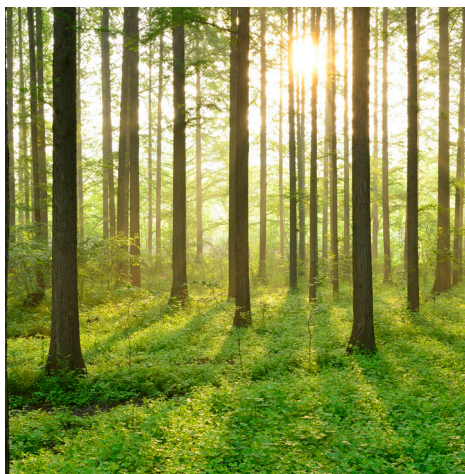


INSPEKTIONSMETODER FÖR INRE VATTENVÄGAR I VATTENKRAFTVERK

RAPPORT 2016:254



BETONGTEKNISKT PROGRAM
VATTENKRAFT





KTH ROYAL INSTITUTE
OF TECHNOLOGY

Inspektionsmetoder för inre vattenvägar i vattenkraftverk

Sebastian Sundberg

Tobias Amsköld

Juni 2015

TRITA-BKN. Examensarbete 447, Betongbyggnad 2015

ISSN 1103-4297

ISRN KTH/BKN/EX--447--SE

Inspektionsmetoder för inre vattenvägar i vattenkraftverk

SEBASTIAN SUNDBERG
TOBIAS AMSKÖLD

ISBN 978-91-7673-254-0 | © 2016 ENERGIFORSK

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

Förord

Att genomföra inspektioner av inre vattenvägar genom torrläggning är en tidsödande och kostsam process. Detta projekt har därför utförts med syfte att utvärdera till vilken grad inspektioner med undervattensfarkoster, ROV, kan användas som alternativ till inspektioner av inre vattenvägar, både aggregatnära och i till- och utloppstunnlarna. Resultatet från arbetet pekar på att besiktningar med ROV kan övervägas för flera olika typer av inspektioner.

Projektet har utförts som ett examensarbete av Sebastian Sundberg och Tobias Amsköld vid KTH inom Energiforsks betongtekniska program vattenkraft. Programmets intressenter är Fortum, Jämtkraft, Jönköping Energi, Karlstad Energi, Skellefteå Kraft, Sollefteåforsens AB, Statkraft och Vattenfall.

Sammanfattning

Den svenska vattenkraften står för nästan 50 % av landets elproduktion vilket gör dess konstruktioner till en viktig del av samhällets infrastruktur. För att ett vattenkraftverk ska fungera effektivt och säkert ställs höga krav på komponenternas funktion och kondition. I dagsläget genomförs därför rutinmässiga kontroller på, i och runt dessa anläggningar. För de aggregatnära inre vattenvägarna genomförs detta ca vart åttonde år i samband med reparationer av turbinerna, vilka då måste tömmas på vatten. För till- och utloppstunnlarna, som ofta är drivna i berg, finns det dock inte några sådana rutiner. Detta i kombination med att majoriteten av Sveriges vattenkraftverk har uppnått en ålder på över 50 år gör att branschen har börjat bli intresserade av att få kännedom om skicket på tunnlarna. Att genomföra inspektioner genom att torrlägga dessa är dock en tidsödande process som kräver att kraftverket är avstängt under en lång tid och därmed ger en stor ekonomisk förlust för ägaren.

Detta arbete har därför utförts med syfte att utvärdera till vilken grad inspektioner med undervattensfarkoster, ROV, kan användas som alternativ till inspektioner av inre vattenvägar, både aggregatnära och i till- och utloppstunnlarna. En litteraturstudie har genomförts, om vattenkraftverk, vanliga skador, dagens inspektionsmetoder samt hur en ROV är uppbyggd och fungerar. Arbetet innefattar även tre praktiska moment bestående av deltagande på en inspektion av torrlagda aggregatnära inre vattenvägar och en inspektion med ROV i en 2,5 km lång utloppstunnel samt egna försök med inhyrd ROV för att undersöka vilka typer av betongskador som är möjliga att detektera.

Resultatet från samtliga delar i arbetet pekar på att besiktningar med ROV kan övervägas för flera olika typer av inspektioner. För till- och utloppstunnlar är denna typ av inspektion många gånger den enda rimliga. För de aggregatnära inre vattenvägarna ger dagens inspektionsmetoder med torrläggning ett fullgott resultat, men ROV skulle kunna vara ett alternativ vid svårtillgängliga delar, t.ex. på grund av utformning eller stora läckage.

Nyckelord: Vattenkraftverk, inre vattenvägar, inspektionsmetoder, ROV, undervattensrobot, sonar, tilloppstub, tilloppstunnel, utloppstunnel, spiral, sugrör, AUV.

Abstract

Swedish hydro power accounts for nearly 50 % of the country's electricity production which makes the constructions within this production system an important part of the societal infrastructure. To ensure safe and efficient operation of these hydroelectric power plants high demands are put on the components function and condition. Therefore, routine inspections are carried out inside and around these facilities. For the waterways directly connected to the power station, such as penstocks, wicket gates and draft tubes, these checkups are made about every eight years simultaneously as planned repairs of the turbine, when the waterways have to be emptied. For the head and tail race tunnels, which often are driven in bedrock, there are no such routines. This, in combination with the fact that the majority of the Swedish hydroelectric plants have attained the age of over 50 years, has led to an increased interest within the industry in ways to increase their knowledge about the condition of these water passageways. To conduct inspections by draining the tunnels is however a very time consuming process that requires the power plant to be turned off for a long time causing a major financial loss for the owner.

The purpose of this master thesis is to assess the extent to which inspections with remotely operated vehicles, ROV, can be used as an alternative method for inspections of covered waterways, both those close to the power house and the head and tail race tunnels. A literature study of hydro power plants, common damages, current inspection methods and the construction and function of an ROV, has been conducted. The method also includes three practical activities, participation at inspections in drained waterways and at an ROV inspection of a 2.5 km tail race tunnel. Furthermore, tests with a rented ROV were carried out to investigate what type of concrete damages that are possible to detect using this method.

The result from all parts in this thesis indicates that examinations by ROV can be considered for several types of inspections. For head and tail race tunnels, this type of inspection is often the only reasonable method. For the waterways directly connected to the power station, current inspection methods by draining show good result. But the ROV could here be an alternative in inaccessible areas, for instance due to waterway design or heavy leakage for instance.

Keywords: Hydroelectric power plant, waterways, inspection methods, ROV, remotely operated vehicle, sonar, penstock, head race tunnel, tail race tunnel, wicket gate, draft tube, AUV.

Innehåll

1.	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte.....	2
1.3	Metod och avgränsningar	2
2.	Vattenkraftverkets komponenter.....	3
2.1	Dammkropp	3
2.2	Utskov.....	6
2.3	Kraftstation	6
2.4	Vattenvägar.....	10
3.	Tunneldrivning och bergförstärkning	17
3.1	Berg och dess svaghetszoner	17
3.2	Tunneldrivning genom tiderna	17
3.3	Bergförstärkningar för inre vattenvägar	21
4.	Nedbrytning, skador och ras	25
4.1	Nedbrytning av betong	25
4.2	Nedbrytning av berg och dess förstärkningar.....	32
4.3	Skador i aggregatnära inre vattenvägar	36
4.4	Ras i bergtunnlar.....	39
5.	Remotely Operated Vehicle (ROV).....	47
5.1	Klassificering av undervattensfarkoster	47
5.2	Klassificering av ROV:ar	47
5.3	Försörjningssystem.....	49
5.4	Sonar.....	51
5.5	Kamera och belysning	55
5.6	Flytkraft och stabilitet.....	57
5.7	Sammanfattningsvis om ROV:ar.....	58
5.8	Autonomous Underwater Vehicle (AUV).....	59
6.	Inspektionsmetoder i inre vattenvägar	61
6.1	Inspektioner i aggregatnära inre vattenvägar.....	61
6.2	Inspektioner i torrlagda bergtunnlar	63
6.3	ROV-inspektioner i inre vattenvägar.....	63
7.	Undersökningar i fält och laboratorium.....	69

7.1	Deltagande på inspektion av torrlagda aggregatnära inre vattenvägar	69
7.2	Deltagande på ROV-inspektion av vattenfylld utloppstunnel	75
7.3	Försök med ROV	79
8.	Diskussion och slutsatser	87
8.1	Kommentarer	87
8.2	Slutsatser	88
8.3	Förslag på fortsatt arbete	89
	Litteraturförteckning	91
	Bilaga	97

1. Inledning

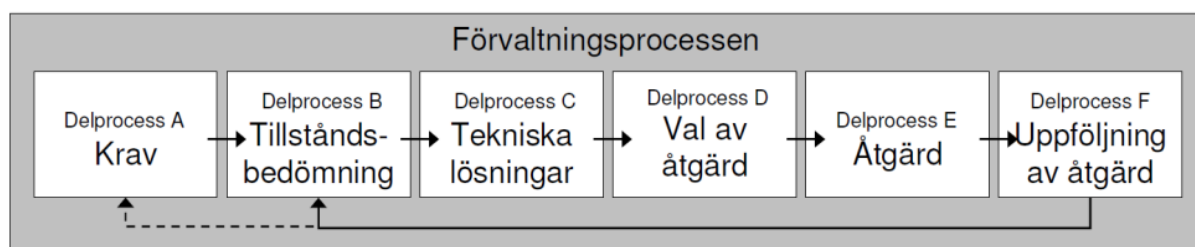
1.1 Bakgrund

I Sverige utnyttjades vattnets rörelseenergi för elproduktion första gången 1882 (Energimyndigheten, 2011). Utbyggnad i större skala påbörjades sedan under 1910-talet för att nå sin kulmen 1950-70 (Vattenfall, 2008). Idag finns det ca 1800 vattenkraftverk i Sverige, varav ungefär 200 klassas som större med en effekt på 10 MW eller mer. Cirka 50 av dessa har en effekt över 100 MW (Energimyndigheten, 2011).

De senaste 20 åren har den svenska vattenkraften stått för en stor del av landets totala årliga elproduktion med ett genomsnitt på ca 49%, vilket motsvarar ungefär 72 TWh/år. Detta gör att vattenkraften tillsammans med kärnkraften står för ca 87% av all elproduktion i Sverige och är därmed en viktig del av den svenska infrastrukturen (Energimyndigheten, 2014).

De flesta vattenkraftanläggningar i Sverige byggdes under perioden 1900 till 1970 varför stora delar av beståndet har en ålder på långt över 50 år. Detta i kombination med att uppskattade livslängder för kraftverksbranschens anläggningar är 50-160 år resulterar i att det beräknade reparationsbehovet kommer att öka markant under kommande decennier. Det amerikanska forskningsprogrammet REMR visar till exempel på ett klart samband mellan ökande medelålder på vattenkraftanläggningar och antalet skador som uppkommit på grund av undermålig betong. För att upprätthålla en hög drift- och säkerhetsmässig prestanda under lång tid så behövs därför kontinuerlig information om dessa konstruktioners kondition, vilket inhämtas via olika typer av inspektionsmetoder (Bernstone, 1999).

För att öka möjligheterna att genomföra rätt åtgärder vid rätt tidpunkt rekommenderar Energiforsk AB att arbeta efter en strukturerad process med sex delprocesser för teknisk förvaltning av betongkonstruktioner, se Figur 1.1. Den andra processen i ordningen, *Delprocess B: Tillståndsbedömning*, innefattar kunskapen om nedbrytnings- och skademekanismer samt tillstånds- och livslängdsbedömningar. För att kunna göra dessa bedömningar krävs det att inspektioner görs regelbundet där information om tillståndet för relevant konstruktionsdel inhämtas.



Figur 1.1 Förvaltningsprocessen och dess delprocesser.

I dagsläget sker inspektioner av de aggregatnära inre vattenvägarna, så som tilloppstub, spiral och sugrör, ca vart åttonde år efter en förutbestämd tidsplan. Dessa inspektioner utförts oftast genom att utrymmena först torrläggs varefter konstruktionsytorna undersöks. Ibland måste även arbetsställningar monteras i sugröret eller tilloppstuben för att ytorna ska kunna inspekteras (Persson, 2015a).

För långa tilllopps- och utloppstunnlar, vilka ofta är drivna i berg, utförs dessa inspektioner ytterst sällan då det är en kostsam process där tunnarna måste torrläggas vilket resulterar i ett längre driftstopp. På grund av detta är informationen bristfällig gällande dessa utrymmes kondition. Vattenfall Vattenkraft förfogade i början av 1990-talet över egna undervattensfarkoster (Remotely Operated Vehicle, ROV) som då användes regelbundet för inspektioner av inre vattenvägar, vilket innebar att tunnarna inte behövde torrläggas. Denna typ av verksamhet upphörde dock att bedrivas internt på grund av en rad faktorer enligt Huss (2007). Bland annat pekas på att nyttan av kontrollsättet i kombination med kostnaden ej var tillfredställande samt det faktum att en av Vattenfalls ROV:ar fastnade i en vattentunnel då den hyrdes ut till en extern kund. Idag finns ett antal företag på den svenska marknaden som sysslar med inspektioner av bland annat inre vattenvägar med ROV.

1.2 Syfte

Syftet med detta arbete är att utvärdera till vilken grad inspektioner med ROV kan implementeras som tillägg och komplement till de inspektioner som i dagsläget sker i vattenkraftsverkens inre vattenvägar.

1.3 Metod och avgränsningar

Inledningsvis genomfördes en litteraturstudie för ökad förståelse om hur ett vattenkraftverk är uppbyggt och hur dess delkomponenter bryts ner. Information kring detta inhämtades bland annat ur rapporter, arbeten och artiklar från källor som t.ex. Energiforsk AB, Vattenfall AB, Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo) samt diverse sökmotorer. Vidare så har en kartläggning gjorts över olika inspektionsmetoder för inre vattenvägar som i dagsläget genomförs på svenska vattenkraftverk. En litteraturstudie utfördes även för att samla information och skaffa förståelse kring hur en ROV är uppbyggd och fungerar. Muntlig information har löpande inhämtats från personal på Vattenfall AB samt från branschfolk och företagsägare som bedriver ROV-inspektioner.

För praktisk anknytning genomfördes tre praktiska delmoment bestående av deltagande på inspektion av torrlagda aggregatnära inre vattenvägar, deltagande på ROV-inspektion av vattenfylld utloppstunnel samt försök med ROV i kontrollerad miljö. Dessa delmoment utfördes för att återkoppla till den teori som var inhämtad från litteraturstudierna.

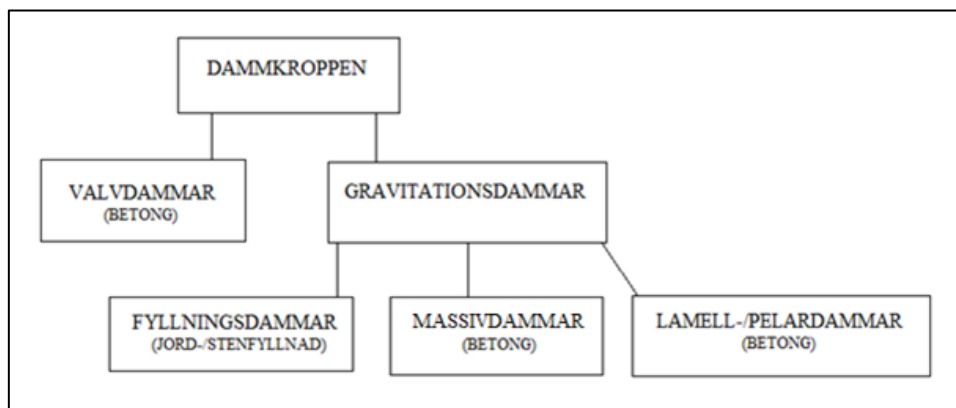
Under arbetets gång har ett par avgränsningar definierats. Rörande skador så har detta arbete fokuserat på uppkomst, utseende och risker med dessa i inre vattenvägar. Detektionen har endast förutsatt göras visuellt och inga andra oförstörande eller förstörande provningsmetoder har diskuterats. Inte heller förslag på reparationer och åtgärder av uppkomna skador har behandlats. Företag som blivit kontaktade under arbetet har gemensamt att de alla är verksamma i Sverige (även fast alla inte har sitt huvudkontor här), varför företag som endast är aktiva utomlands ej har blivit representerade på något sätt. Vidare så har ingen djupare analys gjorts av övergripande kostnader för en torrlägningsinspektion kontra ROV-inspektion då det i sig hade kunnat vara ett fristående arbete p.g.a. mängden faktorer som spelar in.

2. Vattenkraftverkets komponenter

Processen för att omvandla rörelseenergi i vatten till elektricitet är beroende av att komponenterna i ett vattenkraftverk är korrekt konstruerade och funktionsdugliga. Till att börja med däms vatten upp i ett magasin bakom en dammkropp, som oftast är konstruerad av betong eller fyllningsmaterial. Det uppdämda vattnet leds sedan genom vattenvägar till kraftstationen där rörelseenergin omvandlas till elektricitet med hjälp av turbin och generator, varefter det återförs till vattendraget. Med hjälp av så kallade utskov regleras vattennivån i magasinet när flödena i vattendraget överstiger den mängd vatten som kan föras genom turbinerna.

2.1 Dammkropp

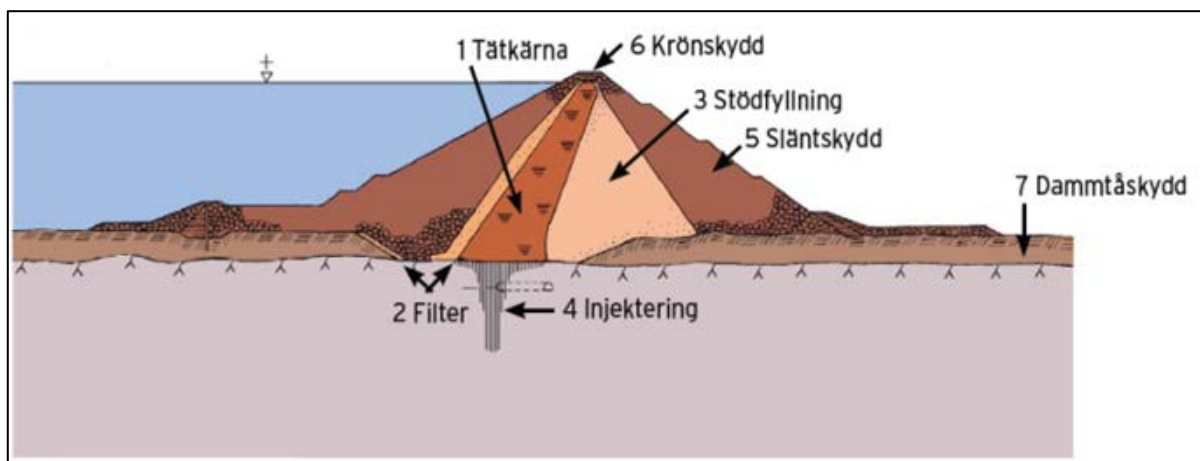
Dammar kan delas upp i kategorier baserat på ett antal olika attribut, generellt görs det efter hur de verkar statiskt. Detta leder till de två huvudkategorierna gravitationsdammar och valvdammar (Ansell et al. 2007). Gravitationsdammar kan sedan delas upp i underkategorierna fyllnads-, massiv- och lamelldammar. Massiv-, lamell- och valvdammarna har gemensamt att alla är tillverkade av betong, se Figur 2.1.



Figur 2.1 Schematisk beskrivning av dammtyper

2.1.1 Fyllnadsdamm

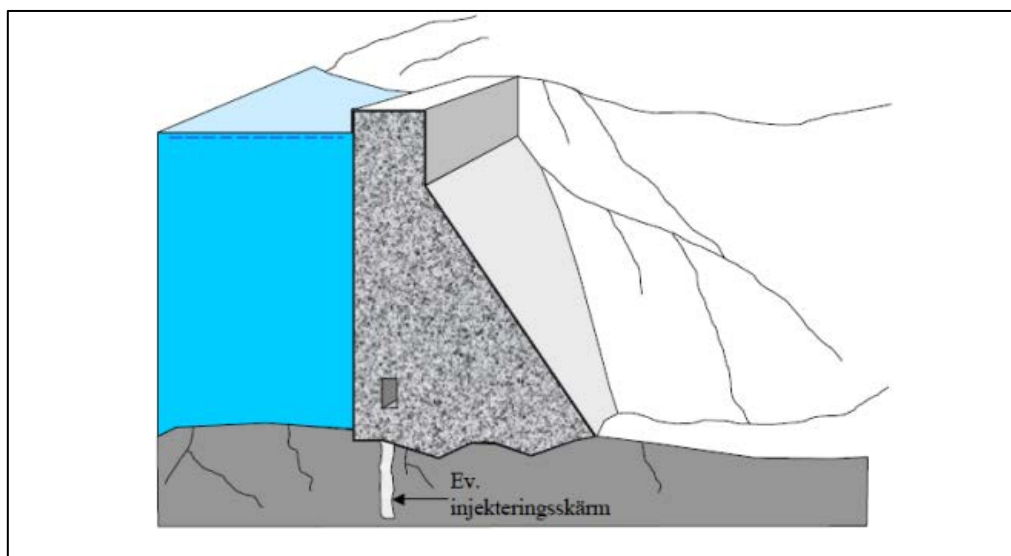
Fyllnadsdammen är den vanligast förekommande dammtypen i Sverige och konstruktionen är generellt sett bäst lämpad som låga och medelhöga dammar (Vattenfall, 2008). Denna dammtyp är uppbyggd av löst liggande material som sedan packas. Fyllnadsdammarna delas in i jordfyllnadsdammar och stenfyllnadsdammar beroende på vad huvudkomponenten i deras volym består av. Dessa är med avseende på stabilitet en mjuk damm vilket kan vara till fördel vid förändrade förhållanden då de i viss utsträckning kan anpassa sig (Spade, 1999). På grund av fyllnadsdammens verkningsätt består de ofta av stora tvärsektioner med basbredder på över 100 meter. Ett visst grundläggningsarbete i form av injektering är nödvändigt för att begränsa vattenströmningar under dammen. Fyllnadsdammens principiella uppbyggnad kan ses i Figur 2.2.



Figur 2.2 Fyllnadsdammens principiella uppbyggnad (Vattenfall 2008).

2.1.2 Massivdamm

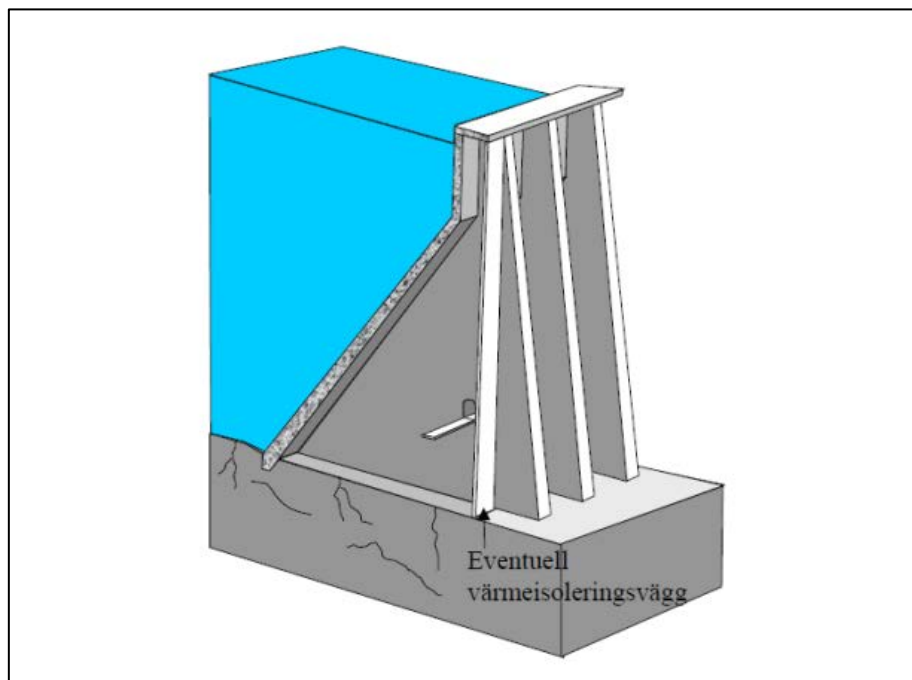
Massivdammen verkar genom att dess egentyngd för ner vattnets tryckkraft till marken via den friktion som utvecklas. Då dessa är konstruerade av betong kan de få en betydligt smäkrare utformning än fyllnadsdammarna och konstruktionen används i första hand för medelhöga till höga dammar (Vattenfall, 2008). För att erforderlig tyngd och stabilitet ska erhållas utformas massivdammens tvärsnitt triangulärt, vilket gör att kontaktytan blir stor mot undergrunden (Vattenfall, 2008). Detta kan dock medföra problem då det uppstämda vattnet kommer att påverka dammen med ett uppåtriktat tryck när det tränger in i den underliggande grunden. Enligt Spade (1999) kan förmodligen många ras av massivdammar förklaras med att det uppåtriktade vattentrycket inte tagits med i konstruktionsberäkningarna. Se Figur 2.3 för schematisk illustration av massivdamm.



Figur 2.3 Massivdammens principiella utformning (Ansell et al 2007).

2.1.3 Lamell-/pelardamm

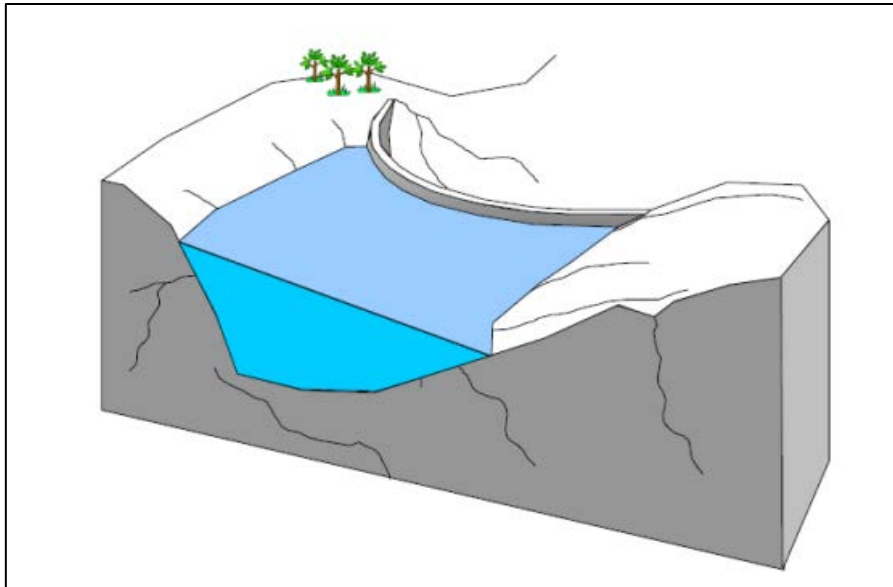
I Sverige kallas denna dammtyp för lamelldamm medan den utomlands går under namnet pelardamm (Spade, 1999). Precis som massivdammen är lamelldammen en gravitationsdam. Principiellt är den designad genom att relativt tunna, täta skivor (lameller) är lutade på uppströmssidan. Dessa gör att delar av kraften från vattnet hjälper till att trycka ner och stabilisera konstruktionen (Kuhlin, 2015a). Dessa lameller är stödda av pelare på nedströmssidan, se Figur 2.4.



Figur 2.4 Lamelldammens utformning (Ansell et al 2007).

2.1.4 Valvdamm

Valvdammen är principiellt en krökt vägg av armerad betong med hög hållfasthet som står placerad med sin konvexa sida uppströms. Krafterna från det uppdämda vattnet tas upp genom valvverkan och fördelas ut till de vertikala kontaktytorna mot bergväggen, se Figur 2.5, (Ansell et al. 2007). Denna dammtyp är relativt ovanlig i Sverige då de flesta vattendragen ligger i dalgångar som är för breda och låga för att motivera valet att bygga dammar i valvform. Optimala förutsättningar är djupt nedskurna vattendrag i bergsklyftor, där dämningshöjden snabbt blir stor, samt att det finns stabila bergsidor att fördela lasterna på. De valvdammar som ändå konstruerats i Sverige har relativt stora krönlängder och låga höjder (Spade, 1999).



Figur 2.5 Valvdammens utformning (Ansell et al 2007).

2.2 Utskov

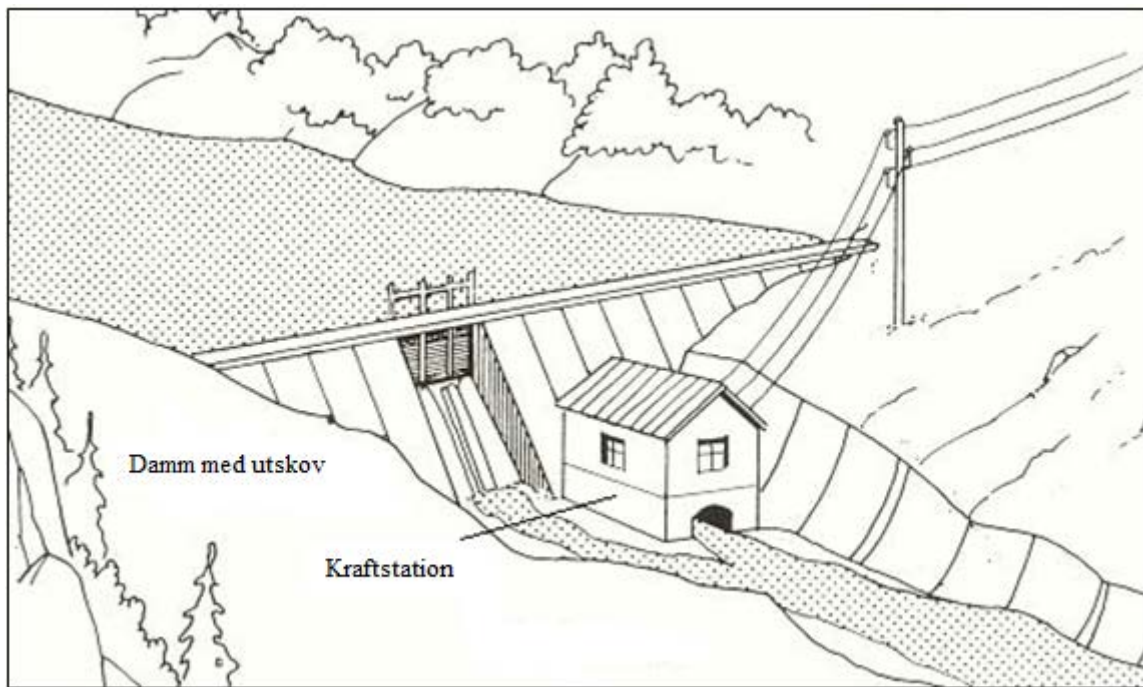
För att reglera vattennivån i magasinet används utskov. Vid stora flöden i uppdämda vattendrag klarar inte turbinerna att ta till vara på allt vatten. För att då undvika okontrollerad vattenförlust runt och över dammen finns olika typer av utskov som är noga dimensionerade (Kuhlin, 2015b). En damm har ofta utskov på ett antal ställen för att möjliggöra styrning av var vattnet ska släppas igenom. Två typer av utskov är överflödesutskov, som helt enkelt är ett lägre segment i dammen, och segmentluckor, som öppnas i nederkant, se Figur 2.6.



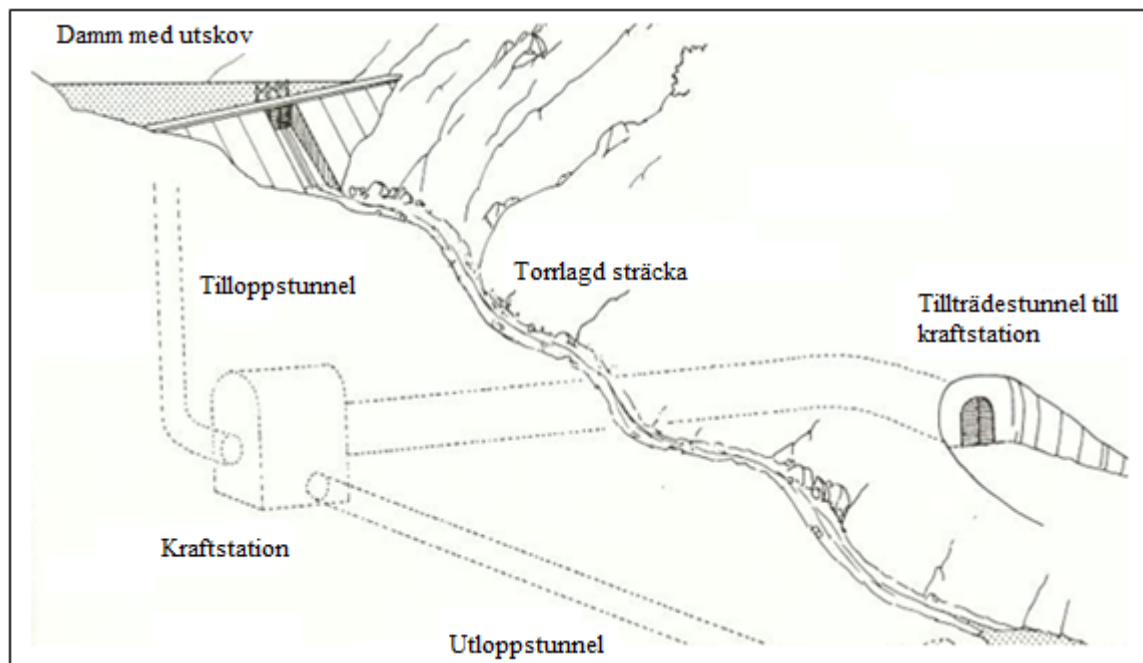
Figur 2.6 Två olika utskov. T.v. ett överflödesutskov och t.h. två segmentluckor där det vänstra är öppet och vatten släpps igenom.

2.3 Kraftstation

Det är i kraftstationen som vattnets rörelseenergi omvandlas till elektricitet med hjälp av turbinen och generatoren. Den kan vara placerad i direkt anslutning till dammkroppen, vilket är vanligt vid fallhöjder på ca 5-35 meter, men kan även vara belägen flera kilometer bort, se Figur 2.7 och 2.8. Kraftstationen är då ofta insprängd i berget och vatten från dammen når stationen genom långa bergtunnlar. På detta sätt kan fallhöjder uppemot 300 meter erhållas i Sverige (Vattenfall, 2008).

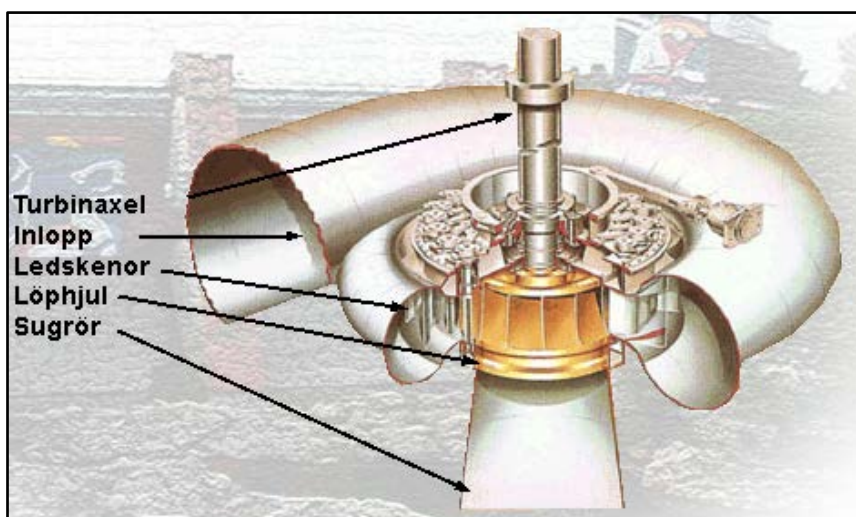


Figur 2.7 Kraftstationen ligger i direkt anslutning till dammkroppen. Modifierad efter Spade (1999).

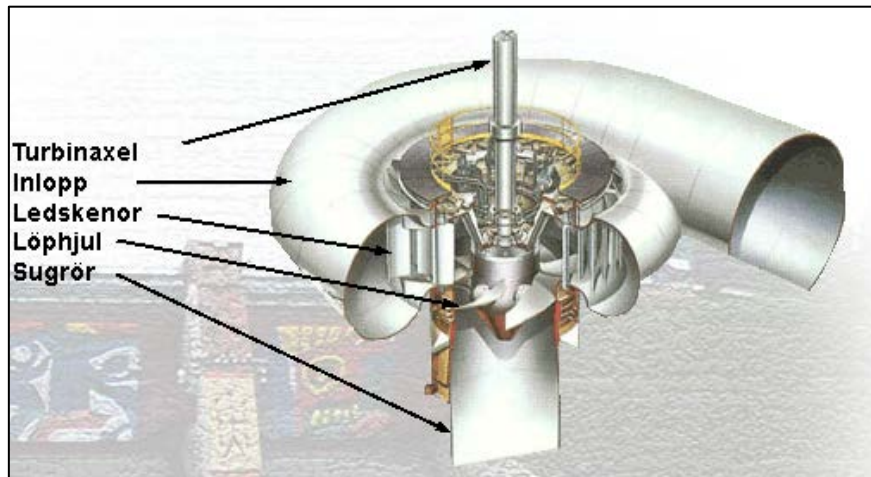


Figur 2.8 Kraftstation är insprängd i berg, ibland många kilometer från dammkroppen. Modifierad efter Spade (1999).

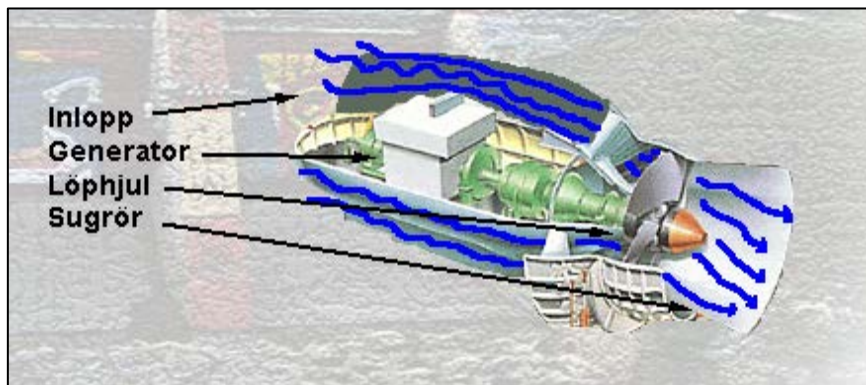
När det strömmande vattnet når turbinen omvandlas dess rörelseenergi från ansamlad fallhöjd till rotation hos turbinen. Denna rotation görs om till elektricitet i generatoren som sedan transformeras om och skickas ut på stamnätet (Vattenfall, 2008). De vanligast förekommande turbin typerna är francis-, kaplan-, rörkaplan- och peltonturbin, se Figur 2.9 – 2.12. Skillnaderna mellan turbinerna är hur vattnet passerar dessa och effektiviteten för olika fallhöjder (Kuhlin, 2015c). Francisturbinen passar bäst för fallhöjder uppemot 450 meter och fungerar genom att vattnet efter ansamlad fallhöjd förs in i en spiral som går runt turbinen. Genom inställningsbara ledskenor pressas sedan vattnet in mot turbinbladen vinkelrätt gentemot dess axel. Ledskenorna mellan spiralen och turbinen kan vinklas för att reglera den vattenmängd som ska passera. Kaplanturbinen fungerar fram till spiralen på samma sätt som francis men används vid fallhöjder på ca 70 meter. Det unika med kaplanturbinen är att dess turbinblad kan justeras genom vridning och därmed vinkeländring mot vattnet och på så vis anpassas för olika flöden. Rörkaplanturbinen kallas även för rörturbin och bulb-turbin. Vattnet passerar denna i samma riktning som axeln och används vid låga fallhöjder. Peltonturbinen kan beskrivas som ett massivt nav på vars ytterkant skålar är fastsatta. Precis innan turbinen stryps vattnet i ett antal ventiler och trycks genom hål mot skålarna vilket får turbinen att rotera. Målet med alla turbin typer är att utvinna en så stor andel av vattnets rörelseenergi som möjligt och det medför att efter ett optimalt utformat vattenkraftverk kommer vattnet att ha en låg hastighet efter passage av turbinen. För vattenkraftverk med stora vattenflöden och därmed hög potential effekt räcker det sällan eller aldrig med endast en turbin, utan flera aggregat behöver installeras för att uppnå optimal verkningsgrad.



Figur 2.9 *Francisturbin, vattnet passerar en spiral varifrån det pressas genom ledskenor mot turbinbladen och faller sedan ner i sugröret (Kuhlin 2015c).*



Figur 2.10 *Kaplanturbin, vattnet passerar en spiral varifrån det pressas genom ledskenor mot turbinbladen och faller sedan ner i sugröret. Notera löphjulets blad som kan vinklas (Kuhlin, 2015c).*



Figur 2.11 *Rörkaplanturbin, vattnet passerar i linje med turbinaxeln (Kuhlin 2015c).*

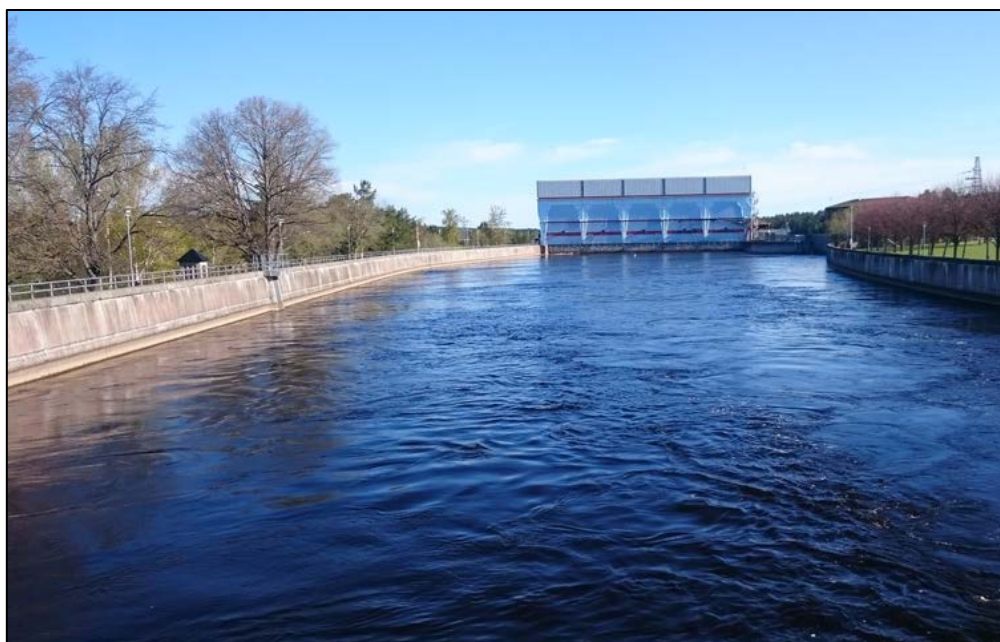


Figur 2.12 *Peltoneturbin, massivt nav med skålar längs med ytterkanten (Kuhlin 2015c).*

Vissa vattenkraftverk kompletterar vindkraften genom att dra ner sin produktion vid gynnsamma vindförhållanden. Vatten däms då istället upp i magasinet och bildar på så sätt en buffert. Eftersom att det krävs en stor mängd energi för att starta upp rotationen hos en stillastående turbin med turbinaxel hålls denna roterande även vid avslagen produktion. Detta möjliggörs genom att en luftficka skapas med övertryck runt turbinen som då kan hållas roterande med en relativt liten motoreffekt. Vid produktionsbehov från vattenkraftverket kan detta då startas med omedelbar verkan (Billstein, 2015).

2.4 Vattenvägar

Via olika typer av vattenvägar transporteras vattnet till och från kraftstationen. Den första vattenvägen brukar ofta vara en tilloppskanal som leder vattnet till intagsluckor mot de inre vattenvägarna, se Figur 2.13. Kanaler kan även finnas i slutet av vattenvägarna men benämns då som utloppskanal. Eftersom detta arbete endast behandlar inre vattenvägar kommer ingen utförligare beskrivning av till- eller utloppskanaler att göras.

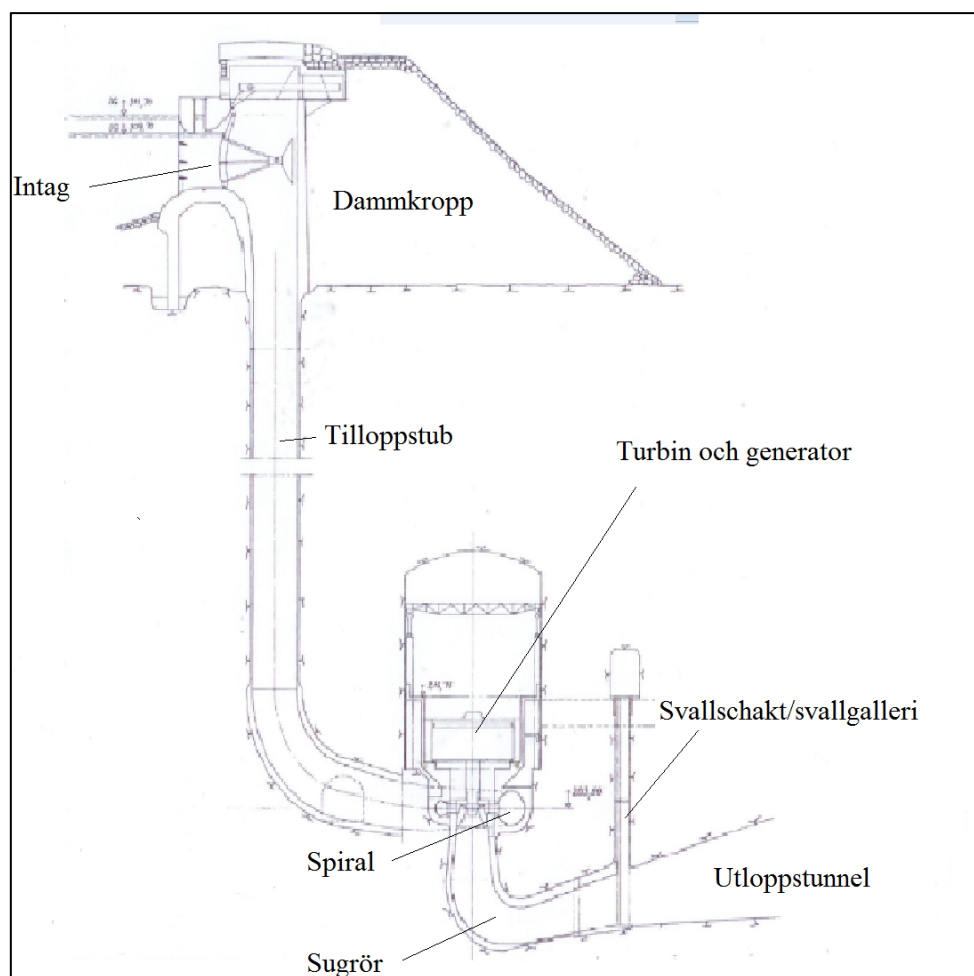


Figur 2.13 *Tilloppskanalen i Älvkarleby.*

Inre vattenvägar definieras som övertäckta, helt eller delvis vattenfyllda utrymmen, d.v.s. det finns ingen fri vattenyta (Persson, 2015a). De inre vattenvägarnas uppgift, innan kraftstationen, är att samla fallhöjd. Dessa kan se ut på helt olika sätt beroende på var kraftstationen är lokaliserad i förhållande till dammen. Trä- och ståltuber ovan mark, betongtuber genom dammkroppen och vid längre sträckor tunnlar i berg är vanliga typer av inre vattenvägar till kraftstationer, se Figur 2.14. Efter kraftstationen leds oftast vattnet ut genom horisontella tunnlar eller tuber (Spade, 1999). Detta arbete kommer främst att behandla inre vattenvägar i berg (med och utan förstärkning) samt betongtuber genom dammkroppen, vilket är de vanligaste typerna, d.v.s. inga tuber ovan mark, se Figur 2.15.



Figur 2.14 *Tilloppstub ovan mark (Spade 1999).*

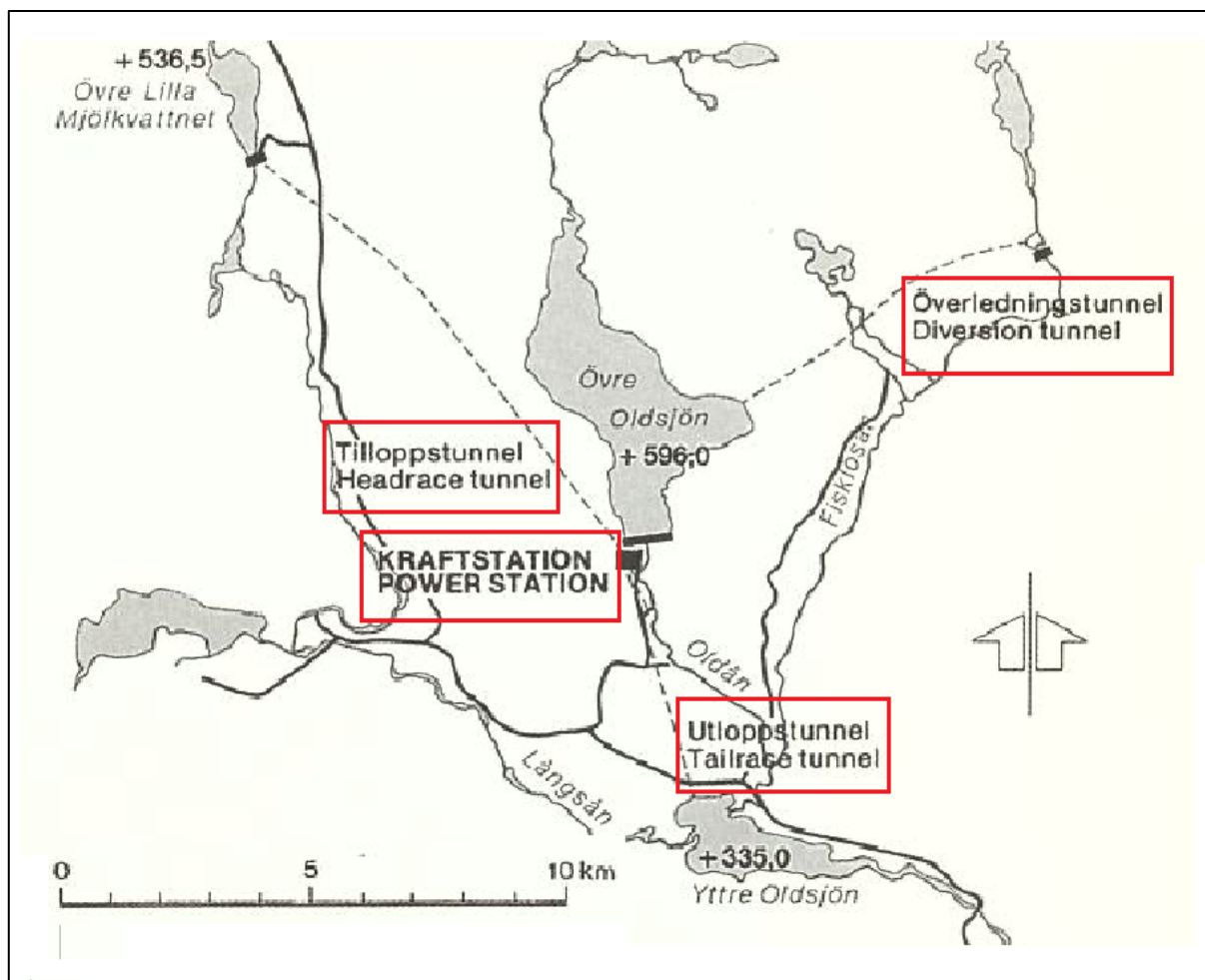


Figur 2.15 *Schematisk bild av inre vattenvägar samt kraftstation och dammkropp.*

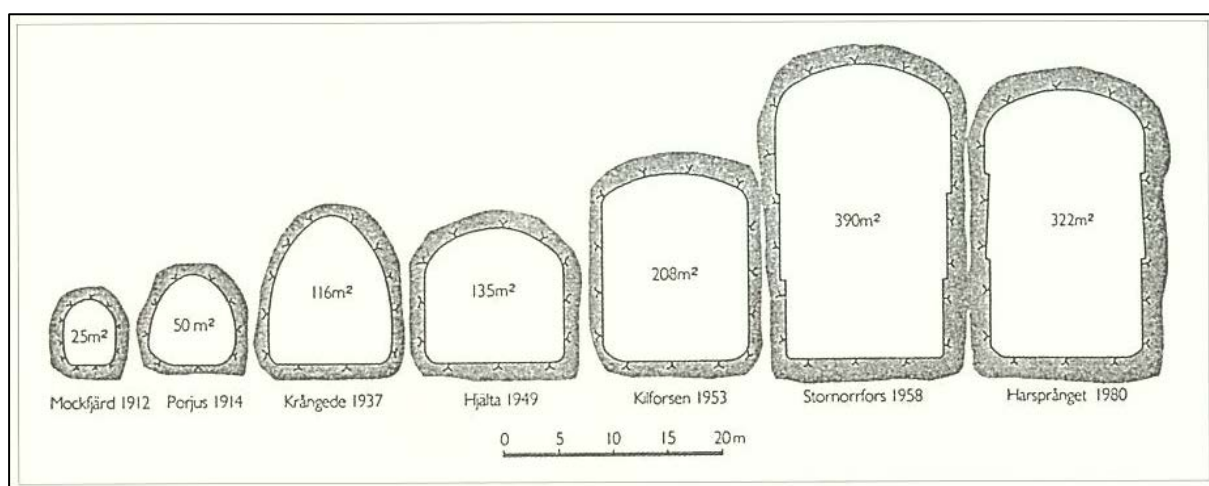
Vid intaget finns intagsluckan som används för att stoppa vattnet från att ta sig till stationen vid t.ex. nödsituationer, inspektioner och reparationer. Vattenmängden som ska släppas igenom till kraftstationen regleras inte här d.v.s. intagsluckan är antingen helt öppen eller helt stängd. Luckan är oftast gjord av stål. Precis innan intagsluckan finns ett galler som förhindrar att is och annat material tar sig till turbinen som då riskerar att skadas. Vissa vattenkraftverks intagsgaller har möjligheten att värmas upp med direktverkande el för att smälta bort is som annars kan täppa igen intaget (Billstein, 2015).

I tilloppstuben återfinns den största delen av kraftverkets fallhöjd vilket omvandlar vattnets lägesenergi till rörelseenergi. Tilloppstuben är inte alltid helt vertikal så som visas i Figur 2.15 utan kan ibland vara lutande i t.ex. en vinkel på 45°. Tilloppstubens ytor är släta och raka för att få en låg råhet. Det är också önskvärt med en stor tvärsnittsarea eftersom vattnets hastighet då kan vara lägre vilket innebär att strömningsförlusterna blir mindre jämfört med en liten tvärsnittsarea med samma flöde (Spade, 1999). Dessa tuber är oftast gjutna i betong och kan ibland vara inklädda med stål. I slutet av tilloppstuben övergår vattnet oftast till en spiral, beroende på vilken typ av turbin som används. Spiralen går runt hela turbinhuset för att få ett jämt flöde till turbinen. Vattnet strömmar sedan genom turbinen ner till sugröret och eventuell sugrörsförlängning. Sugröret är utformat så att en sugeffekt bildas för vattnet från turbinen för att öka effekten, därav namnet. I breda sugrör där taket har en stor spännvidd kan det även finnas en mellanvägg för att stabilisera konstruktionen som påverkas av stora krafter från det strömmande vattnet. I botten finns det även en ventil som används för tömning av vatten samt upptrycks-/drängagehål för att minska vattentryck underifrån. Även spiralen och sugröret består vanligen av betong och stål men i vissa kraftverk är sugörets väggar och tak lämnat som berg, både förstärkt och oförstärkt (Persson, 2015b). Det ovan nämnda delarna: intag, tilloppstub, spiral samt sugrör, kommer vidare i rapporten att benämnas som ”aggregatnära inre vattenvägar”.

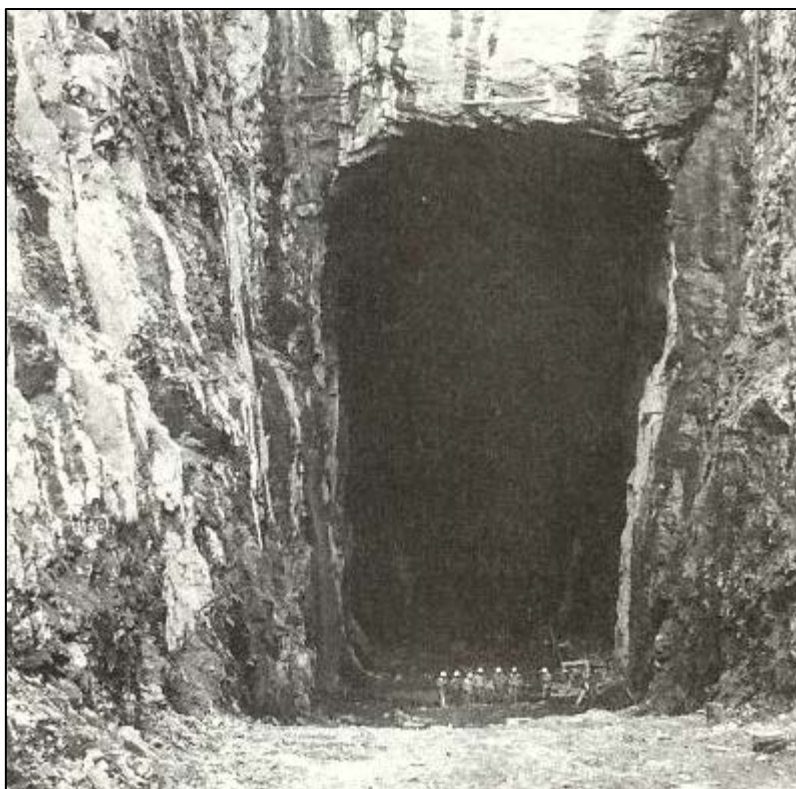
Efter sugröret förs vattnet antingen direkt tillbaka till vattendraget, som i Figur 2.7, eller via en horisontell utloppstunnel. Dessa tunnlar är oftast utsprängda i berg. Det kan även finnas bergtunnlar som för vattnet till tilloppstuben eller direkt till kraftstationen vilka benämns då som tilloppstunnlar. En tredje variant är överledningstunnlar som kopplar ihop två vattendrag med syftet att få en större vattenmängd till det vattendrag som kraftstationen är direkt kopplad till (Spade, 1999). I befintliga svenska kraftverk är bergtunnlarna mellan 0,01 - 17,8 km långa och tvärsnittsarean varierar från några få kvadratmeter upp till 390 m², se Figur 2.16 - 2.18. Om kraftverket är utformat med en tilloppstunnel finns det även en stenficka vars uppgift är att samla upp grus och stenblock som transporteras med vattnet innan det når kraftstationen. Stenfickan är därför placerad i slutet av tilloppstunneln (Persson, 2015b).



Figur 2.16 Utlopps-, tillopps- och överledningstunnel för Oldens kraftstation. Modifierad efter Spade (1999).



Figur 2.17 Tvärsnittsareor för tunnlar i olika vattenkraftverk (Spade, 1999).



Figur 2.18 Stornorrfors utloppstunnel på 390 m² är den största i Sverige. Notera personerna som står i nederkant av tunnelmynning (Spade 1999).

En genomgång av de svenska vattenkraftverkens bergtunnlar har gjorts och sammanställts, se Tabell 2.1. Statistiken är hämtad från Norling (2015) och Kuhlin (2015d). Tabellen visar antalet tunnlar på storskaliga vattenkraftverk, d.v.s. vattenkraftverk med en effekt över 10 MW. På grund av svårigheter att erhålla information om vilka vattenkraftverk som har tunnlar och deras längder är tabellen inte helt fullständig. Dock ger denna en bra överblick av tunnelnarnas längd och antal. För vattenkraftverk som har flera aggregat är de aggregatnära inre vattenvägarna dedikerade för just ett aggregat medan bergtunnlarna vanligtvis är till för flertalet aggregat, d.v.s. de aggregatnära inre vattenvägarna kopplas alla samman till en gemensam utloppstunnel. Mellan sugröret och utloppstunnel finns det ofta en lucka som används för att vatten från tunneln inte ska rinna tillbaka till sugröret vid torrläggning av denna.

Tabell 2.1 Antal och längder på tillopps-, utlopps- och överledningstunnlar i de svenska vattenkraftverken. Sammanställt från Norling (2015) och Kuhlin (2015d).

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

Stora tryckförändringar uppstår vid start och stopp av produktionen. Dessa tryckförändringar kan skapa skador på de inre vattenvägarna. För att undvika sådana skador utformars vattenkraftverken med ett svallgalleri/svallschakt som oftast är placerat efter

sugröret, vars uppgift är att ta hand om och dämpa de svallvågor som kan skapas vid plötsliga tryckförändringar (Spade, 1999).

Det finns ofta tillträdesluckor till de inre vattenvägarna och beroende på hur dessa är konstruerade är luckorna placerade på olika ställen. Ofta finns det ett stegschakt ner till sugröret, annars kan åtkomst till sugröret fås via turbinen där det finns tillträdesluckor. Spiralen nås genom manluckor. Till tilloppstubens botten och topp finns ofta möjlighet till access. Tillträde till bergtunnlarna fås endast genom tunnens mynning och via sugröret/tilloppstuben. Det kan även finnas påslag ner till tunnarna som användes vid drivningen, dock är dessa många gånger igenfyllda med bergmassor (Persson, 2015b).

3. Tunneldrivning och bergförstärkning

Tillopps-, utlopps- och överledningstunnlarna är i de flesta fall dragna i berg och vanligtvis drivna med antingen borra-spränga metoden eller med tunnelbormningsmaskin, TBM. Vid bergpartier av sämre kvalitet, så kallade svaghetszoner, är det viktigt att stabilisera tunnarna med olika typer av bergsförstärkningar.

3.1 Berg och dess svaghetszoner

En bergart är uppbyggd av en eller flera mineraler. Beroende på kornstorleken och mineralsammansättningen får bergarten olika egenskaper t.ex. hållfasthet och hårdhet. Oftast ger ett finkornigt mineral högre hållfasthet (Brännfors, 1964). Vissa bergarter kan vara så mjuka att de går att bryta sönder med fingrarna medan andra är så hårda att de håller för ett tungt hammarslag. En viktig skillnad mellan bergarter och konstruktionsmaterial, så som stål och betong, är anisotropin. Hos bergarter kan egenskaperna vara distinkt skilda från varandra i olika riktningar (Nilsen & Thidemann, 1993), t.ex. så tål en skiffrig bergart högre påkänning vinkelrätt mot skifferheten gentemot parallellt med denna (Brännfors, 1964).

Ett av de största problemen med tunnelbyggande i berg är så kallade svaghetszoner (Nilsen & Thidemann, 1993). Det finns två stycken huvudkategorier av dessa:

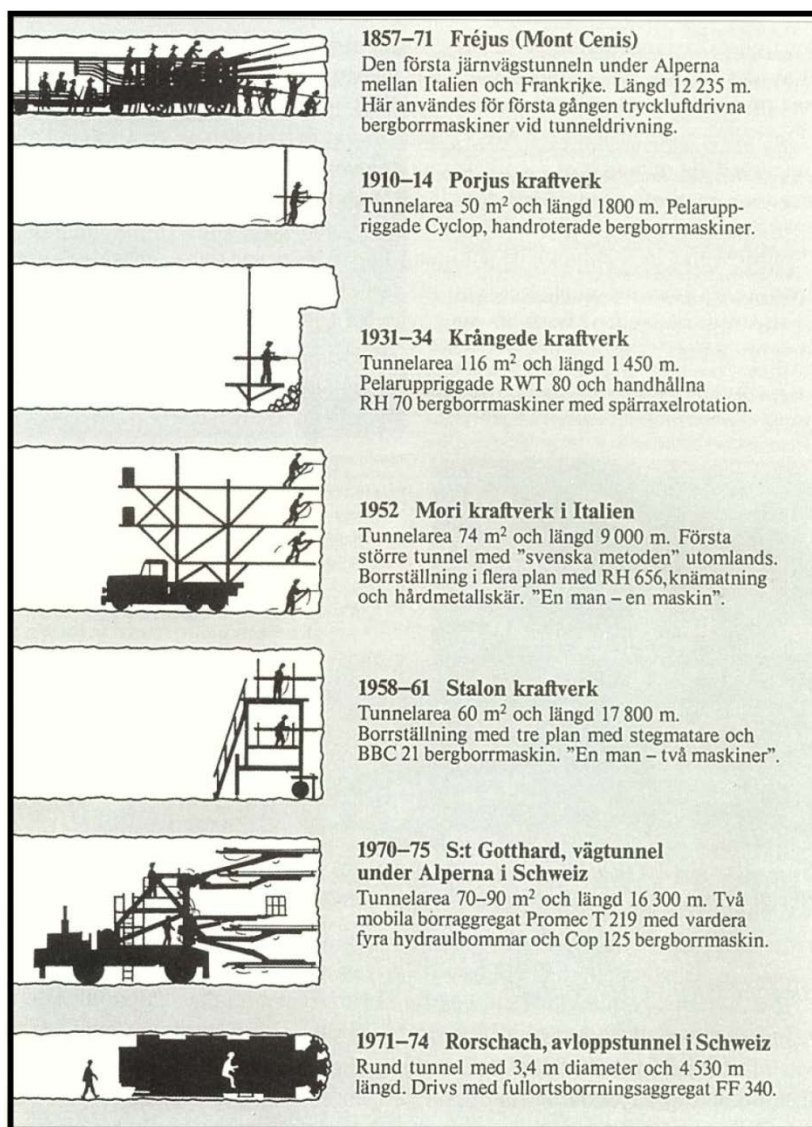
1. Lager och skikt av särskilt svagt berg
2. Spricksystem och krosszoner

Vissa lager av berg kan ha sämre hållfasthet än andra eftersom de innehåller svagare mineraler, som leramineraler och talk, eller på grund av bindingarna mellan mineralkornen har försvagats (Nilsen & Thidemann, 1993). Dessa lager kan ha olika stupning och strykning, d.v.s. lutning och riktning i horisontalplanet, vilket måste uppmärksammas vid tunneldrivning då valet av förstärkning kommer att grundas på dessa. De flesta sprickor har uppkommit vid bergarternas stelning medan krosszoner har bildats av förkastningar eller andra tektoniska rörelser (Brännfors, 1964). Svaghetszoner består oftast av bergfragment i olika storlekar, likt morän (Nilsen & Thidemann, 1993). Lera förekommer också i svaghetszoner och har bildats genom att mineraler eller hela bergarter brutits sönder av kemisk vittring (Rankka, 2003). De flesta svaghetszoner kan observeras som klyftor och nedsänkningar på markytan och sträcker sig neråt i berget. Svaghetszoner förekommer på alla slags djup i berget och vid tunneldrivning blir det därför viktigt att förstärka dessa zoner.

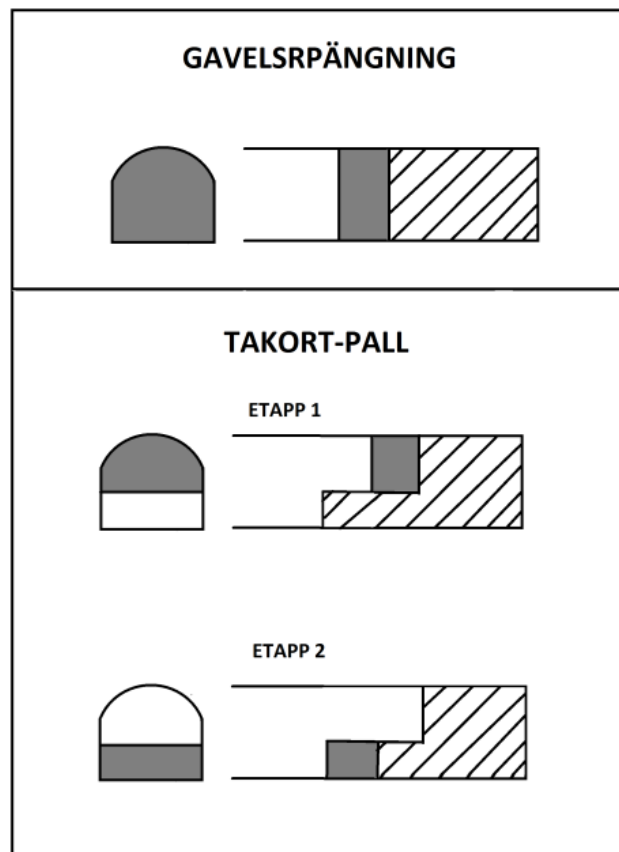
3.2 Tunneldrivning genom tiderna

Teknikerna för tunneldrivning av inre vattenvägar har föregåtts av framsteg inom gruvindustrin. Det var i takt med att bormaskiner och borrar, säkra och effektiva sprängämnen samt väl fungerade urlastningsmetoder utvecklades som det blev ekonomiskt försvarbart att anlägga större delar av vattenkraftverken, i form av vattenvägar och maskinrum, under jord i berg. Tunneldrivningen kan ske enligt två huvudprinciper, antingen borrar och sprängs tunneln fram eller så används en TBM (Spade, 1999).

Vid borrar och sprängning drivs tunneln genom att sprängämnen placeras i förborrade hål i tunnelväggen och detoneras. Hålen borrar efter förutbestämda mönster och detonationerna är noggrant tidsstyrda för att få en så effektiv och skonsam sprängningen som möjligt (Nilsen & Thidemann, 1993). I Sverige började maskinbörning, som föregåtts av handbörning, användas under slutet av 1800-talet. Dessa maskiner och teknikerna för hur de används utvecklades under 1900-talet, från enhålsborrande maskiner på stativ till stora datorstyrda borrhjuggar med flertalet borrhjuggar, se Figur 3.1. Det är framförallt två arbetsmetoder som använts vid drivande av tunnlar med borra-spränga principen, se Figur 3.2. Dessa har arbetats fram med avsikt att driva en så stor tunnelvolym till ett så lågt pris som möjligt. Den första huvudtypen är "gavelsprängning" som innebär att hela tunnelns tvärsnitt sprängs fram simultant. Den andra är "takort-pall" och innebär att en etapp först sprängs och fraktas bort i tunneltvärsnittets överkant varefter den underliggande "pallen" bearbetats (Spade, 1999). Det finns varianter för båda nämnda arbetsmetoder med avseende på i vilken ordning och hur lång del av sträckningen som borrar och sprängs innan bortschackning sker.

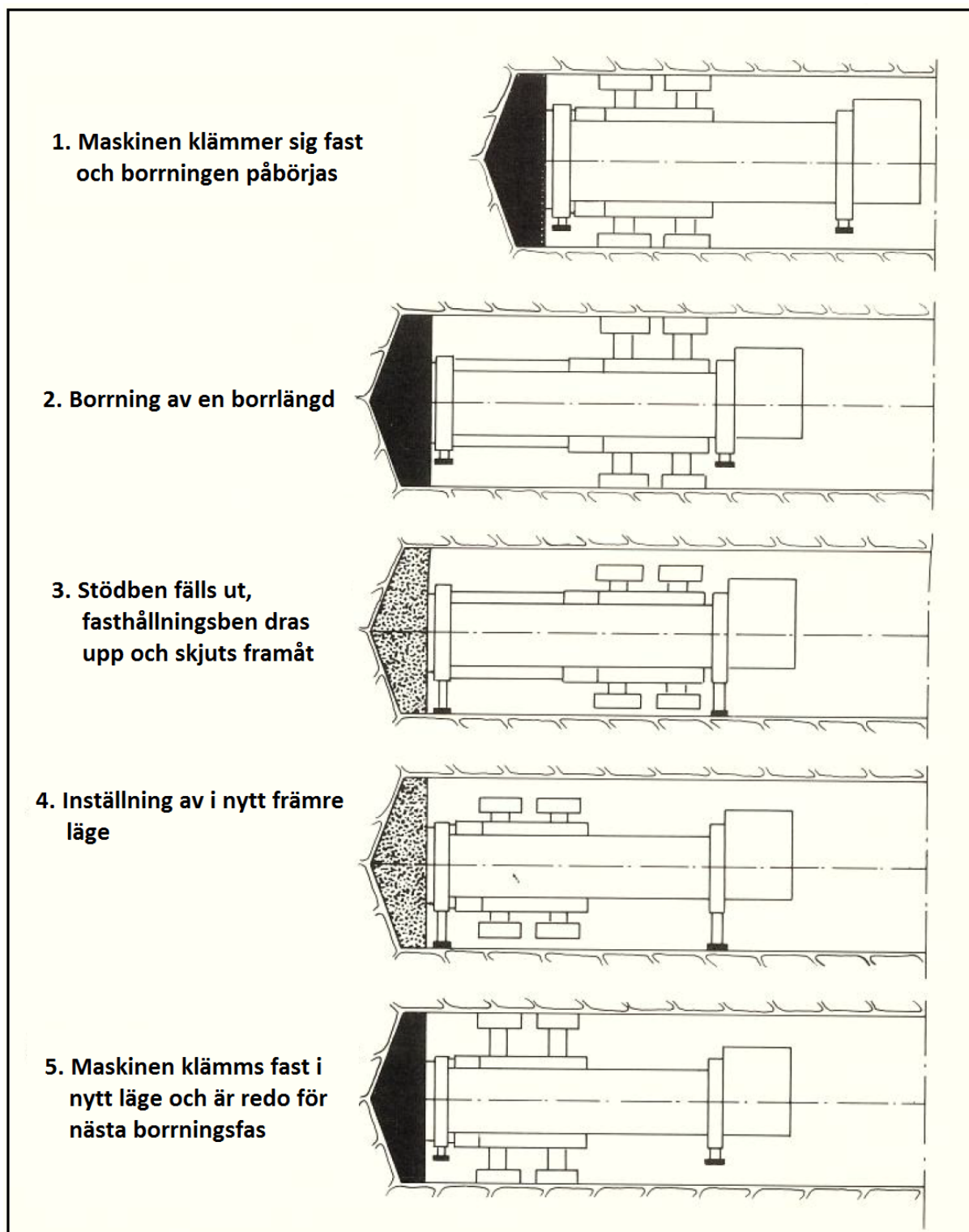


Figur 3.1 Den tekniska utvecklingen för tunneldrivning (Nilsen & Thidemann 1993).



Figur 3.2 *Det två huvudmetoderna för hur tunneldrivning går till med borra-spränga principen.*

En TBM driver hela tunneltvärsnittet simultant genom "äta" sig framåt utan användning av sprängmedel. Denna teknik, som kan driva tunnlar med diametrar från någon enstaka meter upp till 8,5 meter, har ett par fördelar gentemot borra-spränga metoden. Vid långa tunnlar blir det i många fall billigare då metoden är effektiv och gör snabba framsteg så snart produktionen kommit igång. Den drivna tunneln har även betydligt slätare tvärsnitt vilket kommer att minska tryckfallet på vattnet samt eliminera problemen med sprickbildning som kan uppkomma i omgivande berg vid sprängning. Tekniken har funnits sedan början av 1970-talet och har i Sverige bland annat använts vid drifvningen av vattenkraftverket Klippens till- och utloppstunnlar med en total längd på 11 km och tvärsnittsarea på 33 m² (Spade, 1999). Kortfattat så klämmer sig maskinen fast mot tunnelns väggar med kraftiga fötter, pressar sitt borrhuvud mot framförliggande berg och krossar detta och driver på så vis tunneln framåt, se Figur 3.3. När hela borrens längd sedan är driven lättas trycket på fötterna som förs fram och proceduren återupprepas.



Figur 3.3 En TBM:s arbetsgång vid tunneldrivning. Figur modifierad efter Nilsen och Thidemann (1993)

I samband med tunneldrivningen kommer det omgivande berget att utsättas för stora påfrestningar. Dessa kommer dels från vibrationerna av bormning och sprängning, men även från de spänningsförändringar som den urtagna bergsmassan ger upphov till. På grund av detta krävs det att det utsprängda/utborrade rummet skrotas i den omfattning som krävs för att hindra stenfall och ras. Detta sker både omdedelt efter sprängningen, salvskrotning, samt regelbundet så länge det kommer att beträdas av personer, efterskrotning eller skyddsskrotning (Brännfors, 1964). Skrotning innebär att lös bergmassa rensas från utrymmets väggar och tak. Utförandet kan antingen vara maskinellt med tryckluftsverktyg eller manuellt då olika typer av spett används. Vid manuell skrotning och bergsbesiktning ska berget vara rengjort, ordentligt belyst och arbetsplatsen ska vara fri från störande ljud. Arbetarna bör ha en god kännedom om bergförhållandena på aktuell plats då ”manuell bergskrotning är ett farligt arbetsmoment som endast bör anförtros erfarna skrotare” (Arbetsmiljöverket, 2014). Enligt Sjöström (2015) kommer manuell skrotning med en rad fördelar gentemot maskinell skrotning. En betydligt större känsla erhålles med spett då erfarna skrotare vill känna och höra bergets klang för att avgöra dess kvalitet. Med maskinell skrotning finns det även en viss risk att slå sönder berg av god kvalitet och därmed oavsiktligt försämma tidigare bra förhållanden. Normalt sett genomförs skyddsskrotning vart 5:e år i t.ex. tillträdestunnlar vid vattenkraftverk där personal vistas.

3.3 Bergförstärkningar för inre vattenvägar

Då bergrunden aldrig är homogen kommer kraftverkstunnlarna att passera genom olika material och geologiska förhållanden på sin väg till och från kraftstationen. Det är därför viktigt med stor förståelse för hur omgivande berggrund kommer att påfrestras av de hydrauliska krafter som det strömmande vattnet skapar. Vid höga fallhöjder och medföljande stora hydrauliska påfrestningar är bergets uppförande svårt att förutsäga, varför valda förstärkningsmetoder måste noga övervägas (Benson, 1989). Grundfilosofin är dock att vald förstärkningsmetod ska reflektera bergförhållandena, där stabil berggrunds självbärande förmåga ska utnyttjas så långt det är möjligt för att minimera förstärkningskostnaderna (Nilsen & Thidemann, 1993). Vid tunneldrivning finns det fyra huvudtyper av bergförstärkningar, vilka kan kombineras efter behov. Dessa är injektering, bultning, sprutbetong samt inbyggnad med betong (Nilsen & Thidemann, 1993).

3.3.1 Injektering

Injektering är ett sätt att förbättra stabilitet och/eller minska permeabiliteten av mark/berg. Detta görs genom att flytande material under högt tryck pumpas in i grunden där en förändring är önskvärd. Injekteringsmaterialet är ofta cementbaserat med olika typer av tillsatser. För konstruktioner under markytan, såsom tunnlar och bergrum, är eftersträfvade effekter framförallt en minskad tillströmning av grundvatten in i utrymmet samt ökad mekanisk stabilisering (Möller, 2010). För vattenfyllda tunnlar anses dock inte grundvatten som läcker in vara något långsiktigt problem, utan det är under själva konstruktionsfasen som ett för stort flöde kan skapa svårigheter. Injekteringen i projekt under marken kan genomföras enligt två olika metoder, förinjektering och efterinjektering (Nilsen & Thidemann, 1993).

Förinjektering innebär att hål borrar med olika vinklar i tunnelns längdriktning, i form av en tratt, som sedan injekteras. Detta för att i takt som drivningen går framåt täta sprickorna i det omgärdande berget innan sprängning och bortforsling sker (Fransson, 2008). Syftet är att skapa en skyddande skärm runt det planerade tunneltvärsnittet. Fördelar med förinjektering är att det kan ske under högt tryck vilket ökar inträningen i bergsprickorna. Nackdelen är att efterföljande sprängningar måste göras försiktigare för att inte skada omgivande injekteringsskärm (Vägverket, 2000).

Efterinjektering är den injektering som utförs efter att tunneltvärsnittet är utsprängt. I normalfallet sker detta som komplement till förinjekteringen ifall denna inte uppnått fullgott resultat. Kombinationen med att efterinjekteringen måste ske under lägre tryck och därmed att det bestående tätningsresultatet blir sämre innebär det att denna metod normalt sett är dyrare och mer tidskrävande än förinjektering (Vägverket, 2000).

3.3.2 Bultning

Den första kända patentspecifikationen på bergbultar är daterad till 1913 av Stephan, Fröhlich & Klupfel som utvecklade tekniken för gruvindustrin (Kovari, 2003). Det skulle dock dröja ca 40 år, till början av 1950-talet, innan tekniken började användas storskaligt inom tunnelbyggande i Europa. Under de kommande 15 åren blev sedan bergbultning den dominerande förstärkningsmetoden även i Sverige. Det grundläggande verkningssättet är att delar av bergtunnelns ytor av dålig kvalitet förankras med bakomliggande stabilare berggrund. Korrekt utfört kommer det att ge berget en egenbärande effekt, det är alltså inte de tillsatta bultarna i sig som skapar bärförmågan, utan det sammansatta berget som bär upp sig självt (Brännfors, 1964). Detta kan göras enligt två principiella sätt. Ifall det endast är enstaka block som utgör fara för tunneln så kommer dessa att ”punktbultas”, är det däremot en större area med berg av sämre kvalitet systembultas detta område efter ett fördefinierat mönster (Nilsen & Thidemann, 1993). Förstärkningsbultarna kan delas upp i två huvudkategorier, förspända bultar med eller utan ingjutning samt ingjutna bultar utan förspänning (Brännfors, 1964).

De förspända bultarna som ej gjuts in används vanligen som temporär förstärkning under själva tunneldrivningen då de har en omedelbar verkan men begränsad livslängd på grund av korrosionsangrepp. Förspänningen ökar friktionen i berget vilket minskar benägenheten för bergrörelser att uppstå, dock har dessa en lägre förmåga att uppta skjuvkrafter eftersom att de inte fyller upp hela borrhålet i motsats till en ingjuten bult (Brännfors, 1964). Som regel ska dessa bultar kompletteras eller bytas ut mot ingjutna bultar. Det finns dock exempel på tunnlar där det under inspektion visat sig att en stor del av de befintliga bultarna ej varit ingjutna, vilket kan få framtida konsekvenser i form av försvagade bergförstärkningar (Håkansson, 2013).

För längre livslängd på bergbultarna krävs det att dessa gjuts in i cement, vilket skapar ett kemiskt skydd mot korrosion även om bultmaterialet i sig självt inte är rostbehandlat på något annat sätt. För att skyddet ska ha maximal verkningsgrad så krävs det att bulten blir fullständigt ingjuten samt att det använda bruket har ett lågt vattencementtal, vct. Ifall bulten är blottad så är risken stor att cirkulerande vatten kommer i kontakt med ytan och har då potential att starta rostangrepp. Ett lågt vct på bruket, under 0,4, innebär att det kommer finnas

ett överskott av cementkorn som inte reagerat med vatten. Ifall vatten då tränger in i betongen kommer det att reagera med cementkornen vilket leder till viss självläkning av vattenförande sprickor (Windelhed, Lagerblad, & Sandberg, 2002).

3.3.3 Sprutbetong

Sprutbetong som förstärkningsmetod började testas 1914 i "Bruceton experimental mine". Första gången tekniken användes i en inre vattenväg var 1922, då en 6 km lång tunnel till vattenkraftverket Heimbach i Tyskland kläddes in med sprutbetong (Kovari, 2003). I Sverige introducerades sprutbetongen på 1930-talet då vattentunnlarna vid Höljebro vattenkraftverk förstärktes med tekniken. Användningen ökade sedan i landet under 1950-, 60- och 70-talet. Sprutbetongens huvudsakliga uppgift är att hålla ihop och stabilisera bergmassa. Precis som för bergbultarna är det alltså inte tänkt att det sprutade lagret ska bära krafter själv (Lagerblad, 2007). I tjocka skikt, som fyller igen underliggande bergs ojämnheter, kan det dock få en valv-liknande bärförmåga. Vid höga säkerhetskrav eller vid stora spännvidder som ger upphov till betydande laster kan det vara en fördel ifall sprutbetongen armeras och/eller användas tillsammans med bultning. Är förstärkningen endast utsatt för tryckande krafter är det omotiverat att armera den (Nelson, 1998). Armeringen kan bestå av antingen fiberarmering som blandas in i bruket innan sprutningen eller nätarmering som fästes på berget och sedan sprutas in. Armeringsfibrerna består vanligtvis av stål, men det finns även fibrer av plast, kallat syntetiska fibrer, som dock inte används i speciellt stor utsträckning i Sverige (Holmgren & Silfwerbrand, 2015). Vid samverkan med bultning sprutas först ett lager betong varefter bultarna förankras, med fördel används bricka mellan bulthuvud och betonglagret för att minska risken för genomstansning. Till sist sprutas ytterligare ett lager betong för att ge bulten ökat skydd mot korrosion (Holmgren, 1992). Det finns två sprutmetoder, vilka är torrsprutning och våtsprutning.

Torrsprutning är den metoden som dominerade i Sverige fram till början av 1970-talet. Vid torrsprutning kommer torrbruket (cement, ballast och eventuella tillsattsmedel) och vatten att transporteras i separata kanaler fram till munstycket (Nordström & Holmgren, 2009). Blandningen av betongen sker sedan i munstycket, i luften på väg mot samt vid anslaget mot det sprutade underlaget. Då vattenmängden bestäms löpande av operatören finns det en risk att sprutbetongen kommer att ha skiftande kvalitet. Vanligt är att betongen får ett för lågt vattencementtal vilket kan leda till att hydrationen (reaktionen mellan vatten och cement) påverkas negativt vilket resulterar i försämrad hållfasthet, täthet och vidhäftning. Fördelen är att utrustningen är relativt enkel och portabel vilket gör tekniken lämplig för mindre reparationsåtgärder av bergkonstruktioner.

Våtsprutningen utvecklades under 1950-talet i USA och började användas i Sverige under början av 1970-talet i samband med vattenkraftsutbyggnaden. Vid våtsprutning är betongbruket blandat med vatten redan innan det pumpas genom slangarna till munstycket, där endast en accelerator inblandas (Nordström & Holmgren, 2009). De tre huvudtyperna av acceleratorer som finns tillgängliga är vattenglas, alkaliacceleratorer och alkalifria acceleratorer, varav den sistnämnda är vanligast idag (Lagerblad, 2007). I förhållande till torrsprutningen har våtsprutningen fördelar som t.ex. högre volymkapacitet (upp till 18-20

m³/timme), minskad återstudsning, bättre arbetsförhållanden (mindre damm) och enklare att blanda in fibrer (Nilsen & Thidemann, 1993).

3.3.4 Betonginbyggnad

Betongingjutning av ett tunneltvärsnitt sker vanligen med hjälp av en monteringsfärdig glidform, av plåt eller stål, som transporteras på ett lastfordon. Mellan glidformen och bergkonturen gjuts betongen (Brännfors, 1964). Vanligvis är formen mellan 4 och 6 meter lång och betongtjockleken dimensioneras som regel till ett minimum av 30 cm och armering är sällan använd (Nilsen & Thidemann, 1993). Betonginbyggnad av en vattenförande tunnel används endast vid svaghetszoner med ytterst dålig bergkvalitet. En stor fördel med betongingjutning gentemot sprutbetong är att det vid förekomst av svällande leror kommer att uppstå ett betydligt lägre tryck mot konstruktionen. Detta eftersom att ingjutningsbetongen inte fyller ut sprickor och andra utrymmen till lika stor grad som sprutbetongen, och ger därmed leran plats att svälla fritt innan ett tryck börjar byggas upp. Ras på grund av svällande leror är därför betydligt ovanligare med denna typ av förstärkning (Nilsen & Thidemann, 1993).

3.3.5 Andra förstärkningsmetoder

Några mindre använda förstärkningsmetoder är träinbyggnad, stålinbyggnad samt frysning av marken. De två först nämnda används knappt i Sverige och frysning är en ytterst provisorisk metod som endast används under själva drivningen. Träinbyggnad var den första typen av tunnelförstärkning och är därmed föregångaren till resterande förstärkningsmetoder. Bland annat har metoden nackdelarna att den tar upp en stor del av tvärsnittet (upp till 60%), är mycket svår att få tillräckligt styv samt har en begränsad beständighet (Kovari, 2003). Stålinbyggnaden utförs genom att stålbågar reses i tunneltvärsnittet med lämpliga avstånd som sedan förbinds med varandra och berget för att uppnå stabilitet (Brännfors, 1964). Vid tunneldrivning genom partier med exceptionellt dåliga bergförhållanden kan marken frysas. Detta är dock en väldigt dyr och långsam metod som i största utsträckning bör undvikas genom att överväga alternativa tunneldragningar.

4. Nedbrytning, skador och ras

Nedbrytning av och efterföljande skador på betong, berg och förstärkningar kan ske på många olika sätt och blir speciellt kritisk då flera faktorer samverkar. Det är därför viktigt vid uppbyggnad och drift av konstruktioner som t.ex. inre vattenvägar att ha god kännedom om hur och varför dessa skador uppkommer. Inspektioner av aggregatnära inre vattenvägar sker kontinuerligt med hjälp av styrdokument enligt fastställda tidsplaner. För varje inspektion skrivs en rapport där alla detekterade skador är dokumenterade i skrift och med bild. I vattenkraftverkens längre till- och utloppstunnlar i form av bergtunnlar sker idag inga sådana rutinmässiga besiktningar. Detta trots att det förekommit ras som i vissa fall nått upp till markytan.

4.1 Nedbrytning av betong

Nedbrytning av betong kan ske på många olika sätt och är ibland väldigt komplex. Rapporter som behandlar liknande ämnen beskriver många gånger samma skada med olika benämning. Ett exempel är ordet erosion som betyder nedbrytning och borttransportering, vilket i betong-sammanhang ofta syftar på nötning av mekanisk last eller vatten. Dock kan anledningen till att konstruktionen börjat erodera vara att betongytan först har försvagats, t.ex. på grund av ett surt angrepp. Detta har medfört att vissa rapporter benämner den här typen som erosionskada medan andra använder begreppet surt angrepp. Kalkurlakning som också är en typ av erosionskada benämns sällan som sådan utan behandlas nästan alltid separat. För att få en överblick av nedbrytning och dess orsaker presenteras de vanligaste skadorna i detta kapitel, se Tabell 4.1–4.9. Skadorna beskrivs även kortfattat i textform. För utförligare beskrivning av skadeförloppet hänvisas läsaren till respektive referens. Notera att beskrivningen omfattar allmänna skador på betong och inte endast de som är aktuella för inre vattenvägar.

Tabell 4.1 Armeringskorrosion.

Armeringskorrosion	
Skadeorsak	Skada
Kloridinträngning	Expansion av armeringen som leder till sprickbildning och/eller spjälkning av täckskikt
Karbonatisering	Expansion av armeringen som leder till sprickbildning och/eller spjälkning av täckskikt

Tabell 4.2 Fysikaliska angrepp.

Fysikaliska angrepp	
Skadeorsak	Skada
Frostangrepp	Expansion av betongen som leder till inre sprickor och ytsprickor
Saltfrostangrepp	Ytererosion som leder till ytavskalning
Saltsprängning	Expansion av betongens inre som leder till ytavskalning
Nötning av mekanisk last eller vatten, kavitation	Ytererosion som leder till reducerat täckskikt

Tabell 4.3 Kemiska angrepp av syror och salter.

Kemiska angrepp av syror och salter	
Skadeorsak	Skada
Syraangrepp	Upplöst försvagad yta
Saltangrepp	Upplöst försvagad yta eller expansion av betongens inre som leder till inre sprickor och ytsprickor

Tabell 4.4 Urlakning.

Urlakning	
Skadeorsak	Skada
Urlakning av kalk p.g.a. strömmande vatten	Försvagning av ytan, minskning av bärförmåga och förlust av vattentäthet i sprickor. Kan visa sig genom kalkutfällning på ytan

Tabell 4.5 Alkaliballastreaktioner.

Alkaliballastreaktioner	
Skadeorsak	Skada
Alkalikiselsyrareaktioner (AKR)	<u>För samtliga gäller:</u> Expansion av betongens inre: Ytsprickor och inre sprickor Expansion av betongens yta: Ytförsvagning, krackelering och så kallade "pop-outs" Kan visa sig i mörka fuktfläckar på ytan
Alkalisilikatreaktioner (ASR)	
Alkalikarbonatreaktioner (ACR)	

Tabell 4.6 *Biologiska angrepp.*

Biologiska angrepp	
Skadeorsak	Skada
Bakterier	Upplöst försvagad yta

Tabell 4.7 *Fukt- och temperaturrelaterade.*

Fukt- och temperaturrelaterade	
Skadeorsak	Skada
Fuktsvällande ballast	Expansion av betongens inre som leder till inre sprickor och ytsprickor
Fuktrelaterad krympning	Genomgående sprickor och ytsprickor samt krackelering
Termisk krympning under avsvälning	Genomgående sprickor och ytsprickor samt krackelering
Temperaturvariationer i omgivningen	Genomgående sprickor

Tabell 4.8 *Sönderfall p.g.a. instabil materialstruktur.*

Sönderfall p.g.a. instabil materialstruktur	
Skadeorsak	Skada
Omvandling av aluminatcementpasta	Hållfasthetsförlust
Försenad ettringitbildning	Sprickor
Thaumasitbildning	Hållfasthetsförlust

Tabell 4.9 Överbelastning, olyckslast samt brandskada.

Överbelastning, olyckslast samt brandskada	
Skadeorsak	Skada
Överbelastning samt olyckslast	Olika sorters sprickor beroende på vilken typ av överbelastning eller olyckslast, bland annat vidhåftnings-, armerings- eller krossbrott
Utmattning	Utmattningsbrott i betongen och armeringen
Brandskada	Sönderfall och omvandling av betongen vilket leder till sprickor och spjälkning av täcksikt

4.1.1 Armeringskorrosion

När armeringen korroderar bildas rost som har en större volym än ursprungsmaterialet. Detta medför en expansion som kan få den omgivande betongen att spricka och tätskikt spjälkas av. Betong är ett basiskt ämne med ett pH-värde högre än 12 vilket innebär att armeringens miljö är för basisk för att korrosion ska ske. pH-värdet behöver alltså sänkas för att korrosion ska kunna påbörjas vilket kan ske på två olika sätt: karbonatisering och kloridinträngning (Fagerlund, 2011). Karbonatisering innebär att koldioxid tränger in i och reagerar med betongens kalkhaltiga ämnen. Denna reaktion resulterar i att kalciumkarbonat bildas vilket sänker pH-värdet. När den processen sedan når armeringen startar korrosionen. Kloridinträngning innebär att kloridjoner tränger in i betongen och sänker dess pH-värde. När kloridkoncentrationen når ett visst kritiskt värde börjar korrosionen. Kloridjoner kommer främst från avisningssalt och havsvatten (Byfors & Tuutti, 1994).

Karbonatisering och kloridinträngning påverkar inte i sig betongen utan angriper endast armeringen (Lindblom, 2012). Dock kan karbonatisering i viss mån påverka krympning, se avsnitt 4.1.7.

4.1.2 Kalkurlakning

Vatten har en stor förmåga att lösa kalkhaltiga ämnen då det tränger in i betongens porer. När kalciumhydroxiden har urlakats påbörjas sedan upplösningen av kalciumsilikater i bindemedlet. Denna upplösning fortskrider tills cementpastan har förstörts helt vilket resulterar i hållfasthetsförluster (Terzic & Pham, 2013). Dock är kalciumet i bindemedlet mycket svårslutigare än kalciumhydroxiden. Genomströmmande vatten har en större påverkan än stillastående då jämnvikt av kalcium mellan porväggarna och vattnet ej uppstår vilket leder till att urlakningen hela tiden fortgår (Fagerlund, 2010). Även mjukt vatten innehållande kolsyra och med liten mängd salter är aggressivare då betongytan kan utsättas för angrepp som skapar större kalkurlakningsmöjligheter. Kalkurlakning kan även ske vid sprickor vilket ger en lokal urlakning (Rombén, 1994).

4.1.3 Fysikaliska angrepp

Det finns tre huvudsakliga grupper av fysikaliska mekanismer som angriper betong. Dessa är frostangrepp, saltsprängning och nötning.

Det finns två frostskaadetyper, frostangrepp och saltfrostangrepp (Fagerlund, 1994). Vanligt frostangrepp uppstår när vatten i betongens porer fryser till is vilket ökar dess volym med ca 9%. Om en del av porsystemet innehåller luft kan vattnet utvidga sig utan att några skador uppstår. När den kritiska vattenmättnadsgraden i betongen överskrids finns det inget utrymme för volymökningen vilket leder till sprickbildning (Burström, 2006). Detta sker oftast i betongens inre och benämns då som inre frostangrepp. Den andra skadetyper är saltfrostangrepp vilket innebär frysning av vatten i närvaro av salter. Angreppet sker vid betongens yta och kan leda till stora avskalningar (Fagerlund, 1994). Skadeprocessen är inte helt klarlagd. En möjlig förklaring är att eftersom saltkoncentrationen är högre vid betongens yta sugas vatten från betongens inre vilket medför att fukt anrikas på betongens yta som sedan fryser till is och expanderar (Fagerlund, 2012).

En annan typ av saltangrepp är saltsprängning. Vatten som innehåller salt kan antingen sugas in kapillärt eller diffundera in i betongen. Om vattnet sedan avdunstas kan saltet fällas ut och bilda kristaller i porsystemet. Dessa kristaller skapar stora spänningar i porerna vilket kan leda till att betongytan avskalas (Fagerlund, 2012).

Betongytor som utsätts för nötning kan krosskadas och större ballastkorn kan friläggas och slitas bort. I konstruktioner som utsätts för vattenflöden kan sand och sten som transporteras i vattnet nöta sönder betongen (Möller, 1994). En annan typ av nötning i vatten är kavitation. Denna avnöttningsform innebär att luftbubblor bildas vid en tryckminskning i vattnet och sedan imploderar vid en eventuell efterföljande tryckökning. Detta resulterar i att stora krafter uppstår på betongen, likt en jetstråle. För att kavitation ska kunna uppkomma måste vattenhastigheten var större än 10 m/s, vattnet måste utsättas för tvära riktningsändringar och ytorna måste vara ojämna (Sandström, Stojanovic & Persson, 2012).

4.1.4 Kemiska angrepp av syror och salter

Betong är starkt basiskt och kommer därför att skadas vid sura angrepp. Både starka och svaga syror påverkar betongen, t.ex. svavelsyra och kolsyra. Syror angriper betongytan och löser bland annat upp kalcium och bildar ett mjukt lager bestående av kiselsyra. Om detta lager blir kvar fungerar det som ett skydd för den underliggande betongen. Om kiselsyran däremot eroderas bort kan syraangreppet fortsätta längre in i betongen, vilket kan leda till fortsatt nedbrytning (Rombén, 1994).

Det finns många olika salter som kan angripa betongen. Sulfatangrepp är den allvarligaste formen och kan beskrivas med två steg. Sulfatjoner transporteras först in i betongen och sedan sker en eller flera kemiska reaktioner (Rombén, 1994). Sulfat reagerar med kalciumhydroxid och bildar gips vilket resulterar i en volymökning på ca 18%. Det råder delade meningar om det verkligen sker en volymökning med 18% då det förutsätter att gipset kristalliseras. Även ettringit kan bildas vid sulfatangrepp, vilket också ger en stor volymökning. Skador uppstår när porsystemet inte längre kan ta hand om den utfällda ettringiten (Fagerlund, 2012).

Saltangreppen innebär att det sker en expansion av betongens inre och därmed uppkommer inre och yttre sprickor (Fagerlund, 2010). Sulfatjoner som transporteras in i betongen kommer i första hand från vatten och marken (Rombén, 1994). Dock kan sulfatjoner förekomma i cement och ballast, vilket då kan leda till försenad ettringitbildning, se avsnitt 4.1.8. Där behandlas även bildning av thauamsit vilket också är ett speciellt sulfatangrepp.

Magnesium- och ammoniumsalter angrepp liknar syrans då dessa salter är sura och därmed sker en försvagning av betongens yta, så som beskrevs ovan. Dock kan dessa salters motsvarande joner bidra till ettringitbildning och även utveckla liknande angrepp (Fagerlund, 2012). För vidare fördjupning av andra salters och syrors påverkan på betong hänvisas läsaren till Rombén (1994).

4.1.5 Alkaliballastreaktioner

Det finns tre huvudtyper av alkaliballastreaktioner där skillnaden är vilka reaktiva komponenter som ingår, alkalikiselsyrareaktion (AKR), alkalisilikatreaktion (ASR) och alkalikarbonatreaktion (ACR). Skademekanismen är i princip samma i de tre fallen där reaktionen resulterar i att det sker en expansion av betongens inre eller i dess yta p.g.a. av fuktexpansion vilket kan orsaka sprickor, krackelering och "pop-outs" (Rombén, 1994) (Petersons, 1994).

I AKR är det alkalier från cement i formen kalium- och natriumhydroxid som reagerar med kisel syra eller reaktiv kisel dioxid som återfinns i vissa typer ballast, vanligen i mineraler som opal, flinta och kalcedon. Reaktionen bildar en viskös gel som suger till sig vatten och en volymökning sker. ASR är likadan som AKR men reaktionen sker med andra kiselhaltiga mineraler som t.ex. fältspater (Rombén, 1994). ACR brukar även kallas för dolomitreaktion. Dolomit är ett mineral bestående av magnesiumkarbonat och kalciumkarbonat som kan förekomma i ballast. Skadeförloppet är inte helt utrett, men sannolikt bryts dolomiten ner av alkalierna och lera som är innesluten i dolomiten kan då suga upp vatten och svälla (Fagerlund, 2011).

4.1.6 Biologiska angrepp

Biologiska angrepp innebär skador, direkt och indirekt, från djur- och växtliv. Vissa bakterier är sulfatreducerande vilka kan skapa förutsättningar för svavelsyraangrepp. Det finns även mögelsvampar och järnbakterier som kan angripa betongkonstruktioner. Dock är biologiska angrepp sällsynta i Sverige (Rombén, 1994).

4.1.7 Temperatur- och fuktrörelser

Vid temperatur- och fuktvariationer kommer betongen att expandera och krympa. Om dessa variationer är stora kan sprickor bildas.

Temperatursprickor kan delas in två olika typer, ytsprickor och genomgående sprickor som uppkommer vid betongens avsvälning samt genomgående sprickor föranledda av temperaturförändringar i omgivningen (Petersons, 1994). Vid härdning stiger temperaturen och på grund av detta kommer det ske en värmeavgång från betongen. Betongens ytor kommer att avsvälja snabbare än de inre delarna vilket medför att det blir en temperaturdifferens i konstruktionen. Om differensen är tillräckligt stor skapas det

dragspänningar vid ytan och tryckspänningar i de inre delarna som kan leda till att ytsprickor och genomgående sprickor bildas (Petersons, 1994). Om omgivningens temperatur varierar mycket kommer det att påverka konstruktionen då den expanderar vid förhöjd temperatur och drar sig samman vid en temperaturminskning. Genomgående sprickor bildas då om temperaturrörelserna förhindras. Sprickorna är oftast vinkelräta mot rörelseriktningen och storlekarna på dessa kan variera då rörelsen är reversibel (Petersons, 1994).

Vissa typer av ballastmaterial har en förmåga att suga upp fukt, vilket gör att den sväller och därmed skapar en expansion av betongens inre. Både ytsprickor och genomgående sprickor kan då uppkomma (Petersons, 1994). Fuktrealterad krympning innebär att betongen torkas ut på vatten vilket leder till en volymminskning. Om krympning förhindras kan sprickor uppkomma. Detta kan ske på två huvudsätt, mothåll från omgivningen samt differenskrympning. Krympsprickor som föranletts av omgivningens mothåll är oftast vinkelräta mot rörelseriktning och är snarlika sprickor orsakade av den omgivande temperaturen (se ovan). Differenskrympning kan uppstå genom ensidig uttorkning, olika krymphastighet samt olika slutkrympning. Ensidig uttorkning innebär att konstruktionsdelen närmast ytan krymper snabbare än de inre delarna och därmed uppstår dragspänningar vid ytan vilket kan leda till sprickor. Om betongsammansättningen i två förbundna konstruktionsdelar skiljer sig kan sprickor ske vid förbindningen på grund av att krympningshastigheten eller krympningens slutvärde för respektive del kan vara skilda från varandra (Petersons, 1994). Även karbonatisering kan i viss mån orsaka krympning då reaktionsprocessen kan torka ut betongen, men detta är sällan något problem (ACI, 2008).

4.1.8 Sönderfall p.g.a. instabil materialstruktur

Betong kan sönderfalla genom att materialstrukturen är instabil vilket kan bero på olika faktorer som omvandling av aluminatcement, försenad ettringitbildning samt thaumasitbildning. De två sistnämnda är speciella typer av sulfatangrepp som härstammar från hydrationen. Aluminatcement används för att öka värmebeständigheten, dock har det påvisats att den är instabil i fuktiga miljöer och vissa fall har betongen förlorat sin hållfasthet redan efter 20 år (Möller & Petersons, 1994).

Ettringit är ett ämne som bildas vid hydrationen. Eftersom den senare omvandlas vidare till monosulfat är betongens innehåll av ettringit som störst cirka en dag efter gjutningen (Johansson, 1994). För att ettringit ska bildas krävs sulfat, vilket kan transporteras in i betongen från omgivningen och då är ett slags saltangrepp som behandlas i avsnitt 4.1.4. Försenad ettringitbildning innebär att destruktiv och svällande ettringit bildas genom att sulfater tas upp från ballast och gips (Fagerlund, 2012). Detta sker vid för höga härdningstemperatur då monosulfater bildas direkt istället för ettringit som mellansteg. Senare under avsvälningen bildas ettringit vilket ger svällning. (Johansson, 1994). Betongen har då hårdnat och kan då ej hantera den svällande ettringiten vilket leder till sprickbildning (Fagerlund, 2010).

Thaumasit är ett mineral som innehåller sulfat och saknar egen hållfasthet vilket kan bildas under dåliga härdningsförhållanden. Istället för att den vanliga sulfatreaktionen sker, då ettringit bildas, angriper den destruktiva karbonatjonen CO_3 (vid närvaro av sulfat) kalcium-

silikat-hydrat och kalciumkarbonat som är beståndsdelar av cementpastan. Vid denna nedbrytning bildas thaumasit vilket leder till stora hållfasthetsförluster (Fagerlund, 2012).

4.1.9 Överbelastning, olyckslast samt brandskada

Beroende på vilken typ av belastning som sker kan olika typer av sprickmönster skapas i betongen, till exempel böj-, skjuv- och utmattningssprickor samt rörelsesprickor orsakade av sättningar i grunden. Om betongen överbelastas eller utsätts för olyckslast kan det bildas krossbrott i betongen, dragbrott i armeringen, vidhäftningsbrott och utmattningsbrott (Fagerlund, 2010).

Vid de temperaturer som uppkommer i samband med brand kommer betongens delmaterial att brytas ned kemiskt och fysikaliskt. Detta kan leda till sprickbildning och uppspjälkning orsakat av skillnader i volymförändringar mellan betongens delkomponenter. Betongens tryckhållfast kan även förloras helt (Thelandersson, 1994). Skador på betong kan även orsakas av brister i arbetsutförandet, vilket kan visa sig som plastiska sättsprickor (Petersons, 1994).

4.1.10 Kombination av nedbrytningsmekanismer och självläkning

Betongen kan brytas ned på många olika sätt. En isolerad skademekanism behöver inte i sig vara huvudanledning till nedbrytningen, utan kan ibland fungera som katalysator för andra nedbrytningsmekanismer. Som exempel kan inre frostangrepp göra att betongen blir uppluckrad vilket ger bättre förhållanden för kloridinträning och karbonatisering (Fagerlund, 2011). Enligt Rosenqvist (2015) blir skadorna värre om mekanismerna bakom dem kombineras än att resultaten från respektive skada var för sig adderas. T.ex. så kommer yttre frostangrepp bli värre om betongen tidigare har urlakats gentemot att addera en isolerad frostskada med en isolerad urlakningsskada.

Sprickor i betongen kan självläkas/tätas vid rätt förutsättningar. Om koldioxid från genomströmmande vatten karbonatiserar betongens kalciumhydroxid kan kalciumhydroxid- och kalciumkarbonatkristallar fällas ut och ansamlas vid sprickor. Dessa binds då ihop av kristallerna och tätar betongen. För att självläkning ska uppstå får sprickorna inte röra på sig och genomströmningen av vatten får inte vara så hög att betongen lakas ur (Petersons, 1994).

4.2 Nedbrytning av berg och dess förstärkningar

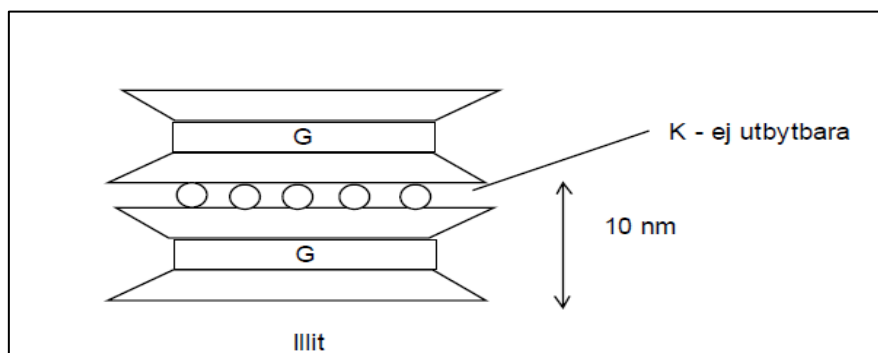
Många vattenkraftverks inre vattenvägar består av tunnlar. Det kan vara tillopps-, utlopps- och överledningstunnlar. Vissa sektioner av dessa tunnlar är förstärkta med t.ex. sprutbetong och bultar. Dessa konstruktioner, själva berget och förstärkningarna, kommer med tiden att brytas ned av olika mekanismer.

4.2.1 Nedbrytning av berg

Eftersom berg ingår i jordens naturliga kretslopp kommer bergstrukturen ständigt att brytas ner och förändras. Denna process sker som regel väldigt långsamt. Vid tunnelbyggande kommer dock dessa processer att påskyndas p.g.a. förändrade grundförhållanden. Till exempel så kommer vattnet att hitta nya vägar genom berget och därmed komma i kontakt med material som legat skyddade från väta under en lång tidsperiod. Frostsprängning i berg fungerar på liknade sätt som för betong, se avsnitt 4.1.3. Vatten tränger in i sprickor samt

andra håligheter varefter det fryser och bergskikt kan därmed spjälkas bort (Strandman & Eklund, 2010). Detta kan ske vid de yttersta delarna av tunneln vid vattenytan (Lindblom, 2010). En viss typ av erosion är vattennötning, som innebär att vatten i rörelse nöter sönder berg. Denna nedbrytning sker snabbare om vattnet innehåller små partiklar vilket ger en förstärkt nötande effekt (Strandman & Eklund, 2010). Kavitation är en annan typ av nötning, skadeförloppet för kavitation beskrivs i avsnitt 4.1.3.

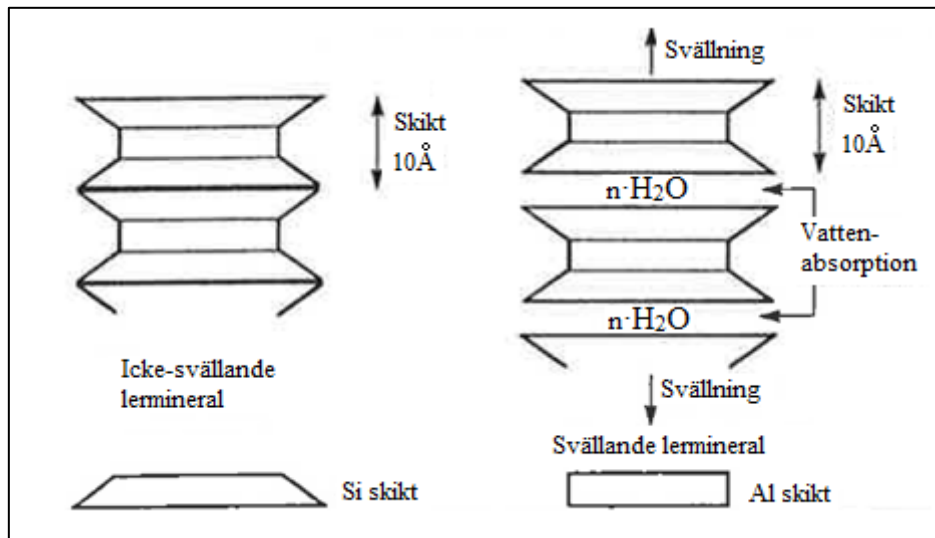
Några av de mest kritiska nedbrytningsmekanismerna för berg i Sverige är grundade i problemen som kan uppstå i samband med lermineraler. Svällande lera, försämring av skjuvhållfasthet, utspolning från sprickor samt urlakning är fyra olika typer av nedbrytningar som beror på lerors uppbyggnad. Alla lermineraler består av plana skikt av magnesiumhydroxid och kiseloxid eller aluminiumhydroxid. Beroende på hur skiktlagren är uppbyggda på varandra så erhålls olika egenskaper hos lermineralen (Rankka, 2003). Illit, smektit och klorit är tre av de vanligaste lermineralerna. Illit är ett stabilt mineral då kaliumjoner starkt håller ihop de olika skiktlagren med varandra, se Figur 4.1.



Figur 4.1 Strukturuppbyggnad av lermineralet illit (Mitchell, 1976).

I smektit-gruppen ingår montmorillonit som har en stor svällningskapacitet. Montmorillonit består av tre skiktlayer och mellan dessa skikt kan vatten absorberas från omgivningen vilket orsakar svällning av lera, se Figur 4.2. Beroende på vilken jon som är dominerade sväller partiklarna i lera olika mycket. Vanliga joner i lera är kalcium-, magnesium-, kalium- och natriumjoner. En uppsvälld lera kan enklare eroderas bort av vatten men kan även skapa stora spänningar på eventuellt mothållande struktur som sprutbetong eller betonginbyggnad (Brekke & Selmer-Olsen, 1965). Enligt Dragnovic och Johansson (2010) beror svällningspotentialen av följande faktorer:

- o Typ av lermineral
- o Mängden lermineral
- o Den dominerande jonen
- o Jonmängden i lera
- o Storlek på lerpartiklarna
- o Vattenhalt innan svällningsprocessen
- o Lerans struktur
- o Lerans torra densitet
- o Tillgänglig vattenmängd
- o Koncentration av joner i vattnet



Figur 4.2 Skillnaden mellan icke-svällande lera och svällande lera. Längden är given i Ångström, där $1\text{Å} = 0,1\text{ nm}$. Modifierad efter Selmer-Olsen (1989)

Vissa typer av lermineraler får lägre skjuvhållfasthet när de kommer i kontakt med vatten, t.ex. kalcit, klorit och montmorillonit. Detta innebär att ras kan uppkomma vid sprickor och förkastningar innehållande dessa lermineraler då skjuvkrafter inte längre kan överföras. Enligt Draganovic och Johansson (2010) behövs det mer undersökningar om hur skjuvhållfastheten förändras hos lermineraler. Även utspolning av material i sprickor och förkastningar är ett problem. Framförallt är det lerhaltiga material som har en tendens att utspolas, vilket kan resultera i glidbrott (Draganovic & Johansson, 2010). Leramineral kan dessutom utsättas för urlakning av joner vilket kan förändra lerans egenskaper (Rankka, 2003). Om bergets temperaturvariationer överstiger 50°C kan det ge spänningstillstånd som resulterar i att material spjälkas bort (Strandman & Eklund, 2010). Det torde dock inte vara något problem i Sverige. Tryckförändringar från vatten kommer också att påverka beteendet hos berg.

4.2.2 Nedbrytning av sprutbetong

Skademekanismerna för sprutbetong fungerar i princip lika som för konventionell betong, med en viss skillnad beroende på att den tillstyvnadsaccelerator som tillsätts vid sprutning förändrar betongens sammansättning och struktur (Lindblom, 2009). Till exempel kommer sprutbetongen att utsättas för mer uttorkningskrympning under härdningen då den inte kan flyta som en gjuten betong (Lindblom, 2010). Beroende på vilken typ av accelerator som används kommer sprutbetongen att bli känsligare mot vissa nedbrytningsmekanismer, t.ex. kan användning av alkaliaccelerator ge stora problem med svällning från ettringitbildning (Lagerblad, 2007).

Sprutbetong är mycket beständig om den har anpassats rätt till omgivande miljö. Enligt Lagerblad (2007) kommer dock följande faktorer att påverka nedbrytningsprocessen:

- o Karbonatisering
- o Urlakning
- o Nötning
- o Armeringskorrosion

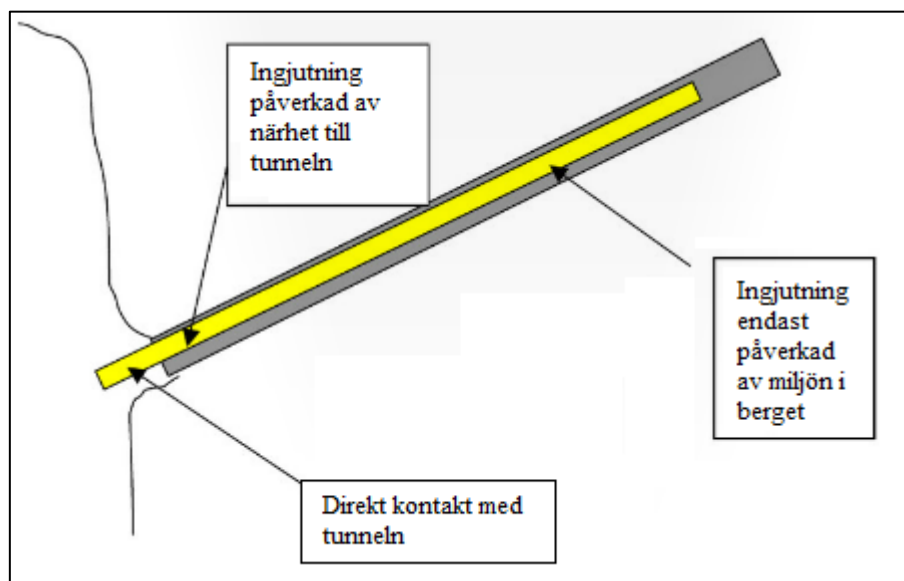
- o Frost
- o Fuktsvällande ballast
- o Sulfatangrepp
- o Andra kemiska angrepp
- o Försenad ettrignit

Dessa mekanismer har beskrivits tidigare, se avsnitt 4.1, varför de inte kommer att beskrivas närmare i detta avsnitt.

Då sprutbetongens huvudsakliga uppgift är att hålla ihop bergmassa av sämre kvalitet är dess funktion slut när vidhäftning mot berget släpper. De två största bidragande orsakerna till att detta sker är urlakning och sultangrepp. Krympning på grund av använda acceleratorer kan också påskynda processen genom att sprickor bildas. I vattenfyllda tunnlar är karbonatisering som regel inte något problem, dock måste kloridinträningen beaktas vilket kan leda till korrosion av fibrer och nät av stål (Lagerblad, 2007). Även arbetsutförandet kommer att påverka hur beständig sprutbetongen blir. Enligt Björkenstam (1999) beror dåligt utförande ofta på att kunskapen hos operatören inte är tillräcklig. Ett annat problem med sprutbetong är tjockleken av det påsprutade lagret, då ett återkommande koncept hos operatörerna är ”hellre för mycket än för lite”. Detta kan leda till att egentygnden av sprutbetongens lager blir för stor vilket kan resultera i att betongen släpper från underlaget (Östberg, 2015).

4.2.3 Nedbrytning av bultar

Ingjutna bergbultar bryts ned genom korrosion. Ofta beror korrosionen på dåligt arbetsutförande t.ex. att bulten har tryckts in för snabbt vilket kan leda till att bultbruket rinner ut eller att bulten är monterad i ett läckande hål (Bogdanoff, 2013). För ingjutna bergbultar kan tre olika korrosionsmiljöer urskiljas; direkt kontakt med tunneln, i närhet av tunneln och miljön i berget, se Figur 4.3

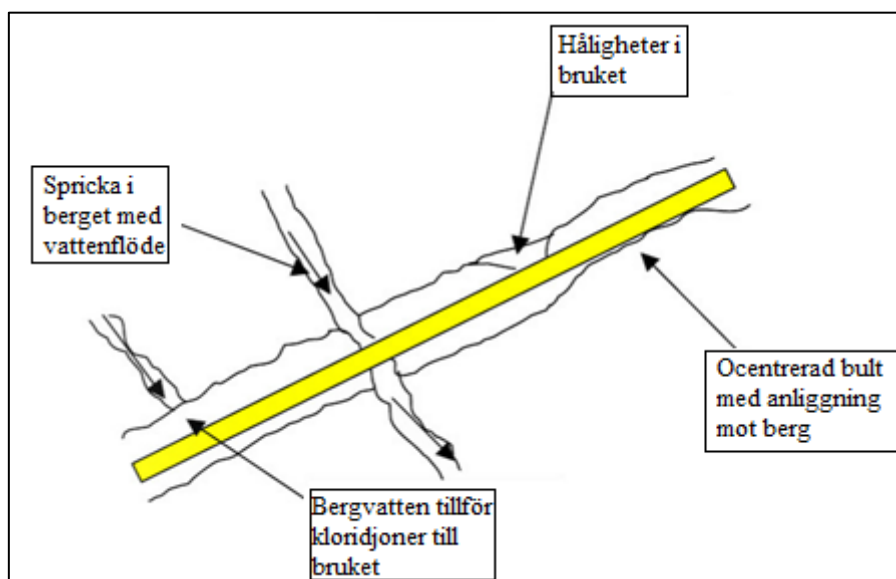


Figur 4.3 Korrosionsmiljöer för en ingjuten bergbult. Modifierad efter Sandberg (2007).

Enligt Sandberg (2007) är bultdelarna som utsätts för de två miljöerna närmast tunnelns tvärsnitt mer korrosionsutsatta än delar längre in. Detta beror på att cementbruket som skyddar bergbulten kan angripas av olika typer av nedbrytningsmekanismer.

- o Kloridjoner från vattnet kan tränga in i cementbruket och sänka dess pH-värde
- o Reaktioner mellan cementpastan och vattnet kan leda till svällning och avspjälkning
- o Urlakning av cementbruket

För bultdelarna som endast utsätts för miljön i berget kommer korrosionsrisken att påverkas av håligheter i bruket, ifall bulten är centrerad i bruket, tillförsel av kloridjoner från bergvatten samt vattenflöden i sprickor, se Figur 4.4.



Figur 4.4 De inre delarna av bulten som endast påverkas av miljön i berget (Sandberg, 2007).

I en sluten spricka eller hålighet kommer det inte att finnas någon risk för korrosion då inget nytt vatten kan tillföras och det befintliga vattnet kommer att alkaliserar av cementpastan och passivera stålet. Inte heller kloridinträngning i cementpastan brukar vara något problem då den begränsande mängden syre i berget ger en låg korrosionshastighet (Sandberg, 2007).

Enligt Sandberg (2007) är den kritiska nedbrytningsmekanismen öppna sprickor och håligheter med kontinuerligt vattenflöde som lakar ut cementbruket. Dock måste vattenflödet vara relativt högt för att det ska vara kritiskt då sprickorna kan självläka vid låg vattenomsättning. Korrosionshastigheten av bultar bestäms då av vattnets kemiska sammansättning, flödes hastigheten samt syrehalten i vattnet.

4.3 Skador i aggregatnära inre vattenvägar

För att få en överblick av vilka typer av skador som har upptäckts vid inspektioner av inre vattenvägar har 62 besiktningsrapporter från åren 1986-2015 studerats. Totalt rör det sig om 17 vattenkraftverk, där det har varit de aggregatnära delarna som undersökts genom torrläggning, så som intag, tilloppstubb, spiral och sugrör. Under dessa 62 inspektioner har ca

620 anmärkningar gjorts, varav 110 vid intaget, 100 i tilloppstuben, 90 i spiralen samt 300 i sugröret. Dessutom fanns det 20 anmärkningar som ej var lokaliserade eller förståeliga, se Tabell 4.10. Vid genomgång av dessa rapporter var det ibland svårt att skilja på om anmärkningen gällde intaget eller tilloppstuben då författaren i vissa fall hade en gemensam rubrik, ”intag/tilloppstub”. I kategorin ”sugrör” ingår även anmärkningar på sugrörsförlängningen. Inspektionerna har inte gjorts av samma person vilket medför att olika benämningar har använts vid beskrivning av liknande skador, t.ex. erosionskada och urgröpning. Det är svårt att veta om det är någon skillnad mellan dessa men i de nästkommande avsnitten har de behandlats likvärdigt. Då genomgången av besiktningsrapporterna har utförts för att få en överblick av vilka typer av skador som är vanligast och var dessa är lokaliserade, har ingen djupare studie av skadorna i sig gjorts.

Tabell 4.10 Skadeanmärkningar från 62 besiktningar mellan år 1986-2015

Del	Anmärkningar	Frekvens
Intag	110	18%
Tilloppstub	100	16%
Spiral	90	15%
Sugrör	300	48%
Ej lokaliserat	20	3%
Totalt	620	100%

4.3.1 Intag

Av de ca 110 anmärkningarna i intaget var de vanligaste skadorna:

- o *Inläckage av vatten*, ca 25 anmärkningar. Framförallt vid intagsluckan. Finns även några enstaka fall av läckage genom gjutfogar.
- o *Rost*, ca 20 anmärkningar. Främst är det intagsluckan och dess komponenter samt grindar som har utsatts för rostangrepp. Nedbrytning/försvagning av rostskydd ingår även i denna kategori.
- o *Gjutsår och sprickor*, ca 10 anmärkningar.
- o *Övriga anmärkningar* var bland annat igensatta dränagehål, lösa plåtbitar, sandavlagringar vid intagsluckan, saknad av bult vid galler och personalsäkerhet som t.ex. saknad av skyddsräcke, halkskydd samt ryggskydd till stege.

4.3.2 Tilloppstub

Av de ca 100 anmärkningarna i tilloppstuben var de vanligaste skadorna:

- o *Erosion och urgröpningar i betongen*, ca 40 anmärkningar.
- o *Rost*, ca 15 anmärkningar. Främst på den stålklädda delen av tilloppstuben.

- o *Betongskador*, ca 10 anmärkningar. (Anmärkningar i vissa protokoll hade inte någon beskrivning av vilken typ av betongskada det rörde sig om).
- o *Gjutsår och sprickor*, ca 10 anmärkningar.
- o *Inläckage av vatten*, ca 10 anmärkningar. Oftast vid fogar mellan tak och vägg.
- o *Övriga anmärkningar* var bland annat kalkutfällningar, urspolning av sprickor och i några få fall var tilloppstuben delvis vattenfylld vilket gjorde att alla ytor inte kunde inspekteras.

4.3.3 Spiral

Av de ca 90 anmärkningarna i spiralen var de vanligaste skadorna:

- o *Rost*, ca 30 anmärkningar. Främst på spiralplåten och stagpelarna. Försvagning av rostskydd ingår även i denna kategori.
- o *Sprickor*, ca 15 anmärkningar. Oftast på botten.
- o *Bompartier*, ca 10 anmärkningar. Vid bomknackning av spiralplåten har man erhållit bomeko.
- o *Erosion i betongen*, ca 10 anmärkningar. Främst vid gjutfogar.
- o *Övriga anmärkningar* var kalkutfällningar, kavitationsskador på ledskenorna, trasigt galler och ”skräp” på spiralbotten.

4.3.4 Sugrör

Av de ca 300 anmärkningarna i sugröret var de vanligaste skadorna:

- o *Erosion och urgröpningar i betongen*, ca 80 anmärkningar.
- o *Inläckage av vatten*, ca 50 anmärkningar. I några få fall var vattennivån så hög att inspektion av sugröret inte kunde genomföras.
- o *Sprickor*, ca 50 anmärkningar.
- o *Rost*, ca 30 anmärkningar. Försvagning av rostskydd ingår även i denna kategori.
- o *Dränagehål och upptryckshål igensatta*, ca 25 anmärkningar.
- o *Betongskador*, ca 20 anmärkningar. (Anmärkningar i vissa protokoll hade inte någon beskrivning av vilken typ av betongskada det rörde sig om).
- o *Gjutsår*, ca 10 anmärkningar.

- o *Bompartier*, ca 10 anmärkningar. Vid bomknackning av plåtdelar har man erhållit bomeko.
- o *Övriga anmärkningar* var bland annat skador på galler, avsaknad av bultar vid galler, slitna betongytor, kalkutfällningar och säkerhetsaspekter t.ex. avsaknad av ryggskydd för steg.

4.3.5 Specialfall

En del vattenkraftverk har haft stora problem med genomgående sprickor i den så kallade mellanväggen i sugröret. Denna konstruktionsdel utsätts för stora normalkrafter, moment och skjuvkrafter vilket troligtvis har lett till utmattningsbrott i armeringen. Det har funnits diskussioner om att implementera någon form av automatisk övervakning för att underlätta löpande tillståndskontroll (Huss, 2007).

4.3.6 Sammanställning

Av statistiken ovan så framgår det att ungefär hälften av alla anmärkningar gäller sugröret. Dock beror detta troligtvis på att sugröret har en mycket större area än de andra delarna. De vanligaste typerna av skador är erosion och urgröpningar, sprickor samt rost. Sprickorna rapporterades i de värsta fallen vara flera meter långa medan sprickvidden för de allra flesta sprickor understeg 1 mm. Längden på erosionsskadorna och urgröpningarna är från några decimetrar till ett par meter, bredden några decimetrar och djupet varierar från några centimetrar upp till drygt en decimeter. Nästan inga skador bedömdes vara allvarliga. De skador som rekommenderades att åtgärdas innan nästa inspektion var oftast vattenläckage som försvårade inspektionen, igensatta upptryckshål och anmärkningar som gällde personalsäkerhet.

4.4 Ras i bergtunnlar

I Sverige har det skett ett antal ras i till- och utloppstunnlar. Det har då handlat om bergtunnlar, där två av de större skett vid Gidböle och Norränge. I dessa två fall har rasen nått ändå upp till markytan, då det helt enkelt har skapats ett slukhål rakt ner till tunneln. Det har även skett liknande ras utomlands, t.ex. i Norge. De flesta av rasen har inträffat under de första åren som kraftverken varit i drift och har oftast berott på svällande lera.

4.4.1 Gidböle kraftverk

Gidböle kraftverk har en fallhöjd på 30 meter och en effekt på 12 MW. Från kraftstationen går en ca 2,5 km lång frånloppstunnel vars tvärsnittsarea är ca 40 m². Ett ras upptäcktes 13 mars 1991 genom att en krater hade bildats vid markytan. Djupet av kratern var ca 35 meter och diametern ca 12 meter, se Figur 4.5 och 4.6. Kraftverket hade varit i drift i 5 år innan raset inträffade (Hultman, Stille & Söder, 1993). Rasområdet var ursprungligen förstärkt med sprutbetong och bultar. Enligt Hultman, Stille och Söder (1993) är det troligt att motmorillonitlera som återfanns på platsen hade kommit i kontakt med vatten och börjat expandera. Lerans tryck mot sprutbetongen ökade succesivt tills förstärkningen började ge efter och sprickor uppkom. Detta möjliggjorde sedan för strömmande vatten att erodera och spola bort material bakom sprutbetongen. Stenblock i berget tappade därefter sin inspanning och föll ner på sprutbetongen som till slut knäcktes och därmed rasade in i tunneln.



Figur 4.5 *Rashålet i ytan vid Gidböle (Hultman, Stille & Söder, 1993).*

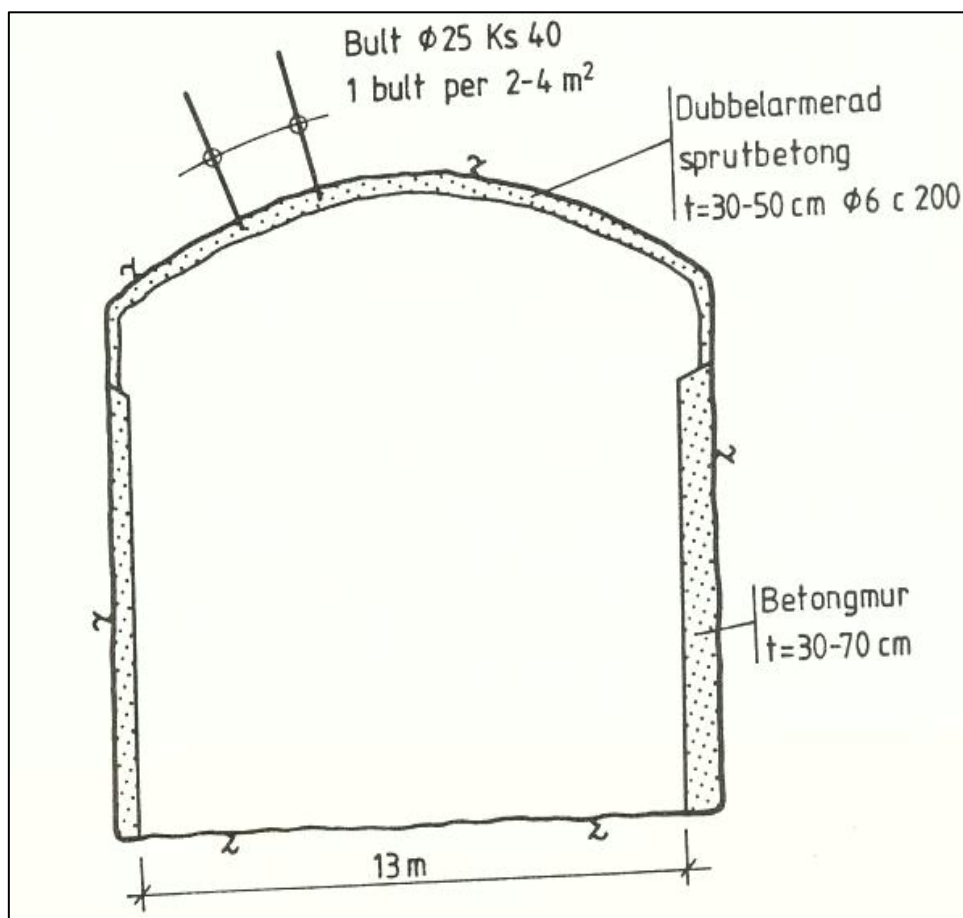


Figur 4.6 *Rashålet vid Gidböle som var ca 12 meter i diameter (Hultman, Stille & Söder, 1993).*

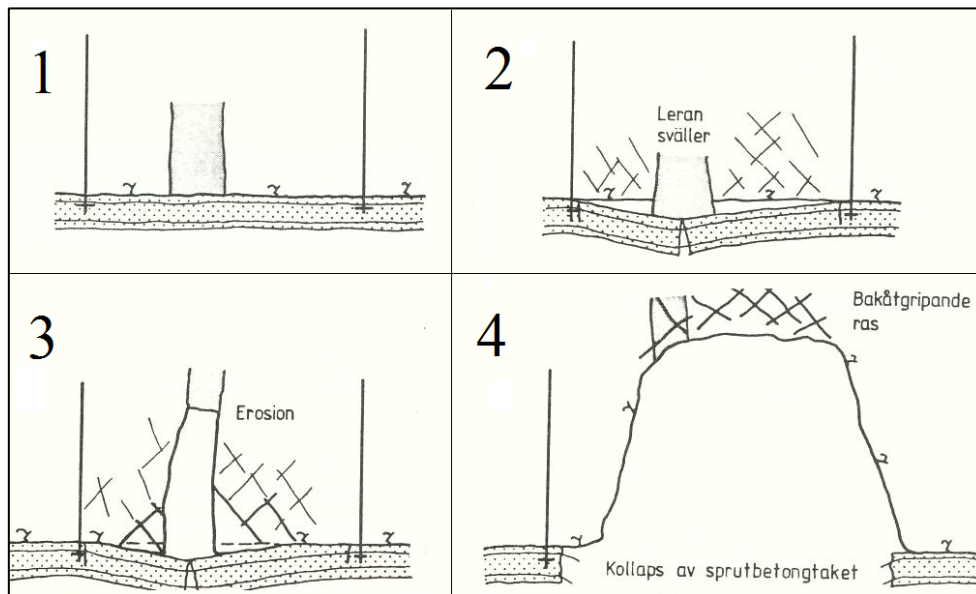
4.4.2 Norränge kraftverk

Norränge vattenkraftverk har en fallhöjd på 21 meter och en effekt på 50 MW. Från kraftstationen går en ca 2 km lång frånloppstunnel med en tvärsnittsarea på 180 m². Den 2 augusti 1989 upptäcktes ett ras i tunneln genom att ett hål på ca 2 m² hade upptäcktes på en motionsslinga som passerade över tunneldragningen. Kraftverket hade varit i drift i 26 år innan raset (Heiner & Stille, 1990). Området vid raset var ursprungligen förstärkt med betongmurar upp längs med väggarna och dubbelarmerad sprutbetong med bultar i taket, se Figur 4.7. Berget hade mycket dålig kvalitet och bestod bland annat av montmorillonitlera. Enligt Heiner och Stille (1990) bestod rasförloppet av följande steg, se Figur 4.8:

1. Vatten trängde igenom sprutbetong och kom i kontakt med leran bakom.
2. Leran började svälla, dock skedde detta mycket långsamt på grund av den begränsade mängden vatten. Svälltrycket på sprutbetongen blev stort och sprickor började bildas.
3. Material bakom sprutbetongen eroderades bort och korrosion på armeringen kunde ske då syrerikt vatten hela tiden tillfördes.
4. Belastningen på sprutbetongen blev så stor att armeringen slets av och material rasade in.



Figur 4.7 Den ursprungliga förstärkningen vid rasområdet i Norränge (Heiner & Stille, 1990).



Figur 4.8 Rasförlopp i Norränge. Modifierad efter Heiner och Stille (1990).

4.4.3 Tåsan kraftverk

Tåsan kraftverk har en fallhöjd på 269 meter och en effekt på 40 MW. År 1957 skedde ett ras i den nästan 7 km långa tilloppstunneln med tvärsnittsarean 17 m². Kraftverket hade varit i drift i 4 år när en ventil skulle monteras i tilloppstunneln och därför tömdes på vatten. På grund av det minskade hydrostatiska trycket mot omgivande berg rasade material in på flera platser (Kuhlin, 2015e).

4.4.4 Vrenga kraftverk

Vrenga kraftverk ligger utanför Oslo i Norge. Ett ras i tunneln inträffade år 1960, endast 10 månader efter att kraftverket tagits i drift. Orsaken till raset bedöms ha berott på dessa två processer: försämring av skjuvhållfastheten i sprickor samt svällande lera. Klorit förekom i sprickor, som i kontakt med vatten tappar en stor del av sin skjuvhållfasthet. Detta i kombination med svällande lera orsakade troligen raset (Brekke & Selmer-Olsen, 1965).

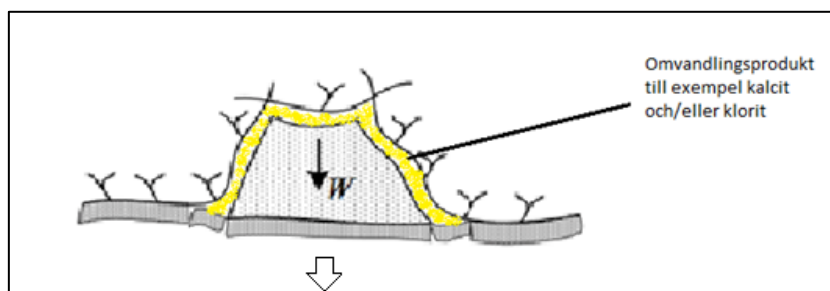
4.4.5 Sammanställning av ras

I Håkansson (2013) sammanställning av 26 ras i vattenledande tunnlar runt om i världen är det möjligt att urskilja tre olika huvudorsaker till rasen.

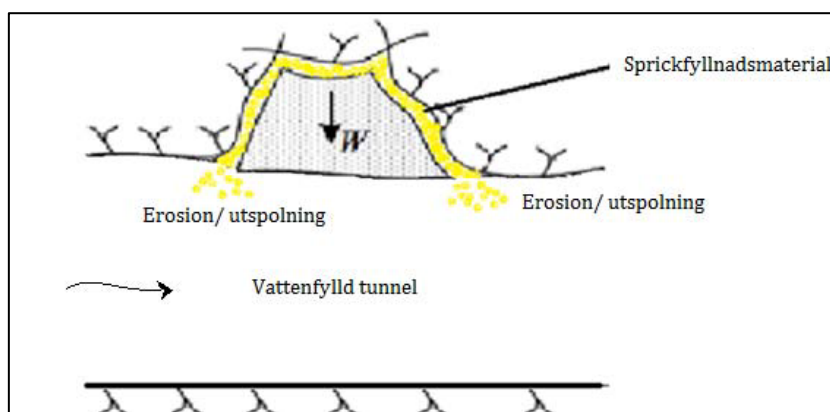
1. Svällande lera.
2. Glidning orsakad av omvandlingsprodukt.
3. Hydrostatiskt tryck.

När svällande leror upptäcks vid drivning av tunnlar förstärks som regel dessa sektioner kraftigt. Lerans svälltryck har trots detta många gånger underskattats då trycket blivit för stort på förstärkningen och ras har därmed inträffat. Lermineraler som kalcit och klorit är vanligt förekommande material i sprickor. Dessa mineralers skjuvhållfasthet minskar drastiskt vid kontakt med vatten och kan då leda till glidning, se Figur 4.9. För hydrostatiska tryckfenomen är det möjligt att skilja på två huvudtyper av händelser. Det första är variationer i trycket, som

orsakade raset vid Tåsan vattenkraftverk. Det andra är urspolning och erosion av sprickmaterial, se Figur 4.10.



Figur 4.9 Glidning på grund av låg skjuvhållfasthet (Håkansson, 2013).



Figur 4.10 Glidning på grund av erosion och utspolning (Håkansson, 2013).

De flesta ras ha berott på en kombination av ovanstående orsaker men oftast har det funnits en dominerande process, t.ex. så trycker den svällande leran sönder sprutbetongen vilket gör det möjligt för vattnet att erodera bort bakomliggande material. Internationellt har man även haft problem med erosion av sandsten (Broch, 2010). I Håkansson (2013) kan det avläsas att de flesta av rasen har inträffat under kraftverkens unga år, nästan 50% av rasen inträffade under de 5 första åren efter driftstart, se Tabell 4.11 Av de 26 ras som Håkansson (2013) undersökte var huvudorsaken till 14 ras svällande lera, se Tabell 4.12 och 4.13. Även i vissa av de andra fallen har svällande lera hittats bland rasmassorna men har inte bedömts vara huvudorsak, utan har då förmodligen verkat som en katalysator.

Tabell 4.11 Antal år från driftstart till ras. Modifierad efter Håkansson (2013).

Tid till ras [år]	Antal ras
0-5	12
5-15	9
15-75	3
Okänt	2
Totalt	26

Tabell 4.12 Huvudorsak till rasen. Modifierad efter Håkansson (2013).

Huvudorsak till ras	Antal
Svällande lera	14
Glidning orsakad av omvandlingsprodukt	5
Hydrostatiskt tryck	6
Okänt	1

I Tabell 4.13 framgår det att trots att förstärkningar funnits längs tunnelsektionen så har detta ej förhindrat ras. Endast två av fallen är det helt fastställt att ingen förstärkning har förekommit. I 12 av fallen har det inte funnits någon information om hurvida förstärkning har funnits eller ej. Intressant är att i 6 av fallen har sprutbetongen inte klarat av det tryck som skapats när leran svällt och en gång har lerat till och med tryck sönder en betonginbyggnad.

Tabell 4.13 Typ av ursprunglig förstärkning vid rasområdet i kombination med huvudorsak till raset. Modifierad efter Håkansson (2013).

Orsak Förstärkning	Svällande lera	Glidning orsakad av omvandlingsprodukt	Hydrostatiskt tryck	Okänt	Totalt
Bult och/eller sprutbetong	7	0	2	0	9
Betonginbyggnad	1	1	1	0	3
Oförstärkt	0	0	2	0	2
Okänt	6	4	1	1	12

Inget av rasen bedöms ha berott på att förstärkningarna brutits ner genom urlakning, korrosion eller liknande och därmed tappat sin hållfasthet. Istället har alla ras troligtvis berott på att betong och andra förstärkningar har släppt på grund av överbelastning, ofta p.g.a. trycket som uppträdde från svällande lera.

4.4.6 Förstärkningars kondition

Idag görs det väldigt sällan besiktningar av bergtunnlarna. Enligt Sundell (1994) gjordes dock en inspektion av Tåsan kraftverk år 1991. Tunnlen hade då varit vattenfylld i 34 år och anledning till inspektion var för att undersöka hur förstärkningarna såg ut.

- Träförstärkningar bedömdes i relativt gott skick.
- Sprutbetongen hade en vidhäftning på över 0,3 MPa, vilket genrellt sätt räknas som godkänt.
- Bultar var av blandad kvalitet. Vissa bultar kunde dras ut med handkraft medan andra bultar höll för 3 ton.

- o Kvaliteten på den konventionella betongen bedömdes vara tillräcklig, dock fanns det erosionskader på betongen.

I Gävunda kraftstation gjordes en stor besiktning och reparation sommaren år 2014. Bland annat reparerades delar av de aggregatnära inre vattenvägarna, t.ex. tilloppstuben och turbinbladen. Utloppstunneln tömdes på vatten, berg skrotades och nya bultar monterades (Schmidt, 2014).

Bolmentunneln är 80 km lång dricksvattentunnel. I samband med ett ras 2009 beslutades att hela tunneln skulle inspekteras och renoveras (Sydvatten, 2010). Enligt Bogdanoff, Ellison och Lundqvist (2010) var konditionen på förstärkningarna följande:

- o Bultar uppskattades vara i gott skick.
- o Sprutbetongen var starkt nedbruten. Den var urlakad, avflagad och flera bomljud vid knackning upptäcktes.
- o På många ställen var bergfregment lösa.
- o Dessutom upptäcktes ett par små ras.

5. Remotely Operated Vehicle (ROV)

Vid undervattensinspektioner där det ej är lämpligt att använda dykare, t.ex. på grund av för stora djup, farliga omgivningar eller svåråtkomliga utrymmen, kan någon typ av undervattensfarkost med fördel nyttjas. Dessa farkoster klassificeras bland annat utifrån graden av kravet på mänsklig närvaro. Med en ROV sitter operatören, kallad pilot, på säkert avstånd och har kontakt med farkosten via ett försörjningssystem bestående av olika typer av kablar. Via installerade instrument som sonar och kamera med belysning får sedan piloten löpande aktuell information från farkosten när den flygs fram i vattnet. Dessa är relativt komplicerade system där konstruktion och design nog måste övervägas.

5.1 Klassificering av undervattensfarkoster

Undervattensfarkoster kan delas upp i de två följande huvudkategorierna: bemannade och obemannade. Obemannade undervattensfarkoster består i sin tur av de två kategorierna: fjärrstyrda, "Remotely Operated Vehicle" (ROV) och automatiska, "Autonomous Underwater Vehicle" (AUV). Det här arbetet behandlar i första hand ROV:ar varför dessa kommer att beskrivas mer ingående. Skillnaden mellan en ROV och en AUV är att den sistnämnda är helt självgående och behöver därmed ingen koppling i form av kabel till vattenytan. Dessa följer antingen en förprogrammerad eller "logik-driven" rutt beroende på uppdragets karaktär (Christ & Wernli, 2014).

5.2 Klassificering av ROV:ar

ROV:ar började användas "offshore" redan 1953, men då framförallt inom militären och i olika typer av forskningsprojekt. De följande 22 åren fortsatte utvecklingen av tekniken inom nämnda områden och introducerades till den kommersiella sektorn 1975. Då byggdes den första farkosten som användes inom oljeindustrin (Shepherd, 2001). En ROV kan förenklat beskrivas som vattentäta instrument och propellrar monterade på ett skrov som är kopplat via ett försörjningssystem till en pilot vid ytan. Via detta system överförs data i form av videobilder, sonarsignaler och annan information och även för det mesta, men inte alltid, elektricitet till propellrar och instrument, beroende på ifall ROV:en är utrustad med ombord monterade batterier. ROV:ar delas vanligen upp i följande fyra klasser (Christ & Wernli, 2014):

1. *Observation class ROV (OCROV)*: Denna klass innefattar farkoster upp till ca 100 kg och har vanligtvis ett maximalt arbetsdjup på ca 300 meter. Användningsområdet är framförallt understöd eller substitut till dykare för inspektioner på relativt små djup. Eftersom att dessa är förhållandevis lätta är de "bärbara" och har därför fördelen att de kan sjösättas för hand. Då OCROV:ar för det mesta är drivna av likström så begränsar detta längden på försörjningskabeln, då spänningsfallet är direkt korrelerat med ledningslängden.
2. *Mid-sized ROV (MSROV)*: ROV:ar i denna klass har vanligtvis en vikt på mellan 100 kg och 1000 kg och anpassade för större djup. Dessa drivs av växelström vilket gör att de kan jobba med längre kablar och därmed har större räckvidd. Detta möjliggör även

montering av kraftigare utrustning som t.ex. manipulatorarmar för lättare arbeten. De flesta instrument och framdrivningspropellrar är vanligtvis drivna direkt av elektricitet, medan t.ex. manipulatorarmar och liknande är drivna av hydraulik. Då denna klass inte är "bärbar" på samma sätt som OCROV:ar behövs det vanligen någon typ av anordning för att sjösätta och ta upp farkosten, vilket medför ett ökat krav på platsen för sjösättning.

3. *Work class ROV (WCROV)*: Dessa ROV:ar drivs av högspännings växelström (>3000 V) som vanligen direkt görs om till mekanisk energi i form av hydraulik för framdrift och arbetsfunktioner. Den stora skillnaden för denna klass gentemot MSROV:ar är det större antalet hästkrafter till manipulatorarmar och andra arbetsverktyg, vilket möjliggör tyngre arbetsuppgifter.
4. *Special use vehicles*: Under denna kategori hamnar maskiner som i första hand inte flyger i vattnet, utan t.ex. kravlar på botten eller blir dragna av andra båtar o.s.v. Dessa kan till exempel vara konstruerade för rengöring av ytor i en vattenreservoar.

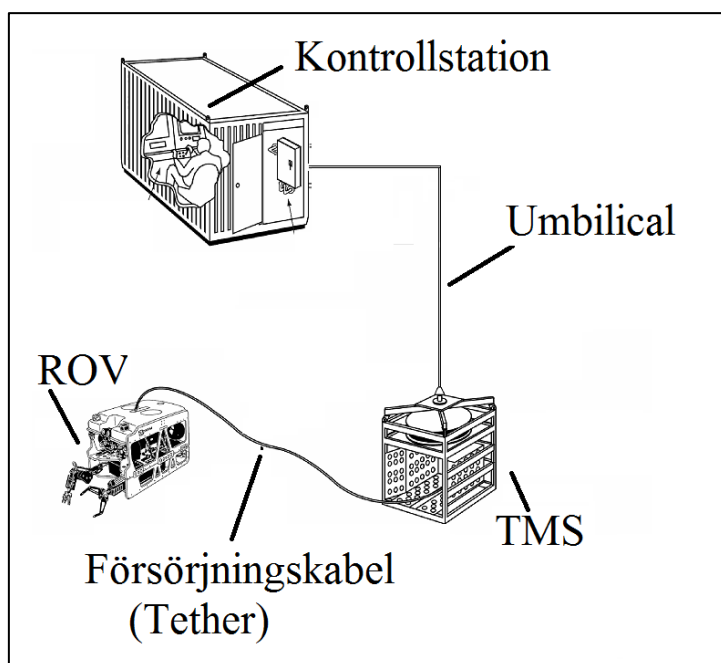
Då detta arbete behandlar inspektionsmetoder av inre vattenvägar (och inte åtgärder och reparationer av uppkomna skador) är det framförallt farkoster i klasserna observation och mid-sized ROV och dess instrument som kommer att beskrivas och diskuteras vidare, se Figur 5.1.



Figur 5.1 Exempel på farkoster i klasserna observation och mid-size ROV (Lexus, 2015).

5.3 Försörjningssystem

För att ha möjlighet att kontrollera och hålla kontakt med en ROV krävs en säker uppkoppling mellan pilot och farkost. Då radiovågor bara penetrerar några få våglängder genom vatten på grund av dess energidämpande effekt krävs det en fysisk koppling i form av ett försörjningssystem. Detta system måste kunna leverera information i båda riktningar i form av styrkommandon till farkosten och registrerad data från kameror, sonar o.s.v. till piloten (Molland, 2008). Tre engelska begrepp är centrala vid beskrivandet av försörjningssystemet mellan kontrollstation och ROV. Dessa är umbilical, tether och tether management system, TMS (Molland, 2008). Umbilical är den kabel som går mellan kontrollstationen och TMS:en. Tether är kabeln som går mellan TMS:en och själva ROV:en, vilken i detta arbete betecknas med försörjningskabel. Ett TMS är anordningen där försörjningskabeln är uppvindad och varifrån erforderlig kabellängd matas ut vid utkörning, samt rullas upp vid återhämtning av en ROV. Vid jobb på stora djup, som till exempel runt oljeplattformar, är TMS:en nedsänkt i vattnet vilket ökar räckvidden. Detta inte bara på grund av den fysiska faktorn med längre kabel i vattnet men även genom att högre spänning ofta är möjlig att lägga på systemets umbilical. En TMS används i vanliga fall endast för system med längre försörjningskablar för att göra hanteringen av dessa enklare. Vid enklare system är försörjningskabeln direkt kopplad till kontrollstationen. För schematisk skiss av ett ROV-systems försörjningssystem se Figur 5.2 .



Figur 5.2 Schematisk skiss över försörjningssystemet mellan kontrollstation och ROV. Modifierad efter SAAB (2015).

Några få avancerade ROV-system bär med sig sin energikälla i form av batterier, men i de flesta fall kommer energi i form av elektricitet att transporteras genom försörjningskabeln. De grundläggande faktorerna gällande design av en försörjningskabel innefattar ledningskapacitet av elektricitet, signalkapacitet för datatrafik, draghållfasthet samt dess flytkraft (Richards, 2015).

För effektiv elektrisk ledningskapacitet gäller det att ha ett material med så låg resistans som möjligt. Det vanligaste materialet som används är därför koppar. På grund av spänningsfallet som sker i en ledare kommer pålagd spänning i kombination med längden av och resistansen i försörjningskabeln att vara avgörande för hur mycket effekt en ROV har att tillgå. Det är därför viktigt att se till att de komponenter som används på farkosten inte har ett större effektbehov än vad som finns tillgängligt (Christ & Wernli, 2007). En begränsning för hur mycket spänning som går att lägga på en försörjningskabel har att göra med isoleringen som används för att isolera den strömförande ledaren. Vanligtvis används olika typer av termoplaster, vilka dock kan bli mjuka och till slut smälta vid de höga temperaturer som kommer med stora elektriska spänningar. Detta kan leda till totalt haveri och förlust av strömförsörjning till ROV:en (Richards, 2015). Likström är det dominerande strömformatet inom klassen OCROV då de krävs mindre avskärmningskomponenter mellan de ström- och informationsledande delarna för att motverka elektroniskt brus. Systemen har även en lägre vikt och är mer portabla samtidigt som kraftöverföringsenheterna är billigare. Vid användning av växelström krävs kraftigare avskärmningskomponenter (Molland, 2008). Denna extra vikt kan därmed medföra att kabeln får negativ flytkraft istället för den generellt sett önskade neutrala. Växelström används därför vanligen endast hos större system på dess umbilical ner till TMS:en där strömmen transformeras till likström eftersom umbilical-kabeln ej kräver neutral flytkraft. Detta är framförallt fördelaktigt vid jobb på stora djup där TMS:en kan sänkas ner och en stor del av distansen mellan kontrollstation och ROV består då av dess umbilical.

Då piloten är beroende av att få korrekt och exakt information från ROV:ens instrument är en så stor bandbredd för datatrafiken som möjligt önskvärd. Även signalerna för dataöverföringen tappar kvalitet och styrka med längden på kabeln. Överföring av information kan vara digital eller analog och antingen elektrisk eller optisk (Richards, 2015). På senare år då kostnaden gått ner för fiberoptik, som tillåter stor datatrafik, har detta blivit allt mer standard även för de mindre och billigare ROV-systemen (Molland, 2008). Kabelns draghållfasthet är väsentlig då den utgör den mekaniska länken till ROV:en. Vanligtvis måste den därför klara att bära sin egenvikt, farkostens vikt samt kunna hantera andra dynamiska påfrestningar som t.ex. friktion mot vattenströmmar och tunnelväggar. Vanligt för umbilicals är att de är förstärkta med stål medan försörjningskabeln förstärks med syntetiska fibrer, som t.ex. kevlar för att hålla vikten nere och därmed lättare uppnå neutral flytkraft i vatten (Richards, 2015). Vid inspektioner i inre vattenvägar så är det framförallt två faktorer som är dimensionerande för räckvidden (Pehrson, 2015). För det första är det spänningsfallet i försörjningskabeln, vilket kommer att påverka den effekt som ROV:en har till sina motorer. För det andra så kommer den friktion som uppstår mellan försörjningskabeln och tunnelns ytor att påverka räckvidden. Beroende på tunnelns utformning så ändras förutsättningarna för hur mycket motståndet ökar med längden in i tunneln. I en rak vattenväg där kabeln kan placeras i tvärsnittscentrum krävs mindre kraft för att åka in än vid en dragning där många krökar finns, eftersom att friktion uppstår vid varje kontaktpunkt. Även mellan kabeln och vattnet skapas friktion, men då strömningshastigheten kommer att vara ytterst begränsad i ett avställt vattenkraftverks inre vattenvägar kommer denna friktion att vara underordnad den som uppstår mot berg och betong.

5.4 Sonar

Ordet sonar kommer från "SOund Navigation And Ranging" och innefattar ett brett spektrum av akustiska instrument. Tekniken blev framtagen och utvecklad som en direkt konsekvens av Titanics förlisning 1912, då det huvudsakliga kravet blev att detektera isberg på minst 1,6 kilometers avstånd. De grundläggande fysikaliska teorierna som tekniken grundar sig på är att ljud med olika våglängder transporteras med bestämda hastigheter i vatten, vilket registreras av en sonars mottagarinstrument (Hansen, 2010). Dessa instrument är ett väldigt användbart verktyg på en ROV för att detektera objekt och navigera i vattenförhållanden med dåligt sikt.

5.4.1 Detaljrikedom kontra räckvidd

För att bestämma den optimala frekvensen för en specifik tillämpning av en sonar krävs det att en övervägning görs mellan bildkvalitet, penetration in i undersökt medium (t.ex. genom leror till underliggande berg) samt storlek på den area som skall undersökas (Christ & Wernli, 2014). Akustiska signaler som transporteras i vatten kommer att absorberas och dö ut i olika takt beroende på frekvensen (Hansen, 2010). En signal med låg frekvens, och därmed lång våglängd, kommer att kunna transporteras en längre sträcka än en signal med hög frekvens och kort våglängd, se Tabell 5.1.

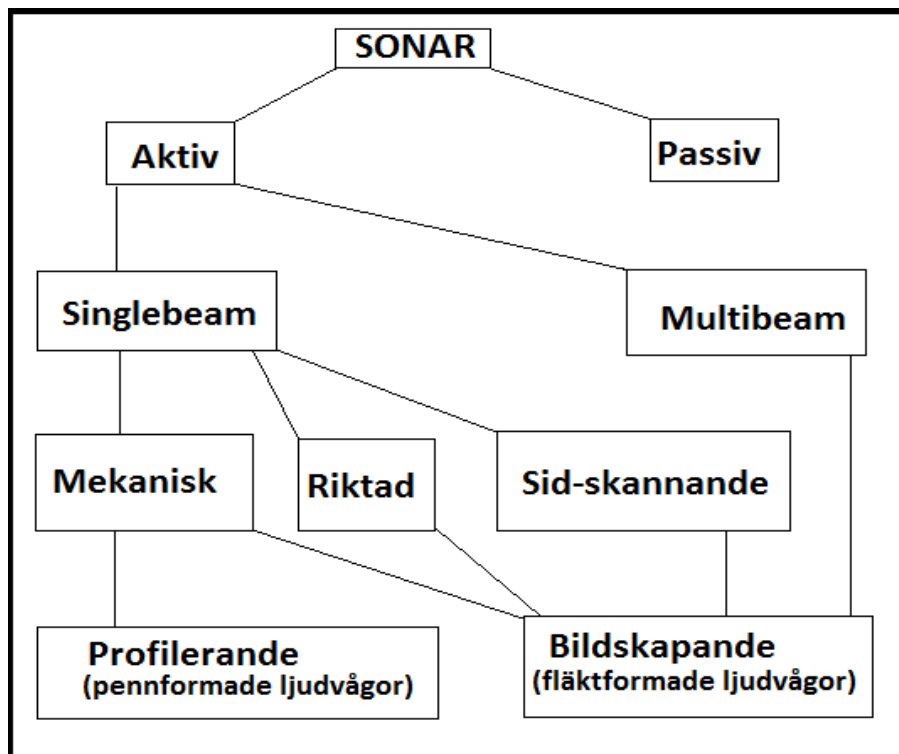
Tabell 5.1 *Frekvens och våglängd kontra räckvidd för ljudsignaler i vatten.*

Frekvens [kHz]	Våglängd [km]	Sträcka [km]
0,1	15	1000
1	1,5	100
10	0,15	10
100	0,015	1
1000	0,0015	0,1

5.4.2 Principer för sonar

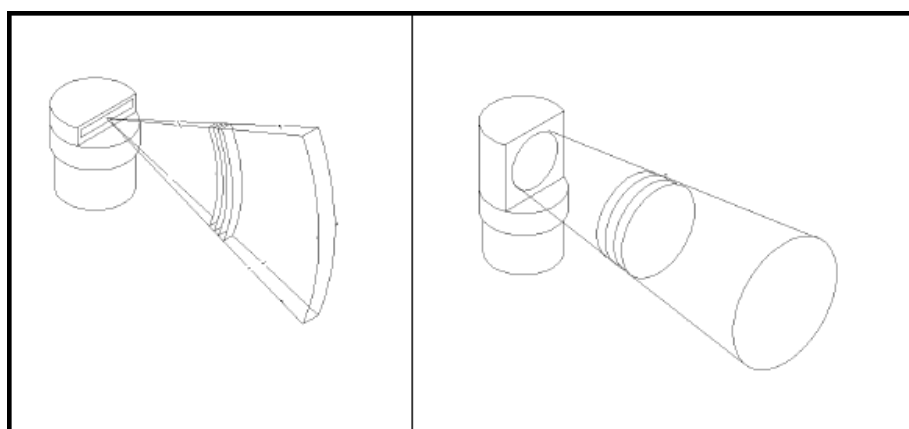
Det finns ett antal sorters sonarer med olika verkningssätt beroende av typ och antal ljudpulser som skickas ut simultant. Dessa redovisas överskådligt i Figur 5.3. Baserat på ursprunget av ljudvågorna som registreras är det möjligt att dela upp sonar-tekniken i två huvudgrupper (Hansen, 2010):

1. *Aktiv sonar.* En aktiv sonar sänder ut akustiska signaler som studsar mot omgivande objekt och sedan reflekteras tillbaka till mottagarelementen på sonaren. De registrerade ljudvågorna har alltså transporterats från sonaren, till reflektionspunkten och sedan tillbaka.
2. *Passiv sonar.* En passiv sonar skickar inte ut några ljudvågor av egen kraft, utan registrerar endast signaler från omgivningen. Källan till de akustiska signalerna kan då vara olika typer av farkoster eller sjöliv. Den passiva sonaren lyssnar med andra ord bara av omgivningen.



Figur 5.3 Överblick av de olika sonarsystemen och vilken information de producerar.

Detta arbete kommer endast att behandla aktiva sonarsystem, då passiva sonarsystem inte används vid inspektioner av inre vattenvägar. För att sonaren ska ha möjlighet att registrera objekt som den skickar signaler mot krävs det att våglängden är kortare än föremålets storlek. Om så inte är fallet kommer delar av ljudvågen att "missa" objektet och sonaren får inget entydigt eko tillbaka. Vidare så krävs att våglängden är mycket kortare än objektet för att enskilda detaljer på undersökt föremål ska framträda. Detta innebär att ju högre frekvens, och därmed kortare våglängden, desto mer detaljerad bild kommer vara möjlig att registrera, på bekostnad av kortare räckvidd (Christ & Wernli, 2014). De aktiva sonarsystemen kan sedan delas upp baserat på antalet och typen av ljudvågor som skickas ut från instrumentet. De två olika typerna av ljudvågorna är antingen fläktformade eller pennformade, se Figur 5.4.

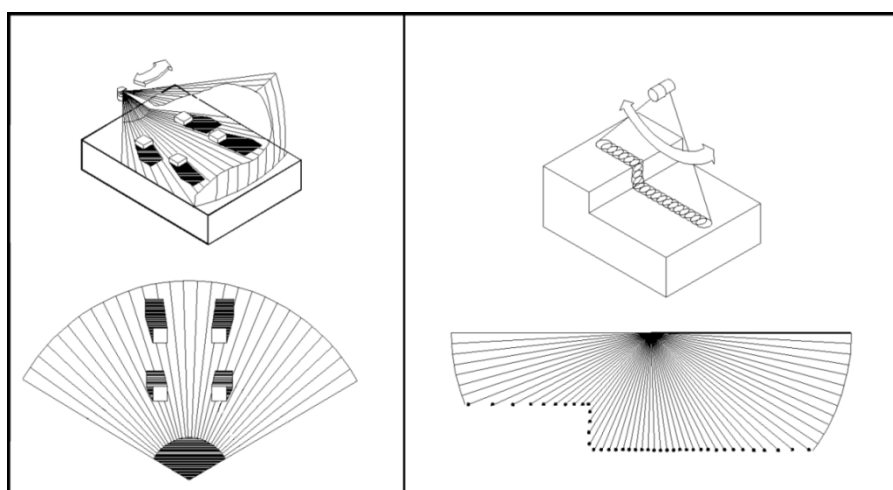


Figur 5.4 T.v. fläktformad ljudvåg, t.h. pennformad ljudvåg. Modifierad efter Imagenex (2015).

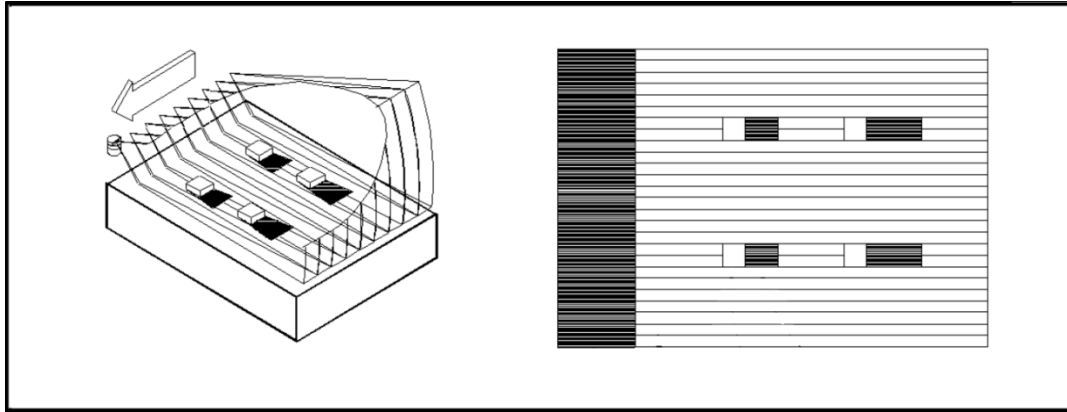
Det aktiva sonarsystemet kan delas in i följande kategorier som sedan blir bildskapande eller profilerande (Christ & Wernli, 2014):

1. Singlebeam: riktad sonar
En ljudvåg i taget skickas iväg i en statisk riktning. Sonarhuvudet har ej möjlighet att rotera.
2. Singlebeam: mekanisk eller sid-skannande sonar
En ljudvåg i taget skickas iväg med skiftande riktning då sonarhuvudet kan rotera.
3. Multibeam
En mängd ljudvågor skickas iväg simultant vilket gör att ett större område kan skannas av samtidigt.

Gemensamt för singlebeamsonarer är att de skickar iväg en signal i taget som registreras en gång av ett mottagarelement. Att en sonar är riktad innebär att signaler skickas och tas emot i samma riktning hela tiden. En mekanisk sonar kan däremot rotera och därmed registrera upp till 360° av sin omgivning. Dock tar det en viss tid, upp till en minut, för sonaren att rotera vilket medför en viss väntetid vid varje registrering. För att få en korrekt registrering krävs det därför att ROV:en inte är i rörelse under registreringsperioden. Mekaniska singlebeamsonarer kan antingen vara bildskapande eller profilerande beroende på vilken typ av ljudvåg som skickas iväg. En bildskapande kan t.ex. registrera bottenprofiler framför ROV:en medan den profilerande kan mäta upp t.ex. ett tunneltvärnsnitt, se Figur 5.5. Sid-skannande sonar används i första hand för kartläggning av havsbotten (Hansen, 2010). Den fungerar genom att farkosten som sonaren är monterad på antingen kör själv eller blir släpad efter en båt i konstant hastighet på bestämt avstånd från botten. Sonaren skickar då ut fläktformade ljudpulser med jämna intervall åt sidorna som registrerar den förbipasserande havsbotten, se Figur 5.6.

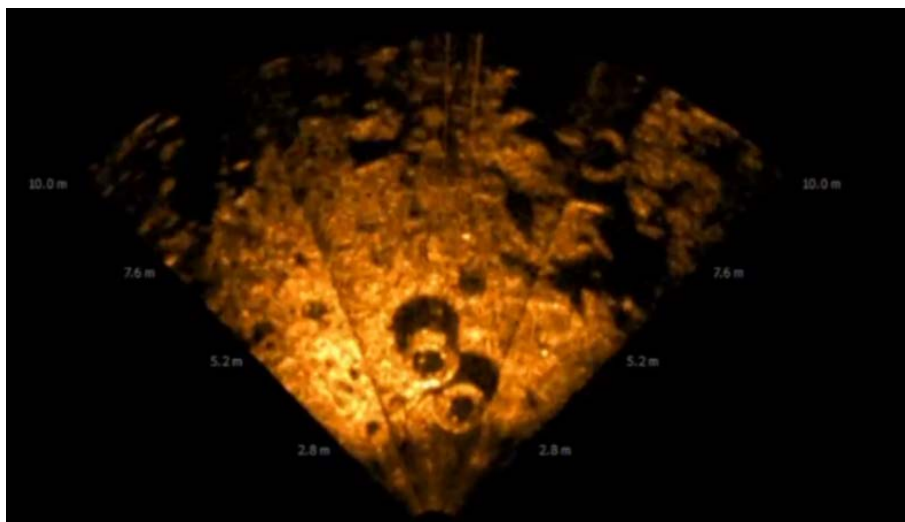


Figur 5.5 T.v. bildskapande, t.h. profilerande mekaniska sonar, ovan illustreras deras verkningsätt och nedan vad som registreras. T.v. representerar mörka områden ljudkuggorna som objekten ger upphov till. Modifierad efter Imagenex (2015).

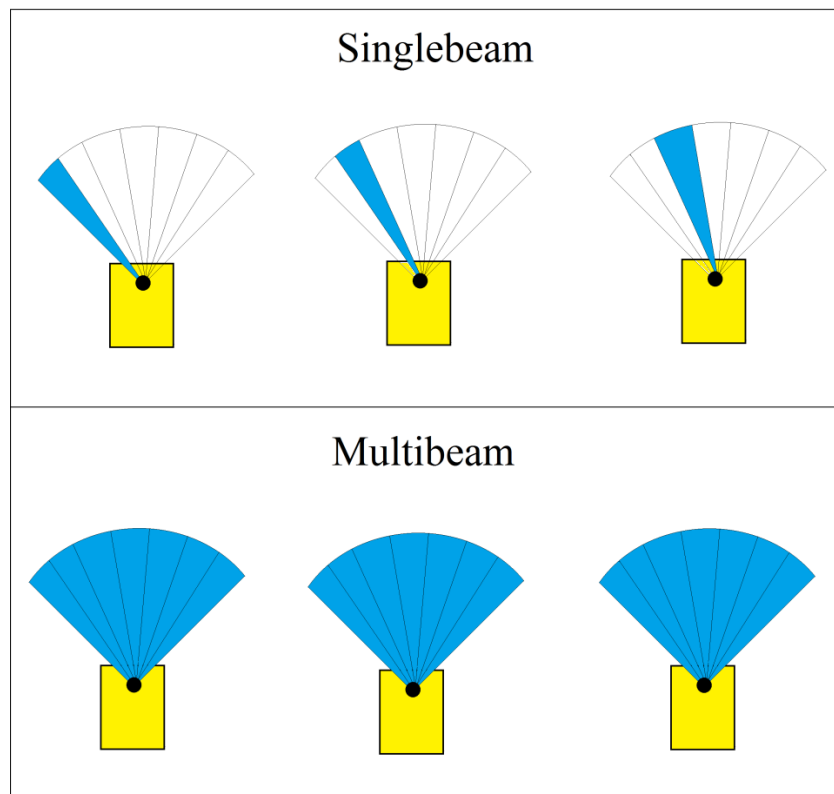


Figur 5.6 Sidskannande sonar, t.v. verkningsätt och t.h. vad som registreras. Modifierad efter Imagenex (2015).

En multibeam skickar ut en bred, fläktformad ljudpuls vars reflektioner registreras på ett antal mottagarelement. Eftersom det med stor exakthet mäts när ljudreflektionerna träffar respektive mottagare så kan sonaren avgöra från vilken riktning ljudet kom. I motsats till en bildskapande mekanisk singlebeam sonar möjliggör detta att området som blir undersökt kan visualiseras i realtid (Christ & Wernli, 2014). För exempel på den typ av bild en multibeamsonar kan generera, se Figur 5.7 som visar en stillbild från en illustrationsvideo för en sonar monterad på en ROV. I bilden kan ett par lastbilsdäck tydligt urskiljas och ljudskuggor som dessa producerar. Sammanfattningsvis kan det nämnas att respektive system, singlebeam och multibeam, fyller olika funktioner och har för och nackdelar vid inspektioner med ROV. Singlebeam sonarer har bland annat fördelen att de kan registrera upp till 360° runt farkosten, är billigare och kräver mindre datakraft. Gentemot en multibeam är dock bilduppdateringen långsam då endast en ljudimpuls i taget skickas ut varför det tar en viss tid innan hela det avskannade området uppdaterats. Med en multibeam erhålls därmed snabbare uppdatering då hela det skannade området uppdateras simultant, se Figur 5.8.



Figur 5.7 Bild från multibeamsonar som visar lastbilsdäck på sjöbotten (BUVI, 2014).

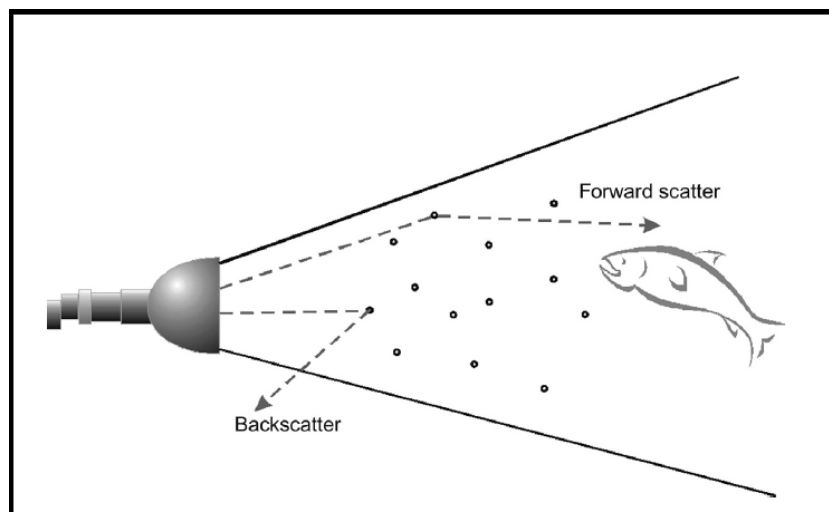


Figur 5.8 Ovan illustreras verkningssättet för en singlebeam som skickar ut en ljudimpuls i taget och på så vis skannar av området. Nedan illustreras en multibeam som skannar av hela området simultant.

5.5 Kamera och belysning

Precis som för många andra komponenter på en ROV finns det ingen kamera som är optimal under alla förutsättningar och avvägningar måste göra vad som prioriteras för var situation. En viktig faktor är placeringen och manöverbarheten av kameran. Fördelaktigt är att kameran har möjlighet att roteras i sidled och vinklas i höjdlid för att kunna rikta linsen i önskad riktning utan att behöva manövrera runt hela ROV:en. En bakåtriktad kamera är också värdefull vid händelse att försörjningskabeln fastnar i objekt under ytan. Det blir då lättare att utvärdera och lösa oväntade problem som uppkommer (Richards, 2015). Vid inspektioner av utrymmen som ligger svårtåtkomligt men ovan vattenytan, t.ex. svallschakt i inre vattenvägar eller undersidan av kajer och liknande, är en toppmonterad kamera som når ovanför vattenytan fördelaktig (Fleetwood, 2015). Kameror som klarar av att återge bilder på längre avstånd under dåliga ljusförhållanden måste göra avkall på färgåtergivning och kontrast. En färgkamera kommer däremot att kräva kraftigare belysning som kan medföra mer ”scattering”, se Figur 5.9, vilket innebär partiklar i vattnet genom reflektion dels leder bort en del av ljuset men även ökar motljuset vilket försämrar sikten. En liknelse kan göras med att köra bil i dimma där användning av helljuset, i de flesta fall, försämrar sikten (Christ & Wernli, 2014). Det finns en mängd olika typer av lampor som vanligtvis används under vatten, vilka kan delas upp i tre huvudkategorier (Gray, 2004).

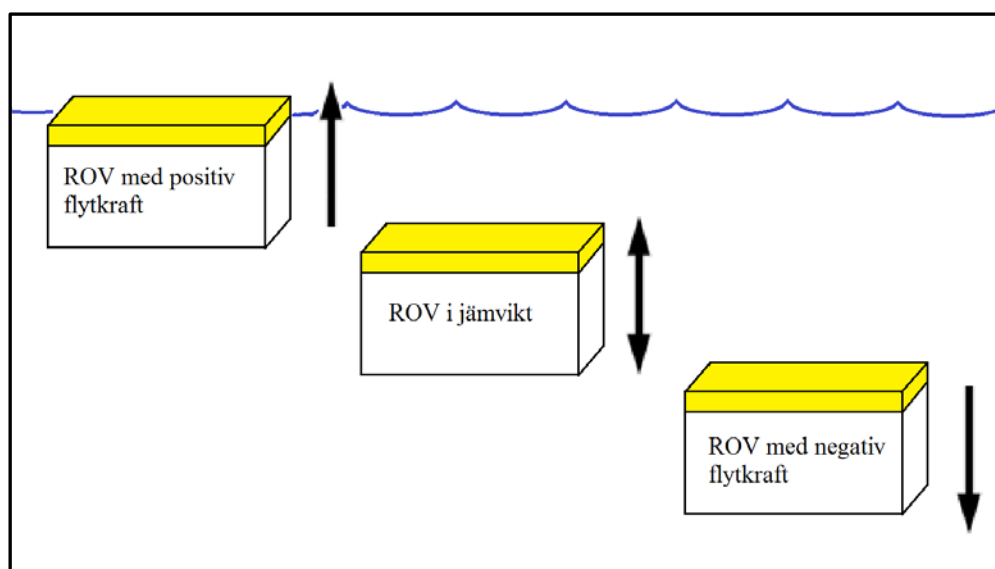
- o Glödlampor (Incandescent Lamps)
Den vanligaste typen av lampa som härstammar från uppfinnandet av det elektriska ljuset. Tekniken går ut på att en elektrisk ström är driven genom en volframtråd (glödtråd) som hettas upp tills den glöder och därmed emitterar ljus. Upp till 90% av den använda energin blir värme och då endast 10% ljus. En glödlampa är även relativt känslig för stötar och vibrationer, vilket kan vara en viktig faktor på en ROV.
- o Gasurladdningslampor (Gas Discharge Lamps)
Ljus produceras genom att en elektrisk ström skapar plasma i ädelgaser som t.ex. argon, neon, krypton och xenon. Denna typ av lampa är vanligtvis betydligt energieffektivare än glödlampan och är även mer stöttålig p.g.a. avsaknaden av glödtråd. Exempel på gasurladdningslampor är lysrör, lågenergilampor och xenonlampor.
- o Lysdioder (LEDs, Light Emitting Diodes)
Fungerar genom att en spänningsskillnad är applicerad mellan två halvledarmaterial vilket får elektroner att hoppa till högre energilägen som sedan emitterar energi i form av ljus när det hoppar tillbaka. Denna lampa är väldigt energieffektiv för att omvandla elektricitet till ljus. Var lysdiod är relativt liten och det krävs ett stort antal för att få ett tillräckligt starkt ljus för undervattensapplikationer. Utmaningen ligger i att placera tillräckligt många i en kompakt och vattentät behållare men fortfarande hålla temperaturen låg nog för effektiv ljusproduktion från dioderna. Denna typ av lampa fick sitt genombrott för undervattensapplikationer under början av 2000-talet och har gjort stora framsteg inom branschen sedan dess (Chew, 2011).



Figur 5.9 *Scattering innebär att ljusets påverkas av partiklar i vattnet (Christ & Wernli, 2014).*

5.6 Flytkraft och stabilitet

Exakt som för alla andra föremål som nedsänks i vatten kommer även en ROV att utsättas för reaktionskrafter enligt Arkimedes princip, som lyder: ”Ett föremål nedsänkt i vätska påverkas av en uppåtriktad kraft, som är lika stor som tyngden av den undanträngda vätskan”. Farkostens flytkraft grundar sig alltså på förhållandet mellan dess egentygnd och volym i jämförelse med motsvarande volyms vattenmassa, se Figur 5.10. I de alla flesta fall eftersträvas en svagt positiv flytkraft av framförallt två anledningar. För det första är det önskvärt att en ROV flyter upp till ytan i händelse av haveri på grund av till exempel strömbrott. För det andra tillåter detta inspektion nära botten utan att behöva använda de nedåtriktade propellrarna som riskerar att röra upp sediment och därmed försämra sikten avsevärt (Richards, 2015). Då vattnets sammansättning varierar kommer också ROV:ens flytkraft att växla. Det är därför viktigt att kontrollera och kalibrera, med hjälp av ballast och flytmaterial, farkostens flytkraft vid inspektioner på nya platser.

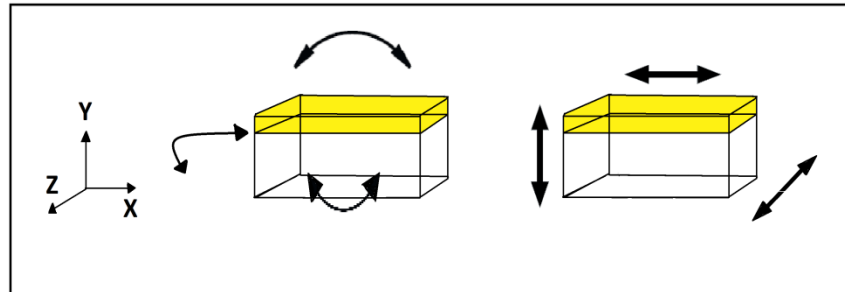


Figur 5.10 Tre grader av flytkraft, positiv, neutral och negativ.

På grund av detta är det genomgående viktigt att ha vikten i åtanke vid designarbetet med en ROV, eftersom att allt som monteras med en densitet större än vatten måste kompenseras med extra flytmaterial (Christ & Wernli, 2014). Dessa material kan delas in i två huvudklasser, och används framförallt på olika djup. För mindre djup, < 330 meter, används styva och lätta material som till exempel polyuretan och polyvinylklorid. Dessa är relativt billiga och uppfyller effektivt sin uppgift. För större djup, ned till 1000 meter, används istället syntaktiskt skum vilket består av små ”luftballonger”, ofta små glassfärer, sammansatta med ett kraftigt lim, harts. Detta material är betydligt dyrare men har en lång livslängd, uppemot 20 år. För att uppnå så stor stabilitet som möjligt eftersträvas centrerat flytmaterial högt upp och tyngdpunkt långt ner. Stabiliteten kommer därmed att öka med avståndet mellan flytcentrum och tyngdpunkten (Richards, 2015).

Totalt kan en farkost ha sex frihetsgrader, vilka innefattar rotationer runt x-, y- och z-axeln, samt tre rörelser längs med nämnda axlar, se Figur 5.11. Vanligtvis är en ROV inte tillverkad

och utrustade för rotationer runt x- och z-axeln under körningen, då detta kräver betydligt mer komplicerade system som därmed drar upp priset. Dock är ballastens läge många gånger möjlig att justera innan sjösättning ifall en viss konstant lutning kring dessa axlar önskas (Richards, 2015).



Figur 5.11 De sex frihetsgraderna, till vänster rotationerna och till höger rörelserna längs med axlarna x, y och z.

5.7 Sammanfattningsvis om ROV:ar

Vid införskaffandet av komponenter, eller hela ROV-system, finns en mängd faktorer som är viktiga att ha i åtanke. Beroende på typen av uppdrag, under vilka förhållanden och vilken typ av information som efterfrågas kommer det att vara möjligt att sätta ihop farkoster med vitt skilda attribut och kapaciteter. En ROV som ska övervaka temperaturförändringar på öppet hav kommer till exempel att ha helt andra krav på sig än en ROV som ska detaljstudera betong i trånga och komplicerade rörsystem. Sammantaget är det dock möjligt att sätta upp ett par kriterium för hur en "perfekt" ROV skulle kunna vara utformad (Christ & Wernli, 2014):

- o Obegränsat med energieffekt från ytan.
I motsats till t.ex. en batteridrivna ROV, som är begränsad till den energi som finns ombord, så skulle en högeffektiv försörjningskabel kunna erbjuda i stort sett obegränsad energieffekt.
- o Liten till storleken men fortfarande stabil i vattnet.
Med mindre storlek kommer större möjlighet att komma åt otillgängliga platser, men även större känslighet mot strömmar och andra påverkande krafter.
- o Obegränsat med bandbredd i försörjningskabeln.
Med stor dataöverföringshastighet blir det möjligt för en ROV att skicka information från en mängd sensorer, t.ex. sonarer och kameror, simultant och i hög kvalitet för att öka pilotens möjlighet att navigera och detektera vad som finns runt farkosten.
- o Minimal diameter på försörjningskabeln.
Desto mindre diameter på kabeln desto mindre friktion, eller drag, kommer det att bli mot vattnet. Detta medför även enklare hantering av systemet vid transporter, o.s.v.

5.8 Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

Av de företag som sysslar med undervattensinspektioner och som blivit kontaktade under arbetets gång är det ingen som använder självtänkande/förprogrammerade farkoster, så kallade AUV:s, vid inspektioner av inre vattenvägar. Enligt Pehrson (2015) fanns ett intresse från Amphi-tech i början av 2000-talet att med stöd från Vinnova (Sveriges innovationsmyndighet) utveckla en AUV för inspektion av inre vattenvägar. På grund av svårigheter att hitta medfinansiärer lades dock projektet på is. En sådan farkost hade bland annat eliminerat problemen som uppstår med försörjningskabeln i samband med inspektioner av långsträckta inre vattenvägar. I dagsläget används AUV:s framförallt vid karteringar av sjöbotten, pipeline-inspektioner, miljöövervakning i havsmiljö och liknande. Grundkonceptet är då att rutt och uppdragsinstruktioner programeras in varefter farkosten på egen hand utför uppgiften. Detta kan ske helt autonomt, utan någon som helst kontakt med operatören, eller i olika stadier av semi-autonomitet då farkosten till exempel uppdaterar sin position med jämna mellanrum (Kongsberg, 2015). Gemensamt för AUV:s är att de används på områden med fri vattenyta, vilket tillåter radiokommunikation och positionsbestämning då fri sikt mellan farkost och operatör är tillgänglig. Denna möjlighet försvinner i inre vattenvägar, då väggar och tak omöjliggör sådan trafik, vilket ställer högre krav på en AUV:s förmåga att orientera och lösa problem utan pilotens närvaro.

6. Inspektionsmetoder i inre vattenvägar

Idag sker det kontinuerliga inspektioner på många av vattenkraftverkens olika delkomponenter. Syftet med dessa är undersöka konditionen på delarna och därigenom säkerhetsställa ifall några reparationer behöver göras. De mest svåråtkomliga delkomponenterna som ska besiktas är de inre vattenvägarna, vars inspektioner kan delas in i de två kategorierna liten och stor. Vid en liten inspektion är det de aggregatnära inre vattenvägar som besiktas vilket tar någon enstaka dag att genomföra (Persson, 2015a). Begreppet stor inspektion innefattar bergtunnlar där det krävs omfattande arbeten för att genomföra besiktningen. En sådan inspektion kan medföra att tunneln måste torrläggas vilket innebär att vattenkraftverket kommer vara avstängt under en längre tid. På senare tid har inspektioner med ROV börjat användas i större utsträckning, framförallt utomlands, för att undersöka i vilket skick tunnarna är.

6.1 Inspektioner i aggregatnära inre vattenvägar

För de aggregatnära inre vattenvägarnas tilloppstub, spiral, sugrör och sugrörsförlängning sker idag besiktningar efter en förutbestämd tidsplan. I normalfallet görs dessa inspektioner vart åttonde år, företrädesvis i samband med reparationer av turbiner (Huss, 2007). För vattenkraftverk med flera aggregat inspekteras vanligtvis inte samtliga inre vattenvägar vid ett och samma tillfälle. Istället är det den turbin som ska inspekteras och repareras vars vattenvägar undersöks medan resterande aggregat och tillhörande inre vattenvägar är i drift (Persson, 2015b).

Inspektionerna genomförs på tre olika sätt och det är yttre skador som undersöks:

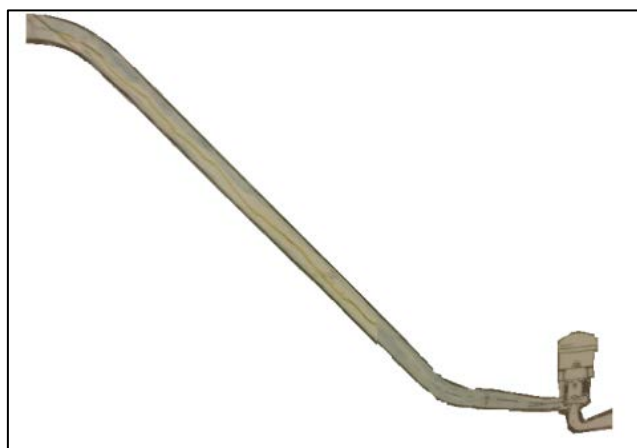
- Inspektionen görs i torrhet av en eller flera besiktningsmän genom att de inre vattenvägarna töms och pumpas ut på vatten. Detta är en okulär besiktning där viss mättningsutrustning och eventuellt oförstörande provning kan förekomma.
- Inspektionen görs av dykare som är försedd med en kamera.
- Inspektionen görs med en ROV.

Innan inspektionen utförs måste en genomgång av underlagsmaterial genomföras. Då undersöks protokoll från tidigare besiktningar med syfte att identifiera anmärkningar och eventuella områden som inte kunde inspekteras vid föregående tillfälle samt ifall det krävs särskild utrustning t.ex. skyddsutrustning, stegar, ställningar, kranbilar etc. (Persson, 2015a). Vid anläggningar där vissa delar av de inre vattenvägarna består av oförstärkt berg, t.ex. i sugröret, måste skyddsskrotning utföras, även om inspektionen sker med dykare (Persson, 2015a). Luckor ska stängas och kontrolleras samt så ska aggregatet ställas av innan inspektionen börjar. Därefter utförs besiktningen med någon av metoderna nämnda ovan. Dykare och ROV används främst för att inspektera utsidan av intaget medan inspektioner i torrhet med en eller flera besiktningsmän är den vanligaste metoden för de aggregatnära inre vattenvägarna (Persson, 2015b).

Vid en inspektion i torrhet kan stegar och ställningar användas för att komma så nära väggar, tak, golv och andra ytor som möjligt. Ingångarna till de inre vattenvägarna är ofta besvärliga att ta sig igenom och utrymmena som ska inspekteras är ofta stora vilket leder till att säkerhetslinor ibland behöver användas. Beroende på utformingen och skicket på stegvägar för respektive vattenkraftverk sker åtkomst till dessa utrymmen på olika sätt. Då det är mörkt i kombination med de stora avstånden i vattenvägarna krävs stark belysning (Huss, 2007). Besiktningsmannen ska dokumentera alla skador som hittas, noga anteckna var skadan är lokaliserad och ta bilder med kamera. Vid inspektionen kan även bomknackning och sprickviddsmätning genomföras (Persson, 2015a). Hela inspektionen inklusive eventuell torrläggning av vattenvägarna och förberedelser tar oftast två till fyra dagar (Persson, 2015b).

Efter utförd inspektion skrivs en rapport som tar upp de anmärkningar och skador som kunde detekteras. Dessa bedöms enligt de två beskrivningarna tillstånd och funktion. Bedömningen sker i en sexgradig skala från "Otillfredsställande" till "Utmärkt". Därefter görs en kort beskrivning av anmärkningen, var den är lokaliserad och eventuella bilder bifogas. Besiktningsmannen skriver även ner inom vilket tidsintervall skadan bör åtgärdas. Områden som inte kunde inspekteras rapporteras och till sist ges ett förslag när nästa besiktning bör äga rum, d.v.s. oftast 8 år senare om inga större skador upptäcktes (Persson, 2015a).

Enligt Wiklund (2015) fungerar inspektion i torrhet av de aggregatnära inre vattenvägarna mycket bra och han anser inte att det finns någon anledning att ersätta den med t.ex. inspektioner med ROV. Även om bedömningarna av skadorna från dessa inspektioner får en subjektiv karaktär ses detta inte som något problem (Huss, 2007). Dock finns det en fundering hos Vattenfall AB ifall ROV:ar skulle kunna användas vid anläggningar där tilloppstuben lutar 45° eftersom att inspektioner av dessa är mycket besvärliga. Konstruktionens kondition bedöms då ofta genom okulär besiktning från tubens botten (Persson, 2015b), se Figur 6.1. I sådana tuber har det även förekommit inspektioner där arbetsställningar monterats från tubens botten och uppåt samt nerfiring från tubens översta del och nedåt.



Figur 6.1 Lutande tilloppstuba. Inspektion sker då oftast visuellt från tubens botten.

I vissa sugrör med oförstärkt berg har flottar använts för att kunna skrota bergytor högst upp. Vattennivån sänks då i takt med att bergytorna skrotas (Sjöström, 2015). En annan försvårande omständighet kan vara läckage från sugrörsluckan, vilket i vissa fall varit så

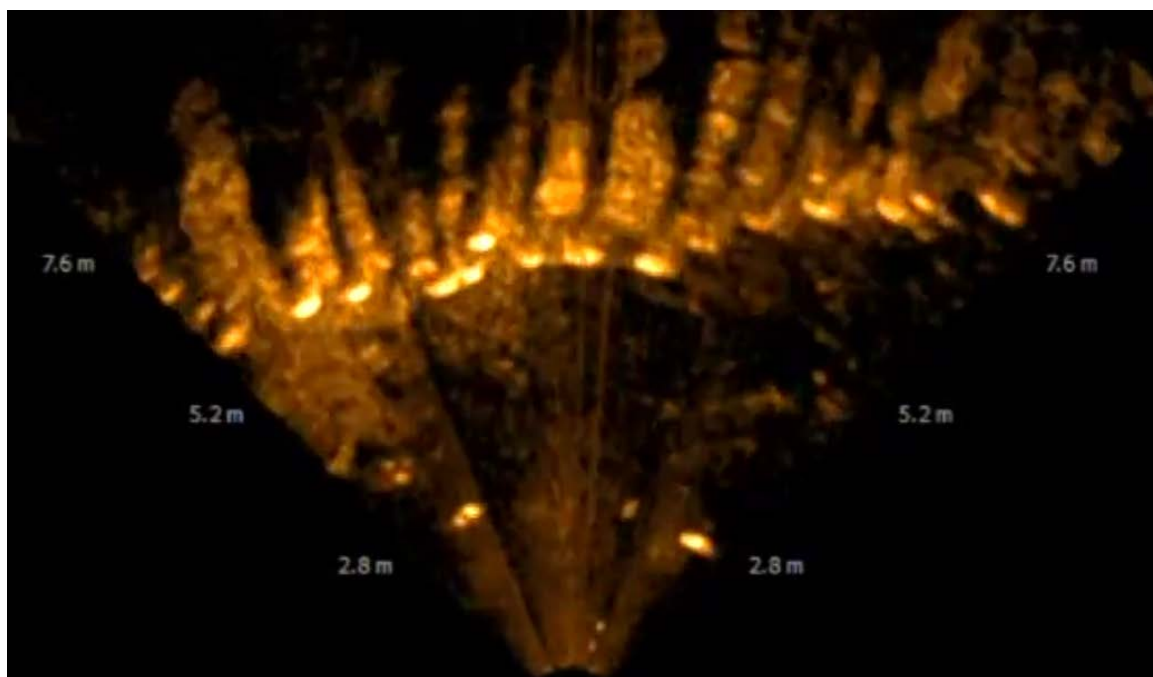
kraftigt av avsedda pumpar ej klarat av flödet vilket resulterat i en hög kvarvarande vattennivå i sugröret.

6.2 Inspektioner i torrlagda bergtunnlar

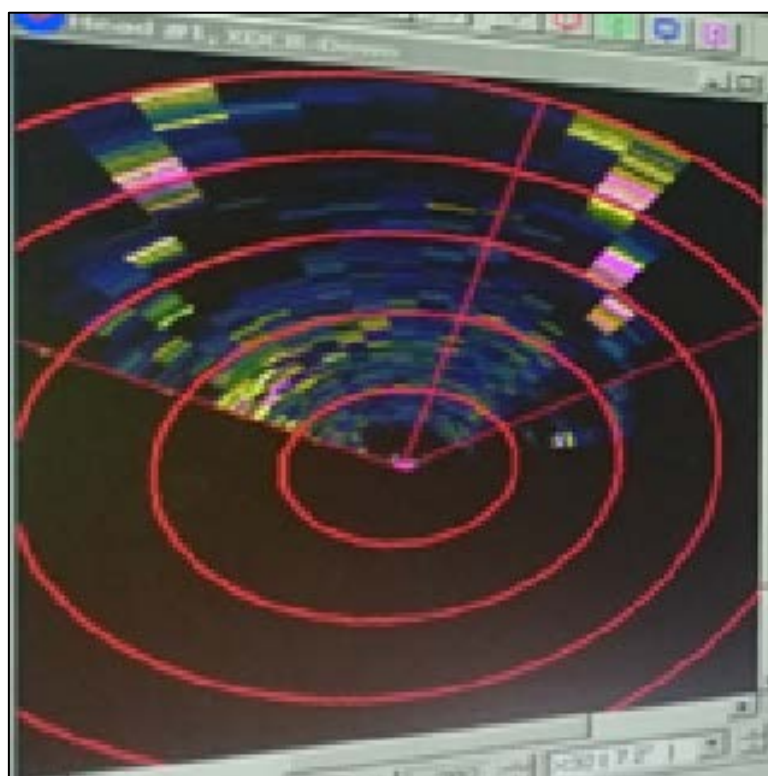
Idag sker det inga rutinmässiga inspektioner likt de ovan beskrivna, av de inre vattenvägarna som består av bergtunnlar eftersom det är ekonomiskt ohållbart (Persson, 2015b). Det finns inte heller något styrdokument som beskriver hur en sådan inspektion skulle gå till men det skulle krävas att vattenkraftverket var avstängt under lång tid. För det första måste eventuella fångdammar monteras, vatten pumpas ut, berg skyddsskrotas och vägar anläggas i tunnarna innan en sådan inspektion kan påbörjas. Bara detta skulle kunna ta flera månader att genomföra (Sjöström, 2015). Då vissa bergtunnlar har en tvärsnittsarea på över 200 m² behövs stora maskiner för att göra en sådan inspektion. Tunnarna är ofta gemensamma för alla aggregat i ett vattenkraftverk vilket innebär att alla dessa måste vara avstängda. Dessutom finns det risk för ras när tunneln töms på vatten då trycket på omgivande berg försvinner. I vissa tunnlar kan det även förekomma en beläggning bestående av alger på bergytorna vilket innebär att dessa måste rengöras innan skyddsskrotning kan utföras (Persson, 2015b). Det har genomförts ett fåtal inspektioner av kortare bergtunnlar men då har det varit i samband med att en tunnel även reparerats med t.ex. sprutbetong och bultar. Dykare har använts för att undersöka stenfickans utfyllnad (Persson, 2015b). Vid reparation av uppkomna ras i bergtunnlar har det som regel även genomförts inspektion och reparation av resterande delar av tunneln. I takt med att tunnarna åldras finns det risk för att nedbrytning av berget och dess förstärkningar sker snabbare. Detta i kombination med att många tunnlar aldrig har undersökts innebär att kunskapen om kondition på dessa delar är väldigt begränsad. Fallförluster kan mätas vilket ger information om ifall tunneln är igensatt på något ställe och det är endast vid fallförluster som det är värt att torrlägga tunneln och göra en okulär inspektion (Persson, 2015b).

6.3 ROV-inspektioner i inre vattenvägar

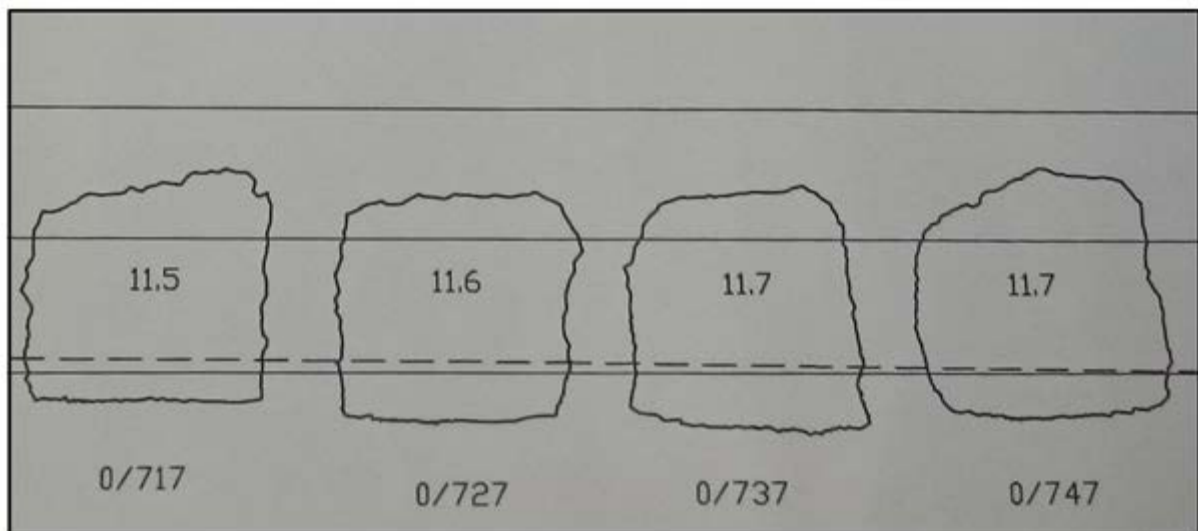
Totalt 14 företag som sysslar med undervattensinspektioner i Sverige med ROV har kontaktats under arbetets gång varav 6 stycken valde att svara på ställda frågor, se Bilaga. Inget av företagen arbetar endast med inspektioner av inre vattenvägar i vattenkraftskonstruktioner, utan undersöker även vattenfyllda utrymmen i andra sammanhang. Företagen har gjort inspektioner i både aggregatnära inre vattenvägar och bergtunnlar. I de flesta fall har dessa inspektioner genomförts på bergtunnlar i samband med att fallförluster i vattenkraftverket har registrerats. De ROV:ar som de aktuella företagen använder för inspektioner väger mellan ca 3 kg och 500 kg. De flesta är utrustade med en eller två sonar, kameror, lampor, djupmätare och kompass. Sonar som används är vanligen multibeam och/eller mekanisk singlebeam (bildskapande och profilerande), se Figur 6.2 – 6.4.



Figur 6.2 *Multibeam (bildskapande), där hela bilden uppdateras i realtid. På stillbilden syns ett påldäck som en horisontell rad i överkant. Lägg märke till ljud-skuggorna som pålarna genererar (BUVI, 2014).*



Figur 6.3 *Singlebeam (bildskapande). Det röda strecket (kl. 13) visar i vilken riktning sonarhuvudet är riktat och därmed vilken sektion av bilden som uppdateras för tillfället.*

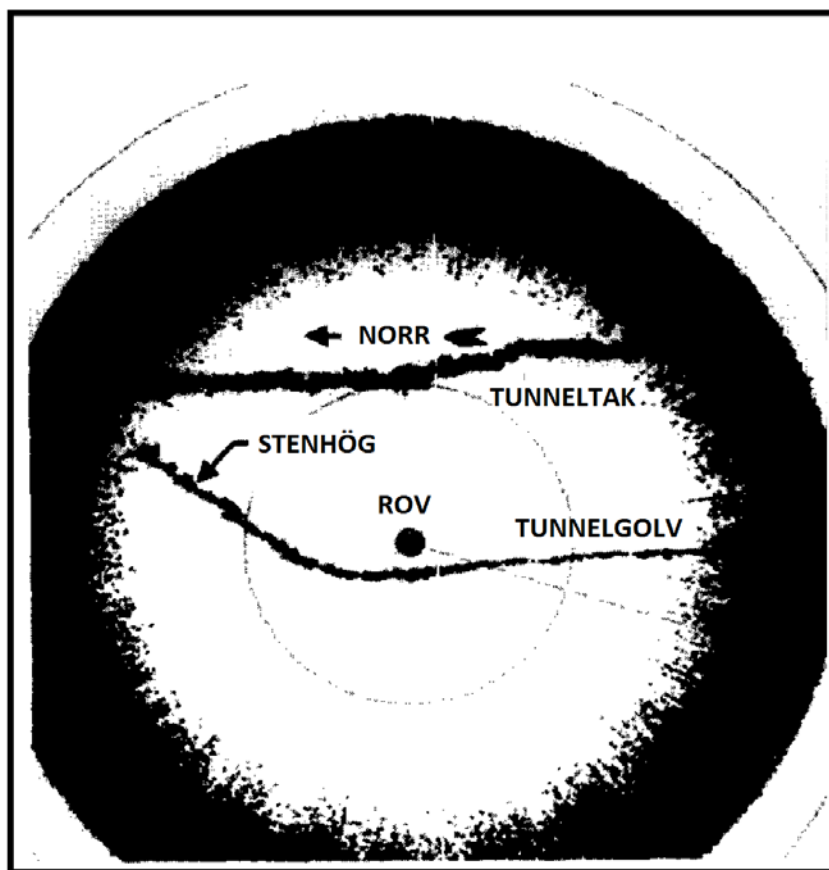


Figur 6.4 *Singlebeam (profilerande). Denna bild är efterbehandlad data som erhöles vid en inspektion. Siffrorna i mitten är tvärsnittsarean i kvadratmeter och siffrorna längst ner visar lokalisering i tunnelns längsgående riktning i meter. Foto Amphi-tech AB.*

Vid en inspektion måste aktuellt aggregat vara avställt och det krävs många förberedelser innan själva besiktningen kan börja. Vid inspektioner med större ROV:ar måste en kran användas vid sjösättning. Ritningar på konstruktionen bör studeras för att få ett bra underlag. Sonar av typerna bildskapande multibeam och singlebeam används för navigering och detektering av rasmassor och annat material på botten. Profilerande singlebeam används för att mäta upp tunnelns tvärsnitt, vilket innebär att ROV:en parkeras på botten och det mekaniska sonarhuvudet får snurra ett varv och mäta av tvärsnittet. Detta tar från några sekunder upp till en minut, varefter ROV:en körs fram exempelvis 10 meter innan nästa avläsning med den profilerande sonaren genomförs. Intervallet mellan varje profilerande bild beror på hur noggrant resultat beställaren vill ha. Vid upptäckt av ras med bildskapande sonar eller kamera (vid bra sikt) kan den profilerande sonaren användas för att mäta hur mycket av tunneln som är igensatt. Kamerorna används t.ex. för att undersöka hur rasmassorna ser ut och för att inspektera konstruktionernas ytor (betong, sprutbetong, bultar, stålbeklädnad, nakna bergytor). Kontaktade företags ROV-system har räckvidder mellan 250 och 7000 meter. För att veta positionen på ROV:en i tunnelns längsgående riktning använder de flesta företagen ett måthjul som registrerar hur många meter av försörjningskabeln som är utmatad. En detalj som flertalet kontaktade företag nämnt är att vid inspektioner i bergstunnlar finns det en risk att fastna med försörjningskabeln i t.ex. utstickande armeringsjärn. Detta skulle i värsta fall kunna leda till att ROV:en inte kan återhämtas. Generellt sett ses dock inte detta som någon överhängande risk då piloterna är skickliga och anser sig ha kunskap att kunna lösa de flesta problem som uppkommer. Vanliga skador som detekterats har varit erosion- och korrosionsskador, betongsprickor och olika typer av ras. Även stenfickans fyllnadsgrad har undersökts. Tidsåtgången för att göra en inspektion är väldigt varierande beroende på en mängd faktorer, så som utformning och storlek av området, önskad detaljrikedom i inspektionsrapporten, sikt i vattnet o.s.v. Ofta behövs det minst tre personer för att utföra en mindre inspektion, en pilot, en person som ansvarar för kabelutmatningen och en som för

anteckningar om inspektionens framsteg. Vid större inspektioner kan det vara nödvändigt med upp till ca fem personer då fler system ska kontrolleras. Ibland kan även en geolog vara med och granska bilderna från eventuella rasmassor och stenblock.

Det finns ett par exempel på tillfällen där tekniken med framgång har brukats för att undersöka och skaffa underlagsmaterial inför reparationer av tunnlar som rasat. Ett exempel är från den 120 km långa vattenförsörjningstunnel Päijänne, Finland, i vilken man registrerade strömningsförluster år 1998 (Mikkola & Viitala, 2000). Initialt gjordes då borrprover från markytan för att mäta vattennivån i tunneln på olika platser och därigenom lokalisera placeringen av ett eventuellt ras. Detta lyckades med en exakthet på ca 150 meter varefter en ROV skickades in för att registrera skadorna. Det visade sig då vara stenhög, ca 20 meter lång vid basen, som hade täppt igen hela tunneltvärsnittet, se Figur 6.5. Efter lokaliseringen av raset togs sedan beslutet att noggrannare undersökningar skulle göras av hela den resterande tunneln genom borrprover och seismiska mätningar med ROV:en då den hade kapacitet att utrustas med specialverktyg och instrument.



Figur 6.5 Profilerande sonarbild som visar ett längsgående tunneltvärsnitt och raset som skett i tunneln. Modifierat efter Mikkola & Viitala (2000).

Ett annat exempel på en inspektion som genomförts på detta sätt var i det norska vattenkraftverket Svandalsflonas lutande tilloppstunnel år 2008. Även här hade fallförluster registrerats och ett ras hade konstaterats. Tack vare inspektionerna med ROV kunde en noggrannare karta tas fram för hur och var rasmassorna hade ackumulerats i tunneln (Panthi, 2012). I Frankrike gjordes det 2009 ett försök där en ROV skulle inspektera 3 km av en inre

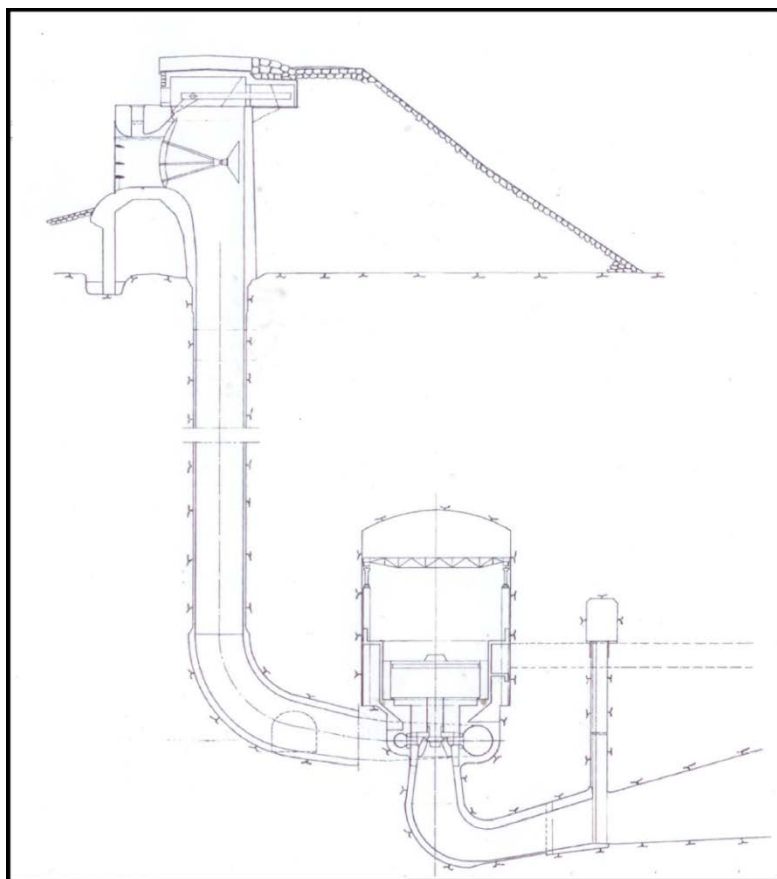
vattenväg. Detta gjordes i en tunnel som var väl dokumenterad sedan tidigare med syfte att jämföra de handnära inspektioner som gjorts med resultaten från ROV-inspektionen. (Loisy et al, 2010). Aktuell ROV var utrustad med lampor, tre kameror, en profilerande sonar, en hydrofon samt bar med sig sin energikälla i form av batterier. Försörjningskabel transporterade med andra ord bara data. Vad som bland annat detekterades vid undervattensinspektionen var stora läckage, vilka inte upptäckts vid de handnära inspektionerna då tunneln varit tömd. Strömmarna som dessa läckage gav upphov till hindrade dock inspektionen att fortgå längre än 1 km då krafterna helt enkelt blev för kraftiga för ROV:en att köra emot. Gruppen som genomförde experimentet var dock nöjda med resultaten som erhöles.

7. Undersökningar i fält och laboratorium

Under arbetets gång med denna rapport genomfördes totalt tre praktiska delmoment bestående av deltagande på inspektion av torrlagda aggregatnära inre vattenvägar, deltagande på ROV-inspektion av vattenfylld utloppstunnel samt försök med ROV i kontrollerad miljö. Dessa delmoment utfördes för att återkoppla till den teori som är presenterad i tidigare kapitel av detta arbete och för att skapa underlag för vidare diskussion och slutsatser.

7.1 Deltagande på inspektion av torrlagda aggregatnära inre vattenvägar

zzUnder våren 2015 deltog författarna på en inspektion av aggregatnära inre vattenvägar i ett av Sveriges större vattenkraftverk, där ett av aggregaten var avställt p.g.a. reparationer av turbinbladen. Denna inspektion innefattade sugrör, spiral och tilloppstub som var i direkt anslutning till turbinen och inklädda med stål eller betong, se Figur 7.1. Inspektionen skedde i torrhet vilket innebar att luckorna vid intaget och sugröret var stängda och berörda vattenvägar tömda på vatten. För detekteringar och dokumentation av skador användes ficklampor och kameror samt säkerhetsutrusning och diverse hjälpmedel för inpassage till de olika delarna.



Figur 7.1 Skiss över vattenkraftverket och dess inre vattenvägar.

7.1.1 Inspektion av sugröret

Ett återkommande problem för stegvägen till sugrören är kraftiga korrosionsangrepp på monterade stegar samt inläckande vatten vilket gör tillträde via dessa omöjligt ur säkerhetssynpunkt. Detta var fallet för denna inspektion. Alternativet blev att hissas ned drygt 20 meter från en monterad plattform vid turbinen till sugrörets botten, se Figur 7.2 och 7.3. Väl nere i sugröret genomfördes inspektionen "handnära" i den mån det är möjligt trots stora avstånd. Inspektionen varade i ca en timme innan deltagarna åter hissades upp till plattformen. Ytskikten, avstängningsluckan, upptryckshål, stegvägar och galler till brunnar inspekterades i sugröret.

7.1.2 Inspektion av spiralen

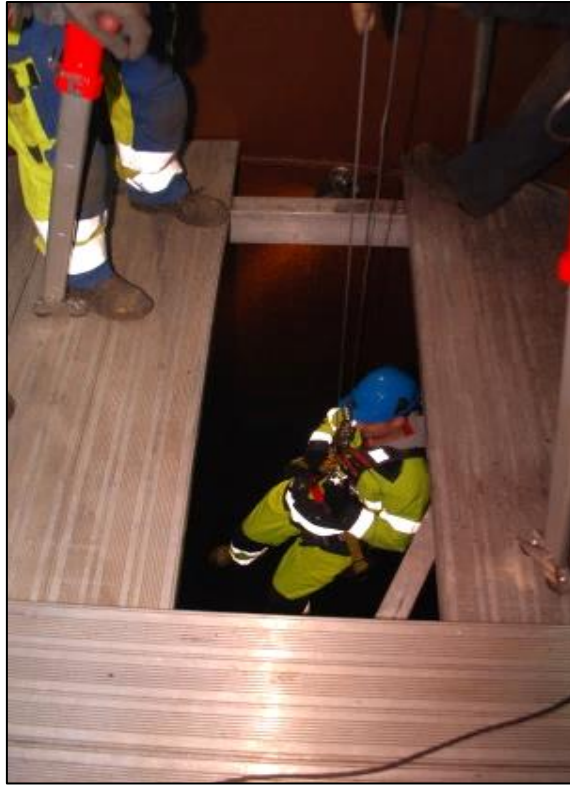
Tillträde till turbinens spiral skedde via tillträdeslucka från turbinaxelutrymmet ovanför, se Figur 7.4. Inspektionen skedde även här "handnära" med fotografier och kommentarer för dokumentation. I spiralen var det framförallt ytskikten, bestående av betong eller stål, som inspekterades för erosion och korrosionsskador. Övergången mellan spiralen och tilloppstuben visas i Figur 7.5

7.1.3 Inspektion av tilloppstuben

Vid aktuell inspektion var tilloppstuben vertikal med en fallhöjd på ca 100 meter, se Figur 7.6. Detta innebär att inspektionen utfördes från korg som vinschades upp och ned med hjälp av kranbil som var parkerad på byggnaden till intagsluckorna. Korgens storlek var ca 0,7×1,4 meter. På grund av utformning av kraftverket var det lättast att montera isär korgen och ta in den i spiralen via tillträdesluckan som visas i Figur 7.4. Väl monterad i spiralen kopplades korgen ihop med kranbilens vajer som var nervinschad. Då vajern kom ner genom ett hål i överbyggnadens tak gick det inte att styra korgen i sidled som därmed blev hissad i tubens tvärsnittscentrum, se Figur 7.7. Detta medförde att inspektionen skedde på nästan hela radien av tilloppstuben, och inte "handnära". Aktuell tilloppstubb hade en diameter på ca 7 meter, vilket innebär ett genomsnittligt avstånd till väggarna på ca 3 meter. Med de kraftiga portabla lampor som inspektören var utrustad med var det trots avståndet möjligt att urskilja väggarna med stor tydlighet. Inspektören hade radiokontakt med lyftkransföraren vilket innebär att inspektören själv kunde informera lyftkransföraren om korgen skulle åka upp, ner eller stå still. Inspektionen skedde från botten av tilloppstuben och hela vägen upp till baksidan av intagsluckan

7.1.4 Resultat

Inga större anmärkning kunde detekteras och inspektionen fortlöpte utan några problem. Några mindre skador och nötningar detekterades dock, för ett urval se Figur 7.8 – 7.10.



Figur 7.2 *Nedfirning från plattform vid turbinen till sugröret.*



Figur 7.3 *Drygt 20 meter från plattform till sugrörets botten. Ovan i bild syns plattformen som är monterad precis under turbinen.*



Figur 7.4 Tillträdeslucka för spiralen.



Figur 7.5 Övergången mellan tilloppstuben och spiralen. Bilden är tagen från tuben mot spiralen.



Figur 7.6 *Tiloppstuben uppifrån, 100 meter rakt ner. Stålbalkarna som syns på bilden tillhör intagsluckan.*



Figur 7.7 *Byggnaden ovanför tiloppstuben. Genom hålet mitt på bilden löpte kranens vajer som hissade korgen upp och ner i tilltoppstuben.*



Figur 7.8 *Inläckage av vatten i sugrörets tak.*



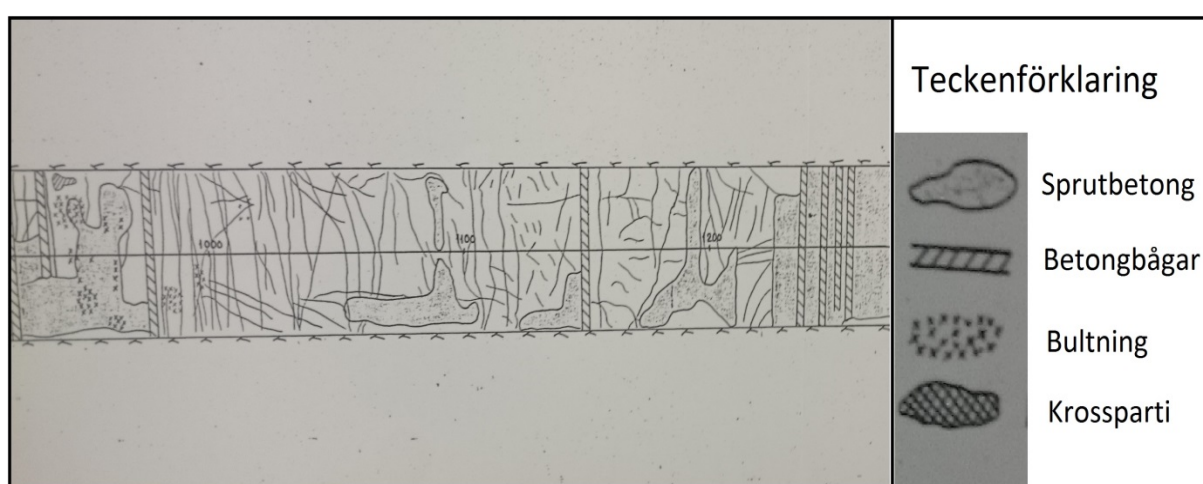
Figur 7.9 *Ytskikt på stagpelare i spiralen är delvis nednötta. Lägg märke till turbinbladen som kan skymtas innanför ledskenorna.*



Figur 7.10 Erosionskada i tilloppstuben. Skadan är ca 300 mm bred, 100 mm hög och 150 mm djup.

7.2 Deltagande på ROV-inspektion av vattenfylld utloppstunnel

Under våren 2015 deltog författarna på en inspektion av en utloppstunnel som utfördes med en ROV. Tunneln hade en längd på ca 2,5 km, en tvärsnittsarea på ca 80 m², var byggd år 1960 och hade inte inspekterats sedan dess. Ritningar fanns tillgängliga och visade dragningen och förstärkningar som bestod av betongbågar, sprutbetong och bultning, se Figur 7.11. Orsaken till att inspektionen genomfördes var att fallförsluter hade registrerats, men utan vetskap om vilken del av kraftverket som orsakade det. Även kanalen efter tunneln undersöktes för att se ifall ackumulering av sediment påverkade utströmningen, detta gjordes dock med sonar från båt och dykare och kommer ej att behandlas här.



Figur 7.11 Ritning på ca 300 meter av den totalt 2,5 km långa tunneln.

7.2.1 ROV:en, dess instrument och övriga tillbehör

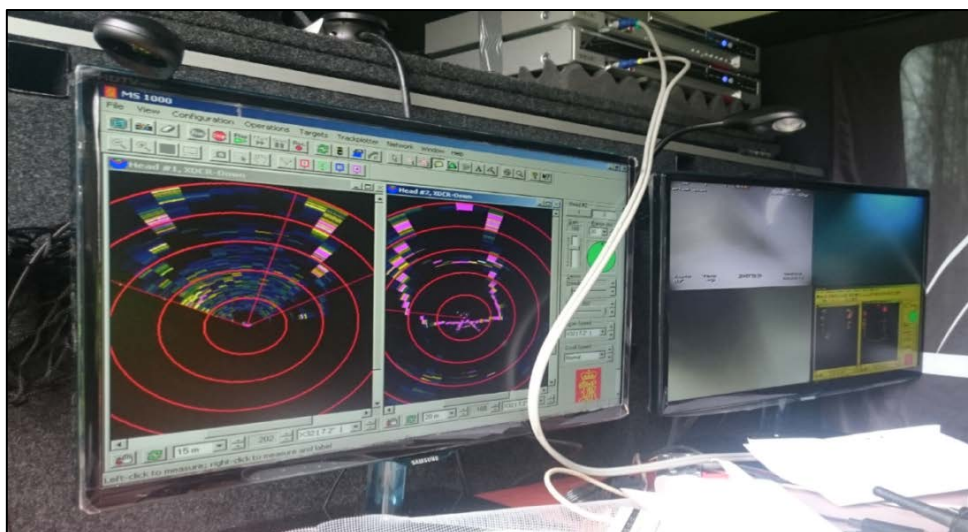
ROV:en som användes under inspektionen var utrustad med fyra kameror, två sonar, LED- och halogenlampor samt åtta stycken driftpropellrar. I tillägg var den kompatibel att utrustas med ytterligare utrustning som manipulatorarmar och liknande. Två av kamerorna var riktade i körriktningen, en var monterad ovanpå ROV:en samt en i motsatt körriktningen. De två sonarerna som användes var mekaniska singlebeams. Den ena var av profilerande typ för att mäta upp tunneltvärsnitt och den andra framåtriktad och bildskapande för att navigera, detektera och undvika hinder. Kamerorna användes också till viss del för navigering men i första hand för att göra närmare inspektioner av objekt som sonarena registrerade. Av de åtta propellrarna stod fyra för drift framåt och bakåt samt svängar, två för sidledsförflyttningar och två för förflyttningar i höjdlid. Tillhörande försörjningskabel hade en totalängd på 7 km som var uppsnurrad på en elektrisk driven TMS, se Figur 7.12. Med hjälp av ett monterat löphjul mättes kontinuerligt hur mycket av försörjningskabeln som var utvindad för att registrera hur många meter in i tunneln ROV:en befann sig. Denna information tillsammans med ritningar över tunnelns tvärsnitt hjälpte piloten att navigera i tunnelns längdriktning. Piloten kontrollerade farkosten via ett bärbart kontrollidon och två monitorer som kunde ställas in att visa de olika kamerabilderna samt sonarinformation i realtid, se Figur 7.13 och 7.14. Från kontrollidonet styrdes ROV:ens propellrar, kameror, sonars och belysning. Monitorerna var monterade i en skåpbil där även inspelningsutrustning i form av datorer och DVD-brännare var installerat.



Figur 7.12 TMS med 7 km försörjningskabel.



Figur 7.13 *Kontrolldon till ROV.*



Figur 7.14 *Monitorer som visar sonar- och kamerabilder från ROV.*

7.2.2 Förberedelser

För att skapa förutsättning att genomföra inspektionen krävdes en avställning av vattenkraftverket. Den aktuella anläggningen består av en tilloppstub, en spiral, ett aggregat, ett sugrör och en utloppstunnel. Totalt var en avställningstid på 36 timmar inplanerad för att genomföra inspektionen av hela utloppstunneln. Det första steget i operationen var att upprätta en kontrollstation och elverk för drift av all elektronisk utrustning. På grund av utformningen av utloppstunneln och kraftverket gjordes det i detta fall vid nedströms tunnelmynning. ROV:en som användes hade en ungefärlig vikt på 500 kg varför det krävdes en kranbil för att sjösätta farkosten, se Figur 7.15. När väl upprättande av kontrollstation och elverk, samt sjösättning och funktionskontroll av utrustningen var gjord så kunde själva körningen påbörjas.



Figur 7.15 ROV sjösätts med kran.

7.2.3 Tillvägagångssätt

Inspektionen utfördes genom att ROV:en flögs fram över mitten av tunnelgolvet. Navigeringen i tunnelns tvärsnitt gjordes framförallt med hjälp av sonarbilderna som visade tvärsnitt samt hinder i längsriktning. Då denna inspektion gjordes på grund av registrerade fallförsluter var det i första hand objekt och rasmassor på botten som eftersöktes och ingen större vikt lades på att inspektera bergsförstärkningarna. Vid körningen parkerades ROV:en var 50:e meter och ett mer detaljerat tvärsnitt av tunneln registrerades av den profilerande sonaren. När hinder detekterades av den bildskapande sonaren gjordes noggrannare körning runt dessa som undersöktes med kamera. Tunneltvärsnitt med sonar gjordes även här för att undersökta ifall större utfall hade skett i tunneltaket. Exempel på objekt som blev orsak till noggrannare undersökning kunde vara nedfall av sprutbetong och stenblock. Hela tunnelsträckningen inspekterades på detta vis, vilket tog ca 5,5 timmar från tunnelmynning till avslutande svallschakt. Vid inkörningen stod ROV:en själv för utdragningen av kabeln vilket löpande genererade mer motstånd ju längre in i tunneln körningen gjordes, främst på grund av friktionen som uppstod mot tunnelns väggar och tak. Vid utkörningen, som tog ca 2,5 timmar, ”drogs” däremot ROV:en ut via kabeln av personal på land. Pilotens uppgift var då primärt att hålla farkosten i mitten av tunneltvärsnittet för att undvika onödiga kollisioner mot tunnelväggar. Totalt tog hela inspektionen, från uppstartad etablering till slutförd avveckling, ca 2 dagar.

7.2.4 Resultat

Under inspektionen av tunneln registrerades ett antal objekt som resulterade i noggrannare undersökningar med kamera och profilerande sonar. Det största objektet som dokumenterades var ett stenblock på 2×2×4 meter som låg på tunnelgolvet. Blocket var orienterat i ”gynnsam” riktning med sidan på 2×2 meter mot vattenströmmens riktning. I övrigt hittades ett antal mindre stenblock samt en del utfall av sprutbetong i form av plattor som rasat ner. Inga stora skador i form av urgröpningar kunde dock registreras i tunneltvärsnittet på dessa platser. Sammansfattningsvis var projektledaren på plats nöjd med resultatet som inspektionen gav (Persson 2015c).

7.3 Försök med ROV

Som en del av arbetet utfördes inspektionsliknande försök med en inhyrd ROV i Vattenfalls laboratorium i Älvkarleby våren 2015.

7.3.1 Syfte

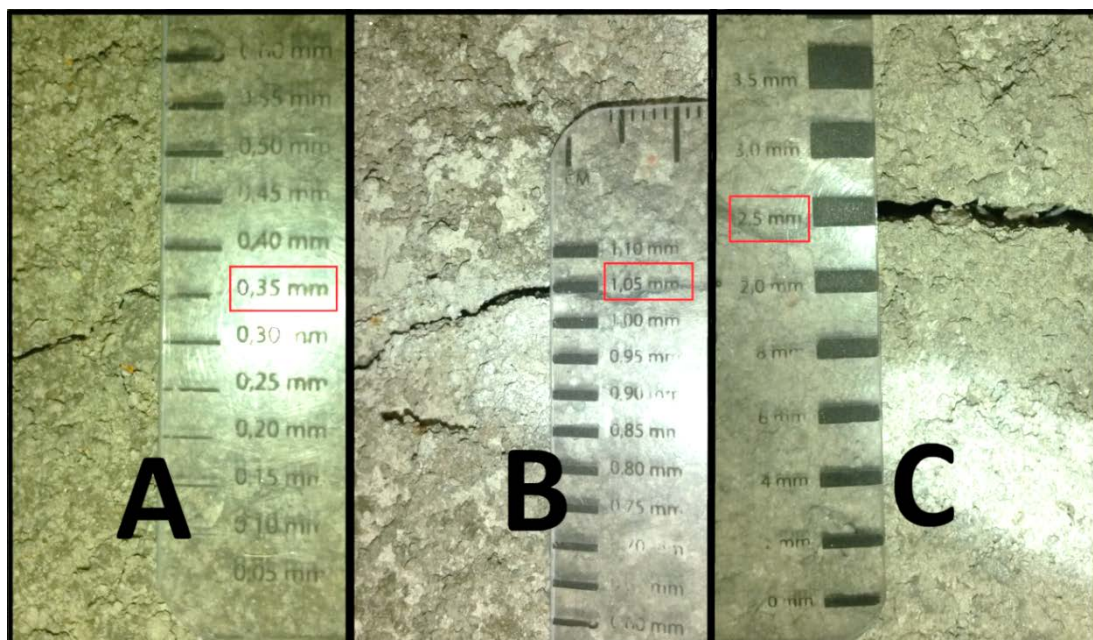
Syftet med försöken var att undersöka hur väl olika typer av vanligt förekommande betongskador i inre vattenvägar var möjliga att detektera visuellt med en kameraförsedd ROV under tunnelliika förhållanden, samt att göra inspektion av befintliga vattenkanaler i anslutning till utnyttjad bassäng.

7.3.2 Material, utrustning och lokal

För att genomföra dessa försök krävdes betong att undersöka, en ROV att undersöka med och ett vattenmagasin att undersöka i. Därför tillverkades 8 balkar med olika typer av skadetextur, en ROV hyrdes in och en bassäng hos Vattenfall R&D nyttjades.

Totalt tillverkades och preparerades 8 olika balkar, varav 3 stycken fiberarmerade sprutbetongbalkar och 5 stycken gjutna betongbalkar. Sprutbetongbalkarna, med måtten 50×12,5×7 cm (längd × bredd × djup), benämns härmed A-C. Dessa manipulerades genom böjning tills sprickor av olika vidd skapades, se Figur 7.16. Sprickorna uppgick till följande vidd:

- o Balk A = 0,35 mm
- o Balk B = 1,05 mm
- o Balk C = 2,5 mm



Figur 7.16 Närbild på sprickor som balkarna A, B och C fick efter knäckning.

De fem formgjutna betongbalkarna, med måtten 40×10×7 cm (längd × bredd × djup), benämns härmed 1-5. Balkarna gjöts i Vattenfalls betonglaboratorium i Älvkarleby. För att efterlikna erosionsskador av olika grad manipulerades balkarnas ytor vid gjutning. Då

hållfasthet och andra liknande attribut inte hade någon relevans i dessa försök kommer ej receptet på betongen att redovisas. Nedan beskrivs respektive gjuten balk och dess karaktär kortfattat, för illustration se Figur 7.17:

- o Balk 1 – Manipulerad erosion, adderad ballast på ytan.
- o Balk 2 – Manipulerad erosion, adderad ballast på ytan samt ett armeringsjärn med diameter 8 mm.
- o Balk 3 – Manipulerad erosion, adderad ballast på ytan samt ett armeringsjärn med diameter 12 mm.
- o Balk 4 – Manipulerad erosion, adderad ballast på ytan samt ett armeringsjärn med diameter 12 mm.
- o Balk 5 – Referensbalk utan några manipulerade skador.



Figur 7.17 De fem gjutna balkarna och dess tillverkade skador.

På alla balkar monterades stålkrokar på ena kortsidan, se Figur 7.18. Detta i syfte att möjliggöra enklare hantering av balkarna då de skulle sänkas ner och hämtas upp ur bassängen. För att genomföra försöken hyrdes en ROV in av modell VideoRay Explorer med tillhörande utrustning, se Figur 7.19. Aktuell ROV hade följande specifikationer (Videoray, 2014):

- o 1 stycken högupplöst färgkamera med vidvinkellins som är möjlig att tilla 160° i vertikalt led.
- o 2 stycken 20 watts halogenlampor.
- o 3 propellrar, varav 2 är riktade i horisontellt led för körning framåt, bakåt och svängar, och den sista vertikalt riktad för höjdläsförflyttningar. ROV:en hade alltså 3 frihetsgrader.
- o Djupmätare.
- o Toppmonterat flytelement



Figur 7.18 Monterade krokar på betongbalkarna.



Figur 7.19 Styrsystem med inkopplad dator, t.h. står ROV:en.

De medföljande tillbehören bestod av en 40 meter lång försörjningskabel (ingen TMS) med neutral flytkraft i sötvatten samt styrenhet och programvara för inspelning och redigering av insamlad data. Styrenheten var monterad i en väska och bestod av videaskärm samt nödvändiga reglage för att kontrollera ROV:en under operation. Då signalerna från kameran var analoge följde det även med en adapter för att göra signalerna digitala och därmed möjliga att importera till dator. Försöken ägde rum i en bassäng belägen under golvet i Hall 53 hos Vattenfall R&D i Älvkarleby. Volymen är uppskattningsvis $40 \times 8 \times 2,5$ meter (längd $\times$ bredd $\times$ djup). I bassängen förvaras det vatten som pumpas runt till modellförsök som genomförs i

hallen. Använt vatten pumpas i överhängande rör till modellerna av dammar och spolas sedan tillbaka i underliggande kanaler. Vid försöken var det inga modellförsök igång. I hallgolvet finns ett flertal öppningsbara luckor som tillåter åtkomst till bassängen.

7.3.3 Metod

Försöken bestod av etablering av kontrollstation och nedsänkning av balkar samt körningar, där avsikten var att detektera betongskadorna. I hallens nordöstra del nyttjades en tillträdeslucka för nedsänkning av betongbalkarna. Respektive balk fästes med rep i de monterade krokarna för att möjliggöra nedsänkning och återhämtning. Vid en tillträdeslucka ca 25 meter västerut etablerades en station där ROV:ens kontrollsystem etablerades, se Figur 7.20.



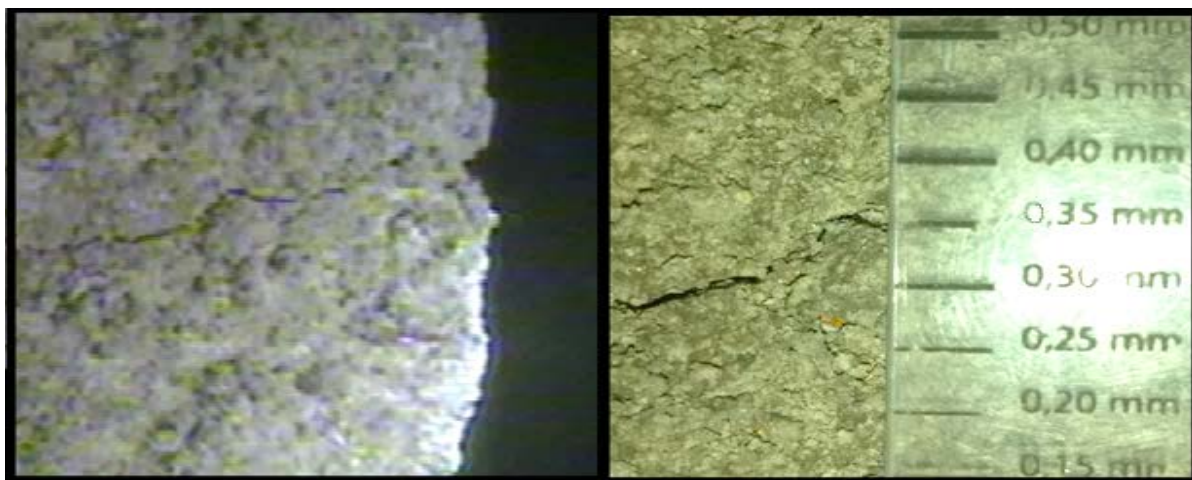
Figur 7.20 Kontrollstation och lucka i hallgolvet där ROV:en sänktes ned inför varje försök.

Under hela försöksproceduren sänktes balkarna ned av operatör 1 medan operatör 2 satt vid ROV:ens kontrollpanel och gjorde körningarna. Operatör 1 valde ut 3 balkar med olika typer av skador som sänktes ned. När detta var gjort sänktes ROV:en ned i den andra luckan och körningen började. Uppgiften var då för operatör 2 att leta reda på balkarna och avgöra vilka typer av skador som respektive balk hade. Då kontrollpanelen ihopkopplad med dator ej var avsedd för handhavande av endast en person satt då operatör 1 med som hjälp och tog stillbilder av vad ROV:en hade framför sig på kommando från operatör 2. När operatör 2 var nöjd med undersökning och dokumentation av respektive balk kördes ROV:en tillbaka och proceduren återupprepades med andra balkar. Avslutningsvis gjordes även körningar i anslutande vattenkanaler där filmsekvenser spelades in för att registrera skicket av dessa.

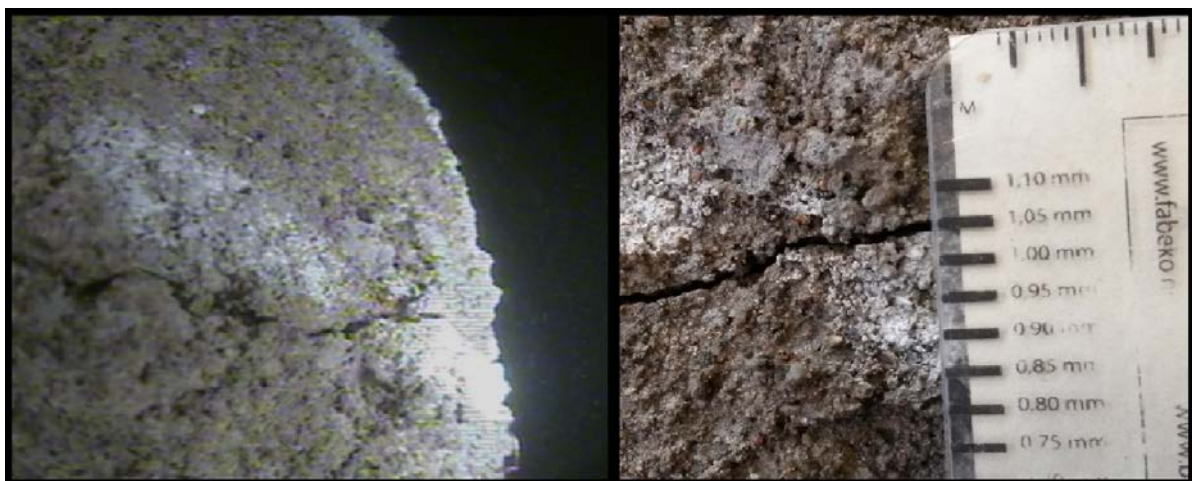
7.3.4 Resultat

Under körningarna med ROV:en var det möjligt att registrera alla tillverkade skador på betongbalkarna med kameran, detta är redovisat i Figur 7.21–7.28. Även den minsta sprickan på 0,35 mm kunde tydligt urskiljas. När bassängens tilloppstuber inspekterades var det

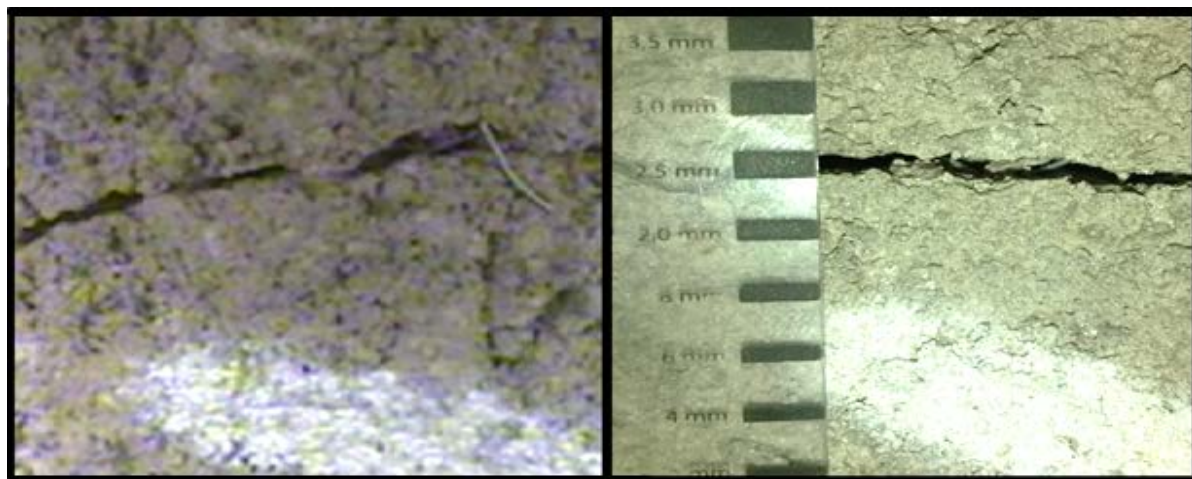
möjligt att registrera mycket fragment och sediment från dammodeller som gjorts tidigare i hallen. Vid inspektionerna av dessa tuber spelades en film in, från vilken Figur 7.29 är tagen. Den visar en ackumulerad mängd bitar från tidigare dammodeller som ligger på botten.



Figur 7.21 Balk A med 0,35 mm spricka. Till vänster foto från ROV och till höger från torrhet.



Figur 7.22 Balk B med 1,05 mm spricka. T.v. foto från ROV och t.h. foto från torrhet.



Figur 7.23 Balk C med 2,5 mm spricka. T.v. foto från ROV och t.h. foto från torrhet.



Figur 7.24 Balk 1 med tillverkade erosionsskada. T.v. foto från ROV och t.h. foto från torrhet.



Figur 7.25 Balk 2 med tillverkad erosionsskada över armeringsjärn. T.v. foto från ROV och t.h. foto från torrhet.



Figur 7.26 Balk 3 med tillverkad erosionsskada och ett armeringsjärn. T.v. foto från ROV och t.h. foto från torrhet.



Figur 7.27 Balk 4 med tillverkad erosionsskada och ett armeringsjärn. T.v. foto från ROV och t.h. foto från torrhet.



Figur 7.28 Balk 5 utan några tillverkade skador. T.v. foto från ROV och t.h. foto från torrhet.



Figur 7.29 Bild från tillloppstunnel till bassängen som visar avlagringar från tidigare modellförsök i hallen.

7.3.5 Kommentarer på labbförsöken

Syftet med försöken var att uppnå tunnelliika förhållanden varför bassängen under golvet i Hall 53 användes. Bassängen besitter minst två attribut som den delar med en inre vattenväg i form av bergtunnel. För det första är bassängen helt mörklagd och den enda ljuskällan närvarande är från ROV:ens egna lampor. För det andra var det en stor mängd partiklar sedimenterat på botten. Dessa gav vid oförsiktig körning nära botten, genom stora utslag på den vertikalt riktade propellern, upphov till markant försämrade sikt. Vid vissa tillfällen uppskattades sikten till mindre än 10 cm. Det hade varit intressant att vid dessa tillfällen ha tillgång till en sonar för enklare navigering, då operatör 2 många gånger helt och hållet gick på "känsla" under dessa försök. När väl objekten var funna, och en närgående inspektion kunde påbörjas, var dock en monterad kamera fullt tillräcklig för att detektera även de minsta skadorna. En anmärkning som kan göras var det tekniska strul som uppkom i och med transformationen mellan kontrollväska och dator. Bilderna tappade ganska mycket kvalitet och var märkbart tydligare på tillhörande skärm än vad som kom upp på datorn och kunde sparas digitalt.

8. Diskussion och slutsatser

Detta arbete har haft som syfte att utvärdera till vilken grad inspektioner med ROV kan användas för inspektioner av inre vattenvägar. Dessa vattenvägar har under arbetets gång delats upp i de två huvudkategorierna ”aggregatnära inre vattenvägar” och ”till- och utloppstunnlar”, eftersom förberedelser och metoder för inspektioner av dessa skiljer sig markant.

8.1 Kommentarer

Vid deltagande under inspektionen av de torrlagda aggregatnära inre vattenvägarna upplevdes den som säker och effektiv. I aktuellt vattenkraftverk kunde inspektionen genomföras utan att det krävdes några större ställningsarbeten eller komplicerade firningssystem för att komma åt västenliga sektioner. Detta är dock inte fallet i alla vattenkraftverk beroende på t.ex. utformning samt skick på luckor och stegvägar. I vissa fall kan dessa faktorer markant försvåra denna typ av torrlagda inspektioner. Resultatet från inspektionen anses i det här fallet vara mycket tillfredställande då alla ytor med god tydlighet kunde studeras med hjälp av kraftiga portabla lampor, trots de relativt stora tvärsnitten och därmed betydande avstånd till väggar och tak. Denna metod, att vid planerade underhåll och reparationer av turbinen, torrlägga och inspektera de aggregatnära inre vattenvägarna är ett snabbt och effektivt tillvägagångssätt. Metoden varken förlänger avställningsperioden eller påverkar på något annat sätt aggregatets produktion.

För inspektioner av till- och utloppstunnlarna finns det idag inte något styrdokument eller standard för hur och när dessa ska göras. I detta arbete har då alternativet med ROV-inspektioner studerats. Försöken som genomfördes visar att små skador (i detta fall en sprickvidd på 0,35 mm) är möjliga att detektera, även i vatten med dålig sikt. För till- och utloppstunnlar anses det dock inte rimligt att detaljstudera betong och andra förstärkningar på det viset då det skulle innebära ett tidsödande arbete. För dessa tunnlar bör inspektioner istället fokusera på att upptäcka begynnande ras, t.ex. genom att detektera nedfallna förstärkningar och stenblock med sonar, och därifrån genomföra noggrannare inspektioner med kamera. Med ett sådant tillvägagångssätt, då kameran i första hand används för detaljstudier, kommer inte sikten i vattnet att spela någon större roll. En kommentar angående svårigheterna att kontrollera en ROV kan även göras. Vid de genomförda försöken var det till en början mycket svårt att styra och orientera farkosten i vattnet. Men bara under tiden som dessa tester utfördes, vilket var ett tidsspänn på ca 8 timmar, blev piloten märkbart säkrare. Med åtanke på att ROV-piloterna som arbetar med detta har 1000-tals flygtimmar är det rimligt att anta att de är mycket skickliga på vad de gör och har en god förmåga att lösa oväntade problem som kan uppkomma.

I dagsläget genomförs inspektioner av till- och utloppstunnlar som regel endast vid registrerade fallförluster, vilket även var fallet för den i arbetet beskrivna ROV-inspektionen. Det största objektet som detekterades var ett block med storleken 2×2×4 meter som låg i gynnsam riktning ur strömningssynpunkt. Vidare arbete kring detta resultat kommer att bli beräkningar för att fastställa till vilken grad detta hinder påverkar kraftverkets produktion.

Vad som bör beaktas i detta fall, och för andra liknande skador, är den turbulens som kommer att uppstå i det förändrade tvärsnittets form som detta blockutfall har gett upphov till. I värsta fall kan detta initiera ytterligare urgröpningar vilket kan leda till ett fullständigt ras. För två av de beskrivna fallen där ras har inträffat i vattenkrafttunnlar, Gidböle och Norränge, var inte några förvarnande tecken som fallförsluter registrerade. Dessa två fall hade även gemensamt att sjunkhålen som nådde hela vägen upp till markytan uppdagades på platser där människor vanligen rör sig. För Gidböle var detta på en tomt och för Norränge på en motionsslinga. Om någon hade ramlat ner i ett sådant hål skulle det inneburet direkt livsfara. Med dessa två ras som exempel är det lätt att argumentera för varför inspektioner av vattenkraftverkens till- och utloppstunnlar ska genomföras för att förhindra liknande händelser i framtiden.

Baserat på muntliga kommentarer från kontaktade företag inom branschen så skulle ett stort framsteg tekniskt sett vara utvecklandet av autonoma undervattensfarkoster, AUV:s, specialiserade för inspektioner av inre vattenvägar. Detta skulle eliminera komplikationerna som uppkommer på grund av kravet på en försörjningskabel och därmed möjliggöra inspektioner även av de längsta tunnarna.

8.2 Slutsatser

Metoden för de torrlagda inspektioner som i dagsläget genomförs på vattenkraftverkens aggregatnära inre vattenvägar ger generellt sett ett fullgott resultat i förhållande till arbetsinsatsen. Detta styrks från erfarenheterna som erhöles från deltagandet vid en torrlagd inspektion.

För vattenkraftverk där tillträde till de aggregatnära inre vattenvägarna innebär stora ansträngningar, t.ex. på grund av 45° lutande tilloppstuber, stora läckage och utrymmen med oförstärkta bergytter som kräver skrotning kan inspektioner med ROV övervägas. Från försöken med ROV kunde det visas att en monterad kamera med god marginal kan detektera även små skador i form av sprickor och erosion.

För till- och utloppstunnlar som endast försörjer ett aggregat med vatten, men som inte töms under de rutinemässiga underhållen av turbinen, kan inspektioner med ROV övervägas. Från ROV-inspektionen visade det sig att en fullgod inspektion av en tunnel på 2,5 km och med en area på 80 m² kunde genomföras på en total körtid av 8 timmar. Då majoriteten av de längre till- och utloppstunnlarna i Sverige är <3 km är det en stor andel av dessa som skulle kunna inspekteras med en ROV på mindre än ett dygn.

För till- och utloppstunnlar som försörjer flera aggregat skulle det krävas en avställning av samtliga för att möjliggöra en inspektion med ROV. För att detta ska vara ekonomiskt försvarbart måste en avställning planeras noggrant då alla berörda turbiner underhålls. Faktorer att beakta kommer då att vara vattennivå i magasin för att slippa släppa stora massor genom utskov, låg efterfrågan och därmed lågt pris på elektricitet vid tillfället, o.s.v. Ifall en avställning av detta slag skulle gå att genomföra effektivt kan inspektioner med ROV övervägas.

Vid registreringar av fallförluster i ett vattenkraftverk, där orsaken inte är känd men som anses vara tillräckliga för att en åtgärd måste ske, kan ROV-inspektioner övervägas. Med en

ROV är det då möjligt att lokalisera och undersöka orsakerna till förlusterna och därefter utvärdera ifall en tömning är nödvändig.

Vid ras där lokaliseringen är känd bör vissa överväganden angående inspektion med ROV göras. Vid ett ras i till- eller utloppstunnel kommer en åtgärd i form av reparation eller förstärkning att bli nödvändig, och därmed även tömmandet av tunneln. Det en inspektion med ROV då kan bidra med är tvärsnittsinformation med sonar och bilder av hur raset ser ut. Detta kan vara värdefullt för planeringen av åtgärderna, men nyttan bör vägas mot kostnaden.

Inspektioner med ROV av de längsta tunnarna i Sverige kan ej genomföras med utbudet av farkoster som finns tillgängligt i landet idag. Detta förutsatt att dessa vattenvägar inte har påslagstunnlar som tillåter tillträde. Den längsta tunneln är 17,8 km och den längsta räckvidden på en ROV är 7 km. Detta är en av anledningarna till varför det kan argumenteras för utveckling av en AUV med fokus på inspektioner av inre vattenvägar. Alternativt, produktion av en ROV med ännu längre försörjnings-kabel.

8.3 Förslag på fortsatt arbete

Under arbetets gång har ett par intressanta idéer för fortsatt arbete framkommit. Nedan sammanfattas de två som anses vara mest relevanta.

En fältstudie där en till- eller utloppstunnel som är planerad att tömmas först inspekteras med ROV. Denna inspektion jämförs sedan grundligt med inspektionen av den torrlagda tunneln. Faktorer att bedöma skulle då kunna vara resultat och detaljrikedom, tidsåtgång samt total kostnad för respektive metod. Detta skulle kunna vara grunden till framställandet av beslutsunderlag för situationer där valet står mellan inspektion med ROV eller inspektion genom torrläggning.

Utvecklandet av en tunnelinspekterande AUV är förmodligen nästa stora steg för inspektioner av vattenfyllda tunnlar. För ca 15 år sedan fanns ett intresse inom branschen, men det kom ej igång på grund av flera olika faktorer, bland annat att tillgänglig teknik inte ansågs vara tillräckligt kompatibel. Sen början av 2000-talet har stora tekniska framsteg gjorts. Inte minst när det kommer till datorkraft, utvecklingen av multibeam sonar, batterikapaciteter o.s.v. Kanske är tiden nu mogen för att återigen göra en förstudie för en sådan farkost.

Litteraturförteckning

- ACI. (2008). *Control of Cracking in Concrete Structures*. ACI 224R-01. American Concrete Institute.
- Ansell, A., Björnström, J., Ekström, T., Hassanzadeh, M., & Unosson, M. (2007). *Spricktillväxt i lamelldamm. Tillämpning av icke-linjära modeller - Del 1*. Rapport 08:21. Elforsk.
- Arbetsmiljöverket. (2014). *Berg- och gruvarbete. Arbetsmiljöverkets föreskrifter om berg- och gruvarbete samt allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna*. AFS 2010:1. Arbetsmiljöverket.
- Benson, R. P. (1989). Design of Unlined and Lined Pressure Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 4(2), 155-170.
- Bernstone, C. (1999). *Utvärdering av befintliga metoder för oförstörande provning av betong*. Rapport 99:45. Elforsk.
- Billstein, M. (2015). Mechanical & Hydraulic Engineering, Key Account Manager, Vattenfall AB, Älvkarleby, Personlig kommunikation under april 2015.
- Björkenstam, E. (1999). *Sprutbetongreparationer*. Rapport 00:44. Elforsk.
- Bogdanoff, I. (2013). *Degradering av berg, förstärkningar och injektering i tunnlar*. Rapport 2013:26. Strålsäkerhetsmyndigheten.
- Bogdanoff, I., Ellison, T., & Lundqvist, C. (2010). *Åtgärder efter ras i Bolmentunneln*. Bergmekanikdagen 2010. Stockholm: WSP Group, AB Besab, Sydsvatten AB.
- Brekke, T., & Selmer-Olsen, R. (1965). Stability problems in underground constructions caused by montmorillonite - carrying joints and faults. *Engineering Geology*, Vol 1(1), 3-19.
- Broch, E. (2010). *Tunnels and underground works for hydropower projects*. Rapport 7491. International Tunnelling and Underground Space Association, ITA.
- Brännfors, S. (1964). *Bergsprängningsteknik*. Svenska bokförlaget/Bonniers.
- Burström, P.-G. (2006). *Byggnadsmaterial - Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Studentlitteratur.
- BUVI. (2014). *Filmer*. Hämtad den 7 maj 2015, från BUVI Undervattensinspektioner AB: <http://www.buvi.se/filmer.html>
- Byfors, K., & Tuutti, K. (1994). Armeringskorrosion. i C. Ljungkrantz, G. Möller, & N. Petersons, *Betonghandbok Material, utgåva 2*. AB Svensk Byggtjänst.

- Chew, J. (2011). LEDs are now the choice for underwater lights. *Ocean News & Technology magazine*, Vol 17(4), 10-12.
- Christ, R. D., & Wernli, R. L. (2014). *The ROV Manual*. Elsevier Ltd.
- Draganovic, A., & Johansson, F. (2010). *Svällande leror i bergtunnlar - Förstudie*. Befo Rapport 101. Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- Energimyndigheten. (2011). *Vattenkraft*. Hämtad den 3 maj 2015, från Energimyndigheten: <http://www.energikunskap.se/sv/FAKTABASEN/Vad-ar-energi/Energibarare/Fornybar-energi/Vatten/Vattenkraft/>
- Energimyndigheten. (2014). *Energiläget*. Hämtad den 4 maj 2015, från Energimyndigheten: <http://www.energimyndigheten.se/Statistik/Energilaget1/>
- Fagerlund, G. (1994). Frostbeständighet. i C. Ljungkrantz, G. Möller, & N. Petersons, *Betonghandbok Material, utgåva 2*. AB Svensk Byggtjänst.
- Fagerlund, G. (2010). *Reparation av betongkonstruktioner*. Lunds Tekniska Högskola.
- Fagerlund, G. (2011). *Ytreparation av betongkonstruktioner*. Lunds Tekniska Högskola.
- Fagerlund, G. (2012). *Inverkan av salter på betong - Kemisk och fysikalisk påverkan*. Rapport 12:29. Elforsk.
- Fleetwood, F. (2015). ROV-pilot på BUVI - Undervattensinspektion AB, Nyköping, Personlig kommunikation den 13 april 2015.
- Fransson, Å. (2008). Täta tunnel kräver kunnskap om bergets kvalitet. *Husbyggaren*, Vol 1, 14-18.
- Gray, R. (2004). *Underwater Illumination*. DeepSea Power & Light.
- Hansen, R. E. (2010). *Introduction to sonar*. Hämtad den 5 maj 2015, från Universitetet i Oslo: http://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INF-GEO4310/h11/undervisningsmateriale/sonar_introduction_2011_compressed.pdf
- Heiner, A., & Stille, H. (1990). *Ras i kraftverkstunnel, Norränge*. BeFo 245:1/90. Stifelsen Bergteknisk Forskning.
- Holmgren, J. (1992). *Bergförstärkning med sprutbetong*. Vattenfall. Vällingby.
- Holmgren, J., & Silfwerbrand, J. (2015). *Steel Fibre Concrete*. Compendium for AF2102 Concrete Structures, advanced course. Edition 2015. Kungliga Tekniska Högskolan.
- Hultman, R., Stille, H., & Söder, P.-E. (1993). *Ras i kraftverkstunnel, Gidböle*. BeFo 471:1/93. Stifelsen Bergteknisk Forskning.
- Huss, J. (2007). *Förvaltning av inre vattenvägar*. Rapportnummer U 07:08 (Företagsintern). Vattenfall Research and Development AB.

- Håkansson, W. (2013). *Kraftverkstunnlars beständighet*. Master thesis. Lund Tekniska Högskola.
- Imagenex. (2015). *Downloads*. Hämtad den 7 maj 2015, från Imagenex:
http://www.imagenex.com/sonar_theory.pdf
- Johansson, S.-E. (1994). Cement. i C. Ljungkrantz, G. Möller, & N. Petersons, *Betonghandbok Material utgåva 2*. AB Svensk Byggtjänst.
- Kongsberg. (2015). *Kongsberg Maritime AS*. Hämtad den 24 april 2015, från Autonomus Underwater Vehicles:
<http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/B3F87A63D8E419E5C1256A68004E946C?OpenDocument>
- Kovari, K. (2003). History of the sprayed concrete lining method - part 1: milestones up to the 1960s. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 18, 57-69.
- Kuhlin, L. (2015a). *Teori - Dammtyper*. Hämtad den 5 maj 2015, från Info om svenska vattenkraft: <http://vattenkraft.info/?page=23>
- Kuhlin, L. (2015b). *Olika utskovstyper*. Hämtad den 12 maj 2015, från Info om svensk vattenkraft: <http://vattenkraft.info/?page=44>
- Kuhlin, L. (2015c). *Turbiner*. Hämtad den 10 maj 2015, från Info om svensk vattenkraft: <http://vattenkraft.info/?page=41>
- Kuhlin, L. (2015d). *Info om svensk vattenkraft*. Hämtad den 2 april 2015, från specifik sida för varje vattenkraftverk: <http://vattenkraft.info/>
- Kuhlin, L. (2015e). *Historien om Uddeholms bruk*. Hämtad den 4 maj 2015, från Info om svensk vattenkraft: <http://vattenkraft.info/?page=42>
- Lagerblad, B. (2007). *Livslängdsbedömning av sprutbetong i tunnlar*. Cement och betong Institutet och KTH.
- Lindblom, U. (2009). *Underhåll av berganläggningar - Etapp II*. SBUF Utvecklingsprojekt 11844. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond.
- Lindblom, U. (2010). *Bergbyggnad*. Liber.
- Lindblom, U. (2012). *Underhållskostnader för bergtunnlar i ett livslängdsperspektiv*. BeFo Rapport 120. Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- Loisy, F., Francois, P., Douchet, G., Hope-Darby, P., Shimmin, K., T Bonner, E. L., et al. (2010). Underwater inspection experiment for a long tunnel of EDF's hydroelectric facilities. *1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry*. Montreal: Water Services Group Ltd.

- Loxus. (2015). *Home*. Hämtad den 14 maj 2015, från Loxus Technologies Oy:
<http://www.loxus.com/index.php>
- Mikkola, J., & Viitala, R. (2000). Cave-ins in the Päijänne Tunnel and Their Repair. *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol 15(2), 129-138.
- Mitchell, J. (1976). *Fundamentals of soil behaviour*. John Wiley & Sons, Inc.
- Molland, A. F. (2008). *The Maritime Engineering Reference Book*. Southampton: Elsevier Ltd.
- Möller, A. (2010). *Jämförelse av tätningskoncept för ytnära bergtunnlar*. Master thesis. Kungliga Tekniska Högskolan.
- Möller, G. (1994). Nötningsmotstånd. i C. Ljungkrantz, G. Möller, & N. Petersons, *Betonghandbok Material*, utgåva 2. AB Svensk Byggtjänst.
- Möller, G., & Petersons, N. (1994). Hållfasthet. i C. Ljungkrantz, G. Möller, & N. Petersons, *Betonghandbok Material*, utgåva 2. AB Svensk Byggtjänst.
- Nelson, M. (1998). *Bergmekanisk dimensionering med statistiska metoder - förstudie*. SveBeFo Rapport 39. Stiftelsen Svensk Bergteknisk Forskning.
- Nilsen, B., & Thidemann, A. (1993). *Hydropower development - Rock Engineering*. Trondheim: The Norwegian University of Science and Technology.
- Nordström, E., & Holmgren, J. (2009). *Sprutbetonghandboken - Reparation*. Svenska Elföretagens Forsknings- och Utvecklings- Elforsk - AB.
- Norling, J. (2015). Projektledare, Project Development, Vattenfall AB, Älvkarleby, Personlig kommunikation under februari 2015.
- Panthi, K. (2012). *Analysis on the Dynamics of Burst Debris Flood at the Inclined Pressure-Shaft of Svandalsflona Hydropower Project, Norway*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- Pehrson, M. (2015). VD Amphi-tech AB, Åsbro, Personlig kommunikation den 23 mars 2015.
- Persson, M. (2015a). *Instruktion för liten inspektion av inre vattenvägar, (Företagsintern)*. Vattenfall AB.
- Persson, M. (2015b). Tekniskspecialist, Damsafety, Vattenfall AB, Luleå, Personlig kommunikation under perioden februari-maj 2015.
- Persson, P. (2015c). Projektledare Vattenrallarn AB, Mockfjärd, Personlig kommunikation den 8 maj 2015.
- Petersons, N. (1994). Sprickor. i C. Ljungkrantz, G. Möller, & N. Petersons, *Betonghandbok Material*, utgåva 2. AB Svensk Byggtjänst.

- Rankka, K. (2003). *Kvicklera - bildning och egenskaper*. Varia 256. Statens Geologiska Institut.
- Richards, C. (2015). ROVS. Hämtad den 10 maj 2015, från ROV Comittee of the Marine Technology Society: http://www.rov.org/rov_design_cables.cfm
- Rombén, L. (1994). Kemiskt angrepp. In C. Ljungkrantz, G. Möller, & N. Petersons, *Betonghandbok Material, utgåva 2*. AB Svensk Byggtjänst.
- Rosenqvist, M. (2015). Civil Engineering, R&D Engineer, Vattenfall AB, Älvkarleby, Personlig kommunikation under maj 2015.
- SAAB. (2015). *Cougar-XT*. Hämtad den 10 maj 2015, från SAAB Products: <http://www.seaeye.com/cougar-xt.html>
- Sandberg, B. (2007). *Dagens kunskapsnivå - korrosion på bergbultar*. Korrosions- och Metallforskningsinstitutet AB.
- Sandström, T., Stojanovic, B., & Persson, M. (2012). *Undervattensgjuten betong - Litteraturstudie om beständighet i vattenvägar*. Rapport 10:72. Elforsk.
- Schmidt, N. (2014). *Vattenkraften under jorden*. Hämtad den 6 maj 2015, från Dalarnas tidning: <http://www.dt.se/dalarna/mora/vattenkraften-under-jorden>
- Selmer-Olsen, R. (1989). Tunnel collapses in swelling clay zones. *Tunnels & Tunnelling*, Vol 21(11), 49-58.
- Shepherd, K. (2001). Remotely Operated Vehicles (ROVs). In J. Steele, S. Thorpe, & K. Turekian, *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Elsevier Ltd.
- Sjöström, R. (2015). Bergarbetare, Projects - Construction and dam, Vattenfall AB, Storuman, Telefonkontakt den 10 mars 2015.
- Spade, B. (1999). *De svenska vattenkraftverken - teknik under 100 år*. Riksantikvarieämbetet.
- Strandman, F., & Eklund, O. (2010). *Kompendium i bergartskännedom*. Institutionen för geologi och mineralogi: Åbo Akademi.
- Sundell, B. (1994). Bergmekanikdag Tunnelrenovering vid Tåsan kraftstation. Stockholm: Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- Sydvatten. (2010). *Följ med ner i Bolmentunneln. Sydvatten berättar om reparationerna*. Hämtad den 5 maj 2015, från <https://www.youtube.com/watch?v=aCM8YJh1-U8>
- Terzic, A., & Pham, L.-W. (2013). *Inverkan av urlakning och nötning på betongytans frostbeständighet*. Master thesis. Lunds Tekniska Högskola.
- Thelandersson, S. (1994). Brandbeständighet. i C. Ljungkrantz, G. Möller, & N. Petersons, *Betonghandbok Material, utgåva 2*. AB Svensk Byggtjänst.

- Vattenfall. (2008). *Vattenkraft teknik och miljö - bilaga till Vattenfall Elproduktions certifierade miljövarudeklaration*. Vattenfall AB.
- Videoray. (2014). *ROV Configuration Explorer*. Hämtad den 10 juni 2015, från Videoray: http://www.videoray.se/uploads/1/1/7/6/11761706/explorer2014_rev.pdf
- Wiklund, R. (2015). Projektledare. Projects - Construction & Dam, Vattenfall AB, Piteå, Personlig kommunikation under mars 2015.
- Windelhed, K., Lagerblad, B., & Sandberg, B. (2002). *Cementingjutna bultars beständighet*. Rapport 58. Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- Vägverket. (2000). *Tätning av bergtunnlar - förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser*. Rapport 2000:101. Vägverket.
- Östberg, A. (2015). Laserskanning för tjockleksbestämning av sprutbetong. Föredrag på kraftindustrins Betongdag 2015, Älvkarleby, Energiforsk.

Bilaga

Företag, vilka sysslar med ROV-inspektioner av vattenutrymmen, som har kontakts och svarat på frågor under arbetets gång, (listan är i alfabetisk ordning):

Amphi-tech AB

BUVI Undervattensinspektion AB

DYKENTREPRENAD AB

Loxus Technologies Oy

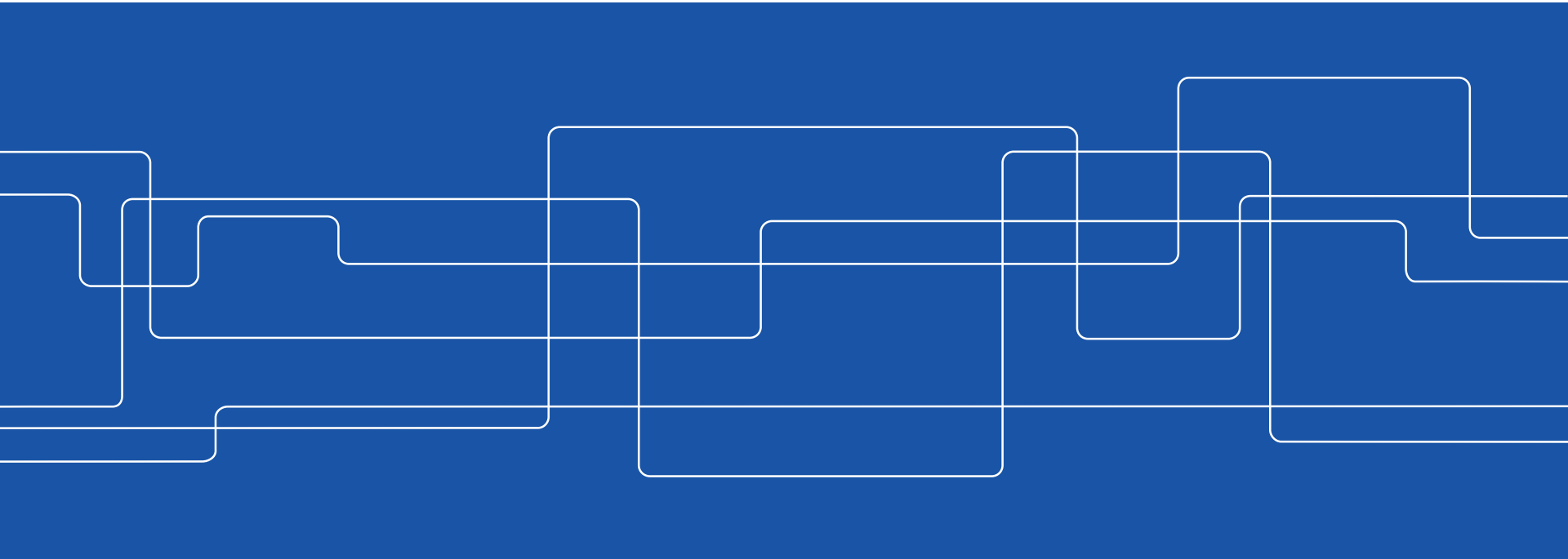
Norconsult AB

Seacure Rescue And Saftey AB



Tillståndskontroll av inre vattenvägar

Tobias Amsköld och Sebastian Sundberg





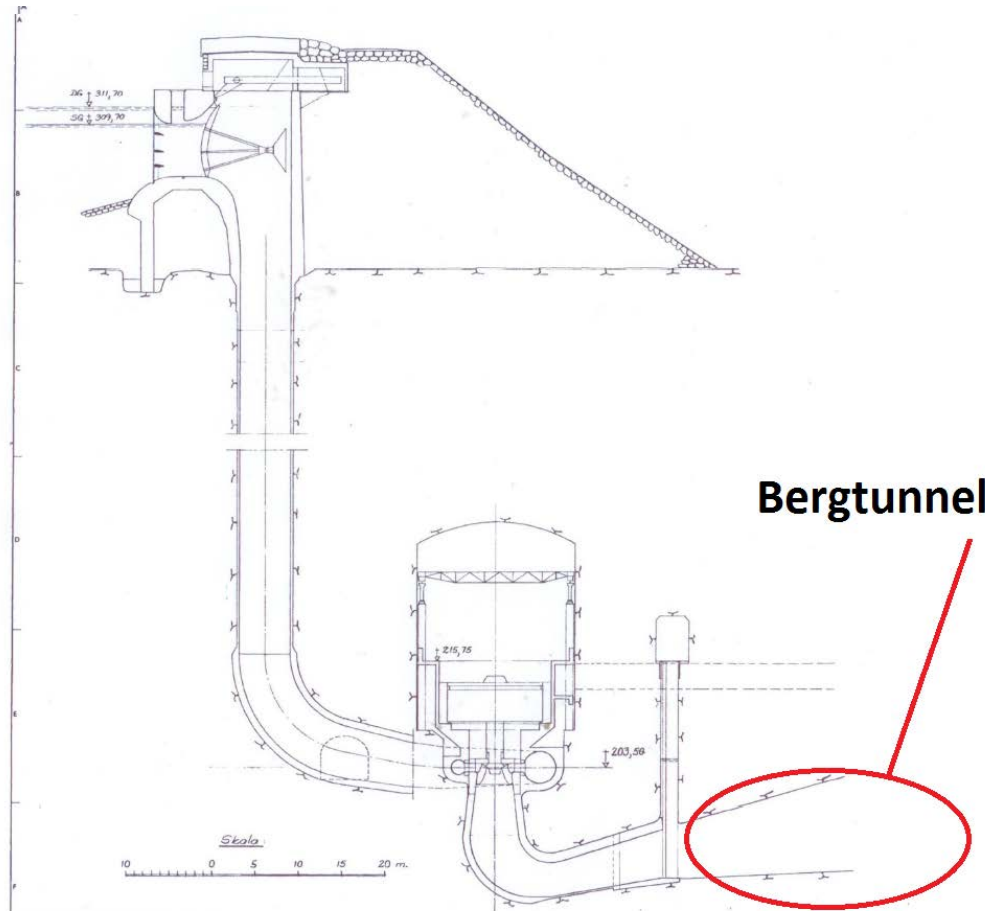
Projektet

- Examensarbete KTH
- Energiforsk AB, Betongtekniska programmet
- Vattenfall AB

Arbetsgång

- Litteraturstudie
- Deltagande på handnära inspektion
- Labbförsök med ROV
- Intervjuer

Uppbyggnad vattenkraftverk



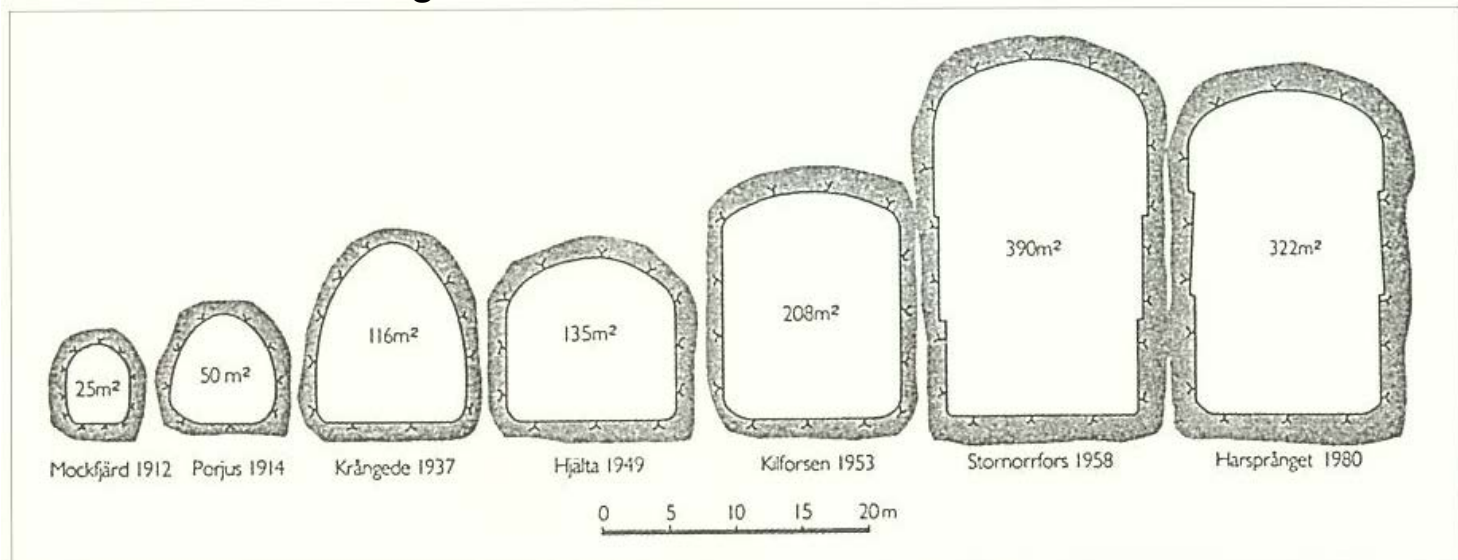
Bergstunnlarna

Sammanställning tunnellängder stora kraftverk (>10MW)

Tunnellängder [km]:	<0,1km	0,1-1km	1-3 km	3-5 km	5-10 km	>10km
Antal:	18	54	42	17	16	7

vattenkraft.info och Jan Norling

Dimensioner bergstunnlar



Spade (1999)

Handnära inspektioner idag

- Aggreagatnära delarna
- Vart 8:e år, i samband med reparation
- Jämför med tidigare protokoll
- Kamera och bomknackning
- Allvarighetsgrad & tidpunkt för åtgärd
- Ej bergtunnlar



Sundberg och Amsköld

Anmärkningar vid aggregatnära inspektioner

- 62 inspektioner, 17 vattenkraftverk, 620 anmärkningar

Del	Anmärkningar	Frekvens
Intag	110	18%
Tilloppstub	100	16%
Spiral	90	15%
Sugrör	300	48%
Ej lokaliserat	20	3%
Totalt	620	100%

- Erosion och urgröpningar
- Sprickor
- Rost

Ras i bergstunnlar

- Sammanställning av ras 2013

Tid efter driftstart [År]	Antal
0-5	12
5-15	9
15-75	3
Okänt	2
Total	26

Håkansson

Typ av förstärkning	Antal
Sprutbetong och/eller bultar	9
Betongkonstruktion	3
Oförstärkt	2
Okänt	12

Håkansson

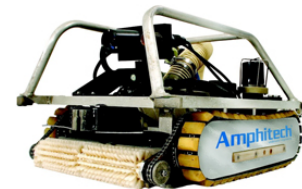
- Svällande lera med erosion
- Lera som tappar skjuvhållfasthet + urspolning
- Hydrostatiska trycket

Remotely Operated Vehicles, ROV

- Fyra olika klasser
 - **Observation**
 - **Mid size**
 - Working class
 - Special use



Loxus



Amphi-tech

ROV

- Utrustning

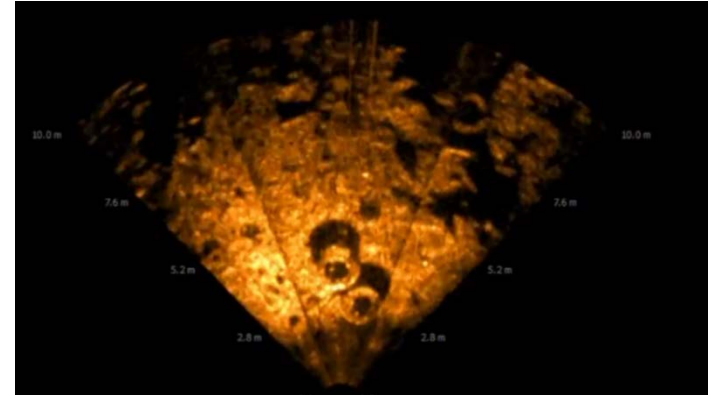
Kamera

Tryckmätare

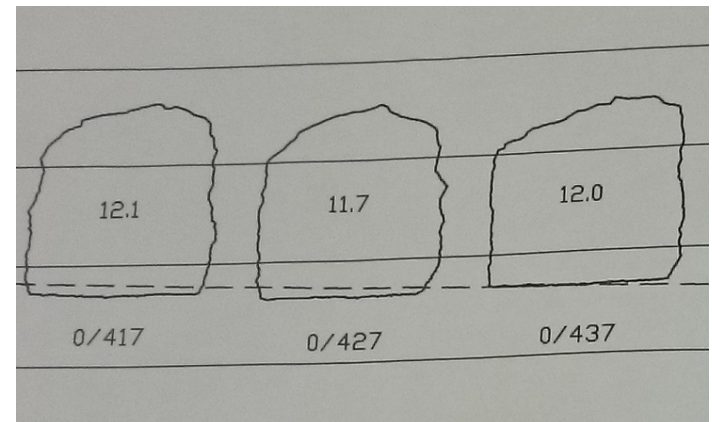
Försörjningskabel

Sonar

Manipulatorarmar



Buvi



Amphi-tech



Försök med ROV

- Syfte
 - Utvärdera vilka typer av betongskador som går att detektera visuellt under tunnelliika förhållanden

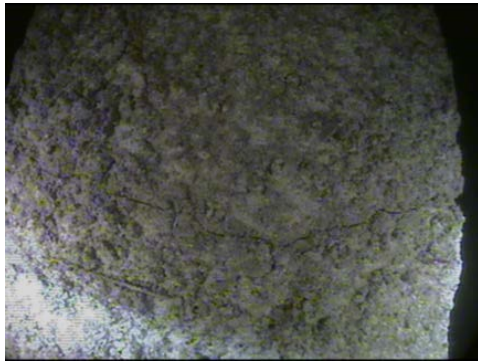
Försök med ROV

- Metod
 - Preparerade balkar med olika typer av skador
 - Hyrde ROV
 - Bassängen under Hall 53



Försök med ROV

- Resultat



Sundberg och Amsköld

"Tunnelinspektion" Hall 53



Sundberg och Amsköld



Avslutande

- Fördelar med ROV-inspektioner
 - Slipper tömma tunnel på vatten
 - Eliminerar personrisk
 - Kortare driftstopp
- Nackdelar
 - Stor engångskostnad att köra fast farkosten
 - Ej lika exakt och övergripande som handnära
- Utvärdera värdet av att inspektera bergtunnlar



Förslag på vidare arbete

Kortsiktigt

- ROV-inspektion i full skala i tunnel som ska tömmas
- Jämföra material från olika typer av sonar

Långsiktigt

- Utveckla ett autonomt system



Tack för att ni lyssnade

Frågor?

INSPEKTIONSMETODER FÖR INRE VATTENVÄGAR I VATTENKRAFTVERK

Att genomföra inspektioner av inre vattenvägar genom torrläggning är en tidsödande och kostsam process. Detta projekt har därför utförts med syfte att utvärdera till vilken grad inspektioner med undervattensfarkoster, ROV, kan användas som alternativ till inspektioner av inre vattenvägar, både aggregatnära och i till- och utloppstunnlarna. Resultatet pekar på att besiktningar med ROV kan övervägas för flera olika typer av inspektioner.

Projektet har utförts som ett examensarbete av Sebastian Sundberg och Tobias Amsköld vid KTH inom Energiforsks betongtekniska program vattenkraft.

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