

# INSPEKTION AV VATTENFYLLDA BERGTUNNAR

RAPPORT 2020:660



VATTENKRAFTENS BERGFRÅGOR





# Inspektion av vattenfyllda bergtunnlar

MARTIN HANSSON



## Förord

**Vattenkraftens berganläggningar har konstruerats genom att borra, spränga, och forsla bort utsprängt berg. Metoden ger oförstärkta bergutrymmen och många utrymmen saknar därför permanentförstärkningar. Kraftstationsnära inre vattenvägar kan ofta ställas av och därmed inspekteras, men detta kan vara mycket komplicerat att göra för till exempel utlopps- och överledningstunnlar. Det finns därför vattenfyllda inre vattenvägar som inte har inspekterats sedan de togs i drift.**

Det finns moderna verktyg som kan användas för att med olika typer av undervattensfarkoster skaffa sig en uppfattning av tillståndet hos konstruktioner under vatten. Svensk och norsk vattenkraftindustri har under senare år genomfört tester av sådan här ny teknik. Samtidigt så går utvecklingen mycket fort framåt, vilket ger nya möjligheter till stöd för den tekniska förvaltningen av inre vattenvägar i berg. I denna rapport visas på exempel på genomförda undervattensbaserade inspektioner av inre vattenvägar i berg och särskilt intressanta kritiska konstruktionsdelar och skadesituationer.

Projektet har utförts av Martin Hansson, senior konsult på AFRY. Arbetet ingår i Energiforsks FoU-program Vattenkraftens bergfrågor, med intressenterna Vattenfall, Uniper/Sydkraft Hydropower, Fortum, Statkraft, Skellefteå Kraft, Jämtkraft, Mälarenergi, Umeå Energi och Karlstads Energi.

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

## Sammanfattning

**Många av vattenkraftens bergtunnlar har aldrig vattentömts och har därmed varit mycket svåra att inspektera på ett säkert sätt. Tekniken med undervattensfarkoster som fjärrstyrs, så kallad ROV, möjliggör snabba och säkra inspektioner av bergtunnlar. Dessa farkoster har utvecklats snabbt under det senaste årtiondet och nu finns det flera entreprenörer som utför inspektioner av långa bergtunnlar.**

I november 2019 höll Energiforsk en workshop i Sundsvall med temat "Inspektion av vattenfyllda bergtunnlar" med bland annat erfarenheter från inspektioner utförda med ROV, Remotely Operated Vehicle. Denna rapport består av en kortare litteraturstudie, en kort summering av presentationerna från workshopen samt en analys med några förslag på fortsatta utvecklingsaktiviteter. Dokumentation från workshopen finns att ladda ned på Energiforsks hemsida.

Till de åldrande vattenkraftsanläggningarna hör många vattenfyllda bergtunnlar. Tunnlarna har byggts under lång tid och teknikerna för att driva och förstärka tunnlar har därför varierat vartefter befintliga tekniker förfinats och nya tillkommit. Bergtunnlarna i vattenvägen är i princip alltid vattenfyllda och de är därför svåra att inspektera. Kännedomen om statusen på tunnlar är därmed begränsad. Det finns en mängd olika anledningar till att utföra en inspektion, där den vanligaste troligen är att säkerställa produktionssäkerheten på anläggningen.

En ROV är en kabelstyrd undervattensfarkost där föraren kallas pilot och sitter tryggt på en annan plats. Farkosten kan, jämfört med en dykare, inspektera områden som är farliga att vistas i som t.ex. vattenfyllda tunnlar och den kan ha en mycket lång drifttid för att utföra inspektionen. Förutom videoupptagning så är olika mätinstrument baserade på sonar – sound navigation and ranging, vanliga på farkosterna. Med 3D-sonarer kan en hel tunnel avbildas med ett punktmoln med stor precision (centimeter) medan noggrannheten i planet kan bli mycket dålig bland annat för att det inte finns tillgång till GPS i en tunnel.

Med dagens farkoster kan många tunnlar inspekteras med t.ex. video och 3D-sonar med enbart en dags driftstillestånd på vattenkraftsanläggningen. Från inspektionen kan tunnelns geometri bestämmas samt t.ex. om det har skett några betydande ras. En viss risk finns för att en ROV fastnar med kabeln speciellt om det är förstärkningsbult som sticker ut. Det är dock mycket sällan som farkosten inte går att rädda.

För att kunna utföra en lyckad tunnelinspektion behövs ett viktigt förarbete med att ta fram underlag och förberedelser. Därför har en punktlista skapats för att få med några av de viktigaste punkterna vid upphandling av entreprenör.

Det rekommenderas att ägarna gör en prioritering av behovet av inspektion då antalet tunnlar är många. Om visuell inspektion ihop med t.ex. 3D-skanning inte är tillräckligt för att bedöma status så föreslås en aktivitet för att ta reda på vilka provmetoder som behövs för att få ett bra analysunderlag.

## Summary

**Many unlined rock-blasted hydro tunnels have never been drained nor inspected due to safety aspects. The technology with Remotely Operated Vehicle, ROV, enables quick and safe inspections of rock tunnels. These vehicles have developed rapidly over the last decades and now there are several contractors carrying out inspections of long rock tunnels.**

In November 2019, Energiforsk held a workshop in Sundsvall with the topic "Inspection of water filled tunnels". This report consists of a brief literature study, a short summary of the presentations from the workshop and an analysis with some suggestions on further R&D activities.

Unlined hydro tunnels are very common in Swedish hydro power plants. The tunnels are built during a long period of time as the rock-blasting technology has developed and has been refined. The rock tunnels in the waterway are, in principle, always water-filled and are therefore difficult to inspect. The knowledge of the status of the tunnels is therefore limited. There are a variety of reasons for performing an inspection where the most common is ensuring the production safety of the plant.

An ROV is a cable-controlled underwater vehicle where the driver is called a pilot and sits securely in a remote location. The vehicle can, compared to a diver, inspect dangerous areas such as water-filled rock tunnels and it can have a very long operating time to carry out the inspection. In addition to video recording, various measuring instruments based on sonar - sound navigation and ranging, are common on the vessels. With 3D sonars, an entire tunnel can be scanned which gives a point cloud with high precision (centimetres) while the accuracy of the points in the plane can be very poor because GPS is not available in these tunnels.

With today's vessels, many tunnels can be inspected with, for example, video and 3D sonar with only one day's down time of the hydropower plant. The geometry of the tunnel can be obtained from the inspection and, for example, if there have been any rockfalls of significance. There is a certain risk that an ROV gets stuck with the cable especially if reinforcing bolts protrude. However, it is very rare that the vehicle cannot be rescued.

In order to be able to carry out a successful tunnel inspection, preparations are needed. Therefore, a check list has been created to include some of the most important points when contracting a contractor.

It is recommended that the owners prioritize the need for inspection as the number of tunnels is large. If visual inspection in conjunction with, for example, 3D scanning is not sufficient to assess the status, an activity is suggested to find out which test methods are needed to obtain a good basis for analysis.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>7</b>
1.1	Bakgrund	7
1.2	Omfattning och mål	8
1.3	Avgränsningar	8
<b>2</b>	<b>Bergtunnlar inom vattenkraften</b>	<b>9</b>
2.1	Bergtunnlar i Sverige och Norge	9
2.2	Skador i bergtunnlar i Norge och Sverige	10
2.2.1	Tunnelras i vattenfyllda bergtunnlar	10
<b>3</b>	<b>Inspektion av bergtunnlar</b>	<b>14</b>
3.1	Inspektion av dränerade bergtunnlar	14
3.2	Inspektion av delvis vattenfyllda bergtunnlar	15
3.3	Inspektioner av vattenfyllda bergtunnlar	17
3.3.1	Svårigheter att inspektera vattenfyllda tunnlar	17
3.3.2	Historiska undervattensfarkoster	17
3.3.3	Remote Operated Vehicle, ROV	18
3.3.4	ROV-verktyg	20
3.3.5	Autonoma farkoster	21
<b>4</b>	<b>Workshop i Sundsvall, 2019</b>	<b>22</b>
4.1	Sammanfattning av workshopen	22
4.1.1	Erfarenheter från inspektion med ROV	22
<b>5</b>	<b>Diskussion, slutsats och rekommendation</b>	<b>28</b>
5.1	Diskussion och slutsats	28
5.1.1	Viktigt med förberedelser inför inspektion	29
5.2	Rekommendation på prioriterade utvecklingsaktiviteter	30
<b>6</b>	<b>Referenser</b>	<b>31</b>



# 1 Inledning

## 1.1 BAKGRUND

De vattenkraftsanläggningar som är i drift i dag började byggas i början av 1900-talet och utbyggnadstakten var som störst under mitten av 1900-talet för att därefter avta. Detta gör att många vattenkraftanläggningar idag har en betydande ålder. En historisk översikt över tunneldrivning och förstärkning finns sammanfattad i Berglund & Lindblom (2019). Många av de tunnlarna som tillhör vattenkraftanläggningarna har varit under vattentryck sedan de driftsattes vanligen beroende på att det finns en betydande risk att få bergnedfall eller på annat sätt skadas då de vattentöms. Uteblivna intäkter för produktionsstopp och kostnader att utföra förberedande arbeten är ytterligare skäl till att inspektioner inte utförts.

Några av de vanligaste orsakerna till att vilja genomföra inspektioner är:

- Säkerheten för tredje man.
- För att veta produktionssäkerheten på anläggningen behövs statusen på vattenvägarna.
- Anläggningarna börjar nå betydande ålder och den tekniska livslängden kan förväntas vara uppnådd speciellt för vissa förstärkningar.
- Anläggningarna får fler start och stopp i och med effekttreglering och det kan innebära förhöjd risk på skador på bergtunnlarna.
- Anläggningen kan ha utsatts för lastfall som den inte var dimensionerad för.

Frånvaron av inspektioner i kombination med brister i dokumentationen från byggtiden gör att statusen på anläggningarna i många fall inte är känd.

Som ett resultat av ökande andel sol- och vindkraftsproduktion gör att vattenkraftsanläggningar behöver stanna och starta maskinerna för att reglera tillgänglig elproduktion mot efterfrågan på marknaden - så kallad effektkörning. Snabba ändringar i tryck i bergtunnlarna ökar risken för skador.

Skador som omfattande bergnedfall påverkar fallförlusterna i tunnlarna och påverkar därmed elproduktionen. Det finns även exempel där tunnlarna kollapsat helt med långa stillestånd i produktionen och därmed utebliven elproduktion samt höga kostnader för åtgärder. I ett fåtal fall har det även hänt att tunnelkollapsen har gått ända upp till markytan, som i Figur 2, och potentiellt varit en risk för säkerheten för tredjeman.

För att optimera underhållsåtgärder ur ekonomiska och säkerhetsmässiga hänseenden krävs kunskap om statusen på de vattenfyllda bergtunnlarna.

De senaste årtiondena har utvecklingen av undervattensfarkoster som har möjlighet att gå in och inspektera vattenfyllda tunnlarna tagit fart. Några av de fördelar som finns med att inspektera vattenfyllda bergtunnlar med undervattensfarkoster är:

- Arbetsmiljörisker minskar eller kan helt elimineras för förberedande arbeten, för att vattentömma och säkra bergtunneln, samt under själva inspektionen.

- Risker för skador på tunneln som t.ex. bergnedfall på grund av vattentömningen minskar.
- Tidsåtgången för inspektionen minskar då det vanligen är färre förberedande arbeten. Även själva inspektionen går fortare.

Bland nackdelarna med undersökning med undervattensfarkoster jämfört med att inspektera en tömd tunnel är:

- En människa vid inspektionsplatsen är med sina sinnen bättre på att bedöma tillstånd än att göra det via video. Själva inspektionen kan då även bli mer detaljerad.
- I en tömd tunnel kan tester göras direkt på intressanta platser och det går att ta ut provkroppar för vidare analys. Detta är idag svårt att göra med undervattensfarkoster.

## 1.2 OMFATTNING OCH MÅL

Denna rapport omfattar:

- en kortfattad litteratursammanfattning av de brister och skador som kan uppstå i tunnlar samt en del tekniker för inspektion av vattenfyllda bergtunnlar med undervattensfarkoster
- sammanställning av en workshop som hölls i Sundsvall den 19 november med temat "Inspektion av vattenfyllda bergtunnlar"
- en kortare diskussion samt några förslag på fortsatta aktiviteter inom Energiforsks bergprogram vattenkraft.

Målsättningen med rapporten är förutom att kortfattat dokumentera presentationerna från workshopen att få en uppfattning av vad som kan utföras och vilka resultat som kan förväntas vid en inspektion av en vattenfylld bergtunnel.

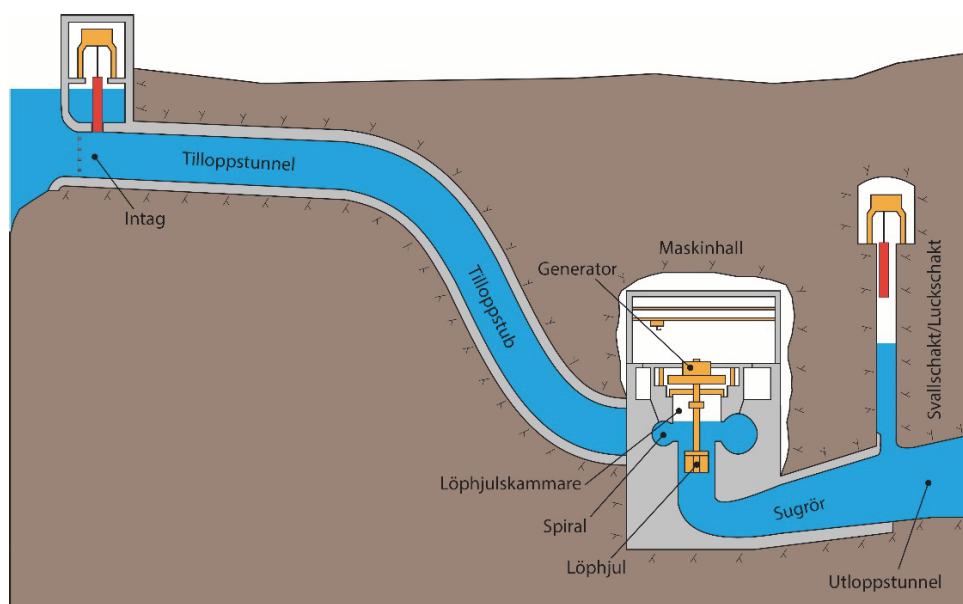
## 1.3 AVGRÄNSNINGAR

Rapporten presenterar inga djupgående analyser av workshopen utan försöker sammanfatta det som diskuterades under workshopen. Litteraturstudien skall inte ses som heltäckande utan som en introduktion till området.

## 2 Bergtunnlar inom vattenkraften

### 2.1 BERGTUNNLAR I SVERIGE OCH NORGE

I svenska vattenkraftsanläggningar finns en stor mängd bergtunnlar. Ett exempel på benämning av bergtunnlarna kan ses i Figur 1. Tillloppstunneln/tillloppstuben, och utloppstunneln är huvudtunnlarna för att transportera vattnet till respektive från aggregaten i bergstationen. Svallschakt finns för att utjämna tryckförändringar som t.ex. kan uppstå vid ett plötsligt avslag på maskinerna. Det finns även andra tunnlar och bergrum med olika användningsområden för att bygga eller för att underhålla anläggningen. Det går att läsa mer om de ingående delarna i vattenvägen övergripande t.ex. i Nordström och Eriksson (2019).



Figur 1: Exempel på layout på en bergstation i ett vattenkraftverk. Nordström & Eriksson (2019).

Det finns ingen fullständig statistik sammanställd för bergtunnlar inom vattenkraften i Sverige. I Sundberg & Amsköld (2015) har information om längderna sammanställts på bergtunnlarna upp till 17,8 km långa och med tvärsnittsareor upp till 390 m<sup>2</sup>. Från två källor kommer data om antal tilllopps-, utlopps- och överledningstunnlar uppdelat på tunnellängder. Tabellen beskrivs som ofullständig, se Tabell 1.

Tabell 1: Antal tilllopps-, utlopps- och överledningstunnlar uppdelat på längd. Sundberg & Amsköld (2015)

Tunnellängder (km)	<0,1	0,1-1	1-3	3-5	5-10	>10	Totalt
Antal	18	54	42	17	16	7	154

I Sverige tog byggandet av underjordiska tunnlar i berg fart och utvecklades fort under första halvan av 1900-talet. Redan 1863 infördes maskinborrning i Persbo

och Persbergs gruvor. Det var dock behovet av malm, elkraft och militära berganläggningar som drev maskinutvecklingen och det relativa priset för tunnlar sjönk. Trots att timpriset för tunnelsprängare femdubblades mellan 1935 och 1957 så kunde priset för tunnlarna sänkas 80 % (omräknat till 1935 års pris), Brännfors et al (1964). För att spränga till rätt kontur på tunneln samt för att säkerställa att kvarstående berg inte rasar ned, vilket är speciellt viktigt för väg- och järnvägstunnlar, utvecklades främst två kontursprängningstekniker, Olofsson (1999):

- Slätsprängning där konturen sprängs i samband med sista salvan. Slätsprängningen utvecklades och förfinades i Sverige under 1950 och 60-talen. Tekniken innebär att skadezonen i tunnelkonturen blev betydligt mindre.
- Förspräckning där konturen formas före sprängning av salvan genom att spräcka längs konturen. Denna teknik används dock främst vid ovanmarkssprängning.

De förfinade sprängningsmetoderna minskar även behovet av förstärkning och för tunnlar som skall bekläs med betong minskar behovet av kostsam betong.

Topografin samt tillgången på nederbörd gör Norge till ett idealiskt land för vattenkraft. Mer än 99% av den årliga elproduktionen på 140TWh kommer från vattenkraften. I Norge är det byggt ca 200 bergstationer för vattenkraft. Det motsvarar ca en fjärdedel av alla som finns i världen. Vidare så är det byggt ca 4000km tunnlar till dessa anläggningar, Broch (2010). I Norge började man på tidigt 1950-tal att på allvar bygga underjordsanläggningar för att förbättra säkerheten vid en krigssituation. Från början så installerades stålrör i bergtunnlarna eftersom man varit van vid det från anläggningar med tilloppstuber i stål som varit vanliga tidigare. Eftersom det är dyrt och tidskrävande att klä in tunnlar i stål eller betong så har dessa tekniker försvunnit som huvudalternativ, Edvardsson & Broch (2002).

## 2.2 SKADOR I BERGTUNNLAR I NORGE OCH SVERIGE

### 2.2.1 Tunnelras i vattenfyllda bergtunnlar

Nyligen publicerades en Energiforsk rapport med fokus på bergets geologiska och bergmekaniska egenskaper för vattenfyllda bergtunnlar, Berglund & Lindblom (2019). Tunnlars globala stabilitet beror på bergkonstruktionens geometri och orientering i förhållande till svagheter i berget. Variationen av drag- och skjuvhållfasthet är vanligen stor och speciellt för skjuvhållfasthet är den skalberoende. Vidare är tre svagheter listade som behöver beaktas:

- Förskiffringsplan
- Sprickor
- Omvandlade zoner

Oftast accepteras mindre nedfall av berg utmed bergtunnlarna. Det går även att göra en överslagsberäkning på produktionsförluster för en reduktion av tunnelarean på grund av bergnedfall, Bruland & Thidemann (1991).

Det finns en rad dokumenterade tunnelras. I Palmström (2003) har 19 ras i norska vattenkraftanläggningar översiktligt presenterats. Draganovic & Johansson (2010) tittade på sex olika tunnelras där svällare har varit av stor betydelse för raset. Håkansson (2013) studerade dokumentationen från 26 olika ras av vattenfyllda bergtunnlar från Sverige (fyra vattenkraftverk + fyra råvattentunnlar), Norge (15 vattenkraftverk) samt ett från Kanada och två från Australien.

Från de 26 fallstudierna kunde huvudorsakerna till tunnelrasen anges, Håkansson (2013):

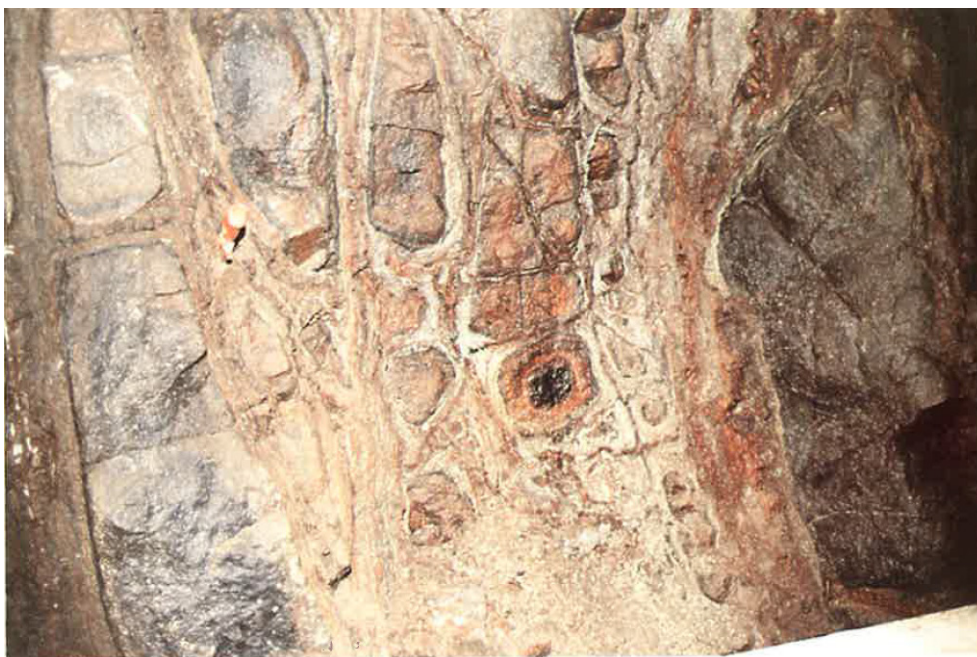
- Svällande lera (i 11 fall av 26)
- Variationer av det hydrostatiska trycket inne i tunneln (i 6 fall av 26)
- Glidning i svaghetszon med omvandlingsprodukt (i 5 fall av 26)

I 21 av de 26 dokumenterade rasen inföll raset inom 15 år från drifttagningen av tunneln.

Det finns ett fåtal exempel där tunnelraset varit så omfattande att det utvecklats ändå upp till markytan. I Hultman et al (1993) beskrivs ett ras i utloppstunneln fem år efter drifttagningen av kraftverkstunnel. Ett kraterhål i markytan bildades med en diameter på ca 15 m enbart 25-30 m från två boningshus, se Figur 2. Orsaken till raset beskrivs som att svällande lera (se Figur 3) kommit i kontakt med tunnelvatten och expanderat och därigenom deformerat förstärkningen av sprutbetong. Erosionen av det dåliga berget kunde därefter ske uppåt. Lösgrjorda block knäckte sprutbetongens armering och hålet kunde utbildas ända upp till markytan.

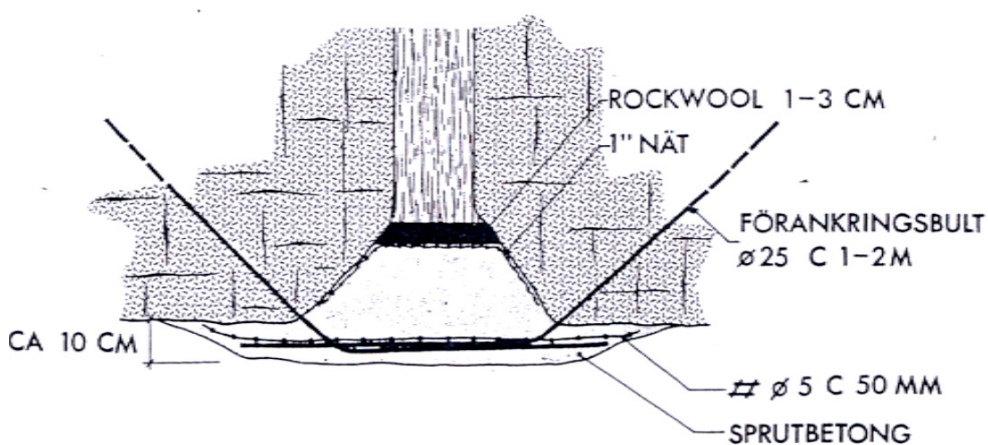


Figur 2: Ras i en utloppstunnel som har nått ända upp till markytan. Hultman et al (1993).



Figur 3: Breccierad och leromvandlat berg i tillfartstunnel i vattenkraftsanläggning. Hultman et al (1993).

Förutom fallstudierna av tunnelras på grund av svällera beskriver Draganovic & Johansson (2010) även hur dimensionering av tunnelförstärkning utförs samt befintliga förstärkningskoncept. I Figur 4 ses ett exempel på en förstärkning med sprutbetong och isolering mot den svällande leran där den kan expandera.



Figur 4: Exempel på förstärkning vid enstaka branta sprickor med svällande lera. Broms & Heiner (1979) efter Eurenus (1972).

Brende et al (2018) beskriver de mest sannolika orsakerna till de ras som uppstått (för norska förhållanden):

- Förstärkningsåtgärderna har varit bristfälliga beroende på att förundersökningarna har varit undermåliga.
- Problemställningarna runt stabilitet har inte observerats eller förstås och lite eller ingen förstärkning är gjord i områden med tveksam stabilitet. Denna brist skylls på dålig uppföljning under byggentreprenaden.
- Problemen med förstärkningen har varit undervärderade och förstärkningen har blivit underdimensionerad eller felaktig. Exempelvis där zoner med svällera på olämpligt sätt har förstärkts med sprutbetong.
- Beständigheten hos förstärkningarna har varit för dålig. Detta gäller speciellt för ras som skett efter lång tid från driftsättningen.

I Håkansson (2013) antogs att felfrekvensen kan liknas vid badkarsmodellen dvs felen inträffar under början eller när produktens livslängd är uppnådd. Berglund & Lindblom (2019) menar dock att det material i Håkansson (2013) inte styrker detta då de flesta ras har skett under de första åren. Berglund & Lindblom (2019) påpekar att badkarskurvan härstammar från tillverkningsindustrin och att möjligen förstärkningarna men troligen inte bergmassan uppför sig enligt denna modell.

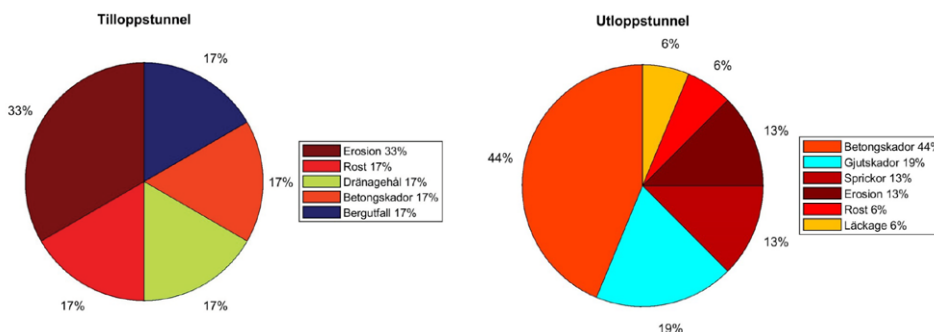
## 3 Inspektion av bergtunnlar

### 3.1 INSPEKTION AV DRÄNERADE BERGTUNNLAR

Arbete i bergtunnlar som av vattnet varit trycksatta och sedan tömms kan ge ett stort säkerhetsproblem. Förutom instabilitetsproblem av tunneln kan andra säkerhetsproblem uppstå. Ett exempel är beskrivet i Panthi (2014) där två arbetare, under reparationsarbetena, olyckligt omkom då vatten frigjordes och en flodvåg av bergmaterial och vatten välldes ned. Att säkra upp en tunnel för att låta den inspekteras är tidskrävande och skapar snabbt stora kostnader för själva säkringen, tömning av tunneln etc. För större anläggningar är produktionsbortfallet vanligen mycket stort.

I Sverige utförs inte inspektioner av vattenfyllda bergtunnlar regelmässigt, Sundberg och Amsköld (2015). Anläggningarna är vanligen inte förberedda för att tunneln skall kunna inspekteras på ett enkelt sätt. För att utföra en inspektion krävs vanligen att hela kraftproduktionen stängs av, fångdammar monteras, vägar byggs, ytor rengörs och skyddsskrotning utförs, Sundberg och Amsköld (2015). För utförande av inspektion i dränerad tunnel finns det en Elforsk rapport "Besiktningmanual för berganläggning inom vattenkraft", Söder (2006). Syftet med rapporten var att försöka likrikta bergbesiktningarna i tunnlar och maskinsalar inom vattenkraften. Som bilagor hittar man förslag till besiktningssrapport, checklista vid bergbesiktning, kompetenskrav för besiktare samt nivå och exempel på besiktning. Trafikverket har en rapport "Inspektionshandbok för berganläggningar" med liknande syfte, Trafikverket (2017). Det är dock oklart om den rapporten är publicerad ännu.

I Nordström & Eriksson (2019) är ett större antal inspektioner av inre vattenvägar i vattenkraftverk sammanfattade. Materialet kommer från inspektioner från 53 svenska vattenkraftverk där det var totalt 1708 observerade skador. Resultaten är uppdelade för intag, tilloppstunnel, tilloppstub, spiral, löphjulskammare, sugrör och utloppstunnel. Statistiken för bergtunnlarna är dock mycket liten då bara 6 observerade skador var noterade på intagstunnlarna och 16 för utloppstunnlarna, se Figur 5.



Figur 5: Observerade skador i tilloppstunnel (6 st) till vänster respektive utloppstunnel (16 st) till höger. Nordström & Eriksson (2019).



I Norge har bergtunnlar inspekterats till fots med enkel utrustning, se Figur 6. På grund av personsäkerheten är det dock inte önskvärt. För att studera om effektkörning kan påverka stabiliteten i bergtunnlarna så inspekterades tio vattenkraftstunnlar på totalt över 100 km till fots, se Bråtveit et al (2016). Nedfallen jämfördes med tidigare inspektion redovisad i Bruland & Thidemann (1991). Studien från 2016 visar att nedfallet av mindre men fler block skedde jämfört med den tidigare studien. Frekvensen av blocknedfall var 3,4 gånger högre i de anläggningarna med effektkörning. Inkomstbortfallet, beroende på fallförlusten, tros ha ökat med 70 % på grund av effektkörningen. Störst frekvens av blocknedfall var i eller nära svaghetszoner med svällera.



Figur 6: Utförare av tunnelinspektioner i Norge. Bråtveit et al (2016).

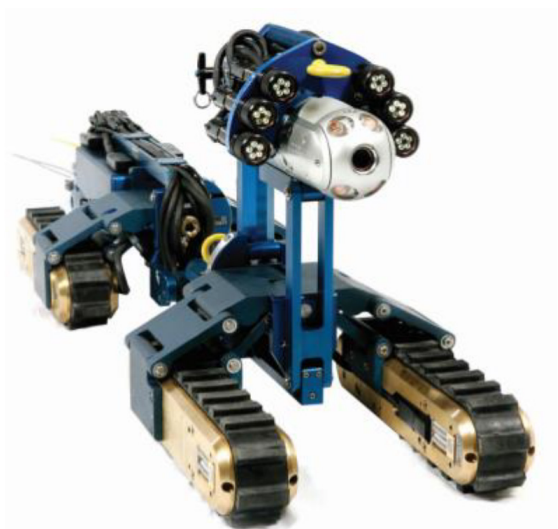
I Bråtveit et al (2012) undersöktes hur en laserskanning av en torrlagd tunnel kan användas för att bestämma geometri och för att bestämma tunnelns råhet för att beräkna fallförluster i tunneln. I Andersson et al (2019) används laserskannad data från en bergtunnel och det kunde visas att Mannings ekvation gav en bra uppskattning på den totala fallförlusten i tunneln. Skanningsdata var dock besvärlig att hantera i mjukvarorna.

### 3.2 INSPEKTION AV DELVIS VATTENFYLLDA BERGTUNNLAR

En sonar kan inte mäta över vattenytan i en delvis vattenfylld tunnel. Exempel på detta kan vara utlopp från bergtunnlar, instängda luftfickor eller svallschakt. Inspektion med video innebär vanligen inget problem då man kan filma även över

vattenytan men önskas en heltäckande modell behövs ett annat mätsystem över vattenytan som t.ex. fotogrammetri eller laserskanning.

Tunnlar som blir för grunda eller till och med delvis utan vatten kan inte inspekteras i sin helhet med en ROV (Remote Operated Vehicle) som drivs med propellrar (thrusters) eller på annat sätt kräver vatten för att röra sig. Det finns då kommersiella ROV:er som tar sig fram med larvfötter, se Figur 7. Dessa kan även ta sig igenom starkt strömmande vatten (upp till 2 m/s).



Figur 7: ROV med larvfötter t.ex. för inspektion av delvis vattenfyllda tunnlar. Hibbard Inshore (2016).

Dessa kan utrustas med t.ex. video och 3D laser. Det kan dock vara ett problem om en luftskannad modell (t.ex. utförd med laserskanning eller med fotogrammetri) skall sättas ihop med en modell från sonarskanning under vattenytan. Detta för att de skannade modellerna vanligen inte har några överlappande referenspunkter i de två modellerna. I Moisan et al (2015) belystes problemen med att få ihop modellerna från laser- respektive sonarskanning för en kanaltunnel dvs en tunnel som bara delvis var fylld med vatten. Problemen som uppstår i dylik miljö:

- Ingen satellitsignal för att globalt positionera modellerna förutom utanför tunneln.
- Höga brusförhållanden vid sonarskanningen på grund av grunt och trångt utrymme under vattenytan i kanalen.
- Svårigheter att sätta ihop de laser- och sonarskannade modellerna till en enhetlig modell eftersom det inte finns några gemensamma punkter.

I artikeln hade man främst tittat på svårigheterna med att få ihop de två modellerna. Lösningen var att manuellt para ihop kända punkter som bryter vattenlinjen och kan hittas i båda punktmodellerna. För att underlätta detta i en kanal sattes ett antal stegar ner från botten och upp en bit över vattenytan. Sedan kunde de två modellerna paras ihop. Moisan et al (2017) utvecklade metoden genom att använda ett automatiskt system med stereokameror och

sonarutrustning för att få ihop modellen och få ett system som inte är beroende av GPS inne i kanaltunneln. Genom fotogrammetri bildas modellen av tunneln över vattenytan och under vattenytan med sonar. Utrustningen satt på en båt som gick med en konstant hastighet på 1 m/s. Foton togs varje 20:e cm och sonarprofil varje 2,5 cm.

### 3.3 INSPEKTIONER AV VATTENFYLLDA BERGTUNNAR

#### 3.3.1 Svårigheter att inspektera vattenfyllda tunnlar

Positionering under vatten ställer till problem. Satellitnavigeringssystem kan inte användas då de elektromagnetiska signaler som skall tas emot inte kan transporteras genom vatten. Det används då olika sorters sensorer under vatten för att mäta farkostens position och vanligen används de redundanta för att ge bra noggrannhet och tillförlitliga värden. Några av instrumenten är (urval från Antonelli, 2018):

- Tryckgivare för djupmätning. Vanligen mycket exakt och tillförlitlig.
- Kompass. Noggrannheten är på nivån del av grad.
- Gyroskop. Mäter rotationen.
- Akustisk positionering.
- Inertial measurement unit (IMU). Vanligen tre accelerometrar, tre gyroskop och tre magnetometrar. IMU:n ger linjär acceleration och vinkelhastighet.

Djupet kan fås med bra noggrannhet eftersom det mäts med tryckgivare som är noggranna och ger ett "globalt" djup dvs inte bara en förändring av djupet sedan senaste mätningen. För tunnelinspektioner används också kabellängden som ett mått på hur långt ROV:n har färdats (noggrannheten bedöms då till någon meter).

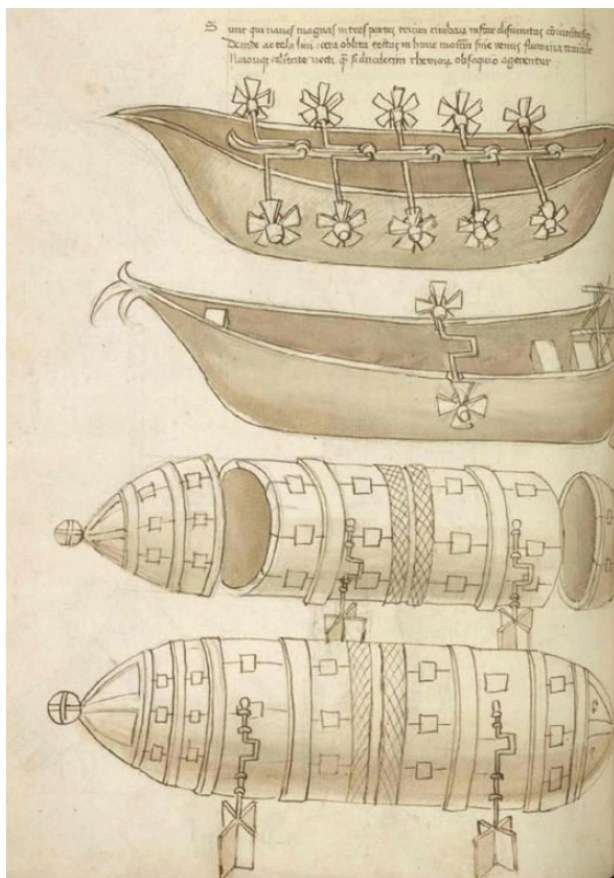
I plan är lägesbestämningen betydligt svårare då instrumenten mäter bland annat förändringar i hastighet, olika vinklar på farkosten etc. Bara ett litet fel i mätningarna med dessa instrument kan ge upphov till mycket stora osäkerheter vart efter farkosten förflyttar sig. Man kan med andra ord inte få den globala positionen med dessa instrument som man får med satellitnavigering där osäkerheter vid tidigare mätningar (t.ex. skymda satelliter) normalt inte påverkar noggrannheten på kommande mätningar.

#### 3.3.2 Historiska undervattensfarkoster

Utvecklingen av undervattensfarkoster kommer bland annat från behoven inom:

- Militären
- Olje- och gasindustrin
- Utforskning av oceaner samt eftersökning och dokumentation av vrak

Så långt tillbaka som på 1400-talet finns dokumenterade idéer om bemannade undervattensfarkoster, se teckning av Roberto Valturio i Figur 8. Syftet med dessa farkoster är troligen militära då Valturio skrev böcker i krigskonst som kopierades flitigt. Det finns även teckningar av en bemannad undervattensfarkost ritade av Leonardo Da Vinci daterad runt 1500, Antonelli (2018).



Figur 8: Undervattensfarkost ritad av Roberto Valturio på 1400-talet. Återgiven i Antonelli (2018).

Under amerikanska inbördeskriget användes ubåtar. År 1864 sänktes det första fartyget av en ubåt. Ubåten hette H.L. Hunley och var handvevad av de åtta männen i besättningen. Ubåten förläste dock strax efter sänkningen, troligen på grund av syrebrist. Några år innan togs örlogsfartyget Monitor i drift. Monitor var ingen egentlig ubåt men låg så djupt i vattnet att i princip bara kanontornet syntes över vattenytan. Den flytande delen under vattenytan var byggd av ek medan den övre delen var täckt med 5 till 9 tum järnplåt. Utvecklingen på farkostsidan har sedan gått mycket snabbt.

### 3.3.3 Remote Operated Vehicle, ROV

När det finns säkerhetsrisker för dykare är en maskin att föredra som t.ex. en ROV, se Figur 9. Det kan även finnas andra fördelar med en ROV som t.ex. drifttid under vatten. Om den får sin kraftförsörjning via kabel kan den ha mycket lång tid under vatten. Den som styr en ROV kallas i dessa sammanhang för pilot och gör det på avstånd via en kommunikationskabel. Kabeln mellan ROV:n och piloten kan samtidigt vara en kraftförsörjningskabel om ROV:n inte har batteridrift. Kabeln har vanligen neutral flytkraft i vattnet (vilket för tunnelfallet även gör att den inte fastnar lätt). För att minska de elektriska problemen som uppstår med de riktigt långa kablarna används likström som kraftförsörjning, se Figur 10. Då

videoöverföring och data från eventuella instrument kräver hög bandbredd så används vanligen fiberoptisk kabel för att manövrera och samla in data.



Figur 9: Exempel på ROV:er. Sundberg & Amsköld (2015).



Figur 10: Exempel på försörjningskabel. Loxus (2020).

Det finns en hel del att läsa om dessa farkoster. En introduktion om ROV:er hittas t.ex. i Sundberg & Amsköld (2015) eller mer ingående i Christ & Wernli (2014).

Utvecklingen av undervattensfarkoster har varit stark de sista årtiondena. Forskning och utveckling sker bland annat i Sverige på forskningscentret Swedish Maritime Robotics Centre (SMaRC). Centret har fokus på robotik inom

områdesövervakning, kartering, oceanografi men också havsodling och miljömätningar. Forskningscentret är finansierat via Stiftelsen för strategisk forskning och är ett samarbete mellan akademien: KTH, Stockholms Universitet och Göteborgs Universitet samt industrin: Saab, MMT Sweden, FMV och FOI.

ROV som används till tunnelinspektioner har vanligen en eller flera olika sonarer (eng "sound navigation and ranging"). En aktiv sonar skickar ut en ljudpuls och registrerar sedan reflektionen (ett eko) av denna puls. Passiva sonarer skickar däremot inte ut egna ljudpulser. Det finns en rad olika sorters sonarer och de används antingen som hjälpmedel för att styra ROV:n eller för att göra mätningar för dokumentation som i Figur 18. För en djupare beskrivning se t.ex. Antonelli (2018).

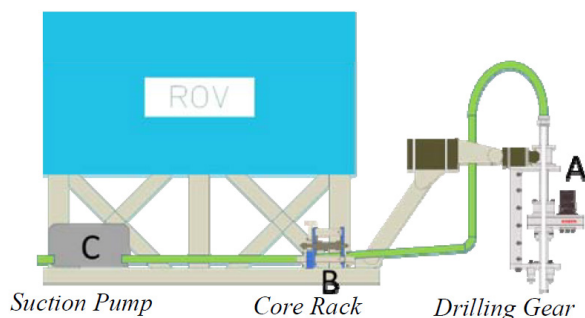
### 3.3.4 ROV-verktyg

För att kunna få ut den information som önskas från inspektionerna med ROV kan någon typ av instrument behövas. Behövs det göras något handgripligen så har de större ROV:erna en så kallad manipulator, se Figur 11.



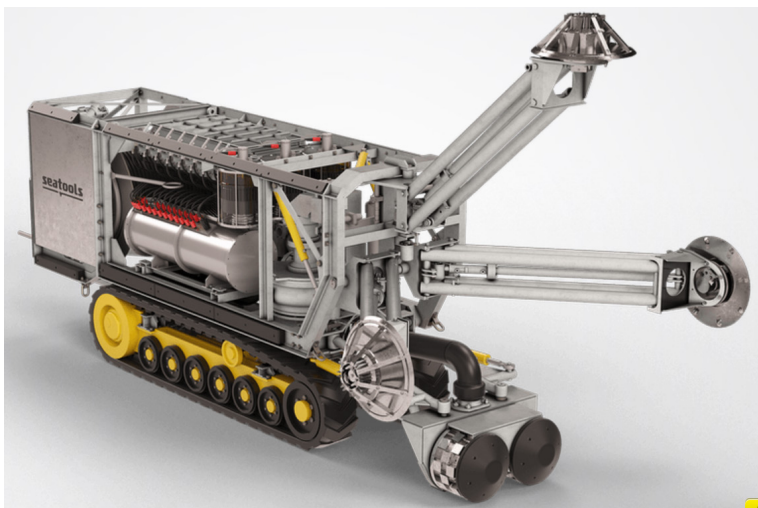
Figur 11: eManip Electric Manipulator från Saab som lanseras 2020. Lundberg (2019).

Tajima et al (2018) visade ett utvecklingsprojekt där flera korta borrhärlor kunde borraras ut från botten i valfri vinkel, se Figur 12. Kärnboring har t.ex. entreprenören Hibbard Inshore med på en lista av möjliga tillval till sina ROV:er.



Figur 12: Utrustning för att ta ut borrhärlor från ROV. Tajima et al (2018).

Det finns även företag som gör specialutrustning för undervattensjobb. Nederländska Seatools tog fram två högst specialtillverkade ROV:er för att rengöra intagsrör till Black point gaskraftverk i Hong Kong, se Figur 13. Rören behövde rensas från en 25 cm påväxt av musselskal då denna påverkade kylningen på anläggningen.



Figur 13: Exempel på larvgående ROV. Rengöringsmaskin för kylvattenrör. Seatools (2020).

### 3.3.5 Autonoma farkoster

Det finns utveckling inom autonoma undervattensfarkoster så kallade AUV:er (Autonomous underwater vehicle) inom den militära sidan samt inom bland annat olje- och gasindustrin, Schjølberg & Utne (2015).

För vattenfyllda bergtunnlar har det inte hittats några dokumenterade system för autonoma inspektioner av bergtunnlar. Dock finns det forskning/utveckling inom närstående områden. Det finns ett mycket långt rörledningsnät (totalt över 1700 km) från Bodensee för dricksvatten till ca fyra miljoner människor i Baden-Württemberg. En 24 km lång betongledning inspekterades autonomt (videoinspektion) 2012 med en AUV-farkost (Seacat från Atlas Elektronik). Ledningen är 2,25 m i diameter och inspekterades för första gången visuellt sedan driftsättningen för ca 40 år sedan. De första ca 300 meter av ledningen styrdes farkosten via kabel för att sedan kopplas loss och med en hastighet på ca 1 m/s autonomt filma ledningen. Totalt körde farkosten ca sju timmar autonomt. Resultat från inspektionen beskrivs bara översiktligt som att konstruktionen verkar vara i bra tillstånd ([www.stuttgarter-zeitung.de](http://www.stuttgarter-zeitung.de), 2012-03-12). Tidigare har man gjort mätningar av friktionsförluster samt läckagemätningar.

Företaget Subdrone från Österrike har ett samarbete med Universitetet i Bremen (German Research Center for Artificial Intelligence) och utvecklar produkter för autonom undervattensinspektion. Subdrone menar att de har kapaciteten att skanna bergtunnlar autonomt men det är ännu inte utfört, Vonach (2019).

Det norska företaget Eelume arbetar med att utveckla en ormliknande AUV i samarbete med Kongsberg och Statoil. Den utvecklas främst för kontroll och övervakning av ledningar på havsbotten.

## 4 Workshop i Sundsvall, 2019

### 4.1 SAMMANFATTNING AV WORKSHOPEN

Den 19 november 2019 hölls en workshop i Sundsvall med temat Inspektion av vattenfyllda bergtunnlar. Energiforsk Vattenkraftens bergfrågor stod som arrangör och värd var Uniper. Anders Isander på Uniper var moderator och Monika Adsten från Energiforsk var biträdande moderator. Det var runt 40 deltagare främst från ägarföretagen men även från entreprenörer som utför inspektioner och representanter från akademien samt konsulter.

Presentatörer och presentationer under workshopen var:

- Jonas Hammarson, Marcus Hautakoski, Fortum och Jonas Bosell, UW-Tech, Inspektion och fotogrammetri i vattenfyllda tunnlar
- Erik Digerud och Jonas Björnström, Norconsult, Varför och hur vattenfyllda tunnlar skannas
- Frank Ellingsen, Norwegian tunnel inspection AS, Erfarenheter från nyligen utförda inspektioner av långa vattenfyllda tunnlar
- Mikko Simola, Loxus, Erfarenheter av 3D skanning av vattenfyllda tunnlar med ROV
- Leif Lia, NTNU, Tunnelforskning i HydroCen – ny kunskap och nya möjligheter
- Lars Lundberg, SAAB, Utveckling av AUV för tunnelinspektion

Varje presentation har inte sammanfattats för sig utan presentationerna har vävts samman för att ge en mer sammanfattande bild av vad som framkom under workshopen. Presentationerna kan laddas ned från Energiforsks hemsida.

Det fanns exempel på utförda inspektioner bland presentationerna och erfarenheter från dessa. En stor del av tiden upptogs av vad som är möjligt att utföra med dagens teknik och även vad som skulle vara önskvärt och eventuellt möjligt i framtiden. Forskning och utveckling inom bergtunnlar var ett tema för att även se vad som görs inom området på HydroCen i Norge.

#### 4.1.1 Erfarenheter från inspektion med ROV

Entreprenörerna som deltog på workshopen har lång tid i ROV-branschen. Variationen var dock stor hur mycket erfarenhet entreprenörerna har av inspektion av vattenfyllda bergtunnlar. Den med mest erfarenhet har inspekterat flera hundra kilometer tunnel jämfört med det nya företaget som med en helt ny produkt i princip precis slutat med utprovningen av sitt system och utför nu inspektioner.

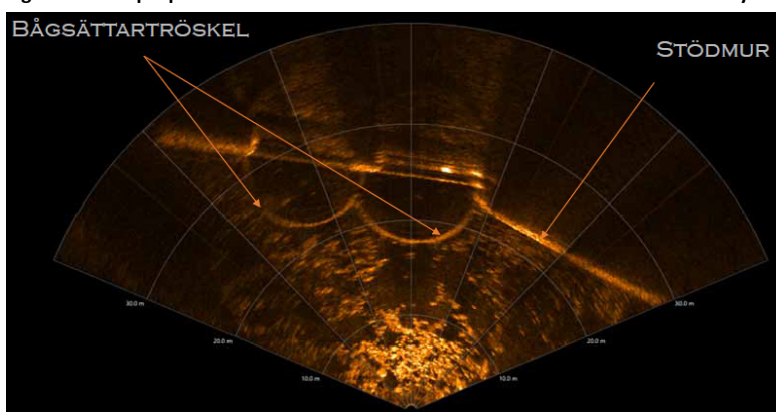
Av de fyra olika entreprenörerna som var representerade på workshopen så var det två huvudtyper av inspektions-ROV:er som presenterades. De mindre och enklare ROV-systemen, se Figur 14, är portabla och avsedda för mindre uppdrag. För långa tunnlar eller där multibeam 3D skanning skall utföras används större ROV. ROV:erna har vanligen flera videokameror och 2D-sonar. 2D-sonaren används för navigering och för inmätning av intressanta områden, se Figur 15. Det



kan dock behövas en del träning för att tolka bilderna. På de mindre ROV:erna så är kabellängden vanligen från några hundra meter upp till 1 km.



Figur 14: Exempel på en liten ROV för mindre tunnlar eller delar nära t.ex. tunnelmynning.



Figur 15: 2D sonar-bild. Bosell (2019).

Det fanns tre entreprenörer som presenterade system för långa tunnlar med kabellängder runt 7 km. Om man kan komma in både vid tunnelns inlopp och utlopp så kan de flesta bergtunnlar inom svensk vattenkraft inspekteras med dessa system. Finns det även mellanpåslag som är tillgängliga så kan inspektionen delas upp ytterligare om det finns behov. Ett av ROV-systemen har batteridrift, se Figur 16, vilket gör att kabeln bara är till för kommunikation och blir därför mycket tunn. Nackdelen är att batteridriften är begränsad. Systemet funkade bra vid en inspektion 2019 av en 12 km tunnel i södra Norge.



Figur 16: ROV med batteridrift. Ellingsen (2019).

Med ny teknik för att skapa 3D modeller i realtid tillsammans med högupplösta kameror är det stor skillnad mot äldre inspektionsvideor gjorda med dykare där fotokvaliteten ofta var dålig och det var svårt att orientera sig.

Det finns en viss risk att en ROV fastnar med kabeln i tunneln. De utförarna som deltog på workshopen menar dock att det är mycket ovanligt. Rekommendationen var att det bör finnas en andra ROV som kan transporteras fram med kort varsel för att utföra en räddningsaktion.

De resultat som går att få ut från en inspektion med ROV kan variera mycket beroende på vilka undersökningsmetoder som används. Det som presenterades på workshopen var följande tekniker:

- Video och stillbilder.
- 2D-sonarbilder, se Figur 15.
- Genom att sätta ihop många foton med fotogrammetri kan högupplösta 3D modeller skapas, se Figur 17.
- 3D sonarskanningsdata presenteras vanligen som punktmoln eller mer bearbetat som ytor, se Figur 18. Det går då att visualisera och mäta ökande mängd nedfallet berg, storlek på block samt vända och vrida på modellen.

Video, stillbilder och 2D sonar diskuterades inte ingående under workshopen. Videoupptagning är en standardmetod. Tunnelns tvärsnittsarea och sikten i vattnet är, förutom inspektionens syfte, de parametrar som avgör om det är lämpligt med video som enda inspektionsmetoden.

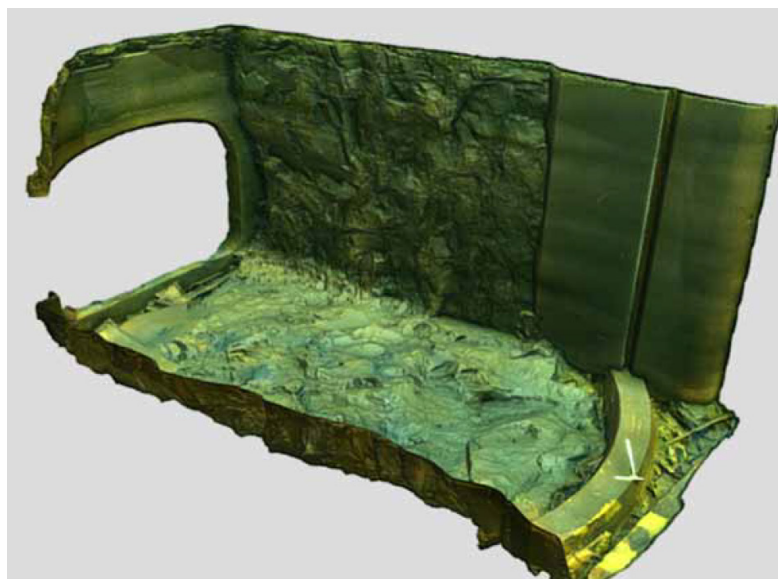
Med fotogrammetri kan man från många högupplösta foton (t.ex. tagna från videoupptagning) skapa högupplösta 3D -punktmoln. Dessa modeller kan man ge textur från foton så att de får ett mycket realistiskt utseende, se Figur 17.

Noggrannheten kan bli mycket god: under-centimeter nivå. Nackdelarna är att det är tidskrävande – ROV:en kan behöva köra mycket nära ytorna beroende av sikten. Helst skall vattnet vara helt stillastående då partiklar annars kan störa resultatet. Filerna från alla foton tar mycket plats då det är högupplösta bilder som används. Även om lägre upplösning önskas så blir själva inspektionstiden densamma men efterarbetet med datorn minskar (mindre antal foton från videon används för att bilda modellen). Detta är inte en metod för att skanna längre sträckor av en tunnel utan kan användas för att detaljstudera avsnitt efter att först kört igenom med 2D-sonar/video och sett ut intressanta områden.

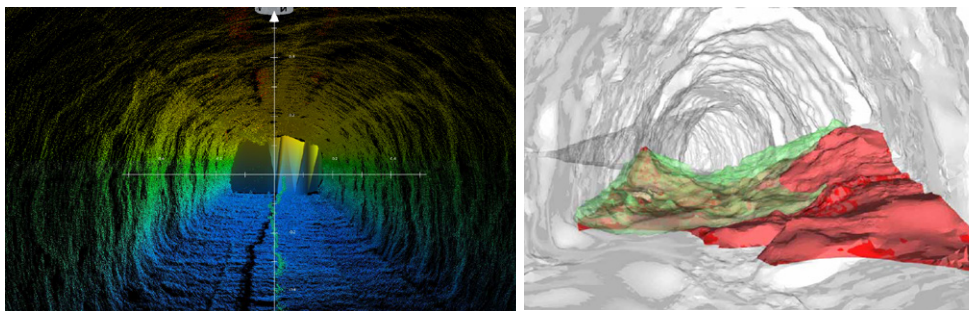
3D sonarskanning går relativt fort att utföra med hög upplösning även under dåliga siktförhållanden. Det kan vara en fördel om en erfaren bergmekaniker finns med under inspektionen för att peka ut speciellt intressanta delar av tunneln. Beroende på vad som upptäcks under sonarinspektionen kan bergmekanikern hjälpa till att ange de avsnitt som avviker från ritningar och därmed extra detaljerad information önskas t.ex. genom noggrann videodokumentering. I efterhand kan man även jämföra med tidigare inspektioner, t.ex. om ett ras har fortskridit eller om det var ett helt nytt ras, se Figur 18. All den data som det blir från en sådan inspektion gör att storleken på filerna är mycket stora (tioalet GB).

För punktmoln som skall beskriva en lång tunnel så blir noggrannheten i djupled som t.ex. djup från markytan och ned till tunneltaket vanligen bra då detta mäts med tryckgivare. För de punkter som ligger i samma sektion blir noggrannhet mycket god på ca +/- 1 cm. Längdangivelse längs med tunneln tas vanligen från hur mycket kabel som är utrullad vilket brukar ge en noggrannhet på ca +/- 1 m. Som beskrivits ovan blir dock noggrannheten i planet mycket dålig där ett tidigt mätfel kan ge betydande avvikelse längre fram i tunneln. Detta gör att det är svårt att bestämma tunnelns läge t.ex. jämfört med överliggande infrastruktur. Exempel på fel på flera hundra meter i planet kan uppstå för en lång tunnel. För tunnlar med bra ritningsunderlag kan man dock göra korrigeringar där man tar fasta på visuella förändringar så som krökar eller dimensionsförändringar i tunneln. Vanligen kan åtminstone tunnelns inlopp och utlopp användas för att i efterarbetet passa in uppmätt tunnel i planet.

På workshopen kom det upp att stor mängd fisk, luftbubblor och is kan ge besvär för utförandet av inspektionen. Eftersom sonarer inte kan bryta vattenytor så blir det inga resultat från sonarer om det skulle vara en luftficka inne i tunneln.



Figur 17: Högupplöst modell skapad genom fotogrammetri. Bosell (2019).



**Figur 18: 3D-data presenterat som punktmoln (tv). 3D presenterad som ytor (th). Två olika skanningar presenterade i olika färger för att se skillnader i mängden rasmassa. Digerud & Björnström (2019).**

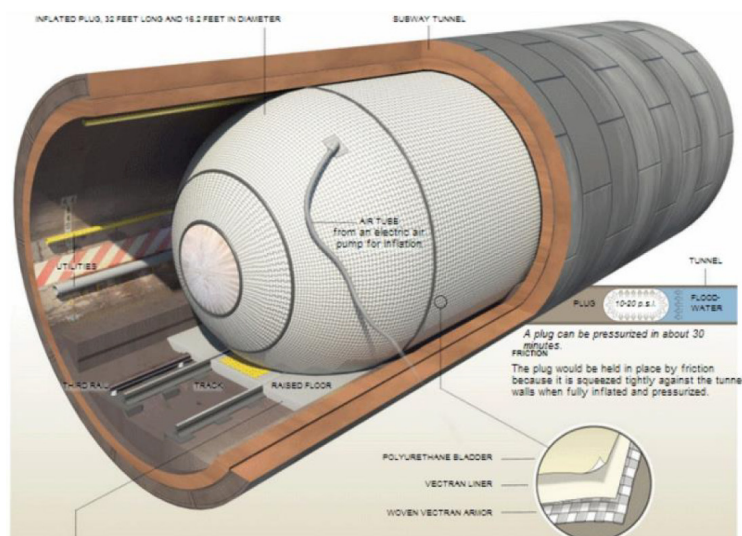
En av entreprenörerna har en larvgående ROV vilket gör att den kan ta sig fram i strömhastigheter ända upp till 2 m/s men det strömmande vattnet ger då sämre mät noggrannhet.

Ingen av entreprenörerna som var på workshopen har ett system för en autonom inspektion. Inga autonoma inspektioner av vattenfyllda bergtunnlar har heller hittats i litteraturen men tekniken har använts på långt rörsystem, se tidigare kapitel om autonoma farkoster.

Saab har en lång erfarenhet av undervattensfarkoster och ROV:er. Lars Lundberg på Saab presenterade tankar om autonoma undervattensfarkoster. Det skulle vara fullt möjligt med autonoma farkoster men rekommendationen skulle vara att bara använda det där det är omöjligt med kablade farkoster. Farkosten skulle behöva programmeras så att den kan ta ett beslut när den stöter på något oväntat.

Leif Lia presenterade pågående forskning inom forskningscentrat HydroCen i Norge. Följande pågående och kommande projekt togs upp (urval):

- Utveckling av metod för att mäta svällorors svällande potential. Mätinstrument (så kallad flat jack) för att mäta tryck installerat i Albanien. Publicering finns i Bulletin of Engineering Geology and Environment.
- Påverkan på tunnelkonstruktioner av många start och stopp på grund av effektkörning (hydropeaking). Instrumentering utförd inne i tunnel på anläggning öster om Stavanger. Mätningarna pågår kontinuerligt sedan juni 2018 och skall stå ytterligare i flera år och mäta. Även tunnelinspektioner av torrlagda tunnlar ingår i detta projekt. Projektet började 2017 och nio tunnlar är inspekterade hittills.
- Enklare och bättre bestämning av tunnlaras råhet. Använder 3D data om tunnlaras geometri för att bestämma råheten.
- Blockera bergtunnel med ballong för att göra underhållsarbeten i torrhet. Något exempel på blockering hittat, se Figur 19, och inom gruvindustrin har det använts under tio år. Projektet har ännu inte startat upp.



Figur 19: Uppblåsbar "kudde" för att blockera cirkulär tunnel för tåg.

## 5 Diskussion, slutsats och rekommendation

### 5.1 DISKUSSION OCH SLUTSATS

Det kan uppstå skador i en bergtunnel som vattentöms. Förutom de kostnader som uppstår för att vattentömma uppstår stora kostnader för att säkra tunneln innan man kan göra inspektionen. De flesta av anläggningarna har därför aldrig inspekterats. Detta gör det svårt att veta status på anläggningarna, och inspektion blir allt mer nödvändigt för att säkra produktion på lång sikt. Då det finns en stor mängd av vattenfyllda bergtunnlar som inte är inspekterade någon gång sedan de togs i drift kan en inspektion med ROV vara intressant. Förutom att hitta eventuella ras är önskan att i förväg kunna inspektera så att underhåll går att sätta in förebyggande.

Det kommer därför att behövas en strategi för att prioritera inspektionerna där de gör störst nytta. Lämpligen utförs denna prioritering med ett risktänkande. Några aspekter som kan påverka denna prioritering kan vara:

- Kritiska tunnlar för säkerhet till exempel avbördningssäkerhet
- Tunnlar med kända ras
- Höga eller plötsligt ökande fallförluster
- Anläggningar med hög produktion eller som används mycket för effektreglering
- Anläggningar med kända svaghetszoner i berget

Det har inte hittats någon bra sammanfattning av vilka typer av bergutrymmen och tunnlar som finns inom vattenkraften. Tunnlarna är byggda under ett långt tidsspann, och tekniken för tunneldrift utvecklades starkt under denna tid. En kartläggning av tunnlar med information om vilka olika tekniker för tunneldrivning som användes, genomförda förstärkningsinsatser, svaghetszoner i berget etc. skulle kunna ge ett bättre underlag för vilka anläggningar som behöver prioriteras för inspektion och eventuellt underhåll. För att förenkla utvärderingen och underlätta uppdateringen är det en möjlighet att använda ett liknande upplägg som Energiföretagens Dammregister. Ett arbete behövs i så fall för att utarbeta ett motsvarande register. Det kräver dock en hel del arbete som insats och det är tveksamt om det ger rätt värde för pengarna.

I Sverige finns det inte många dokumenterade ras i bergtunnlar för vattenkraften jämfört med det antal rapporter som hittas om ras i Norge. Det är troligt att det sker många fler ras i Norge på grund av att där finns fler kilometer tunnel samt att många av dessa tunnlar har ett mycket högt hydrauliskt tryck under drift. Dokumentation av varje tunnelras i Sverige är därför av stort värde. Det är även viktigt att tänka på att analysera och dokumentera resten av tunneln och dess förstärkningar i samband med att då tunneln ändå är dränerad. I Norge har man funnit att effektkörningen ger ökande bergnedfall som påverkar produktionen och därmed ger lägre produktionsintäkter. Det har inte framkommit om det går att dra samma slutsats för svenska anläggningar. Frågan anläggningsägarna måste ställa sig är om det blir skador i tunnlar på grund av effektkörning och i så fall om man kompenseras för detta. Om det uppstår fler ras, är det även av denna

anledning, önskvärt att göra en ordentlig orsaksanalys och dokumentation för att kunna dra bättre slutsatser i framtiden.

De tunnelras som beskrivits i Håkansson (2013) berodde till största del på: Svällande lera, glidning i svaghetszon med omvandlingsprodukt samt variationer i det hydrostatiska trycket inne i tunneln. Den sista orsaken är en avledningarna till att avstå från att dränera tunnarna och utföra inspektionerna i torrhet. Vid en inspektion så är det alltså lämpligt att inför inspektionen leta i relationshandlingarna om det finns något dokumenterat om svaghetszoner och speciellt efter svällare samt vilka förstärkningar som vidtagits. Håkansson (2013) poängterade också att en dokumenterad geokartering över berggrunden är värdefull vid inspektioner.

Undervattensinspektioner med ROV kan ge mycket bra information om geometri och sådant som syns på tunnelytan som t.ex. ras. För att bedöma statusen på en bergtunnel behövs dock även kunskap om vilket skick förstärkningarna har. I dag går det även att utföra en del andra uppgifter med en ROV som t.ex. att ta ut borrkärnor, men det är mer under utvecklingsskedet.

Det finns dock andra möjligheter för vattenkraftsägarna att se om problem uppstår i tunnarna. Till exempel kan fallförluster upptäckas genom att analysera produktionsdata. För mindre anläggningar som brottas med lönsamhet så är förebyggande inspektioner troligen nedprioriterade, men troligen går det att dra lärdom från utförda inspektioner från större anläggningar om det råder liknande berg- och förstärkningsförhållanden. Detta gör en genomlysning av relationshandlingar viktigare för att se om det finns problem som uppstod vid tunneldrivningen och hur det löstes. Avsaknad av relationshandlingar blir då ett reellt problem. Analys av driftdata blir relativt viktigare för dessa anläggningar.

Det framkom under workshopen att relationsdokumentation i många fall saknas eller är av dålig kvalitet. Detta gör inspektionerna svårare att utföra, men en 3D sonarskanning tillsammans med t.ex. videoupptagning ger värdefull information om tunnelns geometri. Den ger även en uppfattning av mängden förstärkningar och eventuella ras. Problemet med undermålig/avsaknad av relationsdokumentation verkar även finnas för väg- och tågtunnlar, Salomonson & Thorsager (2008).

### 5.1.1 Viktigt med förberedelser inför inspektion

Under workshopen kom det upp att det är viktigt med förberedelser inför en inspektion med ROV.

Redan i upphandlingsskedet är det viktigt att entreprenören har tillgång till så mycket data som möjligt om tunneln. Följande punkter kan vara bra att överväga att bifoga vid upphandling (längre tunnel där tung utrustning behövs):

- Inspektionens syfte och omfattning. Vad resultaten skall användas till.
- Tidsramar för inspektionen. Om tidsramarna är mycket begränsade kan kanske flera ROV-system användas samtidigt.

- Relevanta ritningar, t.ex. tvär- och längdsektioner samt mer detaljerade ritningar där man kan förvänta sig få problem med framkomlighet eller delar som är intressanta att inspektera.
- Dokumenterade svaghetszoner och förstärkningar från byggtiden eller eventuella underhållsreparationer. Speciellt utstickande konstruktioner som armeringsjärn etc. kan bli ett hinder under inspektionen. Foton från byggtiden eller från eventuella tidigare underhållsarbeten kan ge värdefull information.
- Vilken vattenhastighet kan förväntas i tunneln under inspektionen. I vissa fall kan ett visst flöde vara en fördel. Kännedom om siktförhållanden och eventuell slam- eller påväxtförekomst i tunneln delges.
- Tillgängligheten till tunnarna. Behöver/kan man köra in i tunnarna med lastbil eller går det att nå inspektionens startpunkt med lastbil utifrån. Om tunneln har dålig tillgänglighet så kan det vara bra att få reda på om ROV-utrustningen går att förflytta med helikopter.
- Eventuella luftfyllda delar av tunneln. Delar över vattenytan kan inte sonarskannas. Om vattenytan nedströms tunneln är låg t.ex. på grund av att kraftstationen är avställd kan det kanske ge upphov till luft i tunneln.
- Vad skall ingå vid leverans och hur långt skall råmaterialet vara bearbetat.
- Inför en inspektion så är det värdefullt om anläggningsägaren i förväg kan sätta ut koordinater uppströms samt nerströms tunnelmynningen, som utföraren sedan kan referera sin data till under inspektionen.

Eftersom arbetet blir mycket intensivt under själva inspektionen är det viktigt att det praktiska fungerar enkelt som t.ex. leveranser med mat och tillgång till toaletter. Elkraftförsörjning till entreprenörernas system kan behöva tas fram, speciellt där mobila elverk med förbränningsmotor inte går att använda inne i tunnlar på grund av arbetsmiljöskäl.

## 5.2 REKOMMENDATION PÅ PRIORITERADE UTVECKLINGSAKTIVITETER

Med diskussionen som bakgrund läggs följande rekommendationer:

- Skapa en prioriteringsordning av vilka bergtunnlar som skall inspekteras. Då antalet tunnlar är så stort så behövs en prioritering. Detta ligger vanligen på respektive ägare och det är därför svårt att ge en entydig rekommendation för projekt inom Energiforsk. En väg framåt är att inom Energiforsk ta fram de viktigaste parametrarna som påverkar prioriteringsordningen.
- Tag reda på vilka prover eller analyser som behövs och kan utföras under vatten på förstärkningarna för att bestämma statusen på dem. Först när det är känt kan man se vilka metoder som är möjliga att utveckla för ROV-inspektioner. Denna utveckling sker i så fall lämpligen i samarbete med inspektionsentreprenörer.
- För att få jämförbara 3D-skanningar mellan olika mätillfällen som går att jämföra behövs en mängd information som t.ex. referenskoordinatsystem, punkttäthet, noggrannhet etc. Det rör sig om stora mängder data som kommer från 3D-scanning och det finns frågetecken runt hur filer skall lagras på ett framtidssäkert sätt. För en beställare och utförare skulle det underlätta med några korta rekommendationer hur data skall dokumenteras och lagras.



## 6 Referenser

- Andersson R., Hellström G., Andreasson P., Lundström S. (2019) Numerical Investigation of a Hydropower Tunnel: Estimating Localised Head-Loss Using the Manning Equation. *Water*.
- Antonelli G. (2018) *Underwater robots*. Fourth Edition, Springer.
- Berglund J. & Lindblom U. (2019) Åldrande vattenförande bergtunnlar. En förstudie: Ingenjörsgelogisk status. *Energiforskrapport 2019:626*.
- Bosell J. (2019) Presentation i Sundsvall 2019-11-19. Inspektion och fotogrammetri i vattenfyllda tunnlar. UW-Tech.
- Brende H., Lia L. & Nilssen B. (2018) FME HydroCen- Norsk storsatsning på vannkraft. Fjellspengingsdagen 2018, Oslo.
- Broch E. (2010) Tunnels and underground works for hydropower projects, - lessons learned in home country and from projects worldwide. Muir Wood Lecture 2010. *International Tunnelling and Underground Space Technology*.
- Broms B. & Heiner A. (1979) Förstärkning av lerzoner i berganläggningar. Statens råd för byggnadsforskning.
- Bruland A. & Thidemann A. (1991) Sikring av vanntunneler. SINTEF Bergteknikk, STF36.
- Bråtveit K., Bruland A., Brevik O. (2016) Rock falls in selected Norwegian hydropower tunnels subjected to hydropeaking. *Tunnelling and Underground Space Technology*.
- Bråtveit, K., Lia L., and Olsen N. R. B. (2012) An Efficient Method to Describe the Geometry and the Roughness of an Existing Unlined Hydro Power Tunnel. *Energy Procedia*.
- Brännfors S. (red), Hagerman Y., Kallin Å., Langefors U. & Mellin T. (1964) *Bergsprängningsteknik*. Bonniers.
- Christ R. & Wernli R. (2014) *The ROV Manual. A User Guide for Remotely Operated Vehicles*. Second edition. Elsevier.
- Digerud E. & Björnström J. (2019) Presentation i Sundsvall 2019-11-19. Varför och hur vattenfyllda tunnlar skannas. Norconsult.
- Draganovic A., & Johansson, F. (2010) Svällande leror i bergtunnlar - Förstudie. Befo, Rapport 101. Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- Edvardsson S. & Broch E. (2002) *Underground powerhouses and high pressure tunnels*. Hydropower development volume No. 14.
- Ellingsen F. (2019) Presentation i Sundsvall 2019-11-19. Erfarenheter från nyligen utförda inspektion av långa vattenfyllda tunnlar. Norwegian tunnel inspection AS

- Hibbard Inshore (2016) Statement of Qualifications. Dam services.
- Hultman R., Stille H. & Söder P. (1993) Ras i kraftverkstunnel, Gidböle. Stiftelsen Bergteknisk forskning, BeFo.
- Håkansson W. (2013) Kraftverkstunnlars beständighet – En studie om åldringsfenomen och nedbrytningsprocesser. Examensarbete, Lunds universitet.
- Loxus (2020) Hemsida. Hämtad den 15 januari 2020, från Loxus Technologies Oy: <http://www.loxus.com/>
- Moisan E., Charbonnier P., Foucher P., Grussenmeyer P., Guillemin S. & Koehl M. (2015) Adjustment of Sonar and Laser Acquisition Data for Building the 3D Reference Model of a Canal Tunnel. Sensors.
- Moisan E., Heinkele C., Charbonnier P., et al. (2017) Dynamic 3D Modeling of a Canal-Tunnel Using Photogrammetric and Bathymetric Data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
- Nordström E. & Eriksson D. (2019) Inventering av inre vattenvägsbesiktningar. Energiforskrapport 2019:566.
- Olofsson S. O. (1999) Modern bergsprängningsteknik. Applex.
- Palmström A. (2003) Ras i vanntunneler – Et vedlikeholdsproblem? Vassdragsteknisk forum, Oslo.
- Panthi K. K. (2014) Analysis on the Dynamics of Burst Debris Flood at the Inclined Pressure-Shaft of Svandalsflona Hydropower Project, Norway. Rock Mech Rock Eng.
- Salomonson J. & Thorsager P. (2008) Inspektionshandbok för bergtunnlar, Landsverk Färöarna. Ramböl.
- Seatools (2020) Hemsida. Hämtad den 15 januari 2020, från Seatools Netherlands <https://www.seatools.com/projects/remotely-operated-cleaning-machine-rocm/>
- Schjølberg I. & Utne I. B. (2015) Towards autonomy in ROV operations. IFAC PapersOnLine.
- Sundberg S. & Amsköld T. (2015). Inspektionsmetoder för inre vattenvägar i vattenkraftverk. Examenarbete, KTH.
- Söder P.-E., (2006) Besiktningsmanual för berganläggningar inom vattenkraft. Elforskrapport 06:84.
- Tajima F., Yamazaki T., Ishizuka O., et al. (2018) Development of a Small Drilling/Coring Machine for ROV to Get Cores at Multiple Places in One Dive. MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans.
- Trafikverket (2017) Inspektionshandbok för berganläggningar. Daterad 2017-11-30.

UW-Tech (2020) Hemsida. Hämtad den 15 januari 2020, från UW-Tech  
<https://www.uw-tech.se/utrustning/>

Vonach T. (2019) Personlig kommunikation.

# INSPEKTION AV VATTENFYLLDA BERGTUNNLAR

Det finns numera moderna verktyg som kan användas för att med olika typer av undervattensfarkoster i kombination med datoranalys få en uppfattning om tillståndet för konstruktioner under vatten.

Svensk och norsk vattenkraftindustri har under senare år genomfört tester av ny teknik för att inspektera bergtunnlar på ett säkert sätt. Samtidigt går utvecklingen mycket fort, vilket ger nya möjligheter för den tekniska förvaltningen av inre vattenvägar i berg.

Rapporten ger exempel på undervattensbaserade inspektioner av inre vattenvägar i berg och på intressanta kritiska konstruktionsdelar och skadesituationer. Den innehåller också en punktlista med några av de viktigaste punkterna att ta hänsyn till vid upphandling av entreprenör.

## 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](http://www.energiforsk.se)