför inte ensamt användas för att basera nationella riktlinjer på. Pells indexmetod skiljer sig dock från Annandales och liknande indexmetoder, då det geologiska bakgrundsmaterialet fanns bättre presenterat av Pells samt att förklaringsgraden redovisats som högre, se Pells (2016). Pells metod rekommenderades därför att användas.

En indexmetod kan dock inte användas för gränsvärdesdimensionering. Parallellt föreslogs därför en alternativ utvecklingslinje där prognostiseringen av erosion bygger på rent mekaniska förhållanden mellan egentygder hos bergblock och trycköverföringskoefficienter 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. Utökade laboratoriestudier bör dock 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.

Efter avslutad "ettapp 1" föreslogs en fortsättning i "ettapp 2", vilket beskrivs nedan avsnitt 1.2 och 1.3.

1.2 SYFTE

Projektet utgår från slutsatser och rekommendationer i Energiforsk-projektet

Bergerosion i spillfåror – kunskapssamling kring erosion av berg nedströms utskov.

Projektets huvudsakliga inriktning är att tydligt peka ut hur erforderliga kunskapsluckor ska fyllas, så att fortsatt forskning inom det aktuella området, kan göras effektivt och med lämpligt fokus.

Vidare inriktas projektet även mot att instruera vilken lämplig metodik och praxis som bör/kan användas, fram till dess att en ny erosionsmodell är utarbetad (vilket kan ta 5–10 år).

Ett mål på lång sikt är att införa en rekommendation i en tillämpningsvägledning i RIDAS, avseende tillståndskontroll av spillfåror och kring säker avbördning, genom utvärdering av bergerosion i spillfåror.

1.3 PROJEKTBSKRIVNING

Projektets omfattning kan grovt delas in i nedanstående delar.

- Litteraturstudier och omvärldsbevakning:
 - × Litteraturstudier som grund för en framtida utvärderingsmodell. Staka ut vägen för en framtida utvärderingsmodell för svenska förhållanden.
 - Vilka sprickvidder förekommer naturligt i Sverige? Detta är avgörande för hur stora tryck som kan kommuniceras in i sprickorna och ev. lyfta blocken.
 - Vilka resultat finns från forskningsinsatser gällande injektering av hårda bergmassor, både avseende förekommande sprickvidder samt hur dessa kan mätas.
 - Vilka spaltvidder och vilka försök att utvärdera dynamiskt tryck har gjorts internationellt i publicerade studier?
 - Vilka laboratorieförsök bör utföras med strömmande vatten, utifrån ovanstående punkter?
- Omvärldsbevakning:
 - × Hur arbetar andra länder med bergerosion i spillfåror, både praktiskt och teoretiskt? Framförallt de länder med likartad berggrund (främst Kanada) men även vårt grannland Norge. En omvärldsbevakning kan ge nyttig information, till arbetet att skapa en svensk arbetsmodell.
 - Kontakt (e-post) etableras med lämpliga representanter (Kanada, Norge). Frågor att få svar på från de länderna är t.ex:
 - Utförs tillståndskontroller? (bergkartering, inmätning/dokumentation med drönare etc.)
 - Vilka förebyggande åtgärder används? (bergförstärkningar, gjutningar, ski jumps, bassänger m.m.)
 - Deltagande i nyligen startat projekt av franska EDF, i samarbete med Pells (Australien), där en inventering och databas utarbetas för franska kraftverk m.a.p. erosionsproblematik. Vi bidrar med erfarenheter från svenska kraftverk/projekt och kan förhoppningsvis få del av erfarenheter från franska kraftverk/projekt.

- Arbetsmodell på kort sikt:
 - × Utarbetande av förslag på arbetsmodell utifrån de kunskaper som finns idag, i väntan på en framtida förbättrad utvärderingsmodell:
 - Skapa en enkel handledning och tolkning av Pells indexmetod (se rapport från projekt VK12113), på svenska, för att den svenska vattenkraftsbranschen ska ha tillgång till en rättfram metod enligt "best practice". Denna kan tänkas bli implementerad i en framtida utgåva av RIDAS, och kan senare bli kompletterad med en nationellt utvecklad utvärderingsmetod.
 - Framtagande av vägledning för kontrollprogram inklusive tillståndskontroll.

2 Utblick

I projektet har det etablerats kontakt med företrädare för industrin i Norge, Kanada samt en etablerad och erfaren australiensisk konsult som doktorerat inom bergerosion i spillfårar. Det finns två syften med denna omvärldsbevakning:

- *Etablera kontakt med aktörer* som har bedömts vara intresserade av ämnet, främst de som bedömts som intresserade av att driva på arbetet vidare mot bättre förståelse för erosionens drivkrafter. Mest intressant är de som jobbar med likartad geologi som den svenska.
- *Hämta hem s.k. state-of-the-art* inom det aktuella ämnet. Frågor har ställts kring om det finns några nationella riktlinjer/vägledningar för hur bergerosion i spillfårar bör hanteras, avseende riskbedömning och dimensionering.

Det övergripande syftet är att ge bra underlag till utformning av en bättre nationell vägledning än vad som finns idag avseende riskbedömning och dimensionering.

Det finns ingen nuvarande svensk vägledning som behandlar bergerosion i spillfårar. I RIDAS (2012) tillämpningsvägledning (TVL) 7.4 *Avbördningssystem* finns ingen vägledning om utformning av energiomvandling eller hantering av erosion i spillfårar. Det enda som finns i RIDAS är avseende grundläggning på berg (TVL 7.3): *”Vid grundläggning på berg skall berget undersökas med avseende på täthet, sprickor svaghetszoner och slag etc. Tillåtna grundpåkänningar skall fastställas. Speciell uppmärksamhet skall inriktas på att undersöka förekomsten av horisontella eller lutande slag eller sprickplan i berggrunden som kan utgöra glidplan för dammen”*.

Bergerosion i spillfårar är alltså hittills inte identifierat som ett stort dammsäkerhetsproblem i Sverige.

2.1 ERFARENHETER OCH AKTUELL PRAXIS

2.1.1 Från Norge

Norska erfarenheter är sammanställda utifrån samtal, mailkonversationer och möten med:

- Det tekniska universitetet NTNU i Trondheim, professor Leif Lia. NTNU är Norges forskningscentrum avseende dammsäkerhet och vattenkraft. Leif Lia är vice ordförande i NNCOLD, som är Norges nationella kommitté inom ICOLD (motsvarighet till svenska SwedCOLD), och hans specialområde är hydraulik och miljöteknik.
- Det norska vassdrags- och energidirektoratet NVE i Trondheim, Morten Skoglund. NVE skriver de norska riktlinjerna för dammsäkerhet. Morten är senioringenjör med bakgrund inom hydrologi och hydraulik, från bl.a. NTNU:s hydrauliska laboratorium i Trondheim.
- Norges största konsultbolag Norconsult AS, Aslak Løvoll. Norconsult har en lång erfarenhet av vattenkraft och dammsäkerhetsfrågor, och har utfört ett flertal uppdrag avseende åtgärder mot bergerosion i spillfårar. Aslak är

senioringenjör med specialområde är hydraulik och han är styrelsemedlem i NNCOLD.

På samma sätt som i Sverige används spillfåror i Norge årligen, men väldigt få har utsatts för flöden i samma storleksordning som det dimensionerande flödet. Vid diskussion med NTNU/NVE uppnåddes konsensus kring det faktum att de allra flesta dammanläggningar sannolikt inte utsatts för den dimensionerande lasten ännu, d.v.s. flöden i storleksordningen som det dimensionerande flödet. Det efterfrågas därför en tillförlitlig metod för att bedöma erosionspotentialen vid en anläggning, så att proaktiva åtgärder kan prioriteras till de anläggningar där behovet är störst. Det efterfrågas även dimensioneringsvägledningar för åtgärder.

Den allmänna uppfattningen inom den norska vattenkraftsbranschen har hittills varit densamma som inom den svenska, att bergkvaliteten generellt är mycket hög och att branschen har över 100 års erfarenhet. Uppfattningen är att erosion i bra berg är en långsam process. Den råa bergytan anses ofta ge tillräcklig energiomvandling, varför konstruerad energiomvandling får anses som undantag i Sverige och Norge.

Om svagheter i berget upptäcks vidtas lämpliga åtgärder (t.ex. bergförstärkningar eller gjutningar), för de områden i spillfåran där bergerosion bedöms kunna hota dammsäkerheten. Viss erosion kan tillåtas i områden där bergerosion *inte* bedöms kunna hota dammsäkerheten. Det är mindre vanligt att proaktiva åtgärder vidtas, om inte erosionsrisken är uppenbar. Sunt förnuft och "trial and error" är accepterade tillvägagångssätt.

I Norge är överfallsdammar (oftast i betong) betydligt vanligare än i Sverige, där luckor istället förekommer i större utsträckning. Vid de norska överfallsdammarna släpps i regel vattnet rätt ner på dammfoten. För fyllningsdammar och större (högre) betongdammar är det vanligt med utsprängda utskovskanaler, likt i Sverige.

Aktuella riktlinjer och vägledningar

Generellt liknar de norska erfarenheterna väldigt mycket de svenska: det finns få fall med omfattande erosion, vilket främst bedöms bero på att kvaliteten och tryckhållfastheten på berget i spillfåror generellt är mycket hög. Av denna anledning finns det knappt någon vägledning alls, avseende hur bergerosion i spillfåror ska hanteras (riskvärdering, dimensionering etc.). I NVE:s *Damsikkerhetsforskriften* (NVE, 2010) (motsvarande RIDAS) står det: "*Ved utforming av flomløp skal det tas hensyn til luftbehov og fare for erosjon av utsatte flater, trykspulasjoner, tilstopping og ising*". I NVE:s *Retningslinjer for flomløp* (NVE, 2005) står det: "*Flomvann som ledes fra magasinnivået til undervannsnivået nedstrøms dammen medfører at store energimengder omsettes (dissiperes). Omsetting av energien må foregå i kontrollerte former der hvor det kan oppstå erosjonsskader eller andre skader*" och "*Skader i utløpet er vanligvis ikke noe stort problem i Norge da grunnen nedstrøms overløpet stort sett består av bergarter med god kvalitet og styrke. Utløpet kan da gå rett i elva. Ved svak, oppsprukket bergart eller løsmasser, og ved store fallhøyder må spesielle løsninger tas i bruk for omdanning av energien. Aktuelle løsninger kan være støpt styrtgulv nedstrøms*".

dammen, fri overløpsstråle delt opp i flere trinn, skihopp, energidreperbasseng og kombinasjoner av ovennevnte”.

De norska riktlinjerna liknar de svenska (RIDAS), även om de norska är något mer beskrivande. Varken i Sverige eller i Norge finns dock tydliga och konkreta vägledningar.

Praxis och erfarenheter från kända fall

Inget av de dammbrott som skett i Norge under årens lopp har konstaterats ske till följd av bergerosion i spillfåror. Det finns ett känt fall där utskovsrännan har kollapsat till följd av bergerosion. Utskovskanalen var där utförd i berg av låg hållfasthet och en ny ränna i betong utfördes sedan.

Det finns exempel på driftsbegränsningar till följd av bergerosion – att vissa luckor inte får användas på grund av tidigare erosion och/eller bedömd erosionsrisk. Det finns även exempel på dammar med mer eller mindre löpande skyddsåtgärder med betong, varefter ny erosion sker.

Observationsmetoden tillämpas, d.v.s. observationer vid inspektioner för att bedöma om ytterligare åtgärder blir aktuella. Denna praxis har lett till att det finns gott om observationer av olika bergtyper - både åtgärdade (oftast bergbult) och icke åtgärdade. Detta innebär att kunskap har byggts upp kring vad olika geologiska förhållanden tål samt vilka typer av åtgärder som fungerar bra/mindre bra för olika typer av berg. (Løvoll, 2019). Denna praxis är för övrigt mycket lik den som tillämpas i Sverige.

Den allmänna uppfattningen bland praktiserande ingenjörer är att de flesta erosionsskadorna i norska spillfåror kan relateras till att det dynamiska trycket från det strömmande vattnet kommuniceras in i bergmassans sprickor.

Vid sprängningsarbeten utvärderas de geologiska förhållandena och behovet av förstärkningsåtgärder (arbetssäkring eller permanent säkring) av en ingenjörsgéolog. Ett minimum är arbetssäkring under utförandet men omfattningen styrs av vilken funktion berget ska ha: undergrund för valvdamm, lamelldamm, spillfåran eller vattenväg till/från kraftstation. Om det bedöms att berget kommer att utsättas för stora hydrauliska laster, kallas även en hydrauliker in för utvärdering. Generellt sker utvärderingen för spillfåror enligt nedan:

- a) För låga dammar/spillfåror med låg vattenhastighet görs sällan någon utvärdering.
- b) För ”mellanhöga” dammar/spillfåror i områden där det är uppenbart att bergkvaliteten kan innebära utmaningar, utförs bergkartering av en ingenjörsgéolog som även diskuterar med bygg- och hydraulikingenjörer. Ofta utförs hydrauliska utredningar för att bättre kunna värdera erosionsrisken, i form av överslagsberäkningar och/eller numeriska beräkningar. Vid komplicerade förhållanden och/eller där vattenhastigheten är hög, utförs ibland 3D-CFD-analyser.
- c) För höga dammar sker utvärderingen enligt punkt b) men med tillägget att mer grundligare borrhundersökningar utförs.

De parametrar som anses vara de viktigaste vid värdering av erosionspotential är bergkvalitet, vattenhastighet och strömningsförhållanden (turbulens, luftinblandning etc.) och observerad bergerosion. Det förekommer användande av indexmetoder, av Annadale (1995) och Van Schalkwyk (1992).

De åtgärder som i Norge bedöms vara lämpliga för att förhindra eller åtminstone minska omfattningen av bergerosion går ut på att minska vattenhastigheten och därmed det dynamiska trycket eller att förstärka berget. Uppfattningen är att energiomvandlingen på det råa berget är betydande vid vattenhastigheter högre än 20–25 m/s.

Åtgärder mot bergerosion vid norska dammanläggningar värderas/utförs ofta enligt:

- a) Klassisk bergförstärkning är allra vanligast (ingen statistik finns).
- b) Bergförstärkning i kombination med sprutbetong eller armerad betong är troligen vanligast efter ren bergförstärkning. Det kan vara utökning (förlängning och/eller breddning) av skibord eller igengjutning av erosionsgropar, med eller utan bergförankring.
- c) Där det är osäkert om åtgärder enligt a) är tillräckligt p.g.a. hög vattenhastighet, mycket dåligt berg och/eller stora konsekvenser vid bergerosion, värderas andra typer av lösningar för utskovens avbördning. Valt alternativ beror på faktorer som dammtyp, dammhöjd/utskovshöjd topografi och bergförhållanden. Utskovstunnel kan bli aktuellt i vissa fall.
- d) Förändring av geometri i vattenvägar: utjämning av bergkanaler, styrning av vattnet i vattenvägar utförda berg eller betong (kanaler, spillfåror, skibord)
- e) Kontrollerad energiomvandling: bassäng eller ski-jump som kastar vattnet tillräcklig långt bort från dammen
- f) I vissa fall, speciellt för höga dammar, kan den tekniska utformningen på utskovskanalen styra valet av dammtyp.

Detta sammanfaller i princip med den praxis som används i Sverige.

I figur 2.1 och figur 2.2 nedan visas exempel på vanligt förekommande typer av åtgärder vid norska anläggningar, om bergerosion bedöms utgöra ett hot.

Utförd och aktuell forskning

Den forskning som är gjord i Norge kring bergerosion är mycket begränsad, och det enda arbete som rapporterats inriktades mot ett specifikt fall (Lia & Skoglund, 2018), inte mot generellt kunskapsbyggande inom området. I det specifika fallet mättes tryckpulsationer från fallande vatten i en fysisk modell vid NTNU, för att kunna dimensionera lämpliga åtgärder vid en damm där omfattande erosionsskador uppstått.



Figur 2.1 Förlängning av skibord genom pågjutning i spillfåra, vid ett kraftverk i Norge (Källa: Norconsult AS).



Figur 2.2 Pågjutning av dammtå på en betongdamm (översfallsdamm) i Norge (Källa: Norconsult AS).

2.1.2 Från Kanada

Kanadensiska erfarenheter är sammanställda utifrån e-postkonversationer med kraftbolaget Hydro Quebec, Marco Quirion. Hydro Quebecs division Production äger dammanläggningarna och ansvarar således för dammsäkerheten (inspektioner, övervakning m.m.). Anledningen till att just Hydro Quebec tillfrågades är framförallt att det på förhand verkade vara det enda kraftbolag i Kanada som arbetar/stöttar forskning inom det aktuella området. En lycklig omständighet är att provinsen Quebec till stor del har likartad geologi som i Sverige.

Marco Quirion är ingenjörsgelog på Production och är engagerad i erosionsfrågor inom vattenkraft. Hydro Quebec har för avseende att stötta fortsatt forskning inom det aktuella området.

Aktuella riktlinjer och vägledningar

Kortfattat kan sammanfattas att det i Kanada saknas riktlinjer eller vägledningar såväl på nationell nivå som på provinsnivå (t.ex. Quebec) avseende arbete med bergerosion i spillfåror d.v.s. kring utvärdering, dimensionering m.m. Likartat med Sverige och Norge finns generella formuleringar, men inget konkret.

Hydro Quebec har en komplett vägledning avseende konstruktion av vattenkraftanläggningar, men där finns inga specifika krav kopplat till bergerosion förutom generella krav på energiomvandling – t.ex. att en utskovskanal som är schaktad i berg skall designas för vattenhastigheten 15 m/s men att hastigheter upp till 20–25 m/s kan tillåtas under gynnsamma geologiska förhållanden. Hänsyn skall tas till förväntad spillfrekvens (tillrinning jämfört mot kraftstationens utbyggnadsvattenföring), hur utskovet är tänkt att användas (tappningsordning mellan flera luckor m.m.) samt om känsliga konstruktioner finns i spillfårans absoluta närhet.

Hydro Quebecs dammsäkerhetsarbete styrs både av lagar och riktlinjer både på nationell och provinsiell nivå. Provinsens dammsäkerhetslag heter "Dam Safety Act" och dess riktlinje heter "Dam Safety Regulation" (båda rev. 2019). Den senare föreskriver att det var 10:e år skall utföras en omfattande dammsäkerhetsutvärdering, motsvarande en svensk DSU (begreppet Fördjupad dammsäkerhetsutvärdering, FDU, utgår f.ö.). Det finns inget skrivet som tydligt ger vägledning om arbete med bergerosion i spillfåror.

Kanadas motsvarighet till RIDAS är den nationella dammsäkerhetsvägledningen Canadian Dam Safety Guidelines, benämnd som "The CDA Guideline" som ges ut av the Canadian Dam Association (CDA). I den finns följande generella text (fritt översatt) avseende avbördningsanordningar (eng. *spillway structures*):

"Vissa typer av avbördningsanordningar och tillloppskanaler till dessa kan behöva löpande underhåll för att säkerställa deras funktion eller strukturella integritet, för att på ett säkert sätt kunna avbörda designflödet. Underhållskrav bör identifieras för dessa konstruktioner, och bör innehålla följande:

- *Rensning av drivgods och annat bråte samt avlägsnande av vegetation (slyröjning) i vattenvägar tillhörande avbördningsanordningarna, där detta kan begränsa eller helt stoppa avbördning.*
- *Reparation av kavitationsskador eller eroderade betongytor eller schaktade vattenvägar (av betydelse) efter spillsituationer.*
- *Rutinmässigt avlägsnande av bråte i energiomvandlare, speciellt vid reparationer av fogar och kring dräneringssystem*
- *Avlägsnande av vegetation och reparation av kanaler kopplat till fuse plugs (eng. fuse plug initiation channels), för att säkerställa dess funktion att trigga som planerat och inte i förtid.*

Praxis och erfarenheter från kända fall

Under konstruktionsfasen är det praxis att använda en indexmetod för bedömning av erosionspotentialen, d.v.s. Annandales eller Van Schalkwyks metoder. Vid tillståndskontroller (inspektioner och andra utvärderingar) är det numera praxis att bedöma om det finns svagheter i gränssnittet betong-berg, och föreslå vidare utredning om det finns ett potentiellt hot.

Detta har blivit mer aktualiserat de senaste åren, eftersom det startats flera forskningsprojekt inom ämnet, och inspektörerna på plats är mer medvetna om det potentiella hotet.

De skyddsåtgärder som enligt Marco bedöms förekomma är antingen skyddande betongytor eller restriktioner i hur utskoven får användas d.v.s. införande av driftinstruktioner avseende tappning (prioritet mellan utskov, tappningsordning, maximal lucköppning m.m.).

Utförd och aktuell forskning

Här nämns hittills utförd forskning som har utförts eller planeras av Hydro Quebec tillsammans med Quebecs tekniska universitet UQAC. Eventuell forskning som utförts av andra kanadensiska kraftbolag eller lärosäten nämns inte här, eftersom kontakt endast tagit med Hydro Quebec.

Ett doktorandprojekt som startade 2015 har utförts av Lamine Boumaiza med professor Ali Saidi som handledare, avslutas 2019 (översatt från franska): *Evaluation of hydraulic erodibility in discharge channels excavated in rock*. Detta är det första och enda forskningsprojekt som Hydro Quebec deltagit i. Syftet med projektet var att skapa en bättre förståelse för Annandales indexmetod och dess lämplighet för Hydro Quebecs anläggningar. De ingående parametrarna i metoden studerades – deras relevans och påverkan på bedömningen av erosionspotentialen. Förslag till alternativ metodik togs fram, och författaren påstår att denna metodik hanterar mer relevanta geologiska parametrar än tidigare metoder.

Detta projekt har viss likhet med Energiforsk-projektet VK12113 som rapporterats i Energiforsk-rapport 2018:532, d.v.s. "etapp 1" avseende Energiforsk-projekt om bergerosion i spillfärör.

2019 har Hydro Quebec lämnat in en ansökan om finansiering för ett forskningsprojekt till statliga forskningsorganet Research Canada – återigen ett samarbete mellan Hydro Quebec och UQAC: *Study of the rock erosion mechanisms*

downstream of spillways by large-scale experimental simulations. Det är ett stort projekt som syftar till att utveckla bättre metoder att bedöma erosionspotentialen (erosionsrisken). Projektet initierades med utgångspunkt från slutsatserna i det nämnda doktorandprojektet, d.v.s. att Annandales metod inte verkar vara lämplig att använda för en (uppsprucken) bergmassa. Projektets mål är att bättre förstå vilka geomekaniska parametrar som har störst inverkan på erosionens omfattning. Detta skall studeras med hjälp av fysiska modellförsök, vilka delvis ska användas till att kalibrera numeriska modeller.

Hydro Quebec har ännu inte fått beviljad finansiering av detta projekt, varför det är oklart om det kommer att genomföras.

Hydro Quebec uppger att, såvitt de känner till, inga andra kraftbolag i Kanada har utfört eller finansierat forskning inom området bergerosion i spillfåror.

2.1.3 Från konsult

Steven Pells på det australiensiska konsultbolaget PSM. Steven Pells m.fl. har skrivit en doktorsavhandling om bergerosion i spillfåror (2016) och arbetar numera som konsult främst inom det området, med uppdrag åt bl.a. det statliga franska kraftbolaget EDF. Pells är speciellt inriktad mot hydraulik och bergmekanik. Erfarenheter från Pells är sammanställda nedan, utifrån publikationer och e-postkonversationer.

I Energiforsk-rapport 2018:532 beskrivs den indexmetod som hittills är mest använd för att värdera erosionsrisken: Annandales metodik (1995). I Pells doktorsavhandling (2016) presenteras en alternativ indexmetod som avser endast berg, inte finare material. Enligt Pells är denna metod bättre anpassad till bergets egenskaper än Annandales metod, som anses vara mer generell, då den gäller både för jord- och bergmaterial. De flesta empiriska data som ligger till grund för Annandales metod är hämtade från spillfåror med finare material.

I Energiforsk-rapport 2018:532 var en slutsats att Annandales indexmetod inte är lämplig för svenska förhållanden, och att Pells metod istället rekommenderas om man önskar använda sig av indexmetodiken.

Pells förespråkar inte enbart indexmetodiken, utan även analytiska metoder där det analyseras om det finns resulterande upplyftande krafter som verkar på blocken. Detta kan göras rent analytiskt eller kopplat numeriskt-analytiskt med hjälp av en CFD-modell ("Computational Fluid Dynamics"): en numerisk-hydraulisk modell i tre dimensioner.

Indexmetoder ska/kan enbart användas som indikation på potentiell bergerosion – de ska varken användas som förutsägelse om erosionens omfattning eller som dimensioneringsgrund för eventuella åtgärder.

Pells & Douglas (2019) har skrivit en vägledning för arbete med bergerosion i spillfåror, kallad "a hydro-geotechnical rock scour assessment". Vägledningen är utformad utifrån genomgång av över 30st fallstudier av bergerosion i spillfåror i Australien, Sydafrika och i USA, och med hänsyn till dagens "best practice" avseende hydraulik och ingenjörsgologi. Vägledningen består av 8 st steg, vilka

beskrivs kort nedan. Kortfattat är metodiken upplagd enligt punktlistan nedan, i den angivna ordningen. De åtta stegen har här lags ihop till färre steg.

- Insamling all relevant information om den aktuella anläggningen eller mer specifikt spillfåran: geometri, geologi, flödeshistorik, skadehistorik/skadegrad.
- Utredning av spillfårans hydrauliska och geologiska egenskaper och bedömning av erosionspotentialen.
- Riskvärdering.
- Utredning av skyddsåtgärder, om det bedöms föreligga erosionsrisk som kan hota dammsäkerheten.
- Övervakning och tillståndskontroll, vid spillsituationer, för att kunna upptäcka och/eller följa utvecklingen av eventuell erosion. Detta är placerat sist i ordningen enligt Pells men kan med fördel initieras i ett tidigare skede.

Nedan beskrivs de åtta stegen kortfattat. Steg 3–5 beskrivs mer ingående i avsnitt 4.1.3.

Steg 1. Geometri och topologi

Grundläggande för arbetet med bergerosion i en spillfåra är spillfårans geometri och topologi, vilket är det första som behöver studeras. En uppmätning och fotografering av spillfåran kan vara nödvändig, om det inte redan finns. Det kan även finnas ritningar och rapportering från grundundersökningar från byggtiden.

Steg 2. Historik – flöden och erosion

En viktig del i värderingen av erosionspotentialen hos en spillfåra är att studera historiska data:

- Spillhistorik – hur mycket och hur ofta spills vatten? Finns dokumentation från spill (foton, filmer, rapporter)?
- Erosionshistorik - har erosion skett och finns den dokumenterad (foton, rapporter)? Vilket flöde och hur länge varade spillet?

Steg 3. Analys av hydraulik och ingenjörsgologi

För att kunna få en god förståelse för den specifika spillfårans hydrauliska och geologiska egenskaper behövs oftast ett platsbesök.

- Hydraulik (3A). Det är nödvändigt att karaktärisera den hydrauliska lasten som spillfåran utsätts för under flödessekvenser som förekommit historiskt såväl som dimensionerande flödessekvenser. Ett antal "hydrauliska domäner" definieras, beroende på vilka flödessituationer som studeras. Detta kan göras antingen analytiskt, för ett antal idealiserade flödesförhållanden, eller numeriskt med en hydraulisk beräkningsmodell. Mer information finns i avsnitt 4.1.3 samt i Pells paper (2019).
- Ingenjörsgologi (3B). En karaktärisering av bergmassan är nödvändig för värdering av erosionspotentialen. Vid en inspektion/kartering noteras bergart och mätning/uppskattning av dess tryckhållfasthet, sprickavstånd (blockstorlek), sprickvidd, sprickfyllnad och sprickrähet m.m. En eller flera "geologiska domäner" definieras, beroende på hur mycket geologin varierar i spillfåran. Mer information finns i avsnitt 4.1.3 samt i Pells paper (2019).

Steg 4. Erosionsdomäner

Nästa steg att definiera erosionsdomäner, vilket kan beskrivas som skärningen mellan hydrauliska domäner och geologiska domäner, där erosion har uppstått eller förväntas uppstå. Det är i dessa domäner som fokus bör läggas.

Steg 5. Bedömning av erosionspotential

Pells presenterar tre olika metoder att bedöma erosionspotentialen hos en bergmassa i en spillfåra:

- A. Jämförande bedömning. Denna metodik baseras på användandet av en indexmetod, t.ex. enligt Annandale eller Pells, där erosionspotentialen bedöms genom jämförelser mot fallstudier.
- B. Analytisk bedömning. Denna metodik baseras på kinematiska studier som syftar till att undersöka den resulterande kraften på ett block i bergmassan – kan upplyft ske eller inte? Detta kräver mycket god detaljkännedom om de platsspecifika hydrauliska och geologiska förhållandena, vilket kan vara svårt att etablera samt att de analytiska metoder som finns oftast är giltiga för vissa idealiserade förhållanden. Men, har man god kännedom de rådande förhållandena kan en kinematisk metod även användas för dimensionering av skyddsåtgärder, t.ex. dimensionering av bergförstärkning.
- C. Kopplad analytisk-numerisk bedömning. Denna metodik baseras också på kinematiska studier, men med stöd av en hydraulisk beräkningsmodell i tre dimensioner (CFD-modeller). CFD-modellen kan beskriva komplexa icke-idealiserade hydrauliska förhållanden.

Steg 6. Riskvärdering

Inom dammsäkerhetsarbete är begreppet risk oftast betraktat som produkten av sannolikhet och konsekvens. Sannolikheten för erosion är kopplad till återkomsttiden för det flöde som bedöms kunna leda till erosion. Konsekvenserna av erosionen är unika för varje dammanläggning och dess spillfåra. Konsekvenser av erosion kan variera allt från kraftigt försämrad stabilitet hos dammen, i värsta fall med dammhaveri som följd, till endast ekonomiska konsekvenser i form av reparationer. I riskvärderingen bör hänsyn även tas till osäkerheter i den föregående analysen.

Steg 7. Utvärdering av tänkbara åtgärder

Beroende på utfall i riskvärderingen kan olika nivåer av åtgärder utvärderas. Om erosionsrisken är oacceptabel måste åtgärder vidtas. Dessa kan vara helt proaktiva. Det finns i princip två typer av åtgärder:

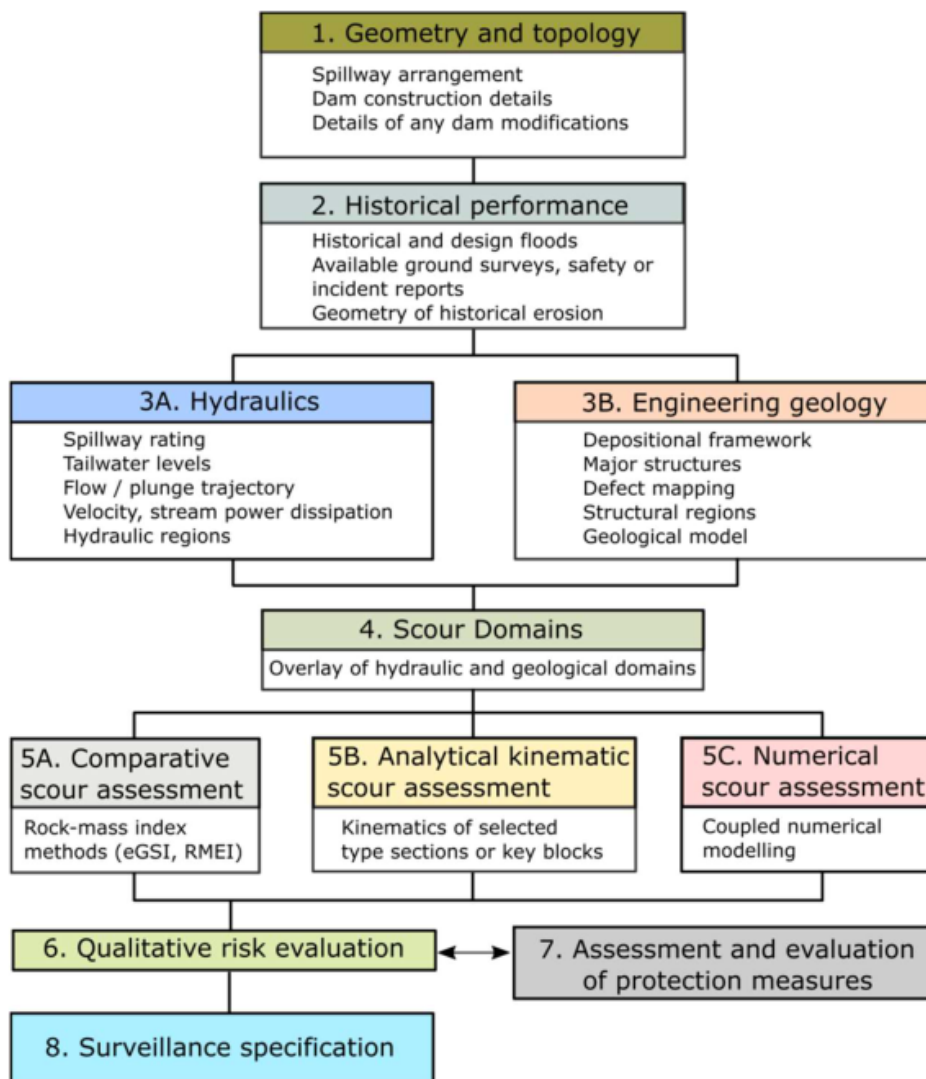
- reducera den hydrauliska lasten: utjämning av bergytan genom schakt och/eller betonggjutning), leda om flödet eller design av klassiska energiomvandlare
- minska bergmassans erosionspotential: bergförstärkning (bergbult) eller förstärkning genom betonggjutning

Steg 8. Övervakning och tillståndskontroll

Pells rekommenderar att relevanta spillsituationer övervakas och dokumenteras - före under och efter spill. Det rekommenderas en översyn av bergmassan före och efter spill, med noteringar och fotografering. Användande av drönare rekommenderas, för fotodokumentation men främst för fotogrammetri d.v.s. skapande av jämförande terrängmodeller före/efter spill.

Om omfattande erosion har skett under det dokumenterade spillet, kan det finnas behov av att gå igenom och eventuellt revidera den hydrauliska och geologiska analysen utifrån de nya förutsättningarna. Riskvärderingen kan då också behöva revideras.

Pells rekommenderar att dammägare inför rutinmässiga inspektioner av sina spillfåror, efter spill, för att på så sätt ha chans att se hur en eventuell erosion propagerar eller avstannar.



Figur 2.3 Flödesschema för hydraulisk-geoteknisk utvärdering av erosion i råa, ej beklädda spillfärör (Pells & Douglas, 2019)

3 Inblick

Ett av resultaten i Energiforsk-rapport 2018:532 var att föreslå användandet av Pells et al. (2017) indexmetod istället för Annandale's (1995) då det geologiska bakgrundsmaterialet fanns bättre presenterat av Pells samt att förklaringsgraden redovisats som högre, se Pells (2016).

I den hydrauliska delen av indexmetodiken, d.v.s. uppskattning av den erosiva effekten från vattnet (eng. *stream power*), förespråkar Pells anläggningsspecifika teoretiska utredningar av energiförlusterna (fallförlusterna), medan Annandale i första hand hänvisar till användande av beräkningar för ett fåtal idealiserade typer av strömningsförhållanden.

I Energiforsk-rapport 2018:532 *Bergerosion i spillfåror – kunskapssamling kring erosion av berg nedströms utskov* utvärderades ett antal anläggningar enligt Annandales metodik, och känslighetsanalyser på både det geologiska indexet samt den erosiva effekten utfördes för att utvärdera själva metodiken. En intressant jämförelse vore att även utvärdera samma anläggningar med Pells metodik. Detta ingår dock inte i omfattningen för detta projekt. Det vore relativt tidskrävande då förnyade utredningar av den erosiva effekten måste utföras för varje undersökt anläggning.

Oaktat fördelarna med Pells metodik var en av rekommendationerna i rapport 2018:532 dock att ändra inriktningen för hur erosion skall utvärderas bort från indexmetoder och energiförlustbetraktelser och istället utarbeta en fysikalisk förståelse av krafterna inblandade i erosionsprocessen som därefter kunna nyttjas för gränsvärdesdimensionering. Mer specifikt förekommande tryckregimer på gränsytan mellan berg- och vattenmassa samt överföringsmöjligheterna av dessa tryck genom bergmassan.

Skillnaden i tryck mellan två motstående sidor av ett bergblock ger upphov till bergerosion. Detta kan utredas analytiskt genom att integrera (summera) alla tryck runt blocket – då erhålls en resulterande kraft som verkar på blocket från det strömmande vattnet. Denna kan delas upp i tvärkraft och lyftkraft och dessa verkar längs respektive vinkelrätt mot flödets riktning.

För att kunna beräkna dessa krafter behövs kunskap om hastighets- och tryckfördelningen runt blocket, vilket även inkluderar blockets förlängning ned i bergmassan. Om block som utbildats av ytnära flacka bankningssprickor undantages så utgör blockets sprickmantelyta i bergmassa en mycket specifik värld. Grundvattenströmning genom en bergmassa sker sällan längs enskilda plan, utan vanligare längs kanaler på denna sprickmantelyta. Finnes även sprickfyllandsmaterial kan flöde även ske genom dessa beroende på typ av mineralisering, då med mycket låga permeabiliteter.

Tryckregimerna blir beroende dels av topografin hos överytan relativt vattenståndet samt av bergmassans förmåga att överföra tryckpulser genom spricksystemet. Som nämnt ovan är det sällan fallet att bergmassans spricksystem, om block som utbildats via bankningsplan undantages, hydrauliskt utgörs av plan, snarare linjer.

Gällande tryckregimer som kan utbildas är dessa i hög grad beroende av vattenvägens utformning. Tryckregimer i kanaler skiljer sig från tryckregimer i energiomvandlarbassänger. Därför ges en introduktion till den i Sverige allmänt förekommande vattenvägen i avsnitt 3.1.

3.1 VANLIGT FÖREKOMMANDE SPILLFÅRA I DEN NATIONELLA URBERGGRUNDEN

Avbördningsanordningar för temporära övermängder av vatten vid dammar kan utgöras av ett antal möjliga konstruktioner. Enligt rapport 2018:532 utgörs de flesta svenska dammars avbördningsanordningar av ett eller ett antal parallella utskov bestående av en lucka följt av ett kort skibord i betong. Vid skibordstån överlämnas vattnet till en flackt sluttande bergyta - antingen i form av en nedsprängd kanal eller vanligare över en tidigare älvfåra, vilken nu ligger utan vattentäckning och vars bredd normalt mångdubbelt överstiger ett utskovs bredd. I vissa fall finns där grunda naturliga eller konstruerade bassänger som ligger närmast skibordstån som i Porjus, Messaure eller Granfors. Dessa små vattenansamlingar påverkar dock energiomvandlingen föga.

I Krångfors slår vattenmassorna på högra sidan av spillfåran emot en bergvägg innan de letar sig ned till en centralt placerad kanal. I Letsi, Midskog, Bergeforsen och Långströmmen finns fullödiga energiomvandlarbassänger till ett av flera utskov. I Ramsele finns ett skidhopp (eng. *ski-jump*), d.v.s. vattnet kastas ett tiotal meter nedströms. Dessa olika fall utgör dock undantag i den nationella sammanställningen av anläggningar.

Den modell av avbördningsanordning som är mest förekommande avlämnar alltså vattnet parallellt eller nära parallellt med den bergyta över vilken vattnet framstörtar. Bergytans topografi om än flack utgörs alltid av oregelbundenheter vilka ömsom agerar som stötsida mot det framskjutande vattnet ömsom som stötbädd för det därefter tumlande vattnet. Oregelbundenheterna inducerar och förstärker energiomvandlingen något i vattenmassan. Då vattenmassorna framrycker över bergytan utan betydande förluster i hastighet måste den energiomvandling som sker vara förhållandevis låg i jämförelse med den i en energiomvandlarbassäng eller över ett vattensprång.

Nedanstående figurer illustrerar berggrunden i vanligt förekommande spillfåror samt spillvattnets forsande över densamma.



Figur 3.1 Bild över spillfåra vid ett kraftverk i norra Norrland, se rapport 2018:532. Notera att block i bergmassan ställvis fungerar som stötblock gentemot det framstörtande vattnet. Där stor turbulens skapas kommer nedströms bergyta även få agera stötbotten. Notera även att ytan ställvis plansprängts för att jämna ut topografin. Sprickytor existerar men är svåra att identifiera, har hög krökning och är tätt sammanpressade. Bergmassan får därav en massiv karaktär.



Figur 3.2 Bild över spillfåra vid ett kraftverk i norra Norrland under lätt snötäcke, se rapport 2018:532. Notera högra delen av spillfåran där berggrunden är uppsprucken i rektangulära block. Ömsom agerar berggrunden som stötblock, ömsom som stötbädd för de framrusande vattenmassorna. Sprickytorna avslöjas lätt i fält på grund av att vertikala sprickgrupper skär av bankningsplan och förlämnar överytan en kubistisk karaktär. Sprickorna i bankningsplanen är något öppna upp till 5mm emedan de vertikala sprickseten företrädesvis är täta till något öppna (<2,5mm) i överytan.



Figur 3.3 Bild över spillfåra vid ett kraftverk i Norrland år 2014 innan ombyggnation av densamma. Direkt nedströms center skibords tå finns en berghäll som höjer sig ovan skibordstån. En dörröppning är placerad vid högsta punkten. Berghällen agerar som stötblock vid spillvattentappning. Notera även det enorma block som ligger, till synes löst något längre nedströms.



Figur 3.4 Fotografi från spillvattentappning ur center utskov vid samma kraftverk som på föregående foto år 2015 innan ombyggnationen av spillfåran, sidovy från höger. Den berghäll som höjde sig ovanför vattenmassornas flödeslinje agerar som stötblock och orsakar därefter turbulens i flödet då vattenkaskaderna rytmiskt slår ned på bergytan nedströms.



Figur 3.5 Fotografi från spillvattentappning ur center utskov vid ett kraftverk i Norrland år 2015 innan ombyggnationen av spillfåran, sidovy från vänster. Den berghäll som höjde sig ovanför vattenmassornas flödeslinje agerar som stötblock och orsakar därefter turbulens i flödet då vattenkaskaderna rytmiskt slår ned på bergytan nedströms.



Figur 3.6 Mindre spillvattentappning ur höger utskov vid ett kraftverk i norra Norrland, se rapport 2018:532. Vattenmassorna lyfts ställvis upp av block som sticker upp ur skibordsförlängningen för att därefter slås emot nedströms bergvägg innan de rutschar ned i en centralt belägen spillfåra. Exemplet kan ses som ett typfall för hur ett enskilt block stötsida anfäktas av de framrusande vattenmassorna.

Ovanstående figurer är tänkta att illustrera en karaktäristisk urberggrund samt hydrauliskt beteende vid vattenmassornas framstörtande. Gemensamt för ovanstående figurer är att energiomvandlingen är låg. Bergarterna tillhör samtliga urbergsskölden och är antingen massformigt magmatiska eller består av helt rekrytalliserade gnejser, leptiter eller granitoider med sammanväxt magmatisk kornfogning mellan de ingående högtemperaturmineralen. Bergmassan är även uppsprucken i medelstora till väldigt stora block (se rapport R-01-19, s. 48 för en god beskrivning av blockstorleksfördelning). Sprickvidden som avgränsar blocken varierar från tätt sammanpressade till tiotalet centimeter i extrema fall där bankningsplan avgränsar en överyta av block vilken följer topografin.

Utan att förvilla sig i den ofta till synes komplexa strukturgeologin så är samtliga ovanstående fall likvärdiga med avbördning över stötblock i vattenvägar. Se fotografierna nedan. Dock med en viktig skillnad. Till skillnad från betongkonstruktionen som utgörs av en monolit så utgörs bergmassan av block vilka är mer eller mindre perfekt passade mot varandra. Sprickytornas avstånd från varandra blir avgörande för om tryck kan kommuniceras från överytan runt blockets bottenarea då för maximal tryckgradient täta sprickor inte kommunicerar tryck över huvud taget. Blockens storlek, bergartens specifika vikt och därmed blockens tyngd blir avgörande för om det kan ryckas ur sitt läge av de framrusande vattenmassorna.



Figur 3.7 Under år 2016 färdigställd renoverad spillfåra med låga stötblock vid skibordstån vid ett kraftverk i Mellansverige.



Figur 3.8 Spillvattentappning över stötblock vid samma kraftverk som på föregående foto under år 2016. Stötblocken träffas av det framsusande vattnet, inducerar ökad energiomvandling i vattenmassan genom att tvinga vattenmassan att lyfta sig, uppdelas genom luftmassan och tumla ned på nedströmssidan om stötblocken med friktionsförluster som följd. Då energimängden avtar genom den inducerade rörelsen i vattenmassan är det högsta trycket att finna vid stötblockens stötsida.

För att skapa en metodik baserad på kinematik, som skall utröna huruvida en bergmassa är känslig för erosion eller inte för det aktuella flödet, måste metodiken kunna förutsäga vilken tryckregim som bildas på stötblockens stötsida relativt vattendjupet samt vilka möjligheter detta tryck har att penetrera berggrunden och orsaka lyftkrafter. Detta återkommer i avsnitt 4.2. Nästföljande kapitel behandlar vägledning kring hur kraftverksägaren skall handskas med erosionsfrågan.

4 Vägledning för framtagande av tillämpningsvägledning

Då det i dagsläget saknas en nationell tillämpningsvägledning (RIDAS) kring arbete med bergerosion i spillfåror, görs här en ansats till en sådan. Beroende på om det finns observerad erosion eller inte, får arbetet olika inriktning. Tillämpningsvägledningen omfattar bedömning av erosionspotential, riskvärdering, behov av kontrollprogram/övervakning och eventuella åtgärder samt förslag till åtgärder. Den aktuella anläggningens dammsäkerhetsklass kommer i praktiken också att bli avgörande för hur vidlyftiga utredningar och eventuella skyddsåtgärder blir.

Det är önskvärt att ha en tillförlitlig och helst enkel metod för att kunna bedöma erosionspotentialen för en spillfåra, så att åtgärder fokuseras till de anläggningar där behovet är störst.

Om erosionen bedöms så allvarlig att den direkt hotar dammsäkerheten, mest troligt genom reducerad glidstabilitet, behövs naturligtvis åtgärder vidtas omedelbart. Det mest vanligt förekommande erosionsfallet är dock att viss erosion har skett, men att det saknas kännedom om tidpunkt för erosionen. Om erosion skett successivt och mer eller mindre jämnt fördelat under årens gång eller om den skett under ett höglöde.

I Energiforsk-rapport 2018:532 förklarades det att erosionspotentialen ökar med flödessekvensens varaktighet d.v.s. att det är inte endast flödets, eller mer korrekt vattenhastighetens storlek, som ökar erosionspotentialen. En långvarig flödessekvens av vanligt förekommande storlek kan ge upphov till bergerosion såväl som en mer kortvarig sekvens med ett högre flöde (t.ex. en fullskalig provtappning). Av denna anledning behövs ofta en analys av erosionspotentialen och en riskvärdering, innan eventuella proaktiva åtgärder kan utredas.

4.1 FÖRSLAG TILL ARBETSGÅNG

Syftet med detta förslag till arbetsgång är att underlätta för dammägare att prioritera insatser till anläggningar där de största behoven finns. Alla anläggningars spillfåror behöver inte utredas, men för anläggningar där bergerosion potentiellt kan äventyra dammsäkerheten behöver åtminstone en bedömning om erosionspotentialen samt en riskvärdering utföras. Arbetets omfattning styrs naturligtvis även av den aktuella anläggningens dammsäkerhetsklass.

Arbetsgången kan med fördel arbetas in i en kommande tillämpningsvägledning i RIDAS. Vissa delar är baserade på Pells & Douglas vägledning (2019), som har beskrivits kortfattat i avsnitt 2.1.3.

Arbetsgången är upplagd utifrån några frågeställningar, ställda i en viss ordning, och arbetet får olika inriktning beroende på svaret. Tre typer av aktiviteter kan bli aktuella:

- Övervakning/tillståndskontroll
- Utredning avseende erosionspotential och riskvärdering
- Utredning avseende ev. skyddsåtgärder

Nedan beskrivs arbetsgångens steg. Den illustreras även i form av ett blockdiagram i figur 4.1. Arbetsgången inleds med en fråga:

1. Är erosion av spillfåran eller undergrund till skibord/kanal ett hot mot dammsäkerheten?

För att svara på denna fråga kan en utredning behövas för den del anläggningar. För vissa anläggningar är det kanske uppenbart, eller kräver åtminstone endast en diskussion.

Om svaret är nej behövs sannolikt inte fortsatta utredningar, och då inte heller några åtgärder.

Om svaret är ja rekommenderas först och främst att ett kontrollprogram initieras, vilket beskrivs i avsnitt 4.1.2.

2. Finns observerad erosion eller befogad oro för erosion?

Om svaret är nej rekommenderas att övervakning/tillståndskontroll fortskrider och utvärderas löpande. Tillståndskontroll bör göras löpande vid ordinarie inspektioner (fördjupade damminspektioner, "FDI"). Föreslagen metodik för detta beskrivs i avsnitt 4.1.2.2. Efter utvärdering av övervakning/tillståndskontroll ställs fråga 2 igen – ett löpande arbete. Så länge svaret är nej, går man inte vidare till fråga 3.

Om svaret är ja rekommenderas, förutom övervakning/tillståndskontroll, att en utredning (förstudie) initieras avseende erosionspotential och riskvärdering.

3. Behöver skyddsåtgärder utföras?

En fortsättning på den utredning som initierats efter fråga 2.

Om svaret är nej rekommenderas att övervakning/tillståndskontroll fortskrider och utvärderas löpande, som beskrivet under fråga 2 ovan.

Om svaret är ja behöver lämpliga åtgärder utredas (förstudie). Principiellt existerar endast två typer av åtgärder: reducering av den hydrauliska lasten eller reducering av bergmassans erosionsbenägenhet, eller en kombination av dessa. Någon av följande åtgärder är oftast lämplig, eller en kombination av flera av dem:

- Pågjutning: skibordsförlängning, säkring av dammtå eller igengjutning av erosionsgrop
- Detaljschakt för att minska belastning: t.ex. plansprängning
- Bergförstärkning
- Konstruerad energiomvandlare: bassäng, ski-jump m.fl.

Föreslagen åtgärd måste naturligtvis dimensioneras, och idag finns inte tillräcklig kunskap om de laster som bergmassan och/eller betongkonstruktionen utsätts för, från vattnet. Idag görs detta därför

genom hävdvunnen dimensionering, d.v.s. genom etablerad metodik och tumregler och/eller genom att extra säkerhetsmarginaler adderas. Utan tillräcklig kunskap är det dock inte säkert att säkerhetsmarginalerna är tillräckligt stora. I avsnitt 4.2 ges en vägledning för framtagande av dimensioneringsgrund.

Efter utförda åtgärder behöver funktions- och tillståndskontroller av åtgärderna utföras löpande. På så sätt börjar arbetet om vid fråga 2, i samband med tillståndskontroller.

Bedömningen för många anläggningar blir troligen att det inte behövs varken utredning, åtgärder eller övervakning. För en hel del anläggningar blir troligen bedömningen att det är fullgott att införa en övervakning i form av fotografering och inmätning av spillfåran med ett antal års mellanrum, för att se eventuell erosionsutveckling. För ett antal "riskanläggningar" behöver utredningar initieras, och kanske skyddsåtgärder utföras i förlängningen.

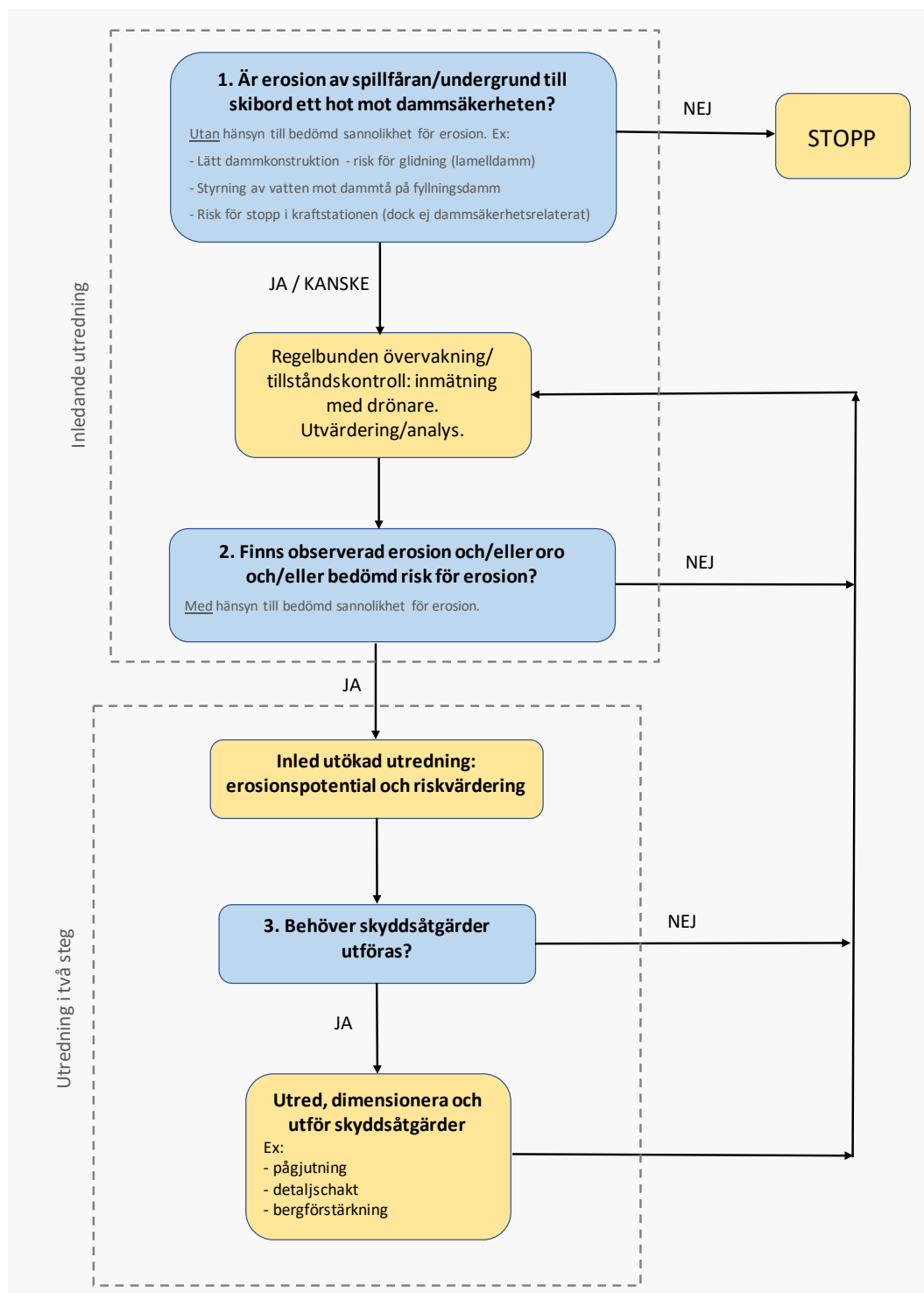
Anledningen till att fråga 1 ställs före fråga 2 är att det är stor sannolikhet att svaret är nej på fråga 2 för många anläggningar, och då riskerar dessa att läggas åt sidan trots att de kan vara potentiella "riskanläggningar". Anledningen till att det är stor sannolikhet att svaret är nej på fråga 2, är att de allra flesta anläggningar inte utsatts för den dimensionerande lasten ännu – därmed finns endast ett begränsat antal fall av observerad erosion och därmed även en begränsad oro för erosion. Arbetet måste därför utgå från dammanläggningens utformning och svagheter, d.v.s. fråga 1.

Fråga 1 och 2 besvaras i en inledande utredning. Om svaret är ja på fråga 2, inleds en utökad utredning, där även fråga 3 ingår. Se blockdiagrammet i figur 4.1 och vidare under avsnitt 4.1.1-4.1.5.

4.1.1 Inledande utredning - situationsanalys avseende bergerosion

Här utreds huruvida bergerosion i spillfåran är ett potentiellt hot mot dammsäkerheten, d.v.s. svaret på fråga 1 ovan. Detta görs med fördel genom en situationsanalys eller felmodsanalys/PFMA (eng. *Probable Failure Mode Analysis*). En sådan kan mycket väl vara utförd för den aktuella anläggningen, och kan då ersätta delar i den inledande utredningen. Detta gäller dock endast om det funnits utrymme och/eller möjlighet att ha hänsyn till bergerosion i spillfåran i den analysen.

Om svaret är ja på fråga 1 ovan, utökas denna inledande utredning med att även sammanställa erosionshistorik och erfarenheter, så att även fråga 2 ovan kan besvaras.



Figur 4.1 Blockdiagram som illustrerar föreslagen arbetsgång för arbete med bergerosion i spillfåror.

4.1.2 Kontrollprogram – övervakning och tillståndskontroll

Här ges ett förslag till hur ett kontrollprogram bör utformas, innehållande övervakning och tillståndskontroll. Valda delar är baserade på Pells & Douglas (2019) vägledning, steg nr 8.

4.1.2.1 Övervakning över tid

Här avses framförallt inmätning av den aktuella bergytan, vid flera tidpunkter, för jämförelse och uppföljning av eventuell propagerande erosion. Detta är alltså ett arbete som sker över tid – ett antal år, kanske tiotal år beroende på bedömd risknivå. Lämpliga tillfällen för inmätning är före och efter ett större spill samt före/efter en planerad provtappning eller funktionsprovning av utskovsluckor, som kan sammanfalla med en tillståndskontroll. Med "ett större spill" avses här höga flöden (lång- eller kortvarigt) eller ett mindre men dock långvarigt spill.

Inmätning görs med laserskanning eller med drönare. Drönarmätning sker genom s.k. fotogrammetri där en terrängmodell skapas utifrån drönarfotografier och inmätta punkter. Drönarmätning rekommenderas om spillfåran består av en öppen yta närmst utan växtlighet, annars rekommenderas laserskanning, så bättre kan hantera träd och annan växtlighet.

En noggrann och heltäckande inmätning med laserskanning kräver många olika uppställningar av instrumentet, d.v.s. inmätning från olika håll för att "komma åt" hela området. Drönarmätning har då fördelen att det sker från luften och går relativt snabbt att utföra samt att risken är mindre för "skuggor" i punktmolnet, jämfört mot laserskanning. En annan fördel med drönarmätning gentemot laserskanning är att en biprodukt av terrängmodelleringen är ett högupplöst ortofoto, som både kan användas delvis till bergkartering (sprickorientering m.m.) och som underlag under fortsatta utredningar och eventuell projektering.

Om spillfåran är vattenfylld rekommenderas högupplöst ekolodning: s.k. multi-beamekolodning.

Vid drönarmätning skall noggrannhetskraven vara mycket höga, t.ex. genom att använda markstöd (noggrant inmätta och tydligt markerade punkter inom flygområdet). Punktmoln från drönarmätningar som utförts vid olika tillfällen jämförs genom att skapa s.k. "differenskartor", där eventuella skillnader i geometrin syns tydligt – till exempel från erosion. Detta är samma förfarande som vid mätningar av fyllningsdammar, där t.ex. utveckling av sjunkhål följs upp över tid genom ekolodning.

Inmätning av en spillfåra kan med fördel även kombineras med inmätning av resterande delar av anläggningen, t.ex. själva dammen – t.ex. inmätning av nedströmsslänten av en fyllningsdamm med syfte att följa utvecklingen av eventuella sättningar m.m.

4.1.2.2 Tillståndskontroll - inspektion

Om svaret på fråga 1 i avsnitt 4.1 är ja eller kanske, rekommenderas att spillfåran ges en ökad uppmärksamhet vid planerade tillståndskontroller såsom fördjupade damminspektioner (FDI) och dammsäkerhetsutvärderingar (DSU, som i tidigare

versioner av RIDAS benämndes FDU). Detta för att kunna göra en inledande bedömning om bergytans erosionsbenägenhet kopplat till den vattenlast som råder vid den aktuella anläggningen.

Det rekommenderas att en provtappning utförs, med ett så stort och långvarigt flöde som är praktiskt genomförbart. Detta kräver oftast lång framförhållning i vatten- och produktionsplaneringen, varför det behöver förankras hos produktionsledningen förutom hos dammsäkerhetsansvariga.

Provtappningen bör övervakas och dokumenteras med hjälp av drönare och med fördel även mätning av aktuella vattennivåer - uppströms men framförallt nedströms dammen. Om anläggningen inte har mätning installerad kan detta med göras med portabla, dränkbara tryckgivare. Vattenföringen under spillet bör dokumenteras – storlek och varaktighet. Sammantaget fås ett bra underlag för en första bedömning av hur väl spillfåran fungerar, t.ex. om det finns känsliga partier, samt att de rådande förhållandena vid provtillfället dokumenteras väl för eventuella fortsatta utredningar.

Provtappning och funktionsprovning av utskovsluckor sker ofta i samband med tillståndskontroller (inspektion) av hela dammanläggningen, varför dessa är lämpliga tillfällen för tillståndskontroll även av spillfåran. Både en ingenjörsgelog/bergmekaniker och en hydrauliker bör därför närvara vid inspektionen. Dessutom är sakkunniga inom ett flertal teknikområden på plats under inspektionen, inom t.ex. betong och grundläggning, vilket möjliggör värdefulla diskussioner kring bergerosion och hur det kan påverka dammanläggningen.

Vid inspektion av spillfåran av ingenjörsgelog/bergmekaniker och hydrauliker, avseende bergerosion, är det en rad viktiga kontroller/observationer som behöver göras samt frågeställningar som behöver besvaras – översiktlig punktlista nedan.

- Hur angriper vattnet bergytan – fallande, närmast horisontellt, tumlande?
- Hur ser spillfårans storskaliga geometri ut – rak, skarpa krökar eller andra riktningsförändringar, ledmurar som styr vattnet där högre hydraulisk belastning kan misstänkas?
- Finns uppstickande bergpartier där belastningen från vattnet troligen är högre än för bergytan generellt? Ligger dessa högpunkter olämpligt till?
- Strömningsförhållanden under spill. Studera strömningen utifrån de tre föregående frågeställningarna samt utifrån några ytterligare enligt nedan. Här är drönarfilmer ett gott stöd.
 - × Var sker troligen de största belastningarna på berget från det strömmande vattnet? Finns risk för stor belastning på berget i närheten av dammkonstruktionen?
 - × Finns det risk för att vatten kan trycka in under ledmurar och är det i så fall ett problem.
 - × Finns risk för kraftiga tryckpulsationer i spillfåran – i så fall var?
 - × Sker någon energiomvandling, kontrollerad (t.ex. bassäng) eller ej kontrollerad?

- Utan att en fullständig kartering utförs bör bergmassans karaktär observeras. Är den enhetlig eller komplex med flera bergartskroppar, gångar, sprickzoner, vitt skild blockighet eller annat som ökar komplexiteten?
- Bergmassans blockighet speciellt där hög hydraulisk belastning sker, blockighet, uppkrossad, finns där öppna sprickor eller bred sprickfyllnad?
- Syns färsk brottytor där block slitits bort. Finns i ytan lösa block som kan misstänkas ha flyttats, exempelvis i form av en hopspolad hög block lite längre nedströms? Finns lösa block i ytan generellt? Ibland kan lossbrytning av block avslöjas genom att vittringshud saknas.
- Eventuell installerad bergförstärknings tillstånd. Har block slitits loss från bergförankringar, är de böjda? Har de installerats i ett flertal omgångar historiskt?

Utöver okulär inspektion behöver spillhistorik, erfarenheter från driftpersonal samt eventuella andra underlag studeras. Ett sammanfattande utlåtande skrivs, om preliminär bedömning av erosionsrisk och i förlängningen dammsäkerhetsrisk, och förslag på eventuella fortsatta utredningar och/eller åtgärder.

4.1.3 Utredning avseende erosionspotential

I rapport 2018:532 var en av rekommendationerna att i väntan på en egenutvecklad kinematisk metod för att utföra utredningar av erosionspotential så skulle Pells (2016) Pells et al. (2017) föreslagna indexmetod kunna användas tills vidare. Nedanstående kapitel beskriver de nödvändiga stegen i en sådan utredning och är baserade på arbeten av Pells (2016) Pells et al. (2017) och Pells & Douglas (2019).

4.1.3.1 Indatainsamling – geometri, topologi och historik

Grunden för ett bra utredningsarbete läggs genom att sammanställa alla relevanta underlag, och gällande bergerosion i spillfärar avser detta framförallt geometri och flöden.

Det geografiska område som normalt bör vara i fokus är från magasinet till slutet av spillfäran. Fokusområdet bör åtminstone sträckas så långt längs spillfäran som bedöms kunna påverka strömningsförhållandena, och därmed erosionsförhållandena, nära dammen för dimensionerande situationer (höga flöden, extremt hög vattenivå i närmast nedströmsliggande sjö/magasin).

Topografin i fokusområdet bör sammanställas och presenteras som kartor eller helst som 3D-modell, eftersom det ökar förståelsen för problemställningen. Om det inte finns tillgänglig information om topografin i fokusområdet, kan inmätningar behöva göras – se lämplig metodik i avsnitt 4.1.2.

Förutom den sammanställning av erosionserfarenheter som görs i den inledande utredningen, beskriven i avsnitt 4.1.1, behöver hydrologisk information sammanställas –historik avseende spill och vattennivåer, som helst kan kopplas till eventuella erosionstillfällen samt information om dimensionerande flöde. Vidare behövs en sammanställning av historiska fotografier: på dammanläggningen och konkret på spillfäran, helst från ett flertal olika årtal, samt på spillfäran under spill.

I den geologiska karaktäriseringen av undergrunden behövs information om flödets angreppsvinkel gentemot undergrunden. Ett kartmaterial som redovisar detta bör därför tas fram redan i detta skede, där en eller flera flödeslinjer läggs in beroende på spillfårans geometri

4.1.3.2 Hydraulik

Föreslagen metodik för att i dagsläget utvärdera erosion är som ovan beskrivet Pells (2016) indexmetod. Den hydrauliska last som spillfåran utsätts för beskrivs här med energiförluster.

För att kunna bedöma hur den hydrauliska lasten på bergmassan är fördelad i det aktuella området av spillfåran, behövs en god förståelse för de hydrauliska förhållandena. Detta åstadkoms mest lämpligt genom numerisk modellering, där energiförluster beräknas. Utifrån den numeriska modelleringen kan den erosiva effekten på bergmassan från det strömmande vattnet uppskattas, vilket representeras som energiförlust per längdenhet (i strömningsriktningen).

Den erosiva effekten beräknas genom:

$$\Pi_{UD} = \rho g \frac{Q}{B} \frac{\Delta E}{\Delta L} = \rho g \frac{Q}{B} S_e \quad [\text{W/m}^2] \quad [1]$$

ρ är vattnets densitet ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$). Q är flödet. B är flödets bredd. ΔE är energiförlusten över sträckan ΔL (i strömningsriktningen, eng. *dissipation length*), vilket ger energilinjens lutning S_e .

Detta samband är allmängiltigt men beräkning av energilinjens lutning görs på olika sätt, med olika verktyg, beroende på de rådande strömningsförhållandena. Detta beskrivs mer i punktlistan nedan.

Storleken på flödet som ska studeras är oftast känt, från historiska flödessituationer eller från designvärden d.v.s. det dimensionerande flödet (ofta 100-årsflöde eller klass 1-flöde). Strömningsarea, strömningshastighet och energiförlust (ΔE) kan beräknas med konventionell teori för kanalströmning men med följande i åtanke (Pells & Douglas, 2019):

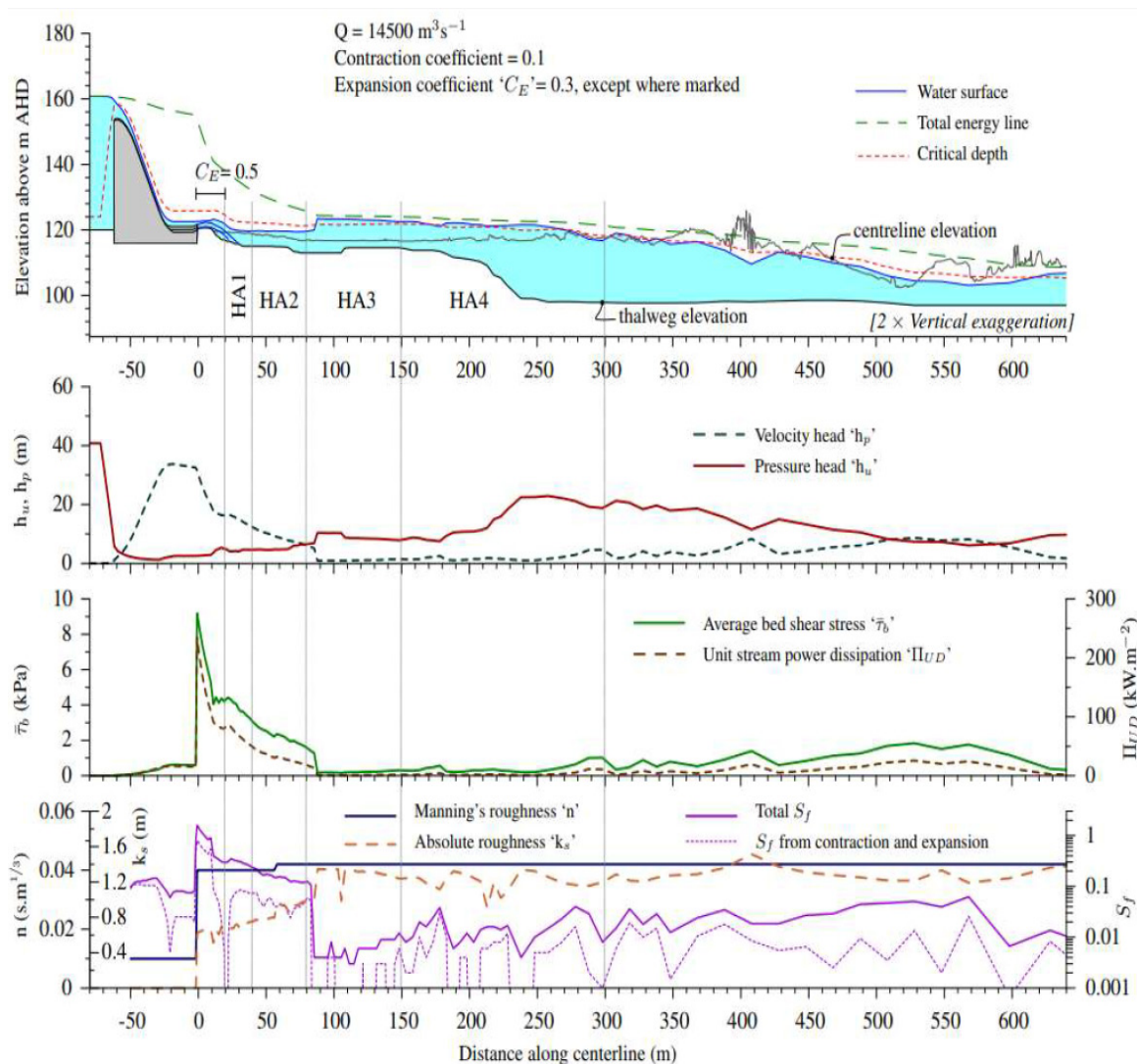
- I konventionell teori för kanalströmning antas att flödet är endimensionellt (1D), vilket innebär en enda fördefinierad strömningsriktning och att strömningshastigheten är densamma i ett och samma tvärsnitt d.v.s. ett medelvärde både i djupled och i breddled. Detta 1D-antagande är oftast lämpligt för spillfåror, eftersom de oftast är tydligt definierade vattenvägar.
- Spillfåror är oftast relativt korta, och strömningshastigheten är hög. Detta innebär att ett antagande om stationära strömningsförhållanden oftast är lämpligt, d.v.s. att flödet är konstant.
- För vidare analys bör den rådande strömningen kategoriseras som *gradvis varierande* eller *hastigt varierande* (turbulent, fors). *Laminär* (likformig) strömning förekommer för övrigt inte i detta sammanhang.
- För gradvis varierande strömning styrs vattenhastigheten och vattendjupet till största del av friktionskrafter - samband som löses med hydrauliska räkneekvationer som t.ex. Mannings eller Darcy-Weisbachs ekvationer.

- Värden för råheten, Manningtalet n eller $M=1/n$, kan hämtas från publicerade vägledningar inom hydraulik, men man bör ha i åtanke att de angivna värdena typiskt gäller för relativt lugna strömningsförhållanden.
 - 1D-programvaror som t.ex. HEC-RAS (USACE, 2010) kan med fördel användas för beräkning av energiförluster för gradvis varierande strömning.
 - För gravis varierande strömning resulterar lokala förändringar i topologi och råhet i en lokalt ökad erosiv effekt, på grund av en lokalt ökad energigradient. Dessa lokala förändringar ska ägnas stor uppmärksamhet och beskrivas med rimliga antaganden.
 - Vid hastigt varierande strömning som t.ex. i figur 3.4 är fallförlusterna från friktion antagligen den minst bidragande delen. Förlusterna härrör till största delen från turbulent virvelbildning, lokala vattensprång etc. och är svårt att beräkna.
 - För hastigt varierande strömning är ΔL den enskilt största osäkerheten vid uppskattning av energiförlusten (och i förlängningen den erosiva effekten), d.v.s. sträckan över vilken energiförlusten sker. Energiförlusten är sannolikt inte heller jämnt fördelad över den sträckan. De analytiska samband som nämns i föregående punkt, såväl som 1D- och 2D-programvaror, tar inte hänsyn till detta.
 - I motsats till en del förekommande vägledning för fallande vatten, bör inte vattenstrålens tjocklek användas som ΔL , eftersom energiförlusten fördelas över en större area än strålens tvärsnitt, och mycket rörelseenergi kan kvarstå efter kollisionen med spillfåran.
 - Erfarenheter säger att strömningsförhållandena för en spillfåra antas vara endimensionella (1D), är energigradienten (energilinjens lutning) sällan överskrider 3, förutom under extrema förhållanden. Detta innebär att den erosiva effekten Π_{UD} sällan överskrider 1000 kW/m².
 - Då hastigt varierande flöde råder. I de fall där varken analytiska samband eller 1D-/2D-beräkningar bedöms kunna ge tillräckligt tillförlitliga resultat, kan detaljerade strömningsberäkningar behöva utföras, d.v.s. CFD-modellering. Där beräknas inte medelvärden av vattenhastighet och vattendjup i djupled och breddled, utan ger istället en rumslig variation av dessa i tre dimensioner ("3D-modellering").
- Metodiken för de jämförande indexmetoderna är framtagen utifrån antagande om endimensionella (1D) strömningsförhållanden, varför resultat från CFD-modellering kan behöva rumslig medelvärdesbildning för att ge jämförbara resultat.

Det rekommenderas resultaten från ovan nämnda analyser presenteras i diagram, som kontinuerliga kurvor för djup, hastighet och energilinje längs den aktuella delen av spillfåran, för ett antal olika dimensionerande flödesförhållanden. Detta ger en tydlig presentation av resultaten samt ger möjlighet att försäkra sig om att beräkningarna ger fysikaliskt korrekta resultat.

Ett exempel på diagram visas i figur 4.2. Där ges en bra överblick och indikation av vilka delar längs spillfåran som bör vara utsatta för störst belastning från vattnet, i form av energiförlust, d.v.s. var energilinjens lutning är störst. Den erosiva effekten (eng. *unit stream power dissipation*) plottas också, i det andra diagrammet nedifrån.

Den hydrauliska analysen bör utföras av personer som är väl förtrogna med hydrauliska beräkningar.



Figur 4.2 Exempel på presentation av hydrauliska analyser för ett skibord och spillfåra (Pells & Douglas 2019).

4.1.3.3 Ingenjörsgéologi

Då energiförlusterna över spillfårans längd definierats med metoder enligt ovanstående kapitel behöver undergrundens egenskaper definieras så att den framräknade energiförlusten kan jämföras mot ett erosionsmotstånd baserat på de geologiska egenskaperna hos bergmassan, mer specifikt de delar av bergmassan som innehåller likartade egenskaper.

I enlighet med rekommendationen i rapport 2018:532 beskrivs här de nödvändiga undersökningarna för att definiera bergmassans egenskaper enligt geologiskt index från Pells (2016).

Den enskilt viktigaste uppgiften med den ingenjörsgelogiska undersökningen är att definiera områden med likartade egenskaper, härafter kallade geologiska domäner. Undersökningen bör innefatta nedanstående två efter varandra följande utredningar.

Byråinventering av geologiskt underlagsmaterial. I fallande betydelseordning högupplösta ortofoton av den aktuella spillfåran, tolkade bergarts- och bergkvalitets-kartor, underlagsmaterial från förundersökningar, övriga geologiska rapporter. Målet är att utröna om den aktuella spillfåran utgörs av en eller flera geologisk(a) domän(er). Exempel på sådana kan vara en moderbergart i en spillfåra som (1) skärs av en sprickzon, (2) intruderats av gångbergarter, (3) övergår från en bergartskropp till en annan, exempelvis större amfibolitförekomster i gnejsberggrund. I sådana fall bör moderbergart ett (gnejsberggrunden i exemplet) definieras som en geologisk domän, sprickzonen som en geologisk domän, gångarna som en geologisk domän och moderbergart två (amfiboliten i exemplet) som en geologisk domän. Det kan vara motiverat att dela upp moderbergarten i flera geologiska domäner baserat på större strukturgeologiska skillnader, vilka i så fall framgår av ortofotografierna. Finns möjlighet så bör bergmassans djupled inventeras exempelvis genom rapporter från tidigare utförda kärnborrningar.

Ett kartmaterial till steg två i den ingenjörsgelogiska utredningen bör tillverkas över de ansatta geologiska domänerna, lämpligen genom att återanvända ortofotona från tillståndsovervakningen.

Är spillfåran täkt av vatten blir ovanstående utredning av naturliga skäl problematisk. Ett större program där spillfåran görs tillgänglig för kartering måste då till.

Efterföljande utredning utgörs av en fältstudie i den aktuella spillfåran av ingenjörsgelog som bör vara väl förtrogen med innehållet i denna rapport samt Energiforsk-rapport 2018:532.

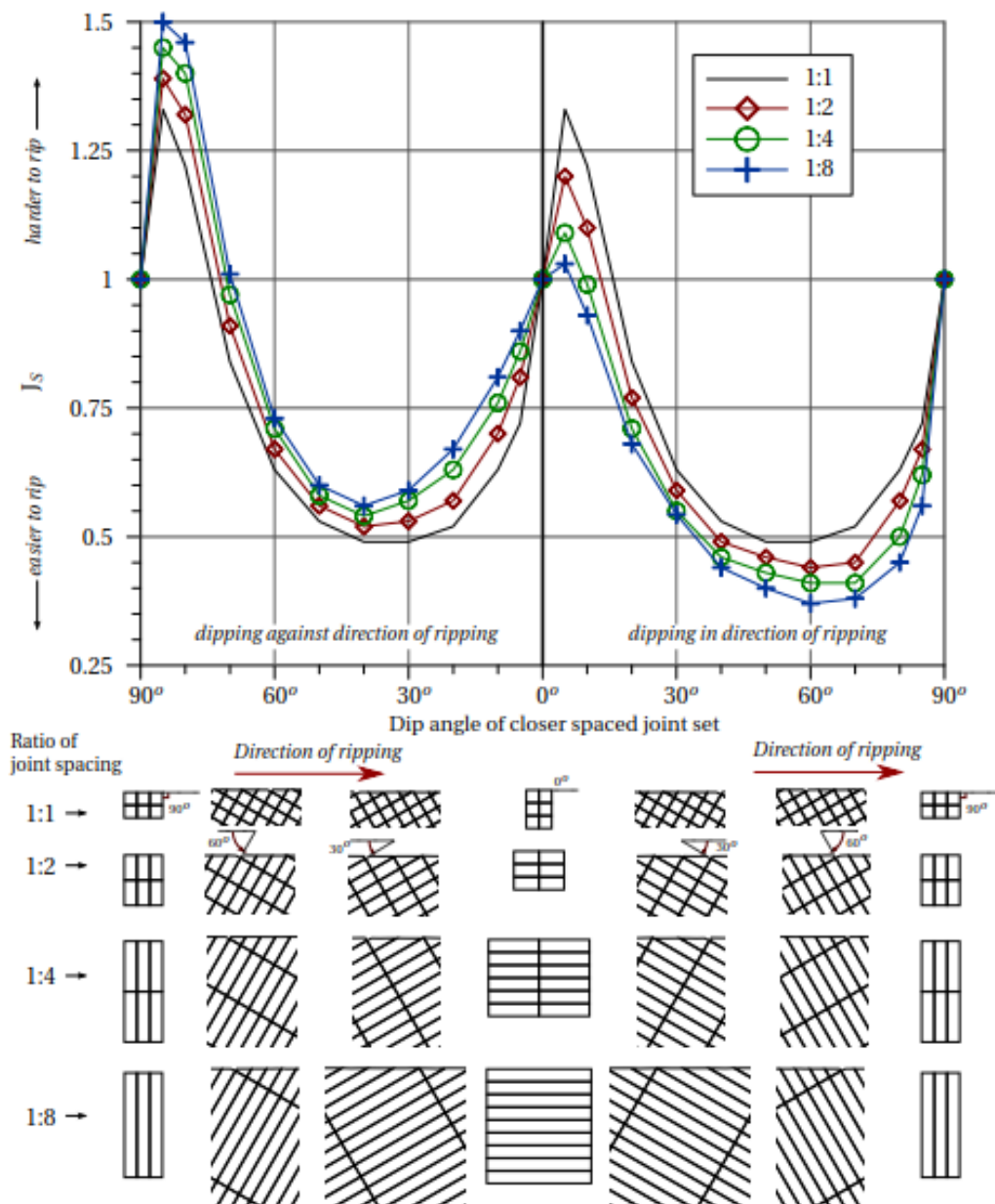
Ingenjörsgelogen skall genom att kartera den aktuella spillfåran i en fältstudie visa eller motbevisa att de i föregående utredningsskede föreslagna geologiska domänerna är korrekt ansatta och slutgiltigt definiera dess egenskaper. Finns möjlighet vid fältstudien så bör gelogen ge akt på bergmassans egenskaper i djupled och avgöra om de geologiska domänerna även kan vara avgränsade i djupled.

Fältsondering för att undersöka egenskaper i djupled bör inte utföras i detta skede såvida det inte genom historiska studier (se kapitel 4.1.3.1) finns fastställt att storskalig erosion skett vid den aktuella anläggningen. Dylka fältundersökningar bör på grund av kostnadsskäl utföras först då det fastställts att ett åtgärdsprogram mot erosion är nödvändigt. I tabell 1 ges en sammanställning av den fältgeologiska karaktäristik som bör ingå i en fältstudie.

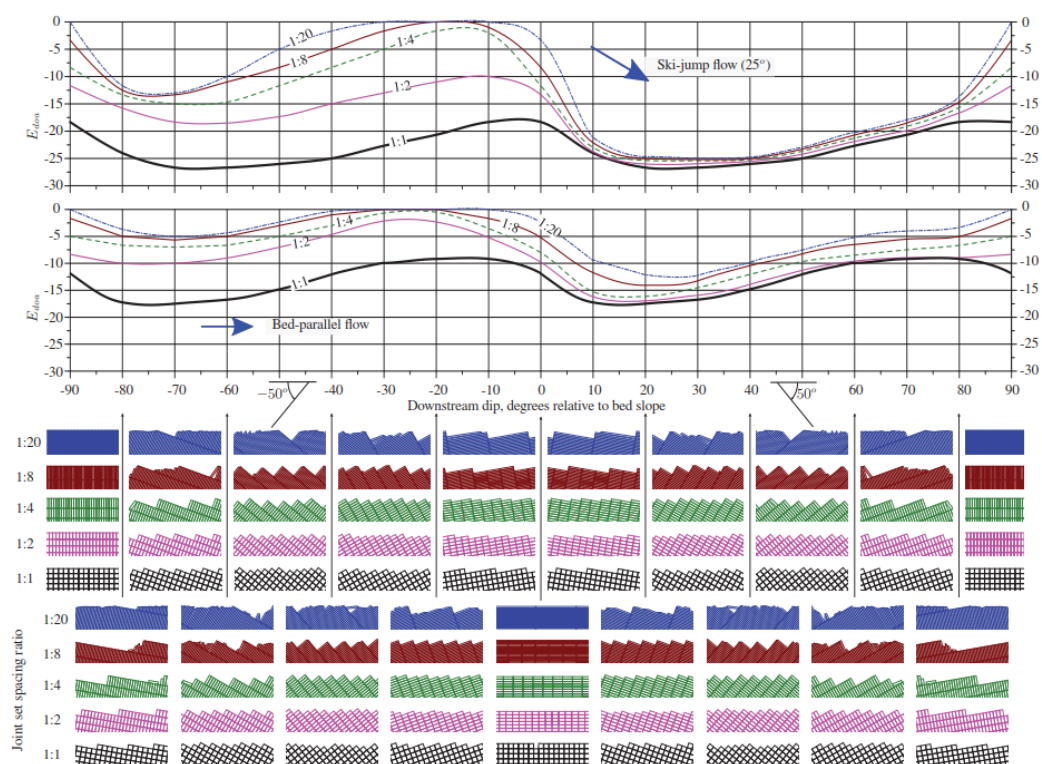
Tabell 1 Fältgeologisk karaktäristik som bör ingå i en fältgeologisk studie.

Geologiska karteringsbegrepp	Allmän kommentar
Bergart	Enligt Bergverkslexicon.
Bergartshållfasthet	Utförs via slagtest med geologhammare. För nationella förhållanden huvudsakligen för att visa att ingående bergarter är höghållfasta magmatiska bergarter. I sprickzoner kan omvandling av ingående bergarter ha förändrat detta förhållande.
Sprickriktningar ^a	Används för att definiera sprick-set inom en geologisk domän. Redovisas fördelaktigast med polpunktsdiagram. Kanals riktning ska anges i polpunktsdiagrammet för varje geologisk domän.
Sprickavstånd ^a	Inom varje sprick-set.
Spricklängd ^a	Inom varje sprick-set. Kan vara svår att definiera. Vad som bör noteras är om de sprick-set man definierar skär varandra så att enskilda block bildas eller om de förekommer mellan varandra så att enskilda block inte utbildas.
Blockighet ^a	Geometrisk beskrivning. Se även kommentarer runt spricklängd. Kubisk, prismatisk, tetraedisk. Längd/bredd-förhållanden.
Sprickytans råhet/rakhet	I mikro- samt makroskala.
Sprickytans egenskaper ^b	Mekaniska egenskaper. Ej påverkad av omvandling, omvandlad, förskiffrad, uppkrossad. Principiellt om sprickytans hållfasthetsegenskaper skiljer sig från bergartens.
Sprickbredd ^b	Vid ej omvandlad sprickyta avstånd mellan sprickytorna. Vid omvandlad/uppkrossad sprickyta avstånd mellan opåverkade begränsningsytor.
Sprickfyllnadsmineral ^b	Beskrivning av mineral(en) samt förekomst. Fläckvis, kontinuerlighet, bredd av mineralet(en). I vattenvägar är det sällan detta påträffas då mjukt sprickfyllnadsmineral spolats bort under holocen tidsålder. Vid breda sprickbredder i naturlig älvfåra kan det därför misstänkas att innandömet bestått av sprickfyllnad.
Sprickstyvhet ^b	Mekaniska egenskaper för en sprickas samlade uppsättning av sprickfyllnadsmineral och eventuella förskiffrade, krossade begränsningslinjer. Denna är viktig att notera då den anger blockens möjlighet att röra sig inom bergmassan.
GSI	Skattning enligt metodik av Marinis et al. (2005). Se även Marinis & Carter (2018). Denna del är viktig då Pells (2016) metodik bygger på GSI. Både ovanstående karaktäristik och skattning av GSI bör ske i fält och inte från efterhandsinformation.

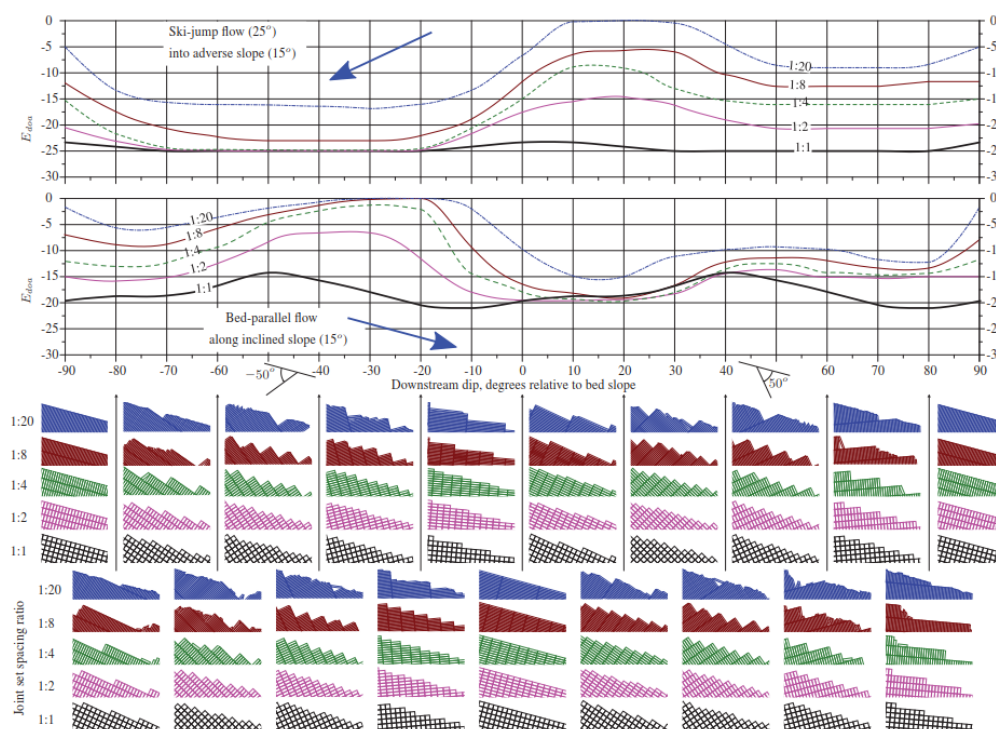
Sammanfogande karaktäristik	Skall utfalla av ovanstående karaktäristik.
^b Frekvens av sprickegenskaper	Viktigt är att notera frekvensen av förekommande typ-sprickbredder med tillhörande typ-sprickyta och typ-sprickfyllnadsmineraluppsättning så att bergmassans egenskaper inte definieras av en enskild notering.
^a Linjekartering i flödeslinje(r)	För att definiera blockigheten hos undergrunden i relation till hydraulisk påverkan, se figur 4.3 nedan. Denna del är mycket viktig att definiera i fält. Beroende på spillfårans geometri kan mer än en flödeslinje vara lämplig att definiera. Förslagsvis läggs lämplig flödes/karteringslinje(r) även in på kartmaterialet för den geologiska fältundersökningen. Flödeslinjerna bör redan vara definierade i den topografiska förundersökningen, se kapitel 4.1.3.1.
<i>eGSI</i>	Enligt Pells (2016). <i>eGSI</i> definieras som ≥ 0 där $eGSI = GSI + E_{doa}$, där E_{doa} utläses ur figur 4.4 och figur 4.5 nedan. Bägge från Pells (2016). För utvärdering av risken för erosion enligt Pells (2016) införes därefter måttet(n) på energiförlust framräknad enligt ovanstående kapitel samt <i>eGSI</i> i diagram enligt nästa kapitel 4.1.3.4.



Figur 4.3 Principfigur från Pells (2016, s. 56, figur 3.13) redovisande en grafisk tolkning av Kirsten (1982) föreslagna värden på undergrundsstrukturtalet J_s (se Kirsten (1982) eller Pells (2016) för detaljer kring J_s), vilken i flödeslinjen enligt Kirsten (1982) påverkar möjligheten till hydraulisk upprivning av undergrunden.



Figur 4.4 E_{doa} för horisontella flöden uttryckt som en funktion av blockighet, förhållande struktur och flödets linje. Figur från Pells (2016, s. 65, figur 3.20).



Figur 4.5 E_{doa} för flöden gentemot lutande undergrund uttryckt som en funktion av blockighet, förhållande struktur och flödets linje. Figur från Pells (2016, s. 66, figur 3.21).

4.1.3.4 Bedömning av erosionspotential

Det finns i princip två olika metodiker att tillgå för att bedöma erosionspotential: analytiska metoder (kinematiska metoder) och jämförande metoder (indexmetoder). Sedan finns en variant av analytiska metoder, nämligen kopplad analytisk-numerisk metodik där numeriska programvaror används för att lösa analytiska problemställningar. Då det ännu inte finns tillräckligt väl utvecklade kinematiska metoder, speciellt inte för svenska geologiska förhållanden, rekommenderas tills vidare att jämförande metoder används.

Jämförande utvärdering (indexmetoder).

Gemensamt för alla indexmetoder avseende erosionspotential är att den erosiva effekten från det strömmande vattnet, representerat som energiförlust per längdenhet i strömningsriktningen, ställs i relation mot bergmassans motståndskraft. Om energiförlusten sker över en kort sträcka är energiöverföringen på bergmassan mer intensiv, d.v.s. en högre belastning. Detta ger en indikation om bergmassans erosionspotential.

Med en indexmetod utvärderas erosionspotentialen genom jämförelse mot fallstudier. Den aktuella spillfårans bergmassa karaktäriseras och ges ett geologiskt index och de hydrauliska förhållandena karaktäriseras genom att den erosiva effekten beräknas. Det är av största vikt att poängtera att varken det geologiska indexet eller den erosiva effekten beskriver själva problemet korrekt, och metodiken kan inte användas som grund för dimensionering av skyddsåtgärder.

Metodiken har dock visat sig vara användbar för att ge indikationer om de generella förhållandena.

Ett geologiskt index innebär ett system för att försöka beskriva de fysiska egenskaperna hos en uppsprucken bergmassa i ett enda tal. Detta tal fås efter summering eller multiplicering av ett värden på utvalda relevanta parametrar, som sprickors riktning i förhållande till strömningsriktningen, antal sprickgrupper, sprickavstånd och sprickornas kondition samt bergmassans tryckhållfasthet.

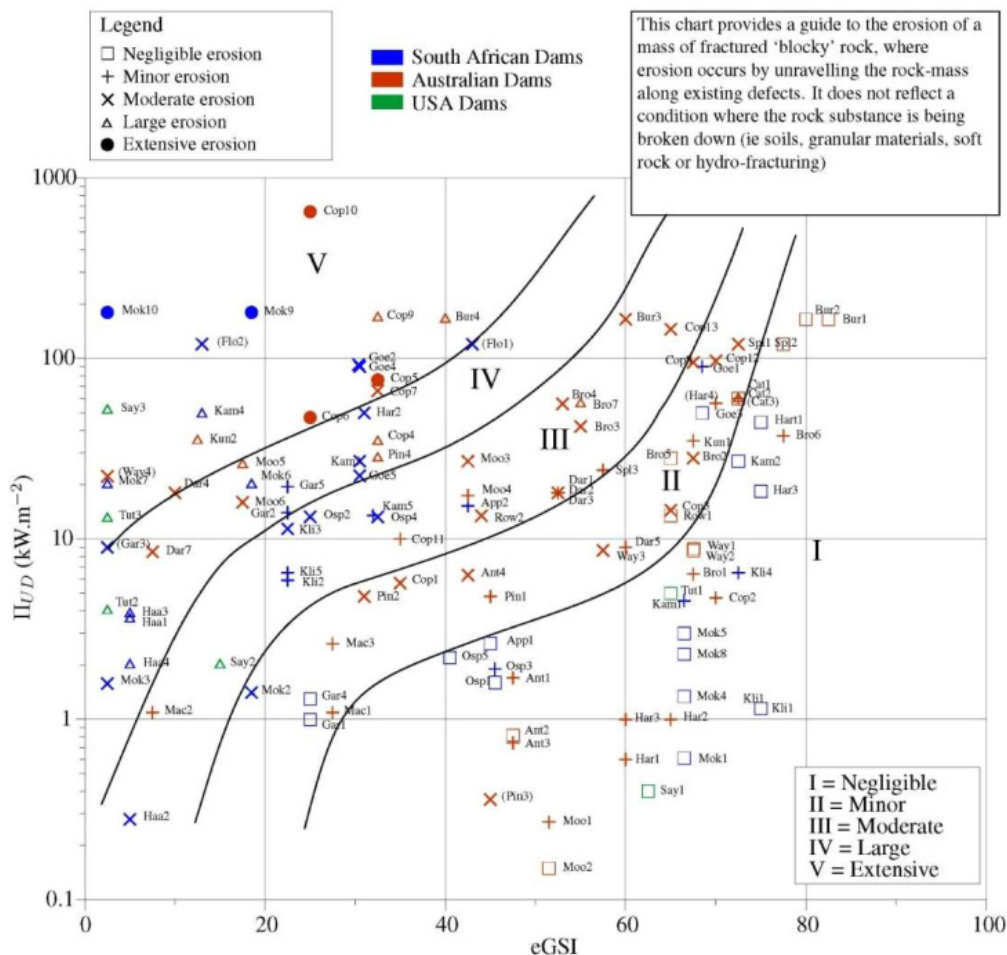
Det finns ett antal olika geologiska index, framtagna för olika syften. I Energiforsk-rapport 2018–532 rekommenderades Pells et al. (2017) och Pells & Douglas (2019) framför andra indexmetoder, eftersom dess geologiska index är bättre anpassat för en uppsprucken bergmassa som den skandinaviska berggrunden. Dessutom är beskrivningen av den hydrauliska lasten i form av erosiv effekt (eng. *stream power*) bättre och mer generell, istället för att hänvisa till ett fåtal olika idealiserade strömningsförhållanden som sällan råder i en spillfåra.

Pells indexmetod

I Pells metod plottas vattnets erosiva effekt på y-axeln och det geologiska indexet på x-axeln, på samma sätt som i andra indexmetoder. Punkten hamnar i någon av de definierade "erosionsriskklasserna" I-V enligt figur 4.6.

Class	Erosion descriptor	Maximum erosion depth (m)	General erosion extent (m ³ per 100 m ²)
I	Negligible	< 0.3	<10
II	Minor	0.3 - 1	10-30
III	Moderate	1 - 2	30-100
IV	Large	2 - 7	100-350
V	Extensive	> 7	>350

Figur 4.6 Erosionsriskklasser från Pells & Douglas (2019). Klasserna representeras som olika områden i Pells indexdiagram, se figur 4.7.



Figur 4.7 Pells indexdiagram "Rock-mass erodibility assessment chart using eGSI" (Pells & Douglas, 2019).

Exempelvis, ur diagrammet: lågt geologiskt index (låg motståndskraft) kombinerat med hög erosiv effekt ger klass V d.v.s. risk för omfattande erosion. Det är dock viktigt att resultatet från den jämförande utvärderingen skall ses som *indikativ* samt att den plottade punkten bör ses som en cirkel med lämplig diameter d.v.s. osäkerheten i punktens placering bör bedömas.

Den erosiva effekten Π_{UD} beräknas enligt ekvation 1, i avsnitt 4.1.3.2. Det geologiska indexet $eGSI$ beräknas enligt Pells (2016) avsnitt 3.3.5.

Fördelar/nackdelar

En fördel med en indexmetod är att den bygger på fallstudier, d.v.s. verkliga fall och att den med relativt enkla medel kan ge en indikation om erosionspotentialen. En nackdel är att en sådan metod kan ge subjektiva bedömningar av både den erosiva effekten från vattnet samt av de geologiska egenskaperna. Det som sedan plottas i diagrammet riskerar därmed att hamna i fel "region" d.v.s. erosionspotentialen kan under- eller överskattas.

Detta innebär att man inte bör fokusera på att plotta punkter i diagrammet utan istället cirklar (områden) av en lämplig radie beroende på bedömd osäkerhet i bedömningarna. Pells metod bedöms dock som mindre känslig för subjektiva bedömningar än andra indexmetoder.

4.1.3.5 Riskvärdering

Inom dammsäkerhet är risk normalt definierad av produkten av sannolikhet och konsekvens, för en viss händelse. Gällande utvärdering av bergerosion i spillfåror är sannolikheten starkt kopplad till återkomsttiden för de flödessituationer som utvärderas (storlek och förhållanden). Konsekvenserna av bergerosion är unika för varje damm. I värsta fall kan konsekvensen i förlängningen vara dammbrott, och i mindre allvarliga fall kan konsekvensen vara kostnader för reparation. Vid bedömning av erosionsrisken bör det även tas hänsyn till osäkerheten i själva bedömningen.

Alla tillgängliga metoder för uppskattning av erosionspotential förlitar sig på tolkning - av observationer, foton, mätningar, beräkningsresultat m.m. Det rekommenderas därför att det hålls en workshop avseende riskvärdering, eftersom en sådan kan ge insiktsfulla vinklingar av vilka erosionsmekanismer som är mest troliga för den aktuella anläggningen samt vilka skyddsåtgärder som är mest lämpliga. En sådan workshop kan med fördel ha ett inslag av en situationsanalys, med ett antal kritiska scenarion. Deltagarna bör väljas med omsorg gällande antal, roller och kompetensområde.

4.1.4 Utredning avseende skyddsåtgärder

Om erosionsrisken bedöms som oacceptabelt hög, behöver skyddsåtgärder utredas, vilket bör utföras parallellt med riskvärderingen. I princip kan åtgärder delas in i två typer: reduktion av den hydrauliska lasten och reduktion av bergmassans erosionsbenägenhet.

Reduktion av den hydrauliska lasten kan innebära att flödet styrs bort från ett erosionskänsligt område som kan hota dammsäkerheten eller modifiering av energiomvandling, eller utjämning av bergytan.

Reduktion av bergmassans erosionsbenägenhet kan innebära att gjuta skyddande betongytor eller andra lagningar av betong (eng. *dental concrete*) eller bergförstärkning (bergbult). Bergförstärkning kan vara ett effektivt sätt att låsa samman block till en större enhet, och därmed större egenvikt. Vid bestämning av avståndet mellan bultarna ("c-c-avståndet") samt bultarnas längd, bör tas hänsyn till blockstorleken.

4.1.5 Utformning och dimensionering av skyddsåtgärder

Vid befarad eller påvisad storskalig erosion av bergmassan i vattenvägen för den aktuella anläggningen samt därtill knutna dammsäkerhetsrisker kan ett flertal byggnadstekniska säkringsåtgärder tillämpas. Beroende på dammsäkerhetsklass, vilken skada eventuell erosion skulle kunna åstadkomma på anläggningen och vilken tillförlitlighet konstruktören lägger på de ingående materialen i

konstruktionen (främst bergmassan), kan lösningsförslag utarbetas runt nedanstående typlösningförslag.

I tabell 2 nedan listas olika åtgärder för att motverka bergerosion i spillfåror, inklusive allmänna råd och rådande dimensioneringsförutsättningar. Om en liknande tabell skulle införas i en framtida tillämpningsvägledning i RIDAS, skulle man även kunna ge vägledning kring vilka åtgärder som är lämpliga beroende på dammsäkerhetsklass. Detta är dock inte helt enkelt eftersom en anläggning som är placerad i en dammsäkerhetsklass C kan ha omfattande problem med bergerosion. Då kan relativt omfattande åtgärder vara lämpligt att rekommendera. Vidare kan en anläggning i dammsäkerhetsklass A ha endast små problem med bergerosion, och att mindre omfattande åtgärder kan vara tillräckliga, om de anses höja dammsäkerhetsnivån tillräckligt mycket.

Tabell 2 Byggnadstekniska typlösningar för att motverka erosion av bergmassa. a) Enligt författarnas kännedom så sent som år 2019.

Typ av åtgärd	Allmänna råd	Dimensioneringsföresattningar ^a
Bergschakt av överytan och borttagande av lösa lager av berg, borttagande av uppstickande topografi. Modellering av bergmassan till kanalförm.	Bör föregås av vattenförlustmätning av bergmassan för att visa att den hydrauliska konduktiviteten är mycket låg i den del av bergmassan som förväntas vara bestående. Bergförankring bör installeras i utsatta bergkonstruktionsdelar så som hörn eller stötväggar. Försiktig sprängning ska tillämpas.	Saknas.
Punktvis bergförstärkning		Enligt observationsmetoden, d.v.s. resultaten från kontinuerliga inspektioner ger underlag för bedömning och beslut om eventuella utredningar och/eller åtgärder.
Areell bergförstärkning	Bör föregås av vattenförlustmätning. Bergmassan bör vara tät. Bergmassan bör bestå av stora väl avgränsade block av hållfasta magmatiska bergarter. Varje block bör fastsättas med minst 2 bergförstärkningar. Hålpipa av 10–15 cm ovan bergförstärkningsände i överytan bör fyllas av bruk för att motverka rostangrepp. Hålpipelängden skall dock vara kort i förhållande till blockdjup. Kärnborring av bergförankringshål får ej tillämpas.	Bör dimensioneras till 80–90% av stagnationstrycket. Stålets draghållfasthet bör reduceras för att ta hänsyn till utmattningslast.
Areell bergförstärkning	Bergmassan kan tillåtas vara hydrauliskt genomsläpplig men bör vara tät. Bergmassan bör bestå av stora väl avgränsade block av hållfasta magmatiska bergarter. Varje block bör fastsättas med minst 2 bergförstärkningar. Hålpipa av 10–15cm ovan bergförstärkningsände i överytan bör fyllas av bruk för att motverka	Upptrycket bör dimensioneras till 80–90% av stagnationstrycket. Stålets draghållfasthet bör reduceras för att ta hänsyn till utmattningslast.

	rostangrepp. Hålpipelängden skall dock vara kort i förhållande till blockdjup. Kärnborring av bergförankringshål får ej tillämpas.	
Avskärande vägg	Utförs för att motverka bakåtskridande erosion. Bör i berg utföras i form av vägg av bergförstärkning och inte i betong eller som stålvägg då man ej önskar att införa en tät barriär nedströms om dammlinjen. Bergmassan bör vara tät men behöver inte bestå av stora block. Förlust av bergmassa nedströms den avskärande väggen får inte påverka dammverkets totalstabilitet.	Skall ej primärt påverkas av hydraulisk last utan enbart ta upp statisk last från block i bergmassa som annars skulle falla ut. Dimensioneringsföretsättningar för djupet hos väggen kan för fallande vatten fås från empiriska modeller för erosionsdjup i bassängform. För plant strömmande vatten behöver troligen modellförsök som tar hänsyn till bergmassans blockstorlek och vattnets angreppsvinkel utföras. I fallet där bergmassa nedströms den avskärande väggen eroderar bort och ersätts av en bassäng kan hydraulisk last komma att påverka den avskärande väggen vilket gör dimensioneringssituationen svårhanterlig.
Betongklädnad av bergmassa	Fogar mellan betongmonoliter bör göras täta exempelvis genom svällande fogband alternativt injekteringsbara fogar samt fallande längs flödeslinjen så inte hydrauliska punktbelastningar gentemot plattkanterna med efterföljande upptryck bildas.	Beräkning av dimensionerande upptryck kan utföras enligt DSO-07-07 (USBR, 2007). Stålets draghållfasthet bör reduceras för utmattningslast. Förankringslängd i berg av bergförankringarna enligt hävdvunna erfarenheter för svensk bergmassa. Dräneringshål som ofta utförs genom betongbeklädnader skall förankras på samma sätt som plattornas kanter.
Skidhopp	Omvandlar utbredd hydraulisk belastning till punktbelastning. Bör utföras med avskärande vägg av bergförstärkning direkt nedströms skidhoppskonstruktionens nedströmsände så denna inte riskerar undermineras. Dammverkets stabilitet får inte påverkas av förlust av bergmassa till följd av inducerad erosion.	Utformning enligt beräkningar eller modellförsök.
Energiomvandlarbassäng	Införandet av en energiomvandlarbassäng i bergmassan får inte påverka dammverkets totalstabilitet. Bergmassan bör vara tät och bestå av stora block av hållfasta magmatiska bergarter. Om inte så	För fallande vatten kan jämnviktsdjup i bassäng fås ur empiriska studier. Högsta dimensionerande tryck kan principiellt fås ur internationella publicerade studier av fallande vatten samt av

4.2 VÄGLEDNING FÖR FRAMTAGANDE AV DIMENSIONERINGSGRUND

Utöver övervakning av erosion nämnt i ovanstående kapitel föreslås att en beräkningsgrund tas fram för att förutsäga tryckbildning i bergmassan vid spillvattentappning över densamma. Denna beräkningsgrund behöver då bergmassan utgöras av naturliga material innehålla två delar, en prognosticeringsdel för tryck beroende på bergmassans och flödets egenskaper samt en undersökningsdel för att i en dimensioneringssituation relatera en okänd bergmassas egenskaper till den prognosticerade modellen.

4.2.1 Beskrivning av tryckbildning från strömmande vatten

Tryckregimer i turbulenta flöden är svåröversägliga till följd av den inre dynamiken som ger kaotiska förändringar av både tryck och lokal flödes hastighet i vattenmassan. Trycken i vattenmassan är variabla över tid samt kan ge högsta värden som överstiger det hydrostatiska uppströmstrycket till följd av överlagring av över- och undertryck under blockytor (se speciellt Liu et al. (1998) för mekaniken bakom detta fenomen).

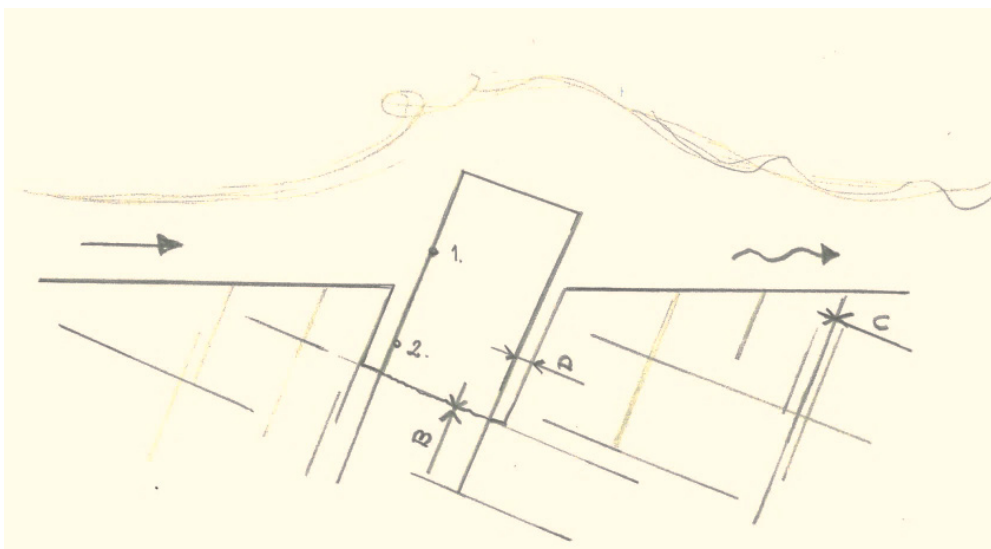
Efter observerade skador och i försök att ta fram dimensioneringsmetodik för hydrauliska byggnadsverk har de tryckregimer som utbildas vid fallande vattenstrålar och vattenstrålar längs kastparabel samt vattensprång rönt intresse och studier har publicerats i internationella vetenskapliga tidskrifter. Fallande vattenstrålar och vattenstrålar längs kastparabel finns undersökta av bland andra Liu et al. (1998), Bollaert (2003a,b), Melo (2006), Castillo & Carillo (2017). Vattensprång har studerats av Bowers & Toso (1988), Toso & Bower (1988), Farhoudi & Narayanan (1991), Fiorotto & Rinaldo (1992a,b), Bellin & Fiorotto (1995), Salandin & Fiorotto (2000), Cerezer et al. (2010) och Güven (2011). Studier av ytparallell strömning finns utförda av Montgomery (1984), Reinius (1986), Coleman (2003), rapport DSO-07-07 (USBR, 2007), Deng et al. (2007) och Pells (2016). Det är för författarna inte känt att överlagring av under- och övertryck är utrett för ytparallell strömning, men sådana effekter torde uppmätas under försökens utförande då försökstoppställningen är stationär och de hydrauliska förhållandena är likartade med ett turbulent flöde i vattenvägen och ett stängt utrymme i spalten mellan blocken. Bland författare som intresserat sig för en energiförlustbetraktelse vid kanalflöde kan nämnas Tokyay & Altan-Sakarya (2011).

I figur 4.8 visas en principfigur för hur ett uppstickande block kommer utsättas av hydrauliskt inducerade tryck. Inom erosionsforskningen har tryckverkan av hävd beskrivits med Bernoulli's ekvation för stationärt flöde. Tryck vid punkt 1 som ligger nära spricköppningen i figur 4.8 beskrivs då som.

$$P = C_p \frac{\rho u^2}{2} + H_p \rho g$$

Där P är tryckverkan [Pa], C_p är dimensionslös koefficient för medeltrycket, ρ är densiteten hos vätskan [kg/m³], u är medelhastigheten för flödet [m/s], H_p är vattenytans höjd över ett referensplan, antagande hydrostatisk profil [m]. g är gravitationskonstanten [m/s²]. Denna matematiska beskrivning av tryckverkan har

fördelen att C_p enkelt kan bestämmas i en laboratorieuppställning. Tryckverkan kommer av naturliga skäl bli irreguljär över tid. Framtagande av medeltryck samt över vilka intervall medeltrycket avviker kan med fördel behandlas med konventionella statistiska metoder. Se exempelvis Pells (2016) för en utförlig instruktion över hur man kan gå till väga.



Figur 4.8 Principbild av block i spillfåra som överströmmas av vattenmassor. I punkt 1 utgörs trycket mot stötytan av en delmängd av det dynamiska trycket samt statiskt tryck. Pascals princip säger att detta tryck kommer kommuniceras ned i spalten mellan blockets stötsida och motsvarande sprickyta. Spaltdimensionerna vid blocket är förstådda. A, B, C: Beteckningar för spaltvidd över tre skilda sprickytor.

Pascals princip säger oss att det tryck som förhärskar vid stötytan nära spricköppningen (1) genom impuls kommer kommuniceras genom den vattenvolym som finns inestängd i spalten mellan två sprickplan (2) i figur 4.8. Är spalten sluten i ändan sker ingen tryckreducering (Cox & Cooker, 2001) men om den är öppen sker en måttlig tryckreducering. Müller (2003) testade spaltöppningar på 0,5; 3; 10; 18,25 × 10 mm och uppmätta stötvågshastigheter mellan 300 – 50 m/s. Resultat från stängda spricköppningar och spaltvidder på 300 µm och 750 µm av Montgomery (1984) fann att trycket vid stötsidan av blocket kommunicerades ned längs hela blockets djup. I rapport DSO-07-07 fann Frizell att trycket avtog, ej ökade med ökande spaltvidd. Minsta spaltvidd som undersöktes av Frizell (2007) var 1/8'' (3175 µm). Coleman (2003) undersökta spaltvidder av 3000 µm. Pells (2016) använde en spaltvidd av 1000 µm i sina försök. Samtliga ovanstående författare fann att lyftkrafter utbildades i förhållande till det tryck som utvecklades vid stötsidan.

Gällande relativt vattendjup så undersökte Montgomery (1984) $24 < y/k < 43$, där y är vattenytans djup över råheten hos ytan k . I rapport DSO-07-07 användes 1 fot vattendjup gentemot steghöjder från 1/8'' till 1/2'', således $24 < y/k < 96$. Coleman (2007) undersökte $0,7 < y/k < 25$ och Pells (2016) undersökte $-0,7 < y/k < 0,3$.

Tabell 3 Sammanfattning av undersökta spaltvidder samt vattenytans förhållande till råheten hos den yta som testats.

Publikation	Spaltvidd [μm]	Vattenytans läge i förhållande till råhetens höjd (y/k) [-]
Montgomery (1984)	300, 750	$24 < y/k < 43$
DSO-07-07	3175	$24 < y/k < 96$
Coleman (2003)	3000	$0,7 < y/k < 25$
Pells (2016)	1000	$-0,7 < y/k < 0,3$

En intressant iakttagelse är att inga dokumenterade försök har utförts på mycket tunna sprickytor liknande de sprickvidder som förekommer i en kompakt bergmassan.

Enligt den geologiska inventeringen i rapport 2018-532 finns breda spricköppningar ($>1000 \mu\text{m}$) representerade bland de nationella kraftbolagens anläggningar, men då i regel endast i bergytor som tydligt karaktäriserades av uppsprickning i bankningsplan. Ställvis bland anläggningarna fanns också i ytan bredare förklyftningar som fanns slutas några decimeter längre ned i bergmassan. Exakta sprickvidder för de mindre sprickvidderna undersöktes inte i studien, men fältstudien bekräftar att bergblocken med undantag av bankningsplanen i regel avskiljs av sprickvidder med en betydligt mindre spaltvidd än $1000 \mu\text{m}$.



Figur 4.9 Fotografi från ett kraftverk i norra Norrland, se Energiforsk-rapport 2018:532. Berggrunden i Ligga karaktäriseras av riklig förekomst av öppna bankningsplan (1/4-2cm). För de branta sprickgrupperna som avdelar bergmassan så gäller i regel att de är tunna. Sprickvidden i de branta grupperna understiger 1mm. Berggrunden i denna spillfåra består av paragnejs.



Figur 4.10 Fotografi från ett kraftverk i norra Norrland, se Energiforsk-rapport 2018:532. Lokalt har block slitits loss längs bankningsplan i Akkats. De branta sprickgrupper som avdelar bergmassan är i regel tunna med en sprickvidd som understiger 1mm. I denna spillfåra består berggrunden av medelkornig granit. Gummistövlar som skala.



Figur 4.11 Fotografi från ett kraftverk i norra Norrland där sprickyterna i bergmassan ställvis var täta och ställvis uppgick till 1-2mm oberoende av stupning, se Energiforsk-rapport 2018:532. Bergarten här utgörs troligen av metamorf gråvacka. Bergmassan är veckad. Närmast utskovet på bild är bergmassan planärförskiffrad i två led.



Figur 4.12 Fotografi från ett kraftverk i norra Norrland där sprickytorna i bergmassan ställvis var täta och ställvis uppgick till 1-2mm oberoende av stupning, se Energiforsk-rapport 2018:532. Här utgörs berggrunden av grönsten med tydligt planärförskiffring. Förskiffringen var ställvis tät för att ställvis uppvisa sprickor på 1-2mm. Notera även den plana uppsprickningen vinkelrätt förskiffringen.

Frågan kring trycköverföring via tunna sprickvidder är intressant då bergmassor i urberggrunden regel består av en hydrauliskt genomsläpplig övre del som en eller ett par meter under bergöverytan övergår till en hydrauliskt ogenomsläpplig del. Skulle trycköverföringen vara spaltviddsberoende och möjligen även avståndsberoende för tunna spalter så kunde maximal tryckverkan beräknas utifrån spaltvidd i aktuell bergmassa och bergförstärkning dimensioneras för att motverka denna. Alternativt klassas som ej eroderbar ingen eller en viss sträcka under överytan.

Den eroderbara överytan kunde antingen bergförstärkas säker, bergschaktas säker eller övergjutas med betong. Beroende på bergmassans struktur, blockstorlek, sprickvidder, specifik vikt hos bergarten och fallhöjd kan sedan lämplig åtgärd föreskrivas och dimensioneras. Det är ett flertal förhållanden som måste undersökas för att få till stånd en dylik dimensionering. I turordning är dessa:

- Som författarna ser det förekommande sprickvidder i urberggrunden samt lämpliga metoder att undersöka desamma.
- Utvärdering av verklig naturlig sprickvidd i bergmassan med praktiskt tillämpbara metoder, lämpligen hydrogeologiska.
- Förhållandet mellan skenbar hydraulisk sprickvidd och naturlig sprickvidd.
- Laboratorieuppställning för att återskapa naturligt förekommande sprickviddsintervall i en måtenhet och därefter mäta trycköverföring i tunna sprickor.
- Laboratorieuppställning i en principiell spillfåra med ett principblock som vattnet kan stöta emot, samt dimensioner och utförande på principblocket som

bör ha inställbar sprickvidd i grövre dimensioner. Utrustning för tryckmätning samt statistiska metoder för att utvärdera mätresultaten.

- Därefter dimensioneringsriktlinjer för hur bergförstärkning skall utformas och när det är lämpligt att bruka denna metod. Även undersökningsprogram för att tillämpa dimensioneringsriktlinjerna för en aktuell bergmassa behöver utformas.

I denna studie undersöks speciellt förekommande sprickvidder, utvärdering av desamma samt förslag till laboratorieuppställningar och utvärderingsmetodik för hydrauliska försök.

4.2.2 Sprickvidder i urberggrunden och dess uppmätning

Den fördelning av sprickvidder som återfinns i urberggrunden kan inte enkelt karteras. För fältmässig kartering klarar en geolog i fält av att kvalitetsmässigt särskilja bredder på sprickor upp till opassade sprickytor enligt tabell 4 med eller utan sprickfyllnad. Rämnor kan även i magmatiska bergmassor påträffas, även om detta är sällsynt.

Tabell 4 Geologisk klassning av sprickvidd för fältskattning av strukturgeologiska egenskaper.

Sprickvidd	Beskrivning	Klassning
<0,1mm	Mycket täta sprickor	Sammanfogade sprickytor
0,1–0,25mm	Täta sprickor	
0,25–0,5mm	Delvis öppna sprickor	
0,5–2,5mm	Öppna sprickor	Opassade sprickytor
2,5–10mm	Breda sprickor	
>10mm	Slag	Slag, Rämnor, Hålrums
1–10cm	Rämna eller sköl	
10–100cm	Bred rämna eller sköl	
>1m	Hålrums, drusrum eller lins	

Ytkartering av bergytorna i studien beskriven i Energiforsk-rapport 2018:532 påvisade en sprickviddsfördelning från mycket täta sprickor till rämnor. För kartering av sprickvidder mot djupet av bergmassan används ofta borrhålskamerafilmning med efterföljande bildbehandling. För syftet att finna sprickvidder i bergmassan är dock automatiserat tolkade sprickfilmer problematiskt att använda. Det förekommer ofta att dessa medtager färgskiftningar till följd av att bergflisor lossnat i skärningen mellan borrhål och sprickyta som sprickvidd samt bergartstexturella effekter närmast sprickytan, inte nödvändigtvis avståndet mellan bägge sprickytorna. Den nedre gränsen för tolkningsmöjligheter i konventionellt använda borrhålskameror tenderar också att vara 1mm, vilket är för grovskaligt för detta syfte.

Se dock Cao et al. (2016) för en intressant metod att beräkna naturlig sprickvidd från högupplösta borrhålsfilmer.

Nyfunna optiska metoder för att definiera tunna sprickvidder finns men är otympliga och beroende av avancerad teknik (se Sharifzadeh et al. 2008; Tatone & Grasselli 2012; Ramandi et al., 2016). För vårt ändamål föreslås istället nyttjandet av vattenförlustmätningar för att bestämma skenbar hydraulisk sprickvidd.

4.2.3 Skenbar hydraulisk sprickvidd

Hydraulisk sprickvidd definieras av hävd som den vidd mellan två parallella plattor som överför motsvarande mängd vatten som den naturliga sprickan gör. Den naturliga sprickans vidd betecknas som naturlig sprickvidd. Hydraulisk sprickvidd och naturlig sprickvidd förhåller sig till varandra beroende på strömningsfall, sprickytans råhet och normalspänning över sprickplanet och de två är inte likställda.

Utan en djuplodande undersökning av detta fenomen och dess begränsningar ges nedan två styrande ekvationer. Den första, Thiem-ekvationen för transmissivitet av laminärt radiellt flödande vatten i en homogen oändlig akvifär. Med denna kan transmissivitet kan undersökas i fält genom vattenförlustmätningar i en eller flera sektioner i ett borrhål som övertvåras bergmassan.

$$T = \frac{Q}{2\pi\Delta H} \ln\left(\frac{r_0}{r_w}\right)$$

Där T är transmissiviteten [m^2/s], Q är flöde [m^3/s], ΔH är vattenövertrycket [m], r_0 är radie hos påverkansområde under försöket [m] och r_w är radie på borrhålet [m].

Skenbar hydraulisk sprickvidd e_h kan efter ett antal antaganden och matematiska omskrivningar bestämmas som.

$$e_h = \sqrt[3]{\frac{12\mu T}{\rho g}}$$

Där e_h är skenbar hydraulisk sprickvidd [m], μ är vattnets viskositet [$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$], ρ är vattnets specifika vikt [kg/m^3] och g är gravitationskonstanten [m/s^2]. Den skenbara hydrauliska sprickvidden blir en sammanslagning av samtliga naturliga sprickors hydrauliska vidd över sektionen som undersöks. För vidare läsning och härledningar av ekvationerna föreslås följande författare. Carlsson & Olsson (1978), Tsang (1992), Zimmerman & Bödvarsson (1997), Quinn et al. (2011) och Dippenaar & Rooy (2016).

Förhållandet mellan naturlig och hydraulisk sprickvidd har undersökts av Barton et al. (1985), Barton & Quadros (1994), Renshaw (1995), Hakami & Larsson (1996), Olsson & Barton (2001), Cao et al. (2016), Liu et al. (2017), Xia et al. (2017), Qian et al. (2018) och Choi et al. (2019). Förhållandet är inte enkelt men kan uttryckas som att den naturliga sprickvidden (Δ_m) för råa sprickor generellt är 2–3 gånger så stor som den hydrauliska (e_h).

Tabell 5 Förhållande mellan naturlig sprickvidd och hydraulisk sprickvidd enligt nedanstående författare.

Källhänvisning	$n = \frac{\Delta_m [m]}{e_h [m]}$	Spricktyp
Barton et al., 1985	2 – 3	Råa sprickor $12 < JRC < 14$
Barton & Quadros, 1994	1 – $1\frac{3}{4}$	Mindre råa sprickor $8 < JRC < 10$
Renshaw, 1995	$\frac{3}{4}$ – 6	Granit, naturliga sprickor
Hakami & Larsson, 1996	2,4	Granit Äspö
Olsson & Barton, 2001	1 – 4	$70 < e_n > 400 \mu m$, $10 < JRC < 20$
Liu et al., 2017	125 – 500	Helt fyllda sprickor
Qian et al., 2018	3 – 5 $1\frac{1}{4}$ – 3	$Re > 10 \times 10^4$ $0 < Re > 10 \times 10^4$
Cao et al., 2019	40	För $\Delta_m \approx 1mm$, beräknade från borrhålsfilmer
Choi et al., 2019	2 – 9	Råa sprickor $12 < JRC < 17$

4.2.4 Förekommande sprickviddsintervall

Förekommande skenbart hydrauliska sprickviddsintervall i den nationella berggrunden har undersökts av Carlsson & Olsson (1978), Abelin et al. (1994), rapport R-09-13 och rapport R-10-39, Hernqvist et al. (2012) och Hjerne & Nordqvist (2014). Undersökningarna företrädesvis gjorda i samband med forskning för slutförvaret av kärnbränsle och alltså djupt under mark i täta bergmassor av mycket god kvalitet. Effekter av en i bergytan störd bergmassa med bankningsplan eller skadezon från sprängningsarbeten ingår inte i dessa studier. Studierna visar att skenbara hydrauliska sprickvidder bör ligga i intervallet $10 < e_h < 600 \mu m$ för en ostörd bergmassa, vilket bör innebära naturliga sprickvidder på $20 < \Delta_m < 2000 \mu m$.

Övergripande studier Carlson & Olsson (1976, 1977) och Banks et al. (2010) visar intressant nog på små skillnader i hydraulisk konduktivitet över Fennoscandium. Enligt Henriksen (2008) påverkar förutom djup under bergöverytan den geoglaciestatiska lyftningen observerad konduktivitet i den kristallina berggrunden. Samtliga ovanstående studier är utförda i intervallet ca. 0 – 100m djup från ytan och visar inte i detalj de hydrauliska egenskaperna i de första 0 – 5m under bergytan. Det kunde för kraftverksindustrin vara intressant att utvärdera den hydrauliska konduktiviteten i de översta metrarna. Dylika vattenförlustmätningar i älvfåror kan eventuellt finnas tillgängliga då det installerats förspända stag i en mängd monoliter tillhörande vattenkraftsanläggningar under de senaste två till tre årtiondena.

Av intresse bör även vara längden på de spricksystem som är hydrauliskt konduktiva. Eller den hydraulisk konduktiva längden hos sprickor givet den konduktiva sprickvidden. En sådan studie ligger utanför detta projekts omfång, se dock Ghanbarian et al. (2019) för en studie över sprickvidd mot spricklängd och sprickvidd mot flöde.

4.2.5 Rekommendationer gällande vetenskapliga insatser

Kunskapsläget för att prognosticera det tryck som uppstår vid plant flöde över en rå bergyta, vanligt förekommande sprickvidder i bergmassa samt metodik för att

uppmäta desamma finns beskrivet ovan. Nedan ges rekommendationer för vilken kedja av vetenskapliga insatser som vi författare har bedömt som lämplig framledes.

Tabell 6 Sammanfattning av fysiska principer som behövs för en förståelse och prognostisering av tryckverkan i bergmassa.

Fysisk princip	Allmän förklaring	Rekommendation
Tryckverkan på bergyta från plant flöde.	Tryckverkan på bergyta är beroende på hur flödet interagerar med topografin. För ett principiellt stötblock så har $0,8 < C_D < 1,0$ uppmätts, medan för en i förhållande till vattenytans läge plan yta så $C_D \approx 0,2$. Har flödet en angreppslinje av 25° gentemot bergytan så har $C_D \approx 0,2$ uppmätts. För fallande vatten med 90° angreppslinje i bassäng har dock $C_D \approx 1,0$ uppmätts. Enligt kapitel 4.2.1 så synes inte förhållandet mellan vattenytans läge och råhetens storlek (y/k , se kapitel 4.2.1) ha någon betydelse för storleken på det tryck som leds in i de testade spaltvidderna. Det är dock för tidigt att fastställa allmänna slutsatser eftersom laboratorieuppställningarna skiljer sig åt mellan de refererade författarna. Sprickornas spaltvidd har betydelse för hur stor del av hela det dynamiska trycket som leds in (se speciellt DSO-07-07). Förhållandet verkar inte vara enkelt. Mycket tunna spaltvidder är inte undersökta.	För en naturlig bergyta kan samtliga fall från fallande vatten till flöde över plan yta tankas inträffa, även vid plan avbördning. Att utreda erosionspotential genom att skatta topografin, flödeslinje och flödehastighet hos en verklig station för att därefter ta fram förhållande tryck ur en serie resultat från laboratorieuppställningar där förekommande typtopografier, varierande vinkel på flödet gentemot topografin, vida intervall av y/k samt lämpliga intervall av spaltvidder blir tekniskt ogörligt då omfånget av nödvändiga laboratorieförsök blir mycket stor. För en ingenjörsmässig metod för att beräkna tryckverkan föreslås istället att konstatera att $C_D \approx 1,0$ och därefter utvärdera om trycket kan överföras i mycket tunna spalter (se nästa fysiska princip). Tryckverkan på typtopografier förordas för tillfället att skrinläggas. Framöver kan det tänkas att en någorlunda plan bergyta kan definieras och flödesförsök utföras på denna. För denna försöksuppställning blir det viktigt att definiera om/för vilka förhållanden som den plana ytan inte agerar som en yta av principiella stötblock. Utloppstunnlar utan kraftiga krökar bör också kunna falla inom kategorin plana ytor.
Tryckverkan längs sprickplan	Frågeställningen är likartad ovanstående med skillnaden att rumslig geometri saknas. När en tryckimpuls eller en serie av tryckimpulser	Detta är en nyckelfrågeställning inom erosionsforskningen och bör vara först i turordningen att undersökas i ett vetenskapligt program. Förslag på hur detta skall utredas ges i nästföljande kapitel 4.2.6.

	Förhåller det sig så att uppmätt storlek från en enskild tryckpuls avtar med minskande spaltvidd samt avstånd från spricköppningen? Finns det en överföringstid för en oändlig serie av impulser för ett givet läge längs sprickplanet, givet en spaltvidd?	Existerar en spaltvidd vi kan replikera och mäta upp, där tryck inte längre kommuniceras innebär det att vissa bergmassor, eller delar av bergmassor är oåtkomliga för hydraulisk inducerad erosion. Existerar en sådan spaltvidd inte så innebär detta att all hydraulisk last överförs via alla bergmassors spricksystem och motverkas av främst mekanisk friktion, därefter egenvikt hos blocken.
Sprickvidder i urberggrunden	Kan variera allt från 20 μm och uppåt.	Behöver inte utredas.
Uppmätning av sprickvidder i urberggrunden	Uppmätning av sprickvidder i en bergmassa med ett okänt antal sprickor med skilda sprickvidder.	Bör ske med konventionella hydrauliska metoder. En ingenjörsmässig metodik bör tas fram för hur man skall gå till väga för att definiera medelsprickvidden i en aktuell undersökningssituation. Själva metodiken är relativt enkel att ta fram. En frågeställning som kan gömma eventuella ytterligare vetenskapliga undersökningar är om de tryck vattenförlustmätningen utförs med skall begränsas till fallhöjd eller om konventionella tryck för vattenförlustmätning skall användas. Framtagande av metodiken bör skrinnläggas till dess av frågan kring tryckutbredning i sprickplan är löst. Saknas en spaltvidd där tryckutbredning inte längre sker måste det diskuteras om bergmassan i sig kan användas som ett konstruktionsmaterial.

4.2.6 Förslag till hydraulisk laboratorieundersökning av tunna spalter

Som beskrivet ovan är rekommendationen att i första hand gå vidare med att i detalj undersöka tryckutbredning i tunna spalter snarare än att ta fram dynamiska tryckkoefficienter för en bred variation av geometrier.

Antagandet är att impulsöverföring av tryck via tunna spaltvidder är spaltviddsberoende och spaltlängdsberoende där en dämpning av överfört tryck sker med minskande spaltvidd. De tryck som skulle överföras från bergytan ned i en bergmassa som översköljdes av framstörtande vattenmassor blir då en delmängd av medeltrycket vid spricköppningen som i sin tur är en delmängd av stagnationstrycket beroende på geometrierna hos undergrund och flöde.

För att visa om detta antagande är giltigt samt definiera hur en eventuell dämpning förhåller sig till spaltvidd- och spaltlängd så kan två typer av laboratorieuppställningar tänkas. Principen är för bägge modifierad från Müller et al. (2003) och består av en enkel tryckkammare som ansätts gentemot en spalt där tryckgivare monterats utefter spaltens längd, se figur 4.13 nedan.

En möjlig försöksuppställning kan utgöras av en plan spalt vars spaltvidd kan förändras, förslagsvis genom tillverkandet av ett antal överdelar av spalten med ett fräst spår där varje spår utgör spaltvidden under respektive försök. Tryckgivarna får monteras i underdelen som förblir fixerad under försökens gång. Då det rör sig om små spaltvidder måste konstruktionsdelarna göras så pass styva att trycket som induceras inte påverkar spaltvidden nämnvärt, förslagsvis genom att spaltdelarna tillverkas av stål och tvingas fast med korta avstånd mellan tvingarna under försöket.

Tillverkningstekniskt måste krav ställas (och hållas) på måttavvikelse hos bägge spalttytor, samt att spåret i den övre spaltdelen behöver kunna fräsas i djup om minst $\frac{1}{4}$ mm, hellre om $\frac{1}{8}$ mm.

Som nämnt i kapitel 4.2.5 så är det inte bara intressant om en dämpning eller utsläckning sker av en enskild puls utan även om det existerar en gångtid för en oändlig serie av pulser så att samma medeltryck som existerar i tryckkammaren över tid t når ett läge l efter spaltlängden. Tryckkammaren behöver därför kunna generera en konstant serie av kaotiska tryck. Möjligtvis kan detta enkelt lösas genom att låta en vattenstråle falla ned i densamma.

En viktig invändning gentemot att använda plana spalter som beskrivet ovan är att naturens sprickytor aldrig har sådana former. Det vore därför fördelaktigt för försökens riktighet att använda naturliga sprickytor. Exempelvis har det under laboratieförsök med injekteringsbruk har det observerats att för planparallella ytor så bildas en tunn vattenfilm mellan ytan och bruksvolymen, emedan det vid försök med naturliknande sprickytor inte uppstår sådana effekter.

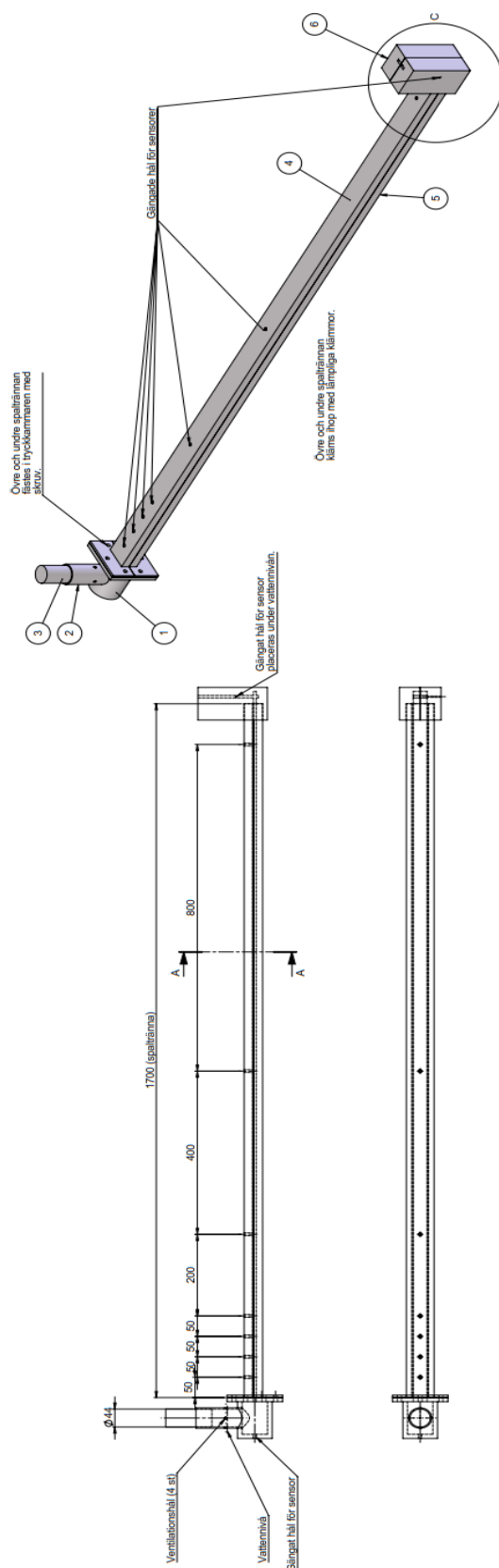
Tillverkningstekniskt blir en försöksuppställning med naturliga sprickytor än mer komplicerad än med plana. Används en naturlig sprickyta med tillhörande bergvolym eller ett spräckt block så måste en upphängningsanordning tillverkas som kan justeras i mått om minst $\frac{1}{4}$ mm och samtidigt bära stuffen. Alternativt kan replikerade sprickytor användas i lättare material vilket skulle förenkla antalet

krav hos försöksuppställningen. Dimensionerna i längdled för både stuffer och replikat är än så länge av tillverkningstekniska skäl begränsad till ett fåtal decimeter, vilket beroende på utfallet hos försöken kan vara begränsande. Framtida laboranter rekommenderas att undersöka möjligheterna med att använda naturliga eller naturliknande sprickytor i så stor mån som möjligt.

För förslaget för laboratorieuppställning för undersökning av plana spalter föreslås nedanstående en serie tester med följande spaltvidder, se tabell 7. Mätpunkternas läge gentemot spricköppning är också intressant där vi önskar få en detaljerad uppföljning av tryckutbredningen närmast spricköppningen. Föreslagna sensorlägen visas i figur 4.13 nedan. För en laboratorieuppställning med naturliga sprickytor är det fördelaktigt om spaltvidden kunde regleras från anliggande, i steg upp till 6 mm.

Tabell 7 Förslag till försöksuppställning för trycköverföring i tunna plana spalter. Förslag på dimensioner hos spalten samt sensorlägen från tryckkammaren och längs spaltrännen.

Spaltbredd (mm)	Spaltvidd (μm)	Sensor	Sensorläge (mm)
30	6000	2	50
30	3000	3	100
30	2000	4	150
30	1000	5	200
30	500	6	400
30	250	7	800
30	125	8	1600
30	60		
30	30		



Figur 4.13: Konceptuell modell över konstruktionen hos försöksupställning för att utreda trycköverföring i tunna plana spalter. Numrering i figur. (1) Tryckkammare. (2) Ledrör för kolv. (3) Kolv som släpps ned på en vattenyta för att inducera ett tryck i den vattenfyllda kammaren. (4) Övre del av spaltränna med hål för trycksensorer. (5) Undre del av spaltränna vilken tillverkas i 7 exemplar med spaltvidd enligt tabell 7. (6) U-del för att undersöka trycköverföring runt hörn samt att undersöka eventuella skillnader vid stängt samt öppet spaltslut.

5 Slutsatser och rekommendationer

Detta projekt har behandlat området ”bergerosion i spillfåror”, en fortsättning på projekt VK12113, presenterat i Energiforsk-rapport 2018:532. Syftet med projektet har varit:

- sammanfatta internationell praxis och vägledning
- sammanfatta egenskaper hos typiska svenska spillfåror, speciellt avseende sprickvidd
- föreslå en arbetsgång, som eventuellt kan arbetas in i en framtida tillämpningsvägledning i RIDAS
- presentera förslag till hur kunskapsluckor ska fyllas, inom det aktuella området, främst kring tryckpulsationer i mycket tunna sprickor

Kontakter har etablerats med internationella aktörer: dammägare, forskare och konsulter i Kanada, Norge och Australien och ett antal frågor har ställts till dessa avseende nationell praxis och vägledning/riktlinjer. Detta har sedan sammanfattats i denna rapport. I Kanada och Norge råder i princip samma kunskapsläge som i Sverige, och aktuell praxis är också likvärdig. Gällande vägledning/riktlinjer är läget också likvärdigt mellan dessa tre länder, vilket i praktiken innebär en stor avsaknad av sådana.

Den australiensiske konsulten Steven Pells, som har doktorerat inom bergerosion i spillfåror, har tagit fram en vägledning till arbete med bergerosion i spillfåror bör bedrivas. Denna verkar lovande, varför den delvis har implementerats i det förslag till vägledning för svenska förhållanden som presenteras i denna rapport.

De identifierade kunskapsluckorna behöver fyllas för att bättre kunna förutsäga bergerosion och för att skapa en mer välgrundad dimensioneringsgrund för skyddsåtgärder. De identifierade kunskapsluckorna rör främst hur tryckpulsationer propagerar i mycket tunna bergsprickor – om det är så att tryckvågor dämpas p.g.a. att sprickorna är just mycket tunna samt i kombination med sprickråheten. I denna rapport har det presenterats förslag på försöksuppställningar där detta skulle kunna utredas. Sådana bör utföras i ett hydrauliskt laboratorium med gedigen kunskap och erfarenhet av modellförsök inom vattenbyggnadshydraulik.

De föreslagna modellförsöken föreslås vara nästa steg i forskningsarbetet kring bergerosion i spillfåror för svenska förhållanden, tillsammans med aktivt deltagande i lämpliga internationella sammanhang för att hämta hem viktig kunskap.

Lämpliga arenor för kunskapsutbyte har i denna studie identifierats till att förutom handla om deltagande på de traditionella konferenserna (*ICOLD*, *DSIG*, *Hydrovisoin*, *IAHR* m.fl.). Att även söka deltagande på sådana arenor som den nyligen etablerade arbetsgruppen *International Working Group on Overflowing and Overtopping Erosion (IWGOOE)*, med en undergrupp *Overflowing erosion of bedrock downstream of concrete dams and overflowing erosion of spillways*, där flera nyckelpersoner inom det aktuella området deltar.

Det pågår även internationell forskning inom det aktuella området, där ett svenskt deltagande skulle kunna medföra ett viktigt utbyte av kunskap. Kanadensiska Hydro Quebec, liksom statliga franska EDF planerar att lägga stora resurser på bergerosionsproblematiken i separata forskningsprogram.

6 Referenslista

- Abelin H., Birgersson L., Widén H., Ågren T., Moreno L., Neretnieks I. (1994) Channeling experiments in crystalline fractured rocks. *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 15, pp. 129-158.
- Banks D., Gundersen P., Gustafson G., Mäkelä J., Morland G. (2010) Regional similarities in the distributions of well yield from crystalline rocks in Fennoscandia. *Norges geologiske undersøkelse Bulletin*, Nr. 450, ss. 33–47.
- Barton N., Bandis S., Bakhtar K. (1985) Strength, deformation and conductivity coupling of rock Joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, Vol. 22, No. 3 pp. 121-140.
- Barton N., Quadros E. (1997) Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock masses. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 34:3-4, paper Nr. 252.
- Bellin A., Fiorotto V. (1995) Direct dynamic force measurement on slabs in spillway stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 10, Paper No. 222, pp. 686-693.
- Bollaert E., Schleiss A. (2003) Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41, No. 5, pp. 451-464.
- Bollaert E., Schleiss A. (2003) 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*, Vol. 41, No. 5, pp. 465-480.
- Bowers C., Toso J. (1988) Karnafuli project, model studies of spillway damage. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 114, No. 5, pp. 469-483.
- Cai M., Kaiser P., Uno H., Tasaka Y., Minami M. (2004) *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 41, pp. 3–19.
- Cao Y., Feng X., Yan E., Chen G., Lü F., Ji H., Song K. (2016) Calculation Method and Distribution Characteristics of Fracture Hydraulic Aperture from Field Experiments in Fractured Granite Area. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, Vol 49, pp. 1629-1647.
- Carlsson A., Olsson T. (1976) Bestämning av berggrundens permeabilitet genom vattenförlustmätning. *Sætrykk fra Vannet i Norden* nr 3–76, ss. 29–35.
- Carlsson A., Olsson T. (1977) Hydraulic properties of Swedish crystalline rocks. *Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala*. N. S., Vol. 7, ss. 71-84.
- Carlsson A., Olsson T. (1978) Joint apertures in a pre-cambrian crystalline rock mass in Sweden. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 18, pp. 127-130.

- Castillo L., Carrillo J. (2017) Comparison of methods to estimate the scour downstream of a ski jump. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 92, pp. 171-180.
- Cerezer S., Müller D., Clarke R., Marques M. (2010) Pressure extrema in energy-dissipating structure using block maxima: case study, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48, No. 4, pp. 483-490.
- Choi S., Jeon B., Lee S., Jeon S. (2019) Experimental Study on Hydromechanical Behavior of an Artificial Rock Joint with Controlled Roughness. *Sustainability*, Vol. 11, paper 1014.
- 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.
- Cox S., Cooker M. (2001) The pressure impulse in a fluid saturated crack in a sea wall. *Coastal Engineering*, Vol. 42, pp. 241-256.
- Deng Z., Guensch G., Richmond M., Weiland M., Carlson T. (2007) Prototype measurements of pressure fluctuations in The Dalles Dam stilling basin. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, No. 5, pp. 674-678.
- Dippenaar M., Rooy L. (2016) On the cubic law and variably saturated flow through discrete open rough-walled discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 89, pp. 200-211.
- Energiforsk (2018) *Bergerosion i spillfåror*, rapport 2018:532
- Energiföretagen Sverige (2019) *RIDAS 2019 Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet*
- Farhoudi J., Narayanan R. (1991) Force on Slab Beneath Hydraulic Jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 1, pp. 64-82.
- Fiorotto V. & Rinaldo A. (1992a) Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 30, No. 4, pp. 499-520.
- Fiorotto V. & Rinaldo A. (1992b) Fluctuating uplift and lining design in spillway stilling basins, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 118, No. 4, pp. 578-596.
- Ghanbarian B., Perfect E., Liu H. (2019) A geometrical aperture-width relationship for rock fractures. Manuscript, 29 pp.
- Güven A. (2011) A predictive model for pressure fluctuations on sloping channels using support vector machine. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 66, pp. 1371-1382.
- Hakami E., Larsson E. (1996) Aperture Measurements and Flow Experiments on a Single Natural Fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Abstracts*, Vol. 33, No. 4, pp. 395-404.
- Henriksen H. (2008) Late Quaternary regional geodynamics and hydraulic properties of the crystalline rocks of Fennoscandia. *Journal of Geodynamics*, Vol. 45, pp. 49-62.

- Hernqvist L., Christian B., Fransson Å., Gustafson G., Funebag J. (2012) A hard rock tunnel case study: Characterization of the water-bearing fracture system for tunnel grouting. *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 30, pp. 132-144.
- Hjerne C., Nordqvist R. (2014) Relation between mass balance aperture and hydraulic properties from field experiments in fractured rock in Sweden. *Hydrogeology Journal*, Vol. 22, pp. 1285-1292.
- Hoek E., Brown E. (2018) The Hoek-Brown failure criterion and GSI - 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Lia L., Skoglund M. (2018) Rock erosion in spillways – Norwegian perspective
- Liu P., Dong J., 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*, Vol. 36, No. 1, pp. 55-68.
- Liu R., Jing H., He L., Zhu T. Yu L., Su H. (2017) An experimental study of the effect of fillings on hydraulic properties of single fractures. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 76, paper 684.
- Løvoll A. (2019) Flomløp i fjell - Norsk praksis ved fare for fjellerosion
- Melo J., Pinheiro A., Ramos C. (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. (1984) Investigations into rock erosion by high velocity water flows, M.Sc. thesis, University of Washington, 107 pp.
- Müller G., Wolters G., Cooker M. (2003) Characteristics of pressure pulses propagating through water-filled cracks. *Coastal Engineering*, Vol. 49, pp. 83–98.
- NVE (2010) Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (damsikkerhetsforskriften)
- NVE (2005) Retningslinjer for flomløp til §§ 4-6 og 4-13 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg
- Olsson R., Barton N. (2001) An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 38, pp. 317–329.
- Pells S. (2016) Erosion of rock in spillways, PhD Thesis, Civil & Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of New South Wales, Australia, 1982 pp.
- Pells S., Douglas K., Pells P., Fell R., Peirson W. (2017) Rock mass erodibility. *Journal of hydraulic Engineering*, Vol. 143, Nr. 5.
- Pells S., Douglas K. (2019) Guidelines for assessment of scour in unlined spillways

- Qian X., Xia C., Gui Y. (2018) Quantitative Estimates of Non-Darcy Groundwater Flow Properties and Normalized Hydraulic Aperture through Discrete Open Rough-Walled Joints. *International Journal of Geomechanics*, Vol. 18, No. 9.
- Quinn P., Parker B., Cherry J. (2011) Using constant head step tests to determine hydraulic apertures in fractured rock. *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 126, pp. 85–99.
- Rapport 2018:532 (2018) Bergerosion i spillfärör. Energiforsk AB, 129 ss.
- Rapport DSO-07-07 (2007) Uplift and Crack Flow Resulting from High Velocity Discharges Over Open Offset Joints. U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation.
- Rapport R-01-19 (2001) Definition och beskrivning av parametrar för geologisk, geofysisk och bergmekanisk kartering av berg. SKB, 49 ss.
- Rapport R-09-13 (2009) Literature survey: Relations between stress change, deformation and transmissivity for fractures and deformation zones based on in situ investigations. SKB, 32 ss.
- Reinius E. (1986) Rock erosion. *Water Power & Dam Construction*, June 1986, 6 pp.
- Renshaw C. (1995) On the relationship between mechanical and hydraulic apertures in rough-walled fractures. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No. B12, pp. 24,629-24,636.
- Fiorotto V., Salandin P. (2000) Design of anchored slabs in spillway stilling basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No. 7, pp. 502-512.
- Sharifzadeh M., Mitani Y., Esaki T. (2008) Rock Joint Surfaces Measurement and Analysis of Aperture Distribution under Different Normal and Shear Loading Using GIS. *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- Svensk Energi (2012), RIDAS 2012 Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet
- Tatone B., Grasselli G. (2012) Quantitative Measurements of Fracture Aperture and Directional Roughness from Rock Cores. *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 45, pp. 619-629.
- Tokay N., Altan-Sakarya A. (2011) Local energy losses at positive and negative steps in subcritical open channel flows. *Water SA*, Vol 37, No. 2, 8 pp.
- Toso J., Bowers C. (1988) Extreme pressures in hydraulic jump stilling basins. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 114, No. 8, pp. 829-843.
- Tsang Y. (1992) Usage of "Equivalent Apertures" for Rock Fractures as Derived from Hydraulic and Tracer Tests. *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 5, pp. 1451-1455.
- US Army Corps of Engineers (2010) HEC-RAS River Analysis System User's manual version 4.1
- USBR (2007), Uplift and Crack Flow Resulting from High Velocity Discharges Over Open Offset Joints (report DSO-07-07)

- Xia C., Qian X., Lin P., Xiao W., Gui Y. (2017) Experimental Investigation of Nonlinear Flow Characteristics of Real Rock Joints under Different Contact Conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 143, No. 3.
- Zimmermann R., Böðvarsson G. (1996) Hydraulic conductivity of rock fractures. *Transport in Porous Media*, Vol. 23, pp. 1–30.

BERGEROSION I SPILLFÅROR – ETAPP 2

Vilka sprickvidder finns naturligt i Sverige? Det avgör hur stora tryck som kan komma in i sprickorna och eventuellt lyfta blocken. Vilka resultat finns kring injektering av hårda bergmassor? Vilka försök att utvärdera dynamiskt tryck har gjorts internationellt?

Här sammanfattas internationell praxis och byggnadstekniska riktlinjer för bergerosion och en teknisk beskrivning av typiska svenska spillfåror. Dammägare, forskare och konsulter i Kanada, Norge och Australien har intervjuats för att få fram gällande praxis och byggnadstekniska vägledningar eller riktlinjer.

Forskningsprojektet har också identifierat kunskapsluckor som framför allt handlar om hur tryckpulsationer propagerar i mycket tunna bergsprickor och presenterar också förslag på forskning kring detta.

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