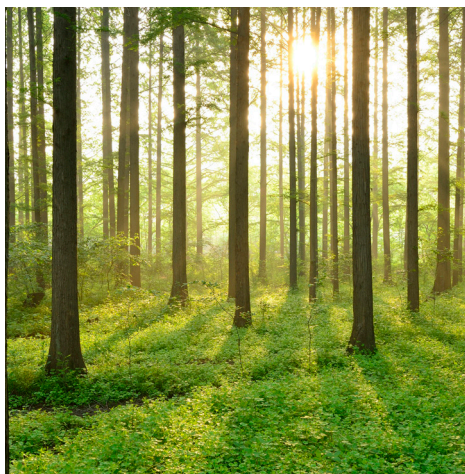


KARTLÄGGNING AV BERGFÖRSTÄRKNINGSMETODER I VATTENKRAFTINDUSTRINS BERGANLÄGGNINGAR

RAPPORT 2022:909



VATTENKRAFTENS BERGFRÅGOR



Kartläggning av bergförstärkningsmetoder i vattenkraftindustrins berganläggningar

SARA BERGQVIST, PETER LUND OCH PER-ERIK SÖDER

ISBN 978-91-7673-909-9 | © Energiforsk december 2022

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

Förord

Vattenkraftens berganläggningar är annorlunda när det kommer till konstruktion, geometri, material och lokal miljö jämfört med majoriteten av de berganläggningar som finns i Sverige. Det saknas en övergripande sammanställning av vilka bergförstärkningsmetoder som förekommer i vattenkraftsanläggningars bergutrymmen. Ett sådant underlag behövs för att kunna utvärdera hur väl metodval och utförande fungerar.

I de fall bergutrymmen förekommer som en del av vattenkraftanläggningar utformades dessa ofta med tillhörande bergförstärkningar redan vid byggnadstillfället. I vissa anläggningar har bergutrymmen byggts till senare. Bergförstärkningar utförs också för att förebygga skador hos åldrande anläggningar. Olika metoder har använts för att förstärka bergutrymmen i decennier. Syftet med detta projekt är att få en samlad bild av omfattningen av förekommande bergförstärkningsåtgärder och att utvärdera åtgärdernas prestanda. Utvärderingen ska också resultera i rekommendationer till anläggningsägarna.

Projektet har utförts av Sara Bergqvist, Peter Lund och Per-Erik Söder, seniora konsulter med bergexpertis på Norconsult AB. Uppdraget ingår i Energiforsks FoU-program Vattenkraftens bergfrågor etapp 2020–2022, med intressenterna Vattenfall, Fortum, Uniper/Sydkraft Hydropower, Statkraft, Skellefteå Kraft, Jämtkraft och Karlstads Energi. Projektets referensgrupp har utgjorts av styrgruppen för Vattenkraftens bergfrågor.

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Rapportförfattarna ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Byggnation av svenska vattenkraftsanläggningar med undermarkförlagda delar har utförts från början av 1900-talet fram till idag. Syftet med denna rapport är att ta fram en övergripande sammanställning av olika metoder för bergförstärkning som utförts i anläggningarna. Rapporten ger även en översiktlig utvärdering av de tidstypiska metodvalen och en utvärdering av dess prestanda.

Anläggningarna har delats in i olika tidsepoker utgående från byggnadsår. Varje tidsepok är unik avseende berguttagsmetoder och förstärkningsmetoder. Baserat på epokindelningen har fem platsbesök utförts på representativa kraftstationer under mark med syfte att studera bergförstärkningsåtgärderna och dess status.

Det var inte möjligt att urskilja någon skillnad i förstärkningseffektivitet över tid i de studerade stationerna och övervägande del av den tidigare utförda bergförstärkningen var fortfarande intakt. I stora delar av anläggningarna hade ingen tilläggsförstärkning utförts. Det fanns dock stationsutrymmen med relativt omfattande tilläggsförstärkning. Dessa var generellt i stationerna som var mellan 50 och 90 år gamla. I samtliga stationer har någon form av systematiskt bergunderhåll utförts över tid med 4–10 års intervall. De utrymmen som har krav på stor driftsäkerhet, som maskinsalar och transformatorutrymmen, har en högre grad av installerad förstärkning jämfört med övriga utrymmen. Det har inte utförts några funktionstester av den äldre förstärkningen, men att döma av utseende av bergytor och låg nivå av tilläggsförstärkning bedöms den tidiga förstärkningen fortfarande vara i funktion.

Utgående från denna sammanställning är det troligt att bergförstärkning enligt dagens praxis, med stålfiberförstärkt sprutbetong och systematisk bultning, generellt innebär en väl tilltagen förstärkningsomfattning. Det bedöms att det är möjligt att utföra förstärkning i mindre omfattning. Detta är dock beroende av de geologiska förutsättningarna i kombination med anläggningsutrymmets krav på driftsäkerhet. Det är då viktigt att utföra kontinuerliga inspektioner och underhåll i form av skrotning och förstärkningsåtgärder med bestämt tidsintervall.

Nyckelord

vattenkraft, bergbyggande, bergförstärkning, bergunderhåll, bergrum

Summary

Construction of Swedish hydropower plants with underground parts has been carried out from the beginning of the 20th century until today. The purpose of this report is to produce an overall compilation of different methods of rock reinforcement carried out in the facilities. The report also provides an overview evaluation of the time-typical method choices and an evaluation of its performance.

The facilities have been divided into different eras based on the year of construction. Each era is unique in terms of rock extraction methods and reinforcement methods. Based on the epoch division, five site visits have been carried out to representative underground power stations with the aim of studying the rock strengthening measures and their status.

It was not possible to discern any difference in reinforcement efficiency over time in the studied stations and the majority of the previously performed rock reinforcement was still intact. In large parts of the facilities, no additional reinforcements had been carried out. However, there were parts of the facility with relatively extensive additional reinforcements. These were generally in the stations that were between 50 and 90 years old. In all stations, some form of systematic rock maintenance has been carried out over time with generally 4–10 year intervals. The spaces that require high operational reliability, such as machine rooms and transformer spaces, have a higher degree of installed reinforcement compared to other spaces. No functional tests of the older reinforcement have been carried out, but judging by the appearance of rock faces and low level of additional reinforcements, the early reinforcement is judged to still be functional.

Based on this compilation, it is likely that rock reinforcement according to today's practice, with steel fiber-reinforced shotcrete and systematic bolting, generally involves a well-measured scope of reinforcement. It is judged that it is possible to carry out reinforcement on a smaller scale. However, this is dependent on the geological conditions in combination with the plant space's requirements for operational reliability. It is then important to carry out continuous inspections and maintenance in the form of scaling and strengthening measures at specific time intervals.

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte	8
1.3	Avgränsningar	8
1.4	Genomförande	8
2	Berganläggningar för vattenkraft	9
2.1	Utformning av berganläggningar för vattenkraft	9
2.2	Indelning av berganläggningar med avseende på konstruktion, utförande och underhåll	9
3	Bergbyggande och förstärkningsåtgärder under 1900-talet fram till idag	10
3.1	Borr- och sprängteknik	10
3.1.1	Borrteknik	10
3.1.2	Sprängteknik	13
3.2	Förstärkningsmetodik	15
3.2.1	Bergbult	16
3.2.2	Sprutbetong	20
3.3	Karakterisering och klassificering av bergmassan	20
3.4	Regelverk	22
4	Drift- och underhåll i berganläggningar för vattenkraft	24
5	Degraderingsprocesser i berganläggningar för vattenkraft	25
6	Urval av referensanläggningar	26
7	Resultat från platsbesök	28
7.1	Förekommande bergförstärkning & prestanda	28
7.2	Förekommande bergunderhållsåtgärder	39
8	Diskussion resultat	40
9	Slutsats och rekommendationer för anläggningsägare	43
10	Referenslista	44
Bilaga A:	Platsbesök	47
Bilaga B:	Underhållsrutiner - Enkätundersökning	56

1 Inledning

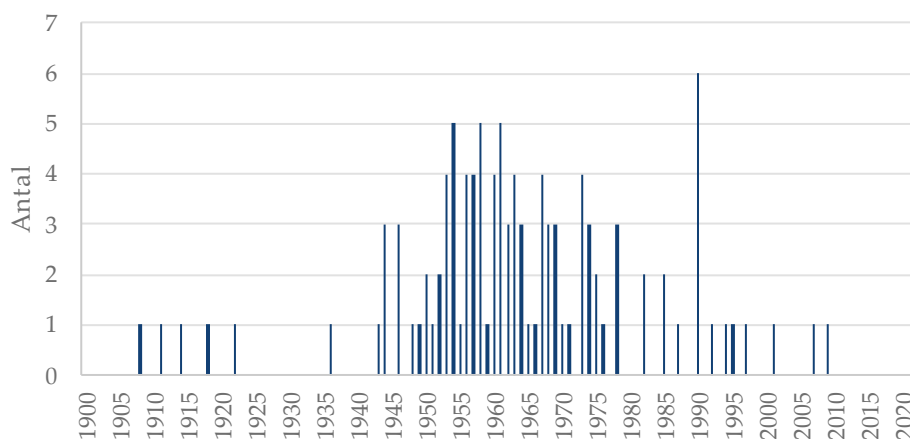
1.1 BAKGRUND

Svenska vattenkraftverk förlagda under mark har uppförts från början av 1900-talet fram till idag, med merparten tillkommande under 1950- och 1960-talet, se Figur 1. I de fall det förekommer bergutrymmen som en del av anläggningen så utformades dessa utrymmen, med tillhörande bergförstärkningar, generellt vid byggnadstillfället. I en del anläggningar har senare tillbyggnader av bergutrymmen skett, exempelvis vid tillkomst av ytterligare aggregat eller för att öka produktionssäkerheten genom systemseparationer.

I takt med att anläggningarna blir äldre utförs underhållsinsatser, vilka även omfattar bergutrymmen. Sammantaget innebär detta att underhåll, skrotning av bergytor och bergförstärkningsåtgärder har utförts i anläggningarna under många decennier och utförs fortlöpande.

Konstruktionerna, geometrin, tillgängligheten, materialen och den lokala miljön är över lag annorlunda i vattenkraftsanläggningar jämfört med både Trafikverkets och gruvindustrins berganläggningar. Det saknas dock en övergripande sammanställning av de olika metoder för bergförstärkningar som förekommer inom vattenkraften.

Föreliggande rapport ger en övergripande sammanställning av olika metoder för bergförstärkning nyttjad inom vattenkraften och presenterar tidstypiska metodval och en utvärdering av deras prestanda. I rapporten presenteras även resultat från platsbesök i fem anläggningar som bedöms som tidstypiska, med en sammanställning av förekommande bergförstärkningar i respektive anläggning.



Figur 1. Uppskattat antal uppförda underjordsanläggningar under 1900-talet fram till idag (Kuhlin, 2022). Antalet anläggningar har inte kunnat verifieras mot kraftbolagens uppgifter.

1.2 SYFTE

Syftet med föreliggande rapport är att förbättra kunskapen och förståelsen kring förekommande bergförstärkningsåtgärder i vattenkraftens berganläggningar. Studien omfattar bergförstärkningar i bergförlagda driftsutrymmen.

Syftet är även att göra en inledande utvärdering av bergförstärkningarnas och underhållsåtgärdernas prestanda. Utvärderingen skall därefter resultera i rekommendationer avseende hanteringen av bergutrymmenas underhåll och säkerhet över tid.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Föreliggande rapport omfattar inte åtgärder som avser vatteninläckage. Vatteninläckage kan påverka bergmassan och installerad bergförstärkning negativt, dels genom erosions- och vittringsprocesser, dels genom att vattentryck reducerar skjuvmotståndet längs med potentiella glidplan. Åtgärder för att förhindra vatteninläckage räknas i regel dock inte som en bergförstärkningsåtgärd, och har därför utelämnats. Avgränsningen kan även motiveras av bristande underlag avseende utförda injekteringsåtgärder i respektive anläggning.

Studien omfattar inte bergförstärkningsåtgärder för vattenvägar, så som inlopp- och utloppstunnel. Studien avser i huvudsak bergförstärkningsåtgärder i undermarksanläggningar och hanterar ej förstärkning av bergslänter eller schakt ovan jord.

1.4 GENOMFÖRANDE

En litteraturgenomgång har initialt utförts för att utvärdera vanligt förekommande bergförstärkningsmetoder och hur synen på underhåll av den färdiga anläggningen har sett ut under 1900-talets början fram till idag.

För att utvärdera hur bergförstärkningsåtgärder samt underhållsarbete utförts, har platsbesök genomförts i fem anläggningar. Under dessa besök har även intervjuer med drift- och underhållsansvariga genomförts.

I tillägg har ett frågeformulär avseende erfarenheter av befintliga bergförstärkningsåtgärder samt rutiner för underhåll i konstruktioner skickats ut till anläggningsägare.

2 Berganläggningar för vattenkraft

2.1 UTFORMNING AV BERGANLÄGGNINGAR FÖR VATTENKRAFT

Typisk utformning av en bergförlagd anläggning för vattenkraft är en maskinsal under mark i bergrum eller i större schakt med betongtak. Tunnlar i anslutning till maskinsalen är typiskt luckorter, skentunnlar och transformatorsalar. Åtkomst till anläggningen utgörs generellt av en tillfartstunnel och via hisschakt. Vattenvägar utgörs av tilloppstunnlar, eller schakt med eller utan stålinfodring, samt utloppstunnel och svallutrymmen där sådana krävs, alternativt utloppskanal. Anslutning mellan transformator och ställverk utgörs av kablar förlagda i schakt eller tunnlar. I en del fall har transformatorerna förlagts ovan mark.

2.2 INDELNING AV BERGANLÄGGNINGAR MED AVSEENDE PÅ KONSTRUKTION, UTFÖRANDE OCH UNDERHÅLL

Berganläggningens olika utrymmen förstärks och underhålls generellt på olika sätt, dels beroende av storlek av utrymmet, dels beroende av dess funktion och krav på driftsäkerhet. I anläggningarna avspeglas detta exempelvis genom att en hel del stationer har betonginnertak i maskinsal och transformatorutrymmen (områden med stora krav på driftsäkerhet) medan andra mindre tunnlar och utrymmen i stort sett är utan bergförstärkningar. Den här förstärkningsfilosofin belystes bland annat av Vattenfalls riktlinjer från 1960-talet då Statens Vattenfallsverk delade in sina berganläggningar i olika kategorier baserat på dess konstruktion, utförande och underhållsbehov. Anläggningarna delades in i A, B eller C- utrymmen (Martna, 1972).

A-utrymmen omfattade utrymmen betydelsefulla för driften av anläggningen, exempelvis maskin- eller transformatorsalar. Då utrustning i dessa utrymmen generellt är i drift, kännetecknas dessa utrymmen av att vara svårtillgängliga för underhållsåtgärder. Tanken var att dessa utrymmen skulle utformas och förstärkas på ett sådant sätt att underhållsbehovet reducerades och att risken för incidenter minimerades.

B-utrymmen omfattade utrymmen mer lättillgängliga för underhåll, exempelvis tillfarts- och förbindelsetunnlar. För dessa utrymmen var fokus att hålla kostnaderna för underhåll nere och kostnaderna för permanenta förstärkningsåtgärder vägdes därför mot behovsstyrt eller kontinuerligt underhåll.

C-utrymmen omfattade utrymmen som inte var avsedda att vistas i, annat än i undantagsfall, exempelvis tillopps- och utloppstunnlar. Förstärkningsåtgärderna för dessa utrymmen hölls därför till ett minimum.

3 Bergbyggande och förstärkningsåtgärder under 1900-talet fram till idag

Då kraftstationerna byggts under cirka ett sekel har metoder för bergbyggande och förstärkningsåtgärder varierat. För att identifiera olika tidsepoker av bergbyggande och förstärkningsåtgärder redogörs i detta kapitel för de olika metoderna. Detta utgör underlag för att kunna dela in stationerna epokvis med likartat berguttag och förstärkningssätt.

3.1 BORR- OCH SPRÄNGTEKNIK

Borr- och sprängtekniken har utvecklats under 1900-talet, vilket inneburit att berget loss hållits på olika sätt över tid. Exempelvis användes korta, klena borrhål med kraftiga laddningar tidigt, för att övergå till grövre, längre borrhål och mer anpassade laddningar i senare tid. Att olika metoder för loss hållning använts kan resultera i att bergytan uppvisar oregelbundenheter, det kan också resultera i olika påverkansdjup från sprängskador. Uttagsmetoden kan därmed återspeglas i anläggningarnas underhållsbehov, exempelvis genom behovet av återkommande skrotning över tid.

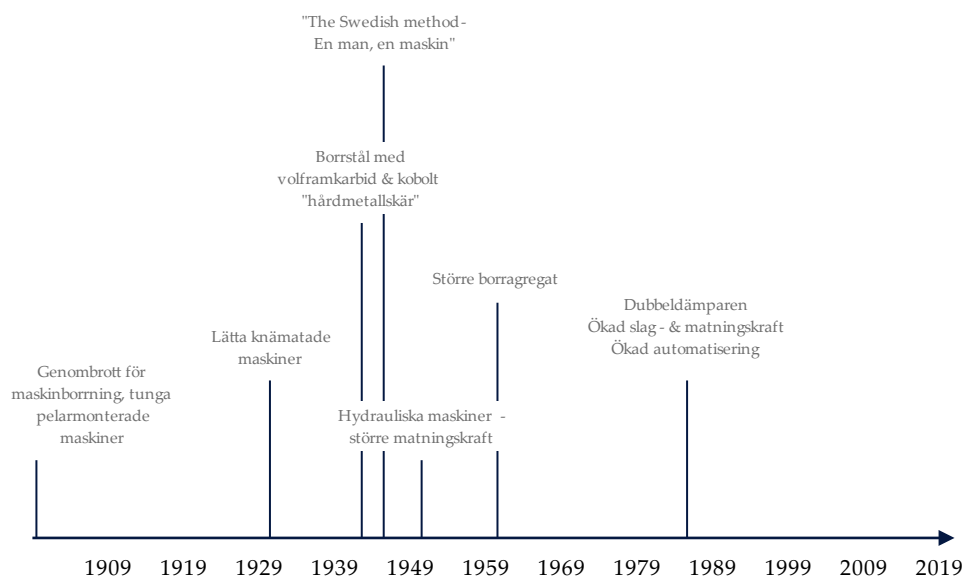
I föreliggande kapitel ges en kort sammanfattning av konventionella metoder som använts vid berguttag, från 1900-talets början fram till idag.

3.1.1 Borrteknik

Utvecklingen av borrteknik har haft stor betydelse för möjligheten att konstruera och kostnadseffektivt anlägga bergrum, schakt och tunnlar. En sammanfattning av de huvudsakliga utvecklingsstegen för borrtekniken från 1900-talets början fram till idag framgår av Figur 2.

Fram till 1800-talets mitt användes generellt borrhning för hand (borr och slägga) vid berguttag och framdriften var låg (Nord, 2004). År 1857 utvecklades den pneumatiska bormaskinen, vilken kom att användas i allt större utsträckning, och som fick sitt genombrott under 1900-talets början. Skiftet från den handdrivna bormaskinen till den pneumatiska maskinen bidrog till allt högre framdrift vid bergbyggande.

Bormaskinerna under 1900-talets början fanns i olika utförande, med och utan automatisk rotation (Nord, 2004). De lättare maskinerna kunde hållas för hand medan de tyngre, som kunde väga upp mot 50 kg, monterades på spännpelare mellan väggar eller mellan tak och sula vid borrhning av längre hål. Bormaskinerna kunde även monteras på ställning som förflyttades framåt i takt med framdriften.



Figur 2. Huvudsakliga utvecklingssteg avseende borrhållsteknik.

En kvarstående begränsning i framdriften utgjordes dock av borrhållstålet. Borrhållstålet under 1900-talets början utgjordes primärt av blötjärn. Stålet nöttes ut snabbt, krävde omsmide, och utgjorde därmed en flaskhals i produktionen (Sandström, 1963). I Sverige utvecklades under 1930-talet ett legerat stål med molybden och krom som förbättrade stålets motstånd mot nötning något. Under samma period utvecklades även utbytbara borrhållspetsar i USA, vilket medförde att inte hela borrhållstålet behövde transporteras till omslipning (Widén & Haglund, 1945). Omslipning utgjorde dock fortfarande ett resurskrävande moment i produktionen.

I början på 1920-talet hade utvecklingen av "hårdmetall" (tungstenskarbid) påbörjats i Tyskland (Sandström, 1963). Utvecklingsarbetet var vid denna tidpunkt inte relaterat till bergarbeten utan initierades bland annat av belysningsföretaget Osram. Hårdmetallen var initialt avsedd som ett substitut till industridiamanter, vilka var en bristvara efter första världskrigets slut. Under 30-talet och 40-talet vidareutvecklades materialet. I Teknisk tidskrift från 1932 beskrivs hur borrhållskronor med spetsar av hårdmetall kan användas i medelhårda, lösa bergarter, men det var vid denna tidpunkt inte gynnsamt att använda metoden i de hårda bergarter som är vanligt förekommande i Skandinavien (Lind, 1932).

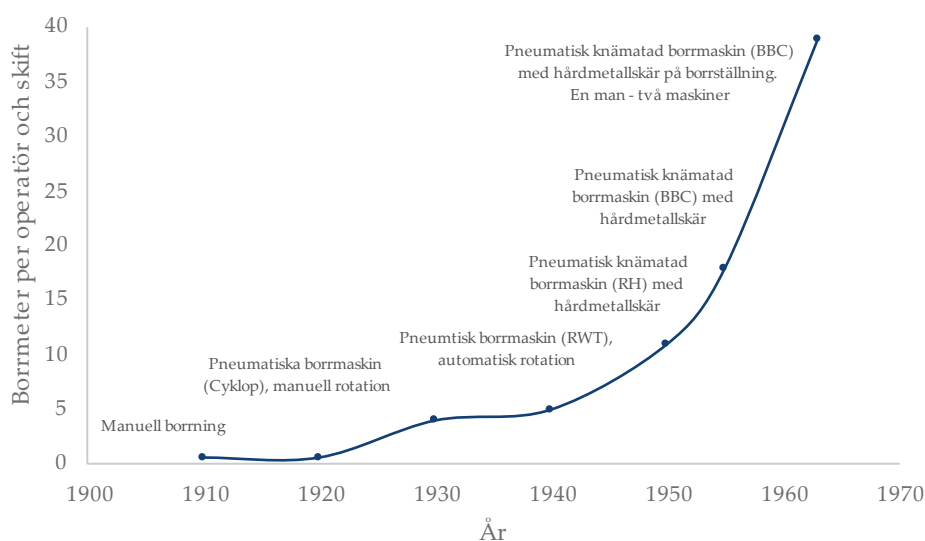
I Sverige drevs utvecklingen av hårdmetall bland annat av Dr. Hans Hermann Wolff, som flytt från Tyskland under andra världskriget (Sandström, 1963). Hårdmetallen var av stort intresse för Försvarsmakten, men kom även att intressera bygg- och gruvindustrin. Hårdmetallbestyckade borrhållstål börjar tillverkas av Sandvik år 1942 och det pulvermetallurgiska materialet av volframkarbid och kobolt, ökade borrhållstålets hållfasthet och slitstyrka markant (Sandvik, 2022). År 1945 används hårdmetallskär för första gången på Atlas Diesels tryckluftsdrivna borrhållrustning (Atlas Copco, 2022).

Användandet av borrar i hårdmetall i kombination med de lätta, handhållna, knämatade bormaskiner som hade utvecklats av Atlas Diesel under 30-talet kom att bli känd som "The Swedish method" (Janelid, 1964). Hårdmetallen gjorde att slagen inte behövde ha lika stor kraft som tidigare, vilket var väl förenligt med de nya lätta maskinerna (Widén & Haglund, 1945). De huvudsakliga fördelarna med "The Swedish method" var att utrustningen var effektiv, kunde hanteras av en person och att borrarstämlet inte behövde bytas ut lika frekvent som tidigare (Janelid, 1964). Utvecklingen av ökad borreffekt fram till 1960-talet illustreras i Figur 3. Andra fördelar var att en reducerad borrhålsdiameter kunde nyttjas och att borrhålens diameter blev jämnare (Kullstedt, 1947). Den reducerade borrhålsdiametern bidrog också till minskad överladdning vid sprängning (Janelid, 1964).

Redan under tidigt 1900-tal användes mer eller mindre mobila ställningar för att ta ut hela tunnelsektioner (Sandström, 1963). Med de nya lätta bormaskinerna kunde borrarplattformarna göras nättare, i och med detta blev det också lättare att montera och förflytta plattformen.

Från och med slutet av 1950-talet och början på 1960-talet användes hydrauliska bormaskiner i högre utsträckning, vilka hade högre slag- och matningskraft än de pneumatiska maskinerna (Nord, 2004). Enligt Persson, Holmberg & Lee (1996) kunde en övergång från pneumatisk till hydraulisk bormaskin öka borrhastigheten med upp till 50–100 %. I och med den ökade borrhastigheten blev borrarstälens hållfasthet återigen den begränsande faktorn. För att undgå denna begränsning och kunna öka borrhastigheten ytterligare utökades initialt borrarstälens diameter.

I slutet på 1980-talet kunde dock ytterligare matningskraft och borrarjunkning tillgodoräknas bormaskinerna till följd av ökad slagkraft och slagfrekvens (Nord, 2004). Detta möjliggjordes bland annat av "dubbeldämparen", vilken reducerade stötvågsenergin i själva borrarstämlet och reducerade därmed slitaget.

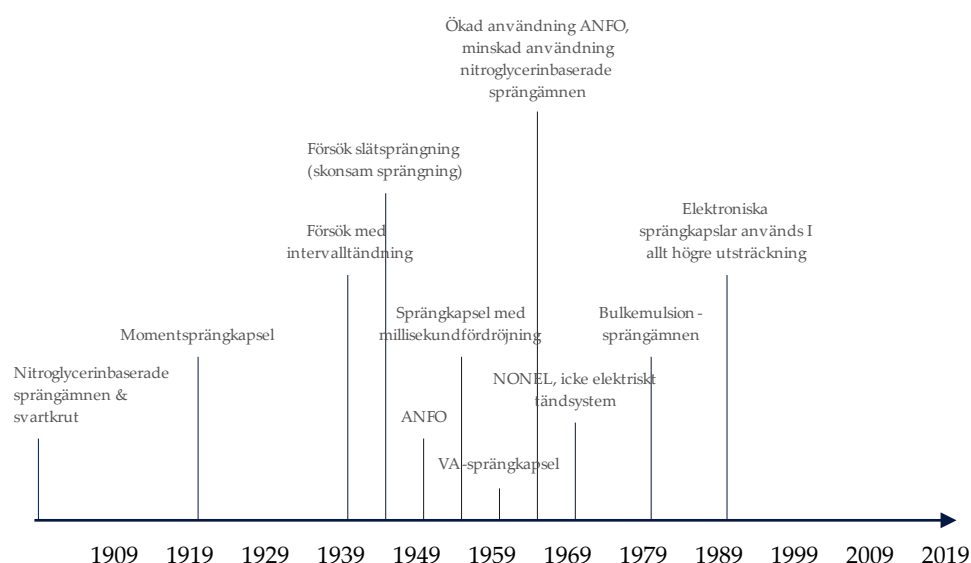


Figur 3. Utveckling av borreffekt över tid. Omarbetad efter Janelid (1963).

I och med övergången till de hydrauliska maskinerna blev borrarbryarna allt större och tyngre, och behövde därmed monteras på borrarbryar och borrarbryar för att kunna användas. Dessa borrarbryar/borrarbryar blir med tiden allt större och mer automatiserade (Nord, 2004). Bland annat automatiseras slagkraft och matarkraft, vilket effektiviserar borrarbryningen och reducerar risken för avbrott i framdriften till följd av att borrarbrytaren kör fast (Persson, Holmberg & Lee, 1996).

3.1.2 Sprängteknik

Under 1900-talet har en stor utveckling skett avseende spräng- och tändmedel, se sammanställning i Figur 4. I början av århundradet var utbudet av sprängämnen ensartat och upptändningen var oprecis. Med tiden har nya sprängämnen utvecklats, med annan styrka och bergbrytande egenskaper, och upptändningen har blivit alltmer exakt. Utvecklingen har bland annat bidragit till att de senare metoderna reducerar mängden överberg och bättre skonar den slutliga bergytan.



Figur 4. Huvudsakliga utvecklingssteg avseende sprängteknik.

Sprängämnen

Under mitten av 1800-talet uppfann Ascano Sobrero nitroglycerinet (Sandström, 1999), vilket så småningom började användas som komponent i sprängämnen. Ämnet var dock svårhanterligt och ett flertal olyckor finns dokumenterade. Det dröjde fram till Alfred Nobels uppfinningar, tändhatten (1864) och Dynamiten (1867), innan sprängämnen med nitroglycerin blev så pass säkra att de började användas i någon högre utsträckning (Patent och registreringsverket, 2021). Under 1900-talet utvecklas och används olika sprängämnen innehållandes nitroglycerin och dessa dominerar marknaden fram till 1950-talet (Olofsson, 1999). Andelen

glycerin reduceras successivt i produkterna, och ersätts efterhand med andra sprängämnen, bland annat ammoniumnitrat.

Sprängämnen med ammoniumnitrat (AN) har använts sedan i slutet av 1800-talet (Larsson, 1960). Ämnet ingick bland annat i ammoniakkrut som patenterades redan år 1867. Ammoniakkrutet var initialt svårantändligt, men kom senare att ingå som komponent i dynamit. Under 1950-talet börjar sprängämnen med AN-oljebas (ANFO) framställas i USA och under slutet av 1950-talet pågår även framställning av ANFO i Sverige (Larsson, 1960). Sprängämnena baserades på ammoniumnitrat i kombination med dieselolja (fuel oil). Fördelen med ANFO var bland annat att sprängämnet var okänsligt för yttre påverkan i odetonerat tillstånd, det ansågs säkert att hantera och var billigt att använda i jämförelse med dynamit. Nackdelen var dess känslighet för vatten. Under 1960-talet ökar användningen av AN-oljebas och ersätter användandet av dynamit i allt högre utsträckning. Efter hand utvecklas även mer eller mindre vattenbeständiga ANFO-sprängämnen, så kallade slurries.

Under mitten av 1950-talet pågick försök för att optimera bergkonturen i samband med sprängning (Langefors, 1958). Syftet med försöken var att utveckla en metod där mängden överberg reducerades och där framtida underhållsarbete i form av bergskrotning reducerades. Metoden som användes benämndes slätsprängning och innebar att koncentrationen sprängämne i konturhålen reducerades samt att hålsättningen och tändningsföljden sågs över. För slätsprängning användes bland annat rör av gurit, dynamitpatroner som delats på längden eller dynamitpatroner som pinnladdats (träpinne lades mellan patronerna).

Under 1980-talet kommer bulkemulsionsämnena och ersätter i allt högre utsträckning både ANFO och patronerade sprängämnen (Larsson & Nylund, 1996). Emulsionsprängämnen, som började utvecklas redan på 1970-talet i USA, utgörs primärt av en emulsion av ammoniumnitrat, olja, vatten och emulgator, vari gas eller mikrobullor tillsätts för att känsliggöra blandningen (Svenska Bergteknikföreningen, 2020). Den primära fördelen med denna typ av sprängämne är att det, precis som ANFO, anses säkert att hantera men med den ytterligare fördelen att det är vattenresistent. Ur arbetsmiljösynpunkt ger sprängämnet inte upphov till huvudvärk så som de nitroglycerinbaserade gör på grund av dess blodtryckssänkande effekt (Larsson & Nylund, 1996).

Tändmedel

Utvecklingen av själva tändmedlet har över tid resulterat i ett mer kontrollerat tändningsförlopp. Den ökade precisionen har dels bidragit till en ökad säkerhet, dels till ett mer effektivt berguttag. Några av de större framstegen avseende tändmedel behandlas översiktligt i detta avsnitt.

Under mitten av 1800-talet pågick arbetet med att framställa ett sprängmedel av Nitroglycerin. Alfred Nobels utveckling av tändhatten, i.e. den vanliga sprängkapseln som användes tillsammans med krutstubin, utvecklades år 1864 och var nödvändig för att kunna detonera de nya sprängämnena på marknaden på ett säkert sätt (Olofsson, 1989).

Omkring år 1920 kommer elektriska momentsprängkapslar ut på marknaden (Holmberg, 1994). Den elektriska sprängkapseln verkar genom att elektricitet förs genom en strömförande tråd omgiven av ett lättantändligt material (Kullstedt, 1947). Då tråden börjar glöda antänder det omkringliggande materialet. Fördelar med elektrisk tändning jämfört med användning av krutstubin var ökad kontroll av salvan, ett större avstånd mellan salva och arbetare samt mindre risk för feltändning och odetonerat sprängämne. (Hagerman, 1955).

Något senare, under 1940-talet, utvecklades intervallkopplare som möjliggjorde fördröjd upptändning av elektriska momentsprängkapslar, intervalltändning (Holmberg, 1994, Langefors, 1949). Efter hand, omkring 1950, inarbetades fördröjningen i stället i själva sprängkapseln. Intervalltändningen möjliggjorde större bergguttar per salva, bättre fragmentering och kunde även reducera vibrationerna i samband med sprängning (Olofsson, 1989, Langefors, 1949).

De elektriska sprängkapslarna var dock även förknippade med problem (Isaksson, 1956). Problematiken bestod primärt i att sprängkapslarna kunde reagera och tända vid exempelvis statisk elektricitet, kryptströmmar och åsknedslag. Under 1949–1955 rapporterades sex olyckor relaterade till åsknedslag i Sverige. Detta ledde till att man pausade pågående sprängarbeten då risk för åska förelåg.

Under 1960-talet utvecklades VA-sprängkapseln för att öka säkerheten vid sprängning, genom att reducera risken för feltändning (Holmberg, 1994). Sprängkapseln hade en högre tolerans mot elektricitet i omgivningen men reducerade inte risken för feltändning helt (Olofsson, 1989). Feltändning kunde fortfarande initieras av exempelvis radiosändare, kraftledning och åsknedslag.

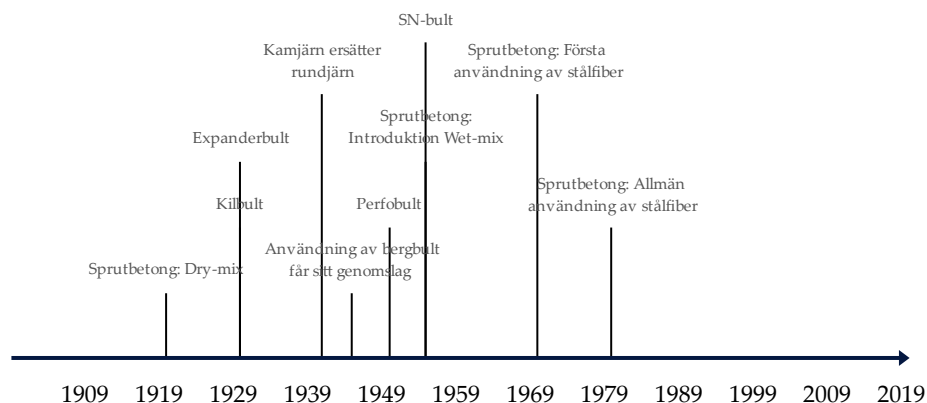
Under 1970-talet kom NONEL-sprängkapseln, som i stället för ström initierar tändningen genom stötvågsteknik (Olofsson, 1989). Detonationen kan ske antingen momentant eller genom fördröjning. Fördelen med denna typ av sprängkapsel var och är att den inte påverkas av elektricitet i omgivningen, vilket medför fler användningsområden än den tidigare nämnda elektriska sprängkapseln.

Under senare tid (1980-tal och framåt) har den elektroniska sprängkapseln utvecklats, vilken ger än mer exakta fördröjningstider (Holmberg, 1994). Precisionen uppnås genom att ersätta den pyrotekniska fördröjningen med en elektronisk komponent. Vinsten blir reducerade vibrationer i anslutning till bergguttar, ökad kontroll över kontur och massor samt ökad säkerhet.

3.2 FÖRSTÄRKNINGSMETODIK

Inom anläggningarna har olika förstärkningsmetoder använts från tidigt 1900-tal fram till idag. Valet av förstärkningsmetod har dels varit beroende av vilka material och innovationer som varit tillgängliga, dels av vad som varit ekonomiskt gynnsamt att använda.

I föreliggande kapitel ges en kort sammanfattning av vanligt förekommande bergförstärkningsmetoder från 1900-talets början fram till idag, se översikt i Figur 5.



Figur 5. Huvudsakliga utvecklingssteg avseende bergförstärkning.

3.2.1 Bergbult

Förstärkningsarbeten med hjälp av bergbult fick sitt genomslag först under 1940-talets andra hälft då de lätta, knämatade bormaskinerna i kombination med hårdmetallskär började marknadsföras i allt högre utsträckning (Smedberg, 1955). I och med att bormaskiner och borrstål blev allt bättre, blev det också enklare och mindre kostbart att installera bergförstärkning i form av bergbult.

Bultning hade fram till 1940-talet primärt utförts med kilbult eller expanderbult. I samband med att bultning blev alltmer vanligt förekommande utvecklades nya metoder, bland annat utvecklades perfobult, injektobult och SN-bult under 1950-talet. Till följd av råvarubrist under andra världskriget ersattes även rundstålet, som primärt använts som armering i betongkonstruktioner, av kamjärn under tidigt 1940-tal (Reinius, 1944).

I början på 1950-talet börjades även bultning av tunneltak, "takbultmetoden" användas alltmer som ersättning för understödjande konstruktioner av stål och betong (Rabcewicz, 1955). Metoden hade främst använts i gruvindustrin men började nu appliceras i andra typer av bergkonstruktioner. Orsaken till övergången från understödjande stål- eller betongkonstruktioner till användandet av bultning av kritiska partier berodde bland annat på höga materialkostnader i kombination med relativt låg kostnad på arbetskraft.

För att tillgodosäkra sig bultarna som permanent förstärkning användes injektering eller kringgjutning mellan bult och bergmassa (Rabcewicz, 1955). Under denna tidsperiod användes generellt ett betydligt högre vct-tal än vad som föreskrivs idag och för att inte bruket skulle rinna ut vid uppåtriktade borrhål användes olika metoder. Exempelvis användes packers i separata, intilliggande injekteringshål eller packers direkt i bult hålet tillsammans med luftningsrör. Dessa metoder visade sig dock ofta ge bristfällig ingjutning och luftfickor i bruket. Ett annat, för tiden, tillgängligt alternativ, var att använda perfobult. Under 1950-talets mitt utvecklades SN-metoden och är en av de bultsättningsmetoder som används än idag.

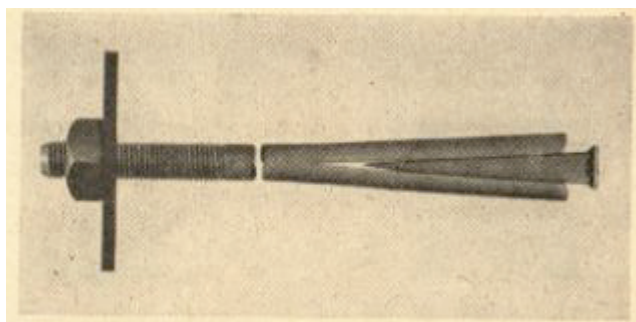
Fjällband är en typ av böjbar, sammanflätad armering som kan användas för att få samverkan mellan bultar.

I följande avsnitt presenteras några av de vanligaste förstärkningsmetoderna inom vattenkraften.

Friktionsbult, Kilbult

Kilbult användes redan under tidigt 1900-tal. Kilbulten, i sitt tidiga utförande, expanderade genom en slits i ena änden, var en kil placerades (Smedberg, 1955). Slitsarna trycks vid installation ut mot borrhållsväggen och bulten spänns därefter upp med hjälp av bricka och mutter. Slitsen medförde ofta en försvagning av bulten, och dimensionerna som användes var därför generellt $\geq 1'' - 7/8''$ (Ø20-25 mm) (Smedberg, 1955, Rabcewicz, 1955).

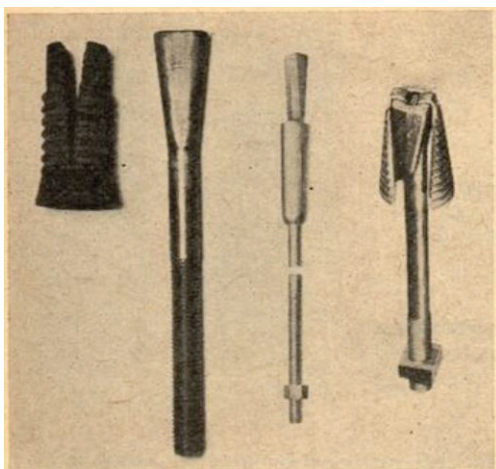
Bultens kapacitet var beroende av hur väl den slagits in i berget och borrhålets geometri och egenskaper. Kilbulten fungerar generellt bäst i medelhårt till hårt berg (Rabcewicz, 1955). Vid för mjukt berg finns det risk att bergmassan ger efter och förankringskapaciteten reduceras. Det samma gäller vid mycket hårt och sprött berg där anläggningsytan mellan kilbult och bergmassa riskerar att bli begränsad. Bultens bärförmåga riskerar även att gå förlorad om bultstålet utsätts för plastisk deformation (Smedberg, 1955).



Figur 6.1 Exempel på kilbult (Smedberg, 1955).

Friktionsbult, Bult med expanderhylsa

Expanderbultarna, vilka utvecklades tidigt 1900-tal, är konstruerade på så sätt att expanderhylsan som gängas på bulten expanderar då bulten utsätts för belastning. Till skillnad från kilbulten, så ökar därmed expanderbultens bärförmåga vid ökad belastning till följd av ökad friktion mellan bult och bergmassa (Smedberg, 1955). Expanderbulten fanns under 1950-talet i olika utförande (normaltyp, bail-typ, shell-typ, diagonalskuren typ samt med uppsmidd kona). Bult med expanderhylsa fungerar, likt kilbulten, generellt bäst i medelhårt- till hårt berg. (Rabcewicz, 1955). Bulten ställer krav på borrhållskonturen, vid ojämna eller krokiga hål föreligger det risk för reducerad bultkapacitet.

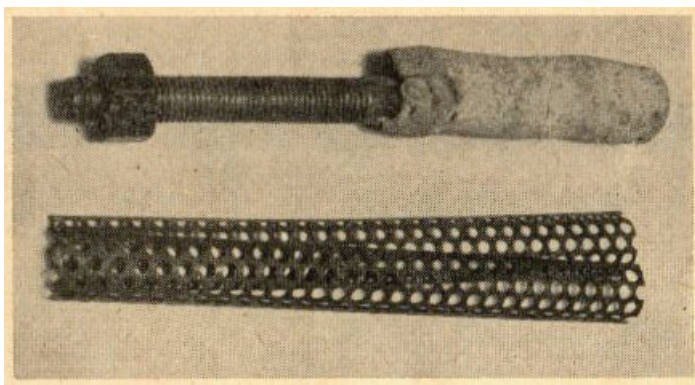


Figur 6.2 Exempel på bult med expanderhylsa (Smedberg, 1955).

Ingjuten bult, Perfobult

Perfo-metoden utvecklades i början på 1950-talet. Perfobulten utgörs av ett kamjärn i kombination med en s.k. perfohylsa. Hylsan utgörs av två perforerade halvcylindrar som fylls med plastiskt cementbruk och sammanfogas kring kamjärnet (Rabcewicz, 1955). Bulten förs in i borrhålet och med hjälp av slägga eller tryckluftshammare (Bjurström & Heimersson, 1979). Metoden användes ofta för uppåtriktade hål, där det annars fanns risk för att bruket kunde rinna ut.

Vid en tidigare studie, utförd av Hamberg och Söder (1996) i Vattenfalls anläggningar, erhöll perfobult en högre andel anmärkningar jämfört med SN-bult.

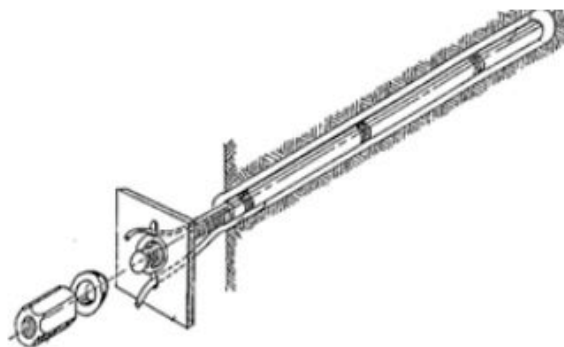


Figur 6.3 Exempel på perfobult (Smedberg, 1955).

Ingjuten bult, Injektobult

Injektobulten utvecklades i mitten av 1950-talet (Teknisk tidskrift, 1955). Bulten, som utgörs av kamjärn, installeras med hjälp av en s.k. injektohylsa med backventil. Injektohylsan håller avluftningsröret som löper från mynning ned till borrhålets botten på plats varvid cementbruk pressas in i hålet från dess mynning. Som ett sista steg dras avluftningsröret ut, kamjärnet matas in i hålet för hand och slås därefter in sista biten.

Precis som för perfobult, erhöll injektobult en högre andel anmärkningar jämfört med SN-bult vid en tidigare utförd inventering av Vattenfalls anläggningar (Hamberg & Söder, 1996).



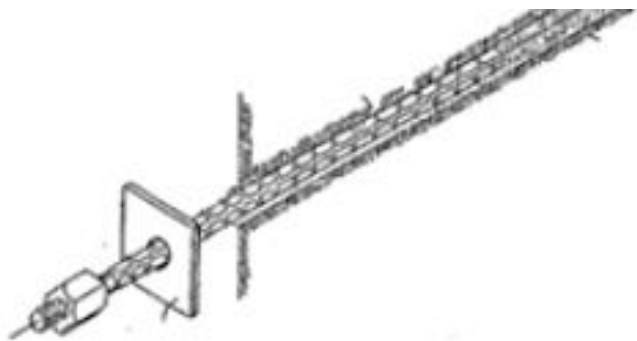
Figur 6.4 Exempel på injektobult (Hamberg och Söder, 1996).

Ingjuten bult, SN-bult

SN-metoden utvecklades i samband med att Stornorrfors kraftstation byggdes år 1957–1958. Arbetsförfarandet innebar att man kunde komma ifrån det ofta förekommande problemet med luftfickor i bruket.

Metoden, som även kan användas för uppåtriktade hål, innebär att cementblandning pressas in med slang från borrhålets botten med hjälp av tryckluft (Bjurström & Heimersson, 1979).

Initialt användes ofta bruk innehållandes upp till 65% viktprocent sand, vilket även medförde ett relativt högt vct-tal var nödvändigt (Bjurström & Heimersson, 1979). År 1961 föreslogs i stället att ren cementpasta med lågt vct-tal skulle användas (Martna & Knape, 2009). Detta förfarande, med ren cementpasta och lågt vct används än idag.



Figur 6.5 Exempel på SN-bult (Hamberg och Söder, 1996).

3.2.2 Sprutbetong

Under 1930-talet började sprutbetong användas i Europa (Sjölander, 2020). Sprutbetongen som användes bestod initialt av en "dry mix", i vilken vatten tillsattes först vid munstycket. Sprutbetongen utfördes som dels som bergförstärkande åtgärd, dels som ytförsegling. Blandningen saknade vid denna tidpunkt fiberarmering och hade därför inte samma skjuv- och draghållfasthet som dagens sprutbetong.

År 1955 kom "wet mix", vilket innebar att vattnet tillsattes tidigare i processen (Sjölander, 2020). Utöver arbetsmiljömässiga fördelar underlättades appliceringen och man fick bättre kontroll över vct-talet.

Under 1970-talet börjar man använda fiberarmering av olika sammansättning i sprutbetongen (Sjölander, 2020), vilket ökar dess kapacitet i skjuv- och drag. Metoden slår igenom under 1980-talet och ersätter det tidigare arbetet med att fördela armeringsstål i sprutbetongen vid behov.

Sprutbetong medför en snabb förbättring av stabiliteten då den påförs, men medför även att det blir svårare att inspektera berget i efterhand.

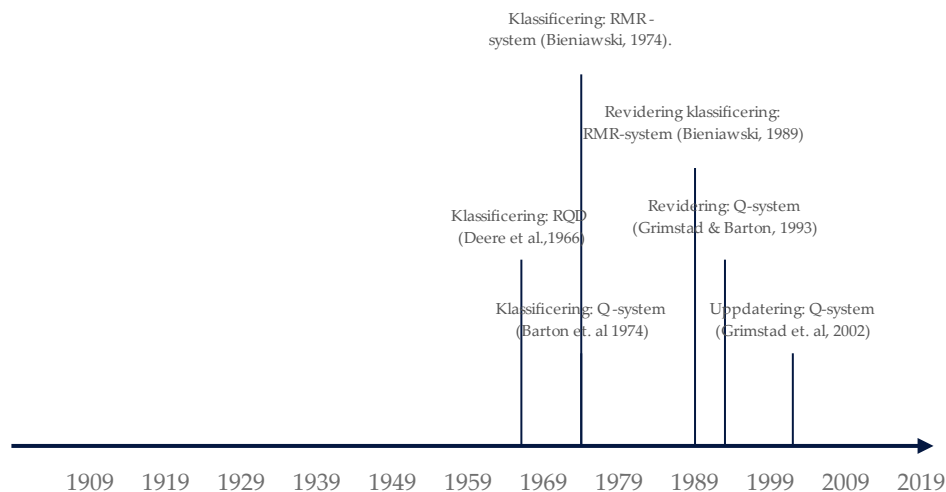
3.3 KARAKTERISERING OCH KLASSIFICERING AV BERGMASSAN

I samband med byggverksamhet relaterad till vattenkraft har inte några systematiska karakteriserings- eller klassificeringsmetoder avseende bergmassan identifierats för 1900-talets första hälft. Bedömning av bergmassans kvalitet, metodik för berggutttag och bergförstärkning har troligtvis lagts helt i händerna på bergfolket på bygget, det vill säga bergbas och bergarbetare.

Geologisk karakterisering av bergmassan och identifiering av större zoner och förkastningar utfördes tidigt genom provborrning i anslutning till föreslagen anläggningsplacering. I ett flertal av äldre anläggningar finns även geologiska beskrivningar från byggtiden vilket indikerar att bergförhållandena följdes upp och hanterades under byggtiden.

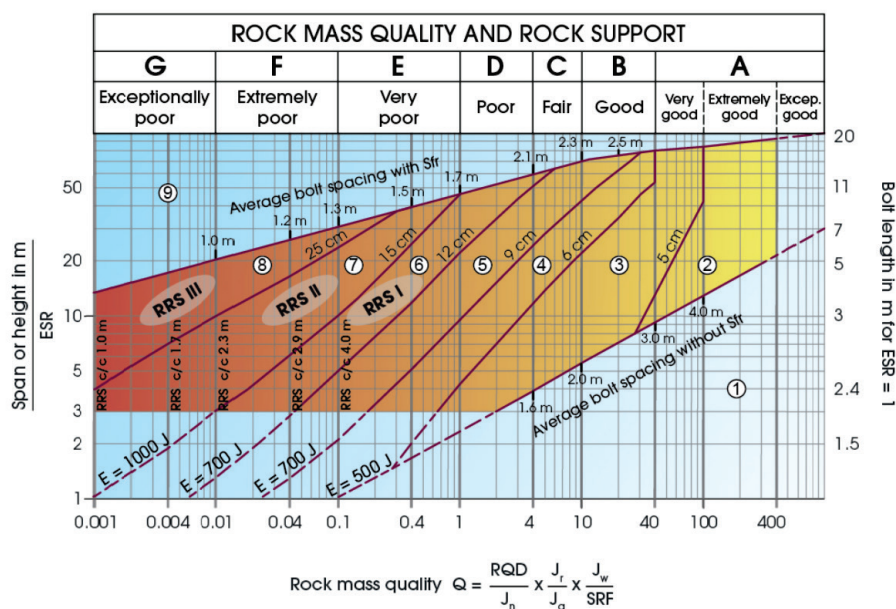
Under 1900-talets senare hälft utvecklades ett flertal metoder för att karaktärisera och klassificera bergmassan som ett sätt att beskriva bergmassan och anpassa mängden förstärkning, se sammanställning i Figur 6. Q-systemet, som utvecklades under 1970-talet, är ofta en ingående komponent vid dimensionering av typförstärkning i bergkonstruktioner i Sverige i dag.

Q-systemet, av Barton et. al (1974), baseras på empiri genom praktikfall från Norge, Schweiz och Indien (NGI, 2022). Praktikfallen omfattar i huvudsak underjordskonstruktioner uppförda i hårda uppspruckna bergarter. Systemet omfattar sex olika parametrar; RQD, sprickgruppstal (J_n), sprickråhetstal (J_a), sprickfyllning/omvandlingstal (J_r), sprickvattental (J_w) samt spänningsreduktionsfaktor (SRF). Faktorerna indelas i tre kvoter, vilka representerar bergmassans blockighet, sprickytornas hållfasthetsegenskaper samt effektivt spänningstillstånd. Vid dimensionering av förstärkning beaktas även anläggningens dimensioner och säkerhetskrav med avseende på anläggningskategori (excavation support ratio), se Ekvation 1 samt Figur 7.



Figur 6. Huvudsakliga utvecklingssteg avseende utveckling av bergklassificering, modifierad från Edelbro (2003).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{Ekvation 1})$$



Figur 7. Rekommenderad bergförstärkning baserat på Q-metoden (NGI, 2022).

3.4 REGELVERK

Det finns väldigt lite material angående regler, lagar och normer för berggutttag och förstärkning att återfinna under de perioder som merparten av kraftstationerna byggts. Bergbyggandet och tillhörande förstärkningsarbeten har mestadels skett enligt praxis. Dock skedde en hel del utveckling, dels hos leverantörer, dels under respektive bygge anpassat till speciella förhållanden, exempelvis togs SN-bulten fram under bygget av Stornorrfors kraftverk. Samtidigt med kraftverksbyggena pågick en intensiv forskningsverksamhet under 1950-talet vid Fortifikationens Befästringsbyrå. Troligen har även det bidragit till att nya rön avseende använda bergguttags- och förstärkningsmetoder kommit till användande.

Tidigt har även Bergmästeriet och Yrkesinspektionen haft en roll att spela avseende bergarbetenas utförande. För till exempel Vattenfall fanns anvisningar sammanställda avseende utförande för sprutbetong och bergbultar, så kallade BT - anvisningar.

Utförande och underhåll av berganläggningar har över tid påverkats av för tiden rådande lagar, regler och normer. Ett gemensamt regelverk för bergkonstruktioner finns i dagsläget inte, utan respektive bransch har utvecklat egna regelverk och branschpraxis utöver de grundläggande lagkraven.

Mattsson & Karlberg (2020) har i en tidigare studie undersökt vilka kravställningar och regelverk som tillämpas och tillämpats vid byggnation av berganläggningar för vattenkraft. Studien innehåller bland annat inventerat underlag från fyra referensanläggningar. Anläggningarna är uppförda under 1960-, 1970-, 1980- samt under 2000-talet. Inventerat material utgörs, i den mån det varit tillgängligt, relationshandlingar, tekniska beskrivningar och ritningar.

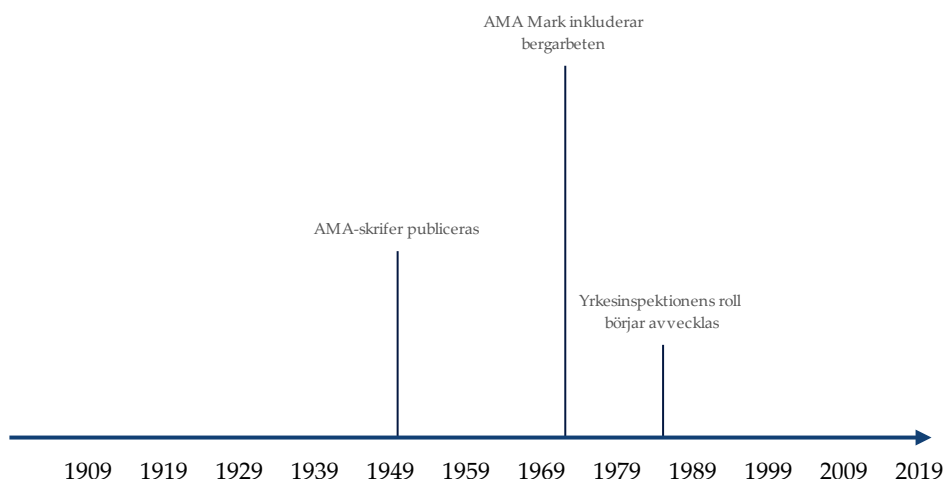
Studien av Mattsson och Karlberg (2020) påvisar att kravställning avseende bergarbeten i dokument från 1960- och 1970-talet generellt liknade formuleringarna i nuvarande AMA, men var mindre specifika och svårare att mäta. En av slutsatserna författarna drar är att förtroendet för entreprenörerna verkar ha varit större under denna tidsperiod jämfört med idag. De menar även att en konsekvens av detta arbetssätt var att högre krav ställdes på byggherren på plats.

I genomgången dokument avseende anläggning från 1980-talet hänvisas till AMAs, för tiden relativt nyskrivna, kapitel för bergarbeten (Mattsson & Karlberg, 2020). Kraven blir i och med detta mer specifika och mätbara. På samma sätt som för tidiga omnämnda anläggningar framgår dock att många beslut avseende utförande, så som förstärkning, fortfarande läggs på entreprenör och byggherre/beställare på plats.

Avseende beslut på plats bör det dock nämnas att många av vattenkraftanläggningarna uppförts i egen regi, varför slutsatsen att förtroendet för entreprenörerna varit större bakåt i tiden delvis kan ifrågasättas.

I det senaste materialet, gällande anläggning uppförd under 2000-tal, framstår det som om kravställningen från beställarsidan blivit än mer omfattande, detaljerad och mätbar (Mattson & Karlberg, 2020). Under denna period kan AMA betraktas som branschpraxis och författarna menar att mycket av de beslut som tidigare lagts

på entreprenör och byggherre på plats, i stället avhandlas genom dessa anvisningar. Det understryks dock att det fortfarande saknas fastställt regelverk avseende dimensionering av bergkonstruktioner. Handlingarna påvisar i stället att man navigerat mellan olika regelverk (e.g. IEG 5:210 och TRVK Tunnel 11), och att arbetet sedan anpassats efter rådande förhållanden.



Figur 8. Huvudsakliga utvecklingssteg avseende praxis och regelverk.

4 Drift- och underhåll i berganläggningar för vattenkraft

Vattenkraftens berganläggningar har uppförts i olika tidsepoker, med olika metoder och i varierande geologiska förhållanden. Driften och underhållsbehovet av berganläggningar beror dels på hur konstruktionsmetod, bergmassans egenskaper och val av förstärkningsåtgärder, dels de degraderingsprocesser som påverkar anläggningen över tid. Exempelvis kan en anläggnings underhållsbehov avseende skrotnings påverkas av den vid konstruktionstillfället rådande bergguttagsmetoden (Alvedahl, Benedik & Öhman, 1985). Försiktig sprängning (slätsprängning) reducerar sprängskador i bakomliggande bergmassa och kan därmed även reducera behovet av framtida skrotnings.

Drift och underhåll av vattenkraftens berganläggningar utförs primärt för att säkra driften, skydda värdefull och känslig utrustning och för att ombesörja personalens säkerhet vid arbete i anläggningen. Det finns i dagsläget inga generella riktlinjer avseende underhåll av berganläggningar inom vattenkraften, utan detta styrs generellt av respektive anläggningsägares krav på egenkontroll.

Drift- och underhållsarbete i berganläggningar omfattar inspektion av bergmassan, inklädnader och befintliga förstärkningsåtgärder (okulär besiktning samt bomknackning) samt kontinuerligt underhåll i form av skrotningsarbeten och kompletterande dränerings- och förstärkningsåtgärder.

Enligt Alvedahl, Benedik & Öhman (1985) kan bristande underhåll härledas till bristande kunskaper och bristande dokumentation avseende anläggningens uppförande och skick, i kombination med bristande kunskap avseende underhållspåverkande faktorer. I studien, utförd på mitten av 1980-talet, visade sig 40 % av anläggningarna tillhörande tillfrågade anläggningsägare saknade underhållsrutiner.

År 2006 utarbetades en rapport av Elforsk, vilken avsåg att ta fram riktlinjer för hur besiktning av vattenkraftens berganläggningar skulle utföras samt följas upp. Riktlinjerna innehåller bland annat rekommendationer avseende hur områden bör prioriteras beroende på användningsområde, miljöfaktorer, risk för personskada samt sannolikhet och konsekvens av fel/haveri (Söder, 2006). Det är svårt att avgöra huruvida dessa riktlinjer har implementerats och följs. Så sent som år 2020 publicerades en rapport som efterfrågar en samlad beskrivning avseende bergunderhåll och inspektioner i vattenkraftens anläggningar (Arvidsson & Engvall, 2020), vilket indikerar att behovet för en gemensam anvisning/beskrivning kvarstår.

5 Degraderingsprocesser i berganläggningar för vattenkraft

Bergmassan och de förstärkningar som skapar stabilitet i berganläggningen påverkas över tid av en rad olika nedbrytande processer.

Enligt Alvedahl, Benedik & Öhman (1985) kan de nedbrytande faktorerna i en berganläggning klassificeras som aktiva eller som passiva. De aktiva faktorerna kan härledas till naturliga eller externa, återkommande nedbrytningsprocesser, exempelvis vatteninläckage, frostsprängning, erosion, vittring, korrosion, utfällning samt belastningssituation. De passiva faktorerna kan härledas till brister vid anläggningens uppförande, exempelvis bristfälliga metodval avseende loss hållning, förstärkning och tätning eller bristfälliga materialegenskaper för bergmassa eller konstruktionsmaterial.

Den dominerande aktiva faktorn är vatteninläckage. Bergmassan eroderar genom urspolning av sprickfyllnader som kan resultera i instabilitet kring bergblock- och kilar. Frilagda bergytor exponeras efter utsprängning och kan påskynda vittringsprocesser. Dessa processer kan orsaka omvandling av mineral, vilket kan medföra minskad hållfasthet samt ökad påkänning på utförda förstärkningar. I vattnet förekommande kemiska substanser och pH-värde kan verka urlakande av cement och korrosivt på armering och bultar. I utemiljö, exempelvis förskärningar och tunnelpåslag bidrar temperaturförändringar i kombination med vatten till ökad nedbrytningsprocess i form av frostsprängning.

Spänningarna i bergmassan förändras efter utsprängning och omlagras och stabiliseras efter viss tid. Förändringar i belastningssituation eller geometrier kan dock ändras under anläggningens drifttid och öka påkänningarna på bergmassan och dess förstärkningar.

Passiva faktorer för nedbrytning hänförs till byggandet av berganläggningen. Skador från oförsiktig sprängning kan skapa en onormalt stor skadezon med utbildning av sprickor som skadar tidigare utförd injektering och ökar vattenströmningen i allmänhet, vilket bidrar till ökat inläckage och stabilitetsproblem på sikt. Brister i metod och materialval vid montering av förstärkningar under anläggningsskedet kan utgöra problem och öka behovet av underhållsåtgärder i driftskedet.

Bergmassans geologiska sammansättning, struktur och bergkvalitet utgör grunden för byggnadsmaterialet och påverkar degraderingssituationen och omfattning av förstärkningar och därmed omfattning av framtida underhållsåtgärder.

6 Urval av referensanläggningar

Baserat på de framsteg som gjorts avseende bergguttag, bergförstärkning och för tiden rådande tankar om konstruktionsteknik och underhållsarbete, under 1900-talet och framåt har en indelning utförts i fyra tidsperioder. Urval för indelningen baseras på följande kategorier, tidigare presenterade i kapitel 3:

- borr- och sprängteknik
- bergförstärkningsmetoder
- klassificeringssystem av bergmassan
- regelverk.

Baserat erhållna tidslinjer har fyra tidsperioder och brytpunkter identifierats:

Tidsperiod 1: Mellan 1900 och 1945. Denna tid karakteriseras av begränsad mekanisering. Borrmaskiner finns på marknaden men begränsningar i borrarstålets hållfasthet gör att framdriften är begränsad. De klena borrhålen gör att sprängskadezonen fortfarande är relativt begränsad, till trots för de högbrisanta sprängämnen som används. Denna tidsperiod karakteriseras av även ett lågt användande av bergbult, vilket också kan härledas till begränsningar i borrhållstekniken. Under denna tidsperiod används i stället ofta understödjande konstruktioner vid behov.

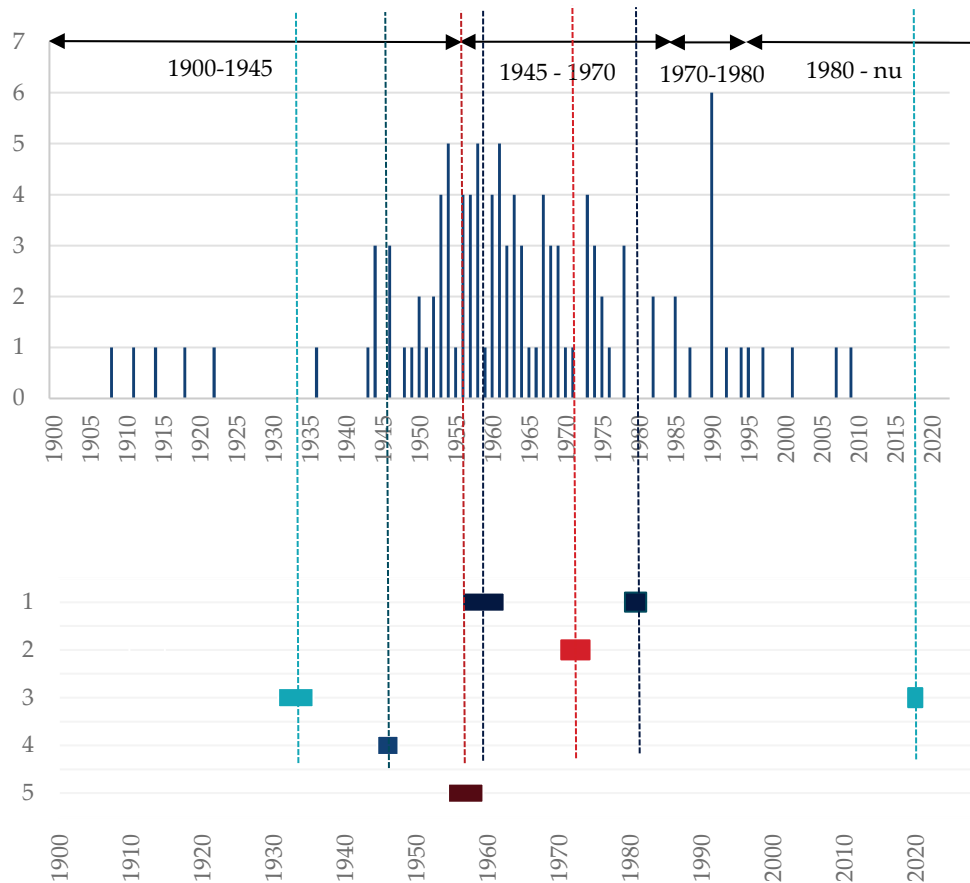
Tidsperiod 2: Mellan 1945 och 1970. Denna tidsperiod karakteriseras av nya innovationer avseende bergguttag & förstärkningsmetodik. I och med hårdmetallen och de lättare knämatade maskinerna blir framdriften större och det blir även mer ekonomiskt försvarbart att installera bergbultar i stället för att använda sig av understödjande konstruktioner. Ett flertal nya bulttyper kommer ut på marknaden. I och med den ökade borrhållskapaciteten blir även borrhålen grövre vilket innebär att risken för sprängskador ökar för bakomliggande bergmassa. För att reducera sprängskadezonen utvecklas metoder för slätsprängning. Regelverk/kravställning enligt AMA tillämpas i viss utsträckning.

Tidsperiod 3: Mellan 1970 och 1980. Under denna tidsperiod utvecklas sprutbetong med fiberarmering och denna börjar användas i allt högre utsträckning, men har ännu inte slagit igenom fullt ut. Under denna tidsperiod kommer även ett flertal system för klassificering av bergmassan ut, som ett sätt att bedöma bergmassans kvalitet och som ett sätt att bestämma typförstärkning. Bergguttag genom sprängning blir allt säkrare, bland annat till följd till VA-sprängkapseln & NONEL-systemet som nu finns på marknaden.

Tidsperiod 4: Mellan 1980 och 2020. Sprutbetong med fiberarmering nu vanligt förekommande. Kravställning blir alltmer specifik och typförstärkning används i allt högre utsträckning. Tekniker avseende bergguttag blir generellt alltmer automatiserad och precisionen ökar.

Fem referensanläggningar valts ut med avsikt att täcka in de olika tidsperioderna. Anläggningarna har anonymiserats och benämns anläggning 1 t.o.m. anläggning 5, se Figur 9. Anläggningarna valdes till viss del även på grund av de geologiska

förhållandena som råder på respektive plats. Det bör dock nämnas att geologin har givits en något underordnad roll.



Figur 9. Övre figur visar antalet byggda undermarksanläggningar för vattenkraft per år och indelning i tidsperioder. Den undre figuren redovisar byggnadsår för de stationer som besökts.

7 Resultat från platsbesök

Baserat på utförda platsbesök har en sammanställning av förekommande bergförstärkningar i respektive anläggning utarbetats. Sammanställningen ger en översiktlig bild av förekommande bergförstärkning i anläggningarna. Till följd av uppdragets omfattning samt begränsad tillgång till vissa utrymmen har det inte funnits utrymme att uttrycka mängden bergförstärkning i exakta siffror. Resultatet baseras således på avvägningar och bedömningar.

I tillägg har en översiktlig bedömning av bultavstånd samt eventuell sprutbetong utförts. Denna har sedan jämförts med vilken förstärkningsmängd som skulle erhållas vid dimensionering av typförstärkning enligt Q-systemet. Bedömningen är översiktlig och tar exempelvis inte hänsyn till bergspänningsförhållanden. Till trots för att bedömningen är relativt subjektiv kan sammanställningen ge en bild av hur förstärkningen upplevs i förhållande till dagens branschpraxis.

7.1 FÖREKOMMANDE BERGFÖRSTÄRKNING & PRESTANDA

Förekommande förstärkning som identifierats under utförda platsbesök redovisas för respektive anläggning i Tabell 1, Tabell 2, Tabell 3, Tabell 4 och Tabell 5.

Illustrerande foton av förekommande förstärkning för respektive anläggning redovisas i Bilaga A.

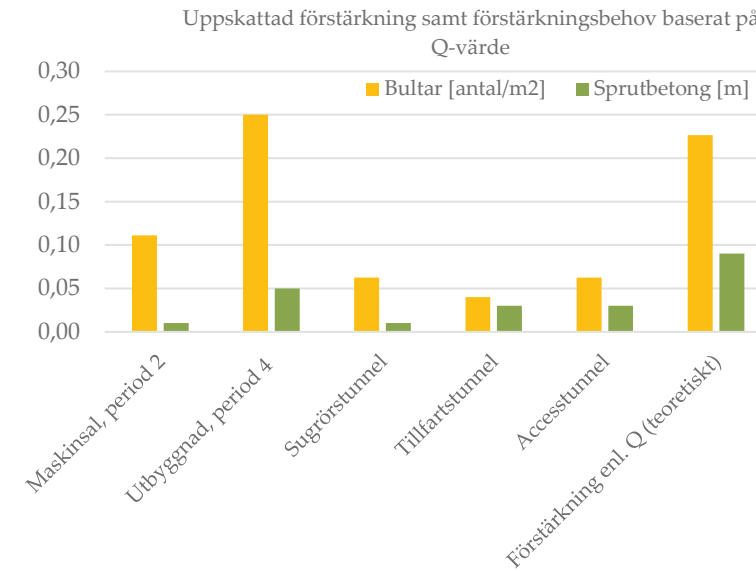
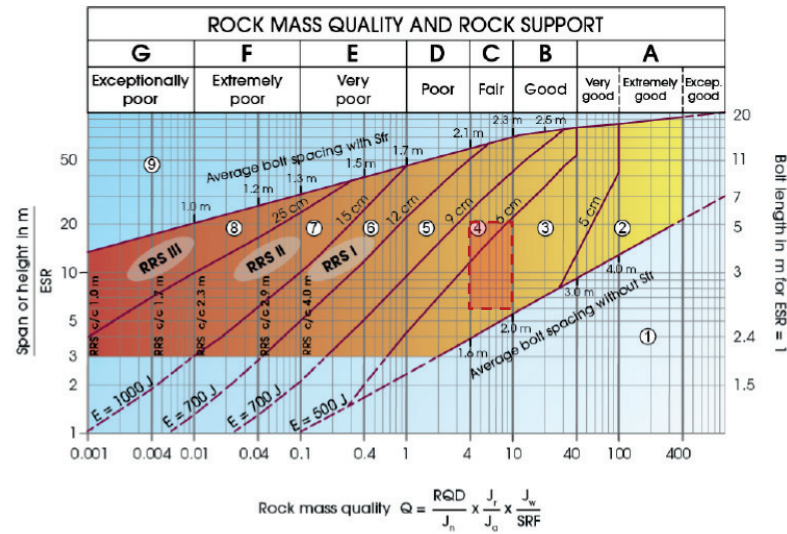
Tabell 1. Förekommande förstärkning som identifierats under platsbesök av anläggning 1.

Anläggning 1	Bergbult	Bultmetod	Sprutbetong	Förstärkning, övrigt
Maskinsal, tak	-	-	-	Innertak i betong, ej motgjutet
Maskinsal, vägg	Perfo- & SN-bult, samt ingjutna kamstål, enstaka rundjärn	Selektiv	Delvis insprutad med sprutbetong, ej fiberarmerad	Spännstag samt betongkontrefor
Utbyggnad för extra aggregat	SN-bult	Systematisk	Sprutbetong, fiberarmerad	
Sugrörstunnel	SN-bult, kamstål	Selektiv Systematisk v. vägg	Sprutbetong, fiberarmerad & ej fiberarmerad	Betongkontrefor i anfang
Tillfartstunnel	Perfo- & SN-bult, ingjutna, kamstål	Selektiv	Delvis insprutad med sprutbetong, fiberarmerad & ej fiberarmerad	Betongbågar
Accesstunnel	SN-bult, kompl. SN-bult m. bricka & tag,	Selektiv	Delvis insprutad med sprutbetong, fiberarmerad & ej fiberarmerad	Betongbågar

Anläggning 1 (1945–1970 samt 1980-nu)

Underjordsdelen av stationen är uppförd i en medelkornig rödaktig granit. Bergkvalitet enligt Q-metoden bedöms vara acceptabel till god, undantaget accesstunneln som belägen i mer skivigt och blockigt berg.

Anläggning 1



Anläggning 1 (1945–1970 samt 1980-nu)

Bedömt generellt Q-värde: 4–10

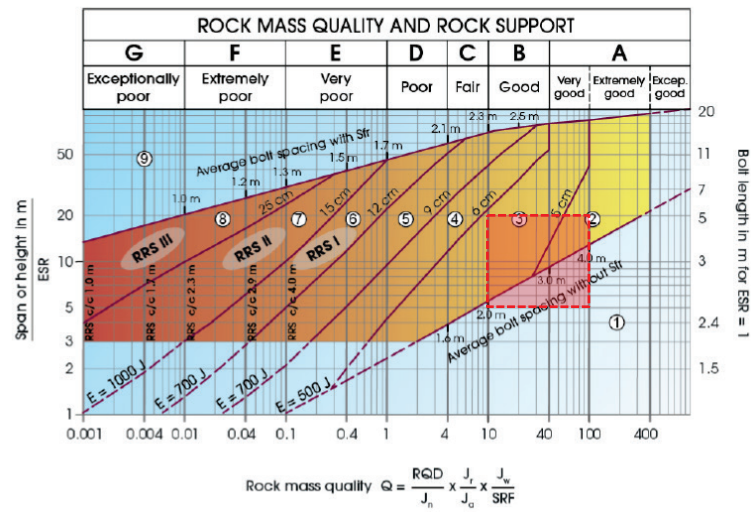
Tabell 2. Förekommande förstärkning som identifierats under platsbesök av anläggning 2.

Anläggning 2	Bergbult	Bultmetod	Sprutbetong	Förstärkning, övrigt
Maskinsal, tak				Betongtak, motgjutet?
Maskinsal, vägg	SN-bult, Perfobult, enstaka expanderbult m. trekantsbricka (äldre samt kompl.)	Selektiv Systematisk kortsida	Delvis insprutad, fiberarmerad samt armerad m. insprutat nät	Nät
Sugrörstunnel	SN-bult, Perfobult, expanderbult m. trekantsbricka	Selektiv?	Delvis insprutad, fiberarmerad samt oarmerad	Betongkontrefor samt enstaka fjällband
Tillfartstunnel	SN-bult, Perfobult, kompl. kamjärn m. tag (med & utan bricka), expanderbult m. trekantsbricka	Selektiv	Delvis insprutad, fiberarmerad samt oarmerad	

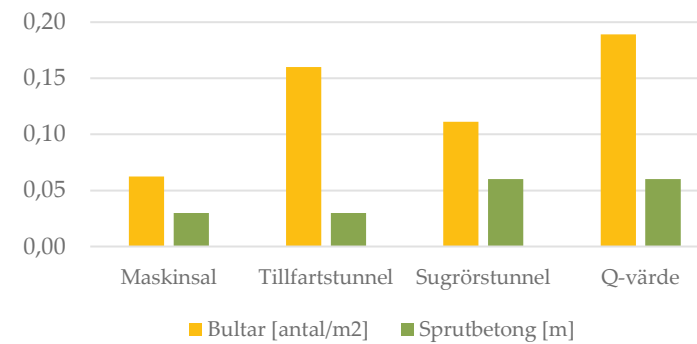
Anläggning 2 (1970–1980 samt (1980 – nu).

Underjordsdelen av stationen är uppförd i grå till röd medelkornig dacit/ryolit. Bergkvalitet enligt Q-metoden bedöms vara god till mycket god.

Anläggning 2



Uppskattad förstärkning samt förstärkningsbehov baserat på Q-värde



Anläggning 2 (1970–1980 samt (1980 – nu).

Bedömt generellt Q-värde: >10

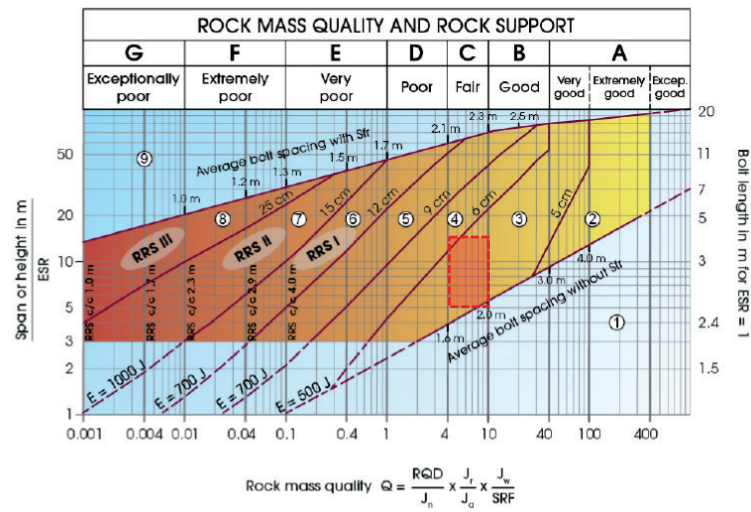
Tabell 3 .Förekommande förstärkning som identifierats under platsbesök av anläggning 3.

Anläggning 3	Bergbult	Bultmetod	Sprutbetong	Förstärkning, övrigt
Maskinsal, tak 1900–1945	Få synliga bultar	Selektiv	-	Betongbågar. Innertak av betong.
Maskinsal, vägg 1900–1945	Ingjutna rundjärn (ev. formstag)	Selektiv	-	Enstaka betongkontrefor
Sugrörsgalleri, 1980-nu	Ingjutna kamjärn, med & utan bricka	systematisk	Fiberarmerad samt oarmerad	
Tillfartstunnel, 1980-nu	Ingjutna kamjärn, med & utan bricka	Systematisk	Fiberarmerad samt oarmerad	

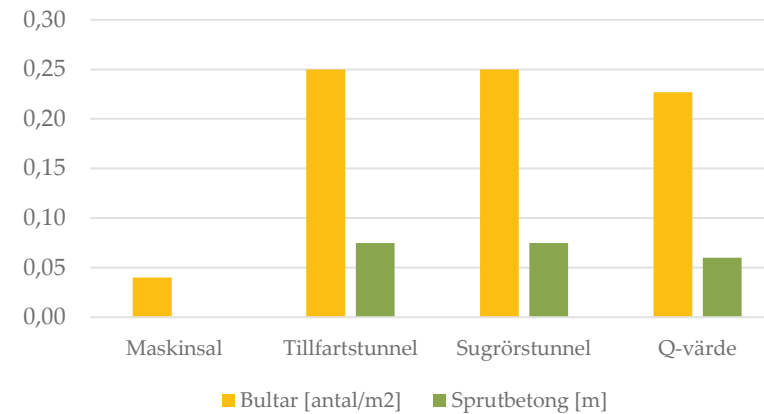
Anläggning 3 (1900–1945 samt 1980 – nu).

Underjordsdelen i stationen är uppförd i en röd, medel- till grovkornig, granitoid bergmassa, med diabasgångar. Bergkvalitet enligt Q-metoden bedöms generellt vara acceptabel till god.

Anläggning 3



Uppskattad förstärkning förstärknings baserat på Q-värde



Anläggning 3 (1900–1945 samt 1980 – nu).

Bedömt generellt Q-värde: 4–10

Tabell 4. Förekommande förstärkning som identifierats under platsbesök av anläggning 4.

Anläggning 4	Bergbult	Bultmetod	Sprutbetong	Förstärkning, övrigt
Maskinsal, tak				Betongtak
Maskinsal, vägg	Enstaka Perfobult, ingjutna kamstål samt ingjutna rundstål, kompl. ingjutna kamjärn märkta (år 1984, år 1997)	Selektiv	Delvis insprutad, fiberarmerad samt oarmerad sprutbetong	Nät (Gunnebo), enstaka betongkontreformer
Sugrörstunnel	N/A	N/A	N/A	N/A
Tillfartstunnel	N/A	N/A	N/A	N/A
Ventilationstunnel	Ingjutna kamjärn	Selektiv		Enstaka nät

Anläggning 4 (1945 - 1970)

Underjordsanläggningen är uppförd i en glimmerförande paragnejs med gnejsig struktur. Bergkvalitet enligt Q-metoden bedöms generellt vara dålig till acceptabel.

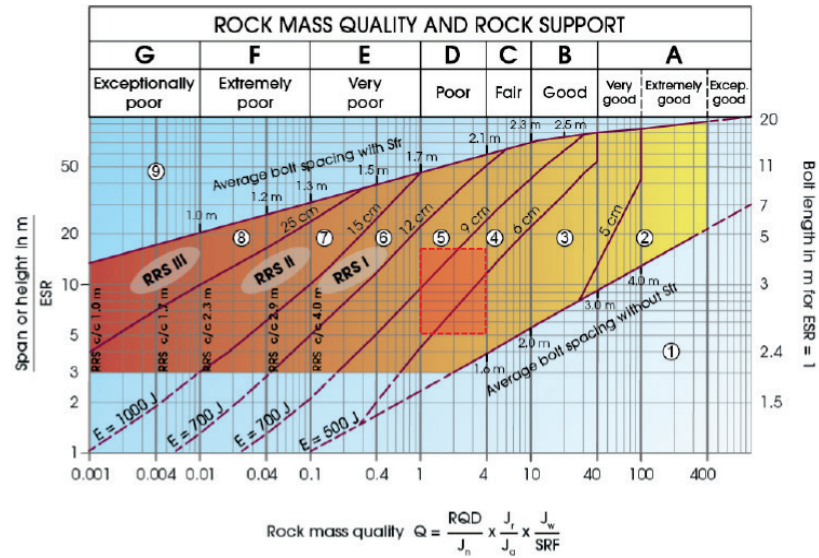
Övrigt:

Maskinsal konstruerad i öppet schakt, betongtak.

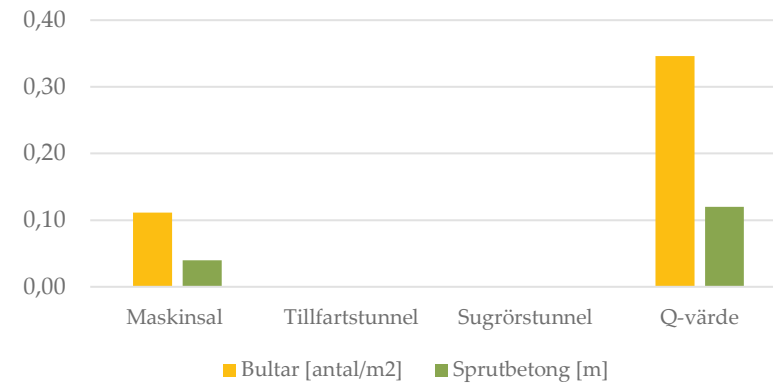
Väggar i tillfartstunnel är bakom plåt, ej tillgängliga. Sugrörstunneln är avspärrad, ej tillgänglig.

Kompletterande bult samt nät har utförts i angränsande utrymmen till maskinrum år 1985 och år 2014.

Anläggning 4



Uppskattad förstärkning samt förstärkningsbehov baserat på Q-värde



Anläggning 4 (1945 - 1970)

Bedömt generellt Q-värde: 1-4

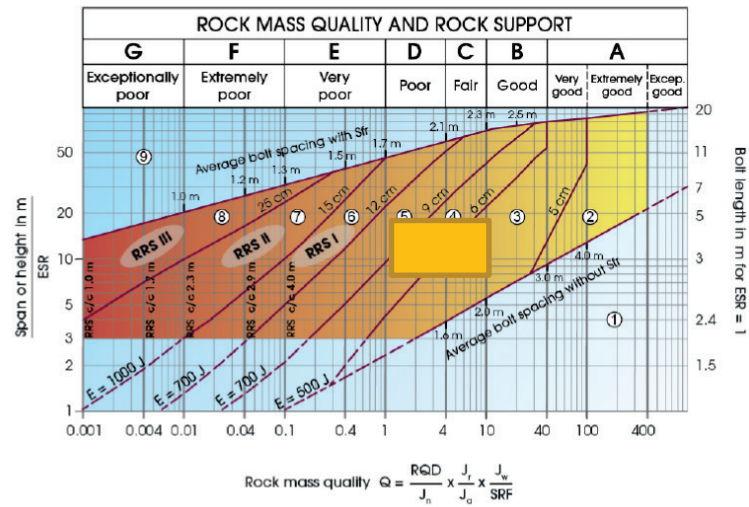
Tabell 5. Förekommande förstärkning som identifierats under platsbesök av anläggning 5.

Anläggning 5	Bergbult	Bultmetod	Sprutbetong	Förstärkning, övrigt
Maskinsal, tak	Ströbult	Expander	-	Innertak i eternit
Maskinsal, vägg	Ströbult	Expander och ingjutna (nya)	-	Betongväggar lokalt
Sugrörstunnel	Ströbult i block	Expander		
Tillfartstunnel	Ströbult lokalt, bakom sprutbetong	Expander och ingjutna (nya)	Sprutad i helhet (1988)	Lokalt droppsäkring
Transformator sal	Systembultat SN-bult		-	Nät och fjällband

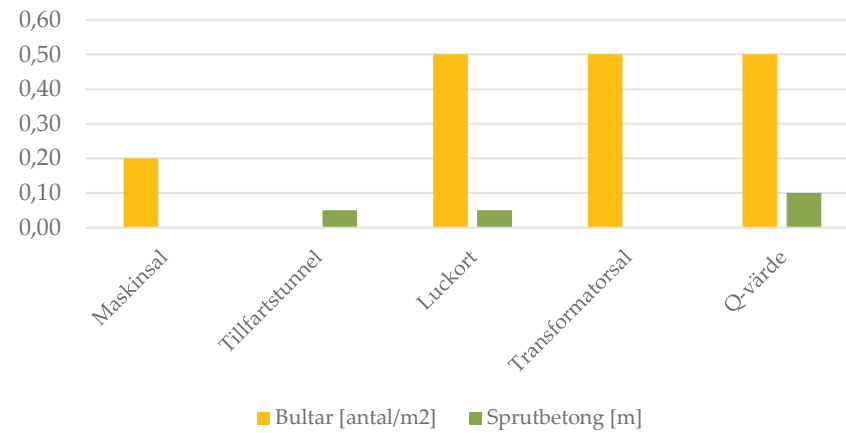
Anläggning 5 (1955-1960, -2022)

Anläggning uppförd i Porfyrisk bergart. Bergkvalitet enligt Q-metoden bedöms generellt vara acceptabel till god, lokalt dålig.

Anläggning 5



Uppskattad förstärkning samt förstärkningsbehov baserat på Q-värde



Anläggning 5

Bedömt generellt Q-värde: 4–10, lokalt ned till 1.

7.2 FÖREKOMMANDE BERGUNDERHÅLLSÅTGÄRDER

Ett frågeformulär avseende erfarenheter av och utförande av underhållsåtgärder skickades ut till Vattenfall. Då anläggningarna anonymiserats presenteras här en sammanställning av inkommet svar. Utskickad enkät redovisas i bilaga 2.

Besiktning av berganläggningar utförs internt av egen organisation eller av extern konsult. Besiktning omfattar bland annat bergmassan, bultar, sprutbetong, betongkonstruktioner, nät och dräneringslösningar. Behov av besiktning bestäms internt av gruppen i samråd med teknikansvarig. Normalt utförs inte besiktning annat än vid utfall eller liknande, utöver de inspektioner som utförs vid de återkommande skyddsskrotningarna.

Underhåll i form av skyddsskrotningar utförs med 5-årsintervall. Alla utrymmen i anläggningen skrotas. Utrymmen som är kritiska för driften eller som kan komma att påverka personsäkerheten i anläggningen prioriteras. I samband med skyddsskrotningen utförs även andra underhållsåtgärder, så som bergförstärkningsåtgärder och keminjektering. Beslut om underhåll/åtgärder tas av utförandeorganisationen i samråd med internt, tekniskt ansvarig för berg/betong. Underhåll utförs av egen organisation, men upphandlas vid behov, exempelvis vid sprutbetongarbeten. Underhållsåtgärder så som skrotad bergvolym anges i protokoll samt i rapportformat.

Dokumentation av befintlig bergbult i anläggningen förekommer till viss del och ålder på befintliga bergbultar kan därför ofta spåras. Erfarenheten är att expanderbult, driftsbult, är den sämsta typen av bult inom anläggningarna. Anläggningsägaren uppskattar att ca 50% av bultarna i anläggningarna utgörs av bergbult installerad före 1980. Nya bultar märks numera med bricktag som anger installations år, längd, diameter och metod.

Gällande sprutbetong är befintlig dokumentation ofta bristfällig. Sprutbetongens skick kontrolleras genom bomknackning. Erfarenheten från anläggningsägare är att den oarmerade sprutbetongen upplevs som sämre över tid.

8 Diskussion resultat

Besökta anläggningar har uppförts under olika perioder, från tidigt 1900-tal fram till idag. Kunskap gällande för tiden rådande teknik och branschpraxis kan ge en fingervisning avseende vilken typ av bergförstärkning som kan återfinnas i en anläggning. Exempelvis kan man förvänta sig att anläggningar uppförda efter 1940-talet innehåller en större andel bergbult jämfört med tidigare anläggningar. Anläggning 3 illustrerar detta väl, då den del av anläggningen som är uppförd under period 1 (år 1900–1945) innehåller relativt få bergbult, medan den del av anläggningen som byggts under period 4 (år 1980–2020) är utförd med systembultning. I samtliga anläggningar har dock kompletterande förstärkningsåtgärder utförts över tid. Sammantaget är det därför svårt att på förhand avgöra vilken typ av bergförstärkning som kan komma att påträffas i en anläggning.

Typ av förstärkning

Bergförstärkningen i undersökta anläggningar utgörs generellt av bergbult, sprutbetong, betongkontreformer och betongvalv. För att fånga upp mindre blockutfall vid icke inklädda/insprutade ytor används nät, främst i anslutning till maskinsal och transformatorutrymmen, men även i anslutning till tillfartstunnel och schakt.

Under utförda platsbesök har bergbult i form av kilbult, expanderbult, samt cementingjutna bultar med eller utan bricka observerats. I anläggning 1 återfinns ett antal spännstag, installerade för att motverka deformationer av bergmassan. Spännstagen är kontrollerbara och ingår i ett kontrollprogram.

Det har varit svårt att härleda val av bult till specifik typ av skada eller bergkvalitet. Bedömningen är att man använt den för tiden vedertagna förstärkningsmetoden.

Generellt har bergförstärkning utförts med selektiv bultning. Systematisk bultning har observerats, lokalt, i några av anläggningarna. Den systematiska bultningen kan härledas till kompletterande åtgärder eller till anläggningsdelar uppförda under senare tid. Det bör dock nämnas att många av ytorna i anläggningarna varit svårtillgängliga för inspektion, bland annat bergytor bakom innerväggar, betongtak/väggar och bakom betongsprutade ytor. Det kan därför inte uteslutas att systematisk bergbultning använts i något högre utsträckning än vad som observerats.

Sprutbetong förekommer i samtliga besökta anläggningar, både oarmerad och fiberarmerad. Innan fiberarmerad sprutbetong kom ut på marknaden användes sprutbetongen dels som sprutputs för ytförsegling, dels som ytförstärkning. Senare, i samband med stålfiberarmerad sprutbetong har den applicerats mer lokalt som förbättringsåtgärd, vilket ges exempel på i några av de besökta anläggningarna. I nya konstruktionsdelar används sprutbetong som en del av den systematiska bergförstärkningen, bland annat i anläggning 3 (tidsperiod 1980-nu).

Sammanfattning bergförstärkningens prestanda

Anläggningarna som besökts följer i stort tidigare beskriven förstärkningsfilosofi, se kapitel 2.2, med högre grad av förstärkningar och åtgärder i områden som maskinsalar (d.v.s. innertak i betong) och transformatorutrymmen och lägre grad av förstärkningar och åtgärder i utrymmen som är mindre kritiska för driften samt mer tillgängliga. Detta oavsett om anläggningen uppförts på 30-talet eller senare.

I samtliga anläggningar har kompletterande förstärkningsåtgärder utförts över tid, sannolikt i samband med de återkommande inspektionerna. De kompletterande åtgärderna har ibland installerats årtionden efter att anläggningen tagits i drift.

Uppskattad andel ursprunglig förstärkning i relation till kompletterande förstärkning i respektive anläggning redovisas i Tabell 6. Det kan konstateras att en relativt stor andel av bergförstärkning i anläggningen upplevs utgöras av kompletterande förstärkning. Detta antagande verifieras till viss del av enkätsvar från anläggningsägare, där kompletterande bergbult anges utgöra ca 50 % av bultarna i anläggningarna.

Tabell 6. Andel i utrymmen med ursprunglig förstärkning och kompletterande förstärkning.

Anläggning	Upplevd andel ursprunglig förstärkning %	Upplevd andel kompletterande förstärkning %
1	30	70
2	100 (betongtak)	0
3	40	60
4	70	30
5	20	80

Många utrymmen har äldre förstärkning utan tilläggsförstärkningar i andra utrymmen finns ny förstärkning, ofta installerad vid ett flertal tillfällen. Ålder på de äldre förstärkningar varierar mellan 50–90 år. I de fall det är konstruerat betongtak är detta ursprungligt utan åtgärder.

Bergbultarnas skick har varit svårt att avgöra. I många fall har bultarna mycket korroderade bultändar, ibland så pass korroderade att de i vissa fall har varit svårt att avgöra vilken typ av bult det är som installerats. Kompletterande förstärkning har i vissa fall ersatt tidigare installerad bult, dock långt från samtliga fall. Tidigare erfarenhet av cementingjuten bult gör att man kan anta att kvaliteten på själva stålet är "oförändrad" så länge ingjutningen är väl utförd.

Omfattning av bergförstärkning

En reaktion vid platsbesöken var att de flesta anläggningar uppfattades ha en relativt sparsam förstärkningsnivå. Denna slutsats baseras på en uppfattning av bergutrymmena mot dagens praxis, och att de uppvisar en förhållandevis låg förstärkningsnivå jämfört med exempelvis NGI:s (Q-index) som i stort sett numera

betraktas som branschpraxis vid utformning av typförstärkning. Kompletterande förstärkning har som sagt ofta installerats i delar av anläggningarna, men vissa delar av anläggningarna är fortfarande relativt sparsamt förstärka.

En grov uppskattning är att av befintlig förstärkning i anläggningarna utgör ca 20–50% av vad typförstärkning med Q-systemet skulle resultera i.

Underhåll

I berganläggningarna har bedrivits och bedrivs fortlöpande bergunderhållsåtgärder i form av besiktningar och systematiskt återkommande skrotningsgenomgångar av anläggningarna. Underhållet omfattar bland annat skrotning och tilläggsförstärkning i form av sprutbetong, bultning samt vattensäkringsåtgärder.

Tidsintervallen varierar något mellan anläggningarna beroende av ägare och typ av anläggning (bergart och storlek av anläggningen). För Vattenfalls anläggningar är tidsintervallet cirka 5 år.

Vid platsbesöken kunde inte någon tydlig skillnad ses mellan de kraftstationer som byggts inom olika tidsepoker avseende den slutliga bergkonturen av bergytter och kraven på bergskrotning.

Ett systematiskt återkommande bergunderhåll i ett i stationsunikt tidsintervall tycks vara påkallat för anläggningarna. Kompletterande förstärkningsåtgärder bedöms stå för upp till cirka 50% mängdmässigt i förhållande till ursprunglig förstärkning. Detta beroende av faktorer som ex. frysning/tining, vatteninläckage, vibrationer, uttorkning och värme (i anslutning till maskinsal), vilket kan leda till lastomfördelningar i bergmassan, men kanske främst ytpåverkan som beroende av geologi uppvisar olika känslighet.

9 Slutsats och rekommendationer för anläggningsägare

Baserat på indelningen i epoker med olika förstärknings- och uttagsmetoder samt platsbesök i de fem stationerna är slutsatsen att förstärkningsnivån vid byggnation är relativt låg (i förhållande till dagens praxis) och att tilläggsförstärkningar utförts i samtliga stationer vid ett flertal tillfällen.

Det förefaller som om det är fullt möjligt att ha en ganska låg basförstärkning i stationerna, dock förutsatt kontinuerliga besiktningar med behovsstyrt systematiskt underhåll i form av skrotning och tilläggsförstärkning över tid.

I samtliga stationer har dock en omfattande förstärkning eller någon form av skyddstak monterats i själva maskinsalen och i transformatorutrymmen. Den förstärkningen är kraftigare än i övriga utrymmen.

Trots de olika tidsepokerna, med tillgång till spräng- och förstärkningsmetoder som förbättrats över tid, framstår de besöka stationerna som ganska likvärdiga förstärkningsmässigt. Moderna utbyggnader av stationerna använder mycket mer förstärkning än i de ursprungliga stationerna.

Utifrån besiktningar och dokumentation styrs behovet av systematiskt underhåll. Ett systematiskt underhåll möjliggör behovsanpassad bergförstärkning – mycket av den äldre förstärkningen är fortfarande i drift.

Vid ny- eller ombyggnation är det troligt att det går att bygga anläggningar med lägre förstärkningsnivåer avseende ett flertal utrymmen än dagens praxis med fiberförstärkt sprutbetong och systematisk bultning. Klassificering av utrymmen och förstärkningsnivå kan då utföras enligt den äldre metod, med indelning av utrymmen i tre olika klasser A-C, som Vattenfall tog fram på 60-talet. I förvaltning av vattenkraftens berganläggningar bör riktlinjer utarbetas som kan ge stöd till hur Energiföretagen ska bedriva och dokumentera bergunderhåll. Detta för att säkerställa att anläggningarna uppfyller en lägsta säkerhetsnivå avseende såväl driftsäkerhet som arbetsmiljö.

10 Referenslista

- Alvedahl, B., Benedik, R. & Öhman, I. (1985) *Underhåll av bergum och tunnlar*. (BeFo 80:1/85). BeFo.
<https://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/213/R80185.pdf>
- Arvidsson, A. & Engvall, P. (2020) *Krav vid drift av vattenkraftens berganläggningar: Genomgång av lagstadgade krav* (Rapport 2020:686). Energiforsk.
<https://energiforsk.se/media/28298/krav-vid-drift-av-vattenkraftens-berganlaggningar-energiforskrapport-2020-686.pdf>
- Atlas Copco (2022) Mining and rock excavation equipment.
<https://www.atlascopco.com/history/en/innovations/mr> (hämtad 2022-08-01)
- Barton, Nick & Lien, R. & Lunde, J. (1974) *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches. 6. 189-236.
- Bieniawski, Z.T. (1973) *Engineering classification of jointed rock masses*. Trans S. Afr.Inst. Civ. Engrs 15, 335-344
- Bieniawski, Z.T. (1989) *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.
- Bjurström, S. & Heimersson, M. (1979) *Bergbultning, Dimensionering, praxis och tillämpningar* (Rapport nr 8). Stockholm: BeFo.
- Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D. & Cording, E.J. (1967) *Design of surface and near surface construction in rock*. In Failure and breakage of rock, proc. 8th U.S. symp. rock mech., (ed. C. Fairhurst), 237-302. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.
- Edelbro, C. (2003) *Rock mass strength, A review*. Technical Report 2003:16, Department of Civil Engineering, Division of Rock Mechanics, Luleå Technical University.
- Grimstad, E., Kankes, K., Bhasin, R. & Magnussen, A. (2002) *Rock Mass Quality Q Used in designing Reinforced Ribs of Sprayed Concrete and Energy Absorption*. Proceedings Indian Rock Conference, INDROCK, New Delhi N28-29P th P November 2002.p.101-118
- Grimstad, E. & Barton, N. (1993) *Updating of the Q-System for NMT*. Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete, Fagernes, 22-26 October 1993, 46-66.
- Hamberg, U & Söder, P-E. (1996) *Ingjutna bultars beständighet, erfarenheter från Vattenfalls anläggningar inför Ringen projektet* (Bergmekanikdag 1996). BeFo
https://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/193/Bergmekanikdag_1996.pdf
- Hagerman, Y. (1955) *Säkerhet vid sprängningsarbete*. Teknisk tidskrift, Årgång 85. 101 – 106. <http://runeberg.org/tektid/1955/0121.html>
- Holmberg, R. (1994) *Från lunta till högprecisionssprängkapslar*. (Bergteknik BK-dagen 1994). Svenska bergteknikföreningen.

<https://www.svbergteknik.se/UserFiles/Archive/4389/9%20Fr%C3%A5n%20lunta%20till%20h%C3%B6gprecisionsspr%C3%A4ngkapslar.pdf>

Isaksson, Å. (1956) Oavsiktlig tändning av sprängkapslar. *Teknisk tidskrift, Årgång 86*. 798. <http://runeberg.org/tektid/1956/0818.html>

Janelid, I. (1964) *The Swedish Method - a Stage in the Development of Tunnelling and Mining*. Stockholm. Print. Atlas Copco Publication.

Kuhlin, Leif (2022) Vattenkraft.info – Info om svensk vattenkraft. <https://vattenkraft.info/?bannerdisp=0> (hämtad 2022-02-21)

Kullstedt, H. (1947) Sprängningsarbeten. I Strömberg, C. (Red) *Ingenjörshandboken, Materiallära, värme och sanitet, husbyggnad*. (ss. 1180 – 1202). Nordisk Rotogravyr. <http://runeberg.org/inghb/5/0635.html>

Langefors, U. (1949) Minskning av markskakningarna vid sprängning. *Teknisk Tidskrift, Årgång 79*. 141–147. <http://runeberg.org/tektid/1949/0153.html>

Langefors, U. (1958) Slätsprängning. *Teknisk tidskrift, Årgång 88*. 415 – 420 <http://runeberg.org/tektid/1958/0447.html>

Larsson, L-O. (1960) Sprängning med ammoniumnitrat. *Teknisk tidskrift, Årgång 90*. 1301 – 1306 <http://runeberg.org/tektid/1960/1327.html>

Larsson, B. & Nylund, T. (1996) *Tar emulsionssprängämnen död på ANFO?* (Bergteknik BK-dagen 1996). Svenska Bergteknikföreningen. <https://www.svbergteknik.se/UserFiles/Archive/4324/5%20Tar%20emulsionsspr%C3%A4ng%C3%A4mnena%20d%C3%B6d%20p%C3%A5%20anfo.pdf>

Lind, S. G. (1932) Om högprocentiga volframkarbidlegeringar och deras tekniska användning. *Teknisk Tidskrift Bergsvetenskap, 62:a årgången*. 9–14. <http://runeberg.org/tektid/1932b/0016.html>

Mattsson, H-Å. & Karlberg, T. (2020) *Tekniska krav vid dimensionering och utformning av berganläggningar: Vägval för vattenkraftbranschens framtida bergbyggande* (Rapport 2020:668). Energiforsk. <https://energiforsk.se/media/28078/tekniska-krav-vid-dimensionering-och-utformning-av-berganlaggningar-energiforskrapport-2020-668.pdf>

Martna, J. (1972) *Leriga zoner i Sveriges berggrund*. I Statens geotekniska institut (red.) *Lerzoner i Sveriges Berggrund*. Diskussionsmöte anordnat av IVA den 7 oktober 1970 (No. 49). (ss. 13–38). Statens Geotekniska Institut <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:1300039/FULLTEXT01.pdf>

Martna, J. & Knape, P. (2009) *Kapitel 16 – Geologi*. 60 års utveckling av sprängteknik. http://www.matpool.se/spr-utveckling/kap_16.html (hämtad 2022-08-01)

NGI (2022) *Using the Q-system: Rock mass classification and support design*, NGI, <https://www.ngi.no/eng/Services/Technical-expertise/Engineering-geology-and-rock-mechanics/Q-system>

Nord, G. (2004) *Kapitel 6 - Historik Bergborrning*. 60 års utveckling av Sprängteknik. http://www.matpool.se/spr-utveckling/kap_2.html (hämtad 2022-08-01)

Olofsson, S. O. (1999) *Kapitel 11 - Sprängämnen och tändmedel*, 50 år av utveckling. 60 års utveckling av Sprängteknik. http://www.matpool.se/spr-utveckling/kap_11.html (hämtad 2022-08-01)

Olofsson, Stig O. (1989) *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*. Apple

Patent & Registreringsverket (2021) *Alfred Nobel – Dynamiten*. PRV. <https://www.prv.se/sv/larare/uppfinnare-fran-sverige/alfred-nobel--dynamiten/> (hämtad 2022-08-01)

Persson, P-A. Holmberg, R. & Lee, J. (1996) *Rock blasting and explosives engineering*. CRC Press

Rabcewicz, L. (1955) Förstärkning av tunnlar med bergbult. *Teknisk tidskrift, Årgång 85*. 965 – 971. <http://runeberg.org/tektid/1955/0985.html>

Reinius, E. (1944) Erfarenheter av kamjärn. *Teknisk tidskrift, Årgång 74*. 897 – 901. <http://runeberg.org/tektid/1944/0913.html>

Sandström, Gösta E. (1963) *The History of Tunnelling: Underground Workings through the Ages*. Barrie and Rockliff

Sandström, H. (1999) *Kapitel 1 - Ingress, förord*. 60 års utveckling av Sprängteknik. http://www.matpool.se/spr-utveckling/kap_1.html (hämtad 2022-08-01)

Sandvik (2022) *Historia*. Sandvik Group. <https://www.home.sandvik/se/om-oss/vart-foretag/historia/> (Hämtad 2022-08-01)

Sjölander, A. (2020) *Structural behavior of shotcrete in hard rock tunnels* (Rapport 210). BeFo https://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/2567/BeFo_Report_210_web.pdf

Smedberg, M. (1955) Bergförankring. *Teknisk tidskrift, Årgång 85*. 825 – 831. <http://runeberg.org/tektid/1955/0845.html>

Söder, P-E (2006) *Besiktningsmanual för berganläggningar inom vattenkraft* (Rapport 06:84). Elforsk <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/19365/besiktningsmanual-for-berganlaggningar-inom-vattenkraft-elforskrapport-2006-84.pdf>

Svenska bergteknikföreningen (2020) *Sprängmedelsleveranser*. Svenska bergteknikföreningen. https://www.svbergteknik.se/branschinformation/sprangmedelsleveranser__958 (hämtad 2022-08-01)

Teknisk tidskrift (1955) En metod för fastsättning av bergbult. *Teknisk tidskrift, Årgång 85*. 800. <http://runeberg.org/tektid/1955/0820.html>

Widén, C-A & Haglund, W. (1945) Bergborrning med hårdmetallborrar. *Teknisk tidskrift, Årgång 75*. 533–535. <http://runeberg.org/tektid/1945/0545.html>

Bilaga A: Platsbesök

FOTON PLATSBESÖK – ANLÄGGNING 1



Figur A-1. Exempel sprutbetong maskinhall, galleri respektive turbinplan anläggning 1.



Figur A-2. Exempel ingjutna bultar maskinsal, galleri anläggning 1.



Figur A-3. Exempel korroderad bult respektive kompletterande bult med tag, infartstunnel anläggning 1.



Figur A-4. Exempel bult med bricka respektive urlakad sprutbetong, inspektionstunnel anläggning 1.

FOTON PLATSBESÖK – ANLÄGGNING 2



Figur A-5. Exempel på gynnsam bergkvalitet samt bult med bristfällig ingjutning, maskinsal, turbinplan.



Figur A-6. Exempel på Perfobult samt kompletterande bult med felvänd trekantsbricka som ersatt tidigare bult, maskinsal.



Figur A-7. T.v. Exempel på oförstärkt yta sugrörsgång. T.h. Exempel på yta förstärkt med fiberarmerad sprutbetong sugrörsgång.



Figur A-8. T.v. Exempel på kompletterande bult i tillfartstunnel. T.h. Exempel på äldre, korroderad bult i tillfartstunnel.

FOTON PLATSBESÖK – ANLÄGGNING 3



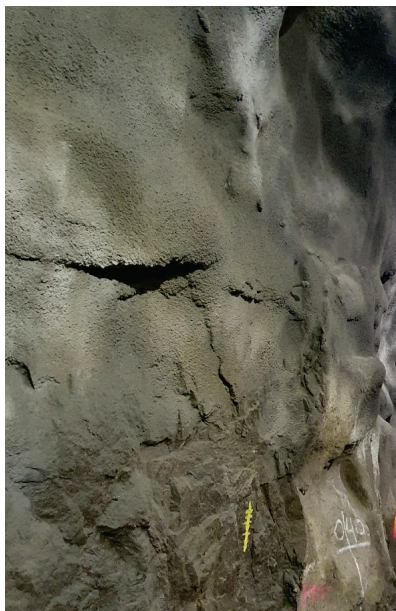
Figur A-9. Exempel bergkvalitet bakom innervägg, maskinsal.



Figur A-10. Exempel bergkvalitet samt bergförstärkning i mindre utrymme i anslutning till maskinsal. Bergyta insprutade med målad sprutbetong. Ingjuten bult med årtal 94.



Figur A-11. T.v. Exempel kompletterande förstärkning (gängstång?). T.h. Ny sprutbetong, ej fiberarmerad pga svårtillgängligt utrymme.



Figur A-12. Exempel utrymme konstruerat efter 1980 sprutbetong och systematisk bultning i tak och väggar

FOTON PLATSBESÖK – ANLÄGGNING 4



Figur A-13. T.v. Exempel på ingjutna bultar med korroderad bultände. Vägg i utrymme i anslutning till maskinsal.



Figur A-14. Exempel på kompletterande bult i utrymme i anslutning till maskinsal. Ingjutet kamjärn, tag märkt med årtal 1984 respektive 97.

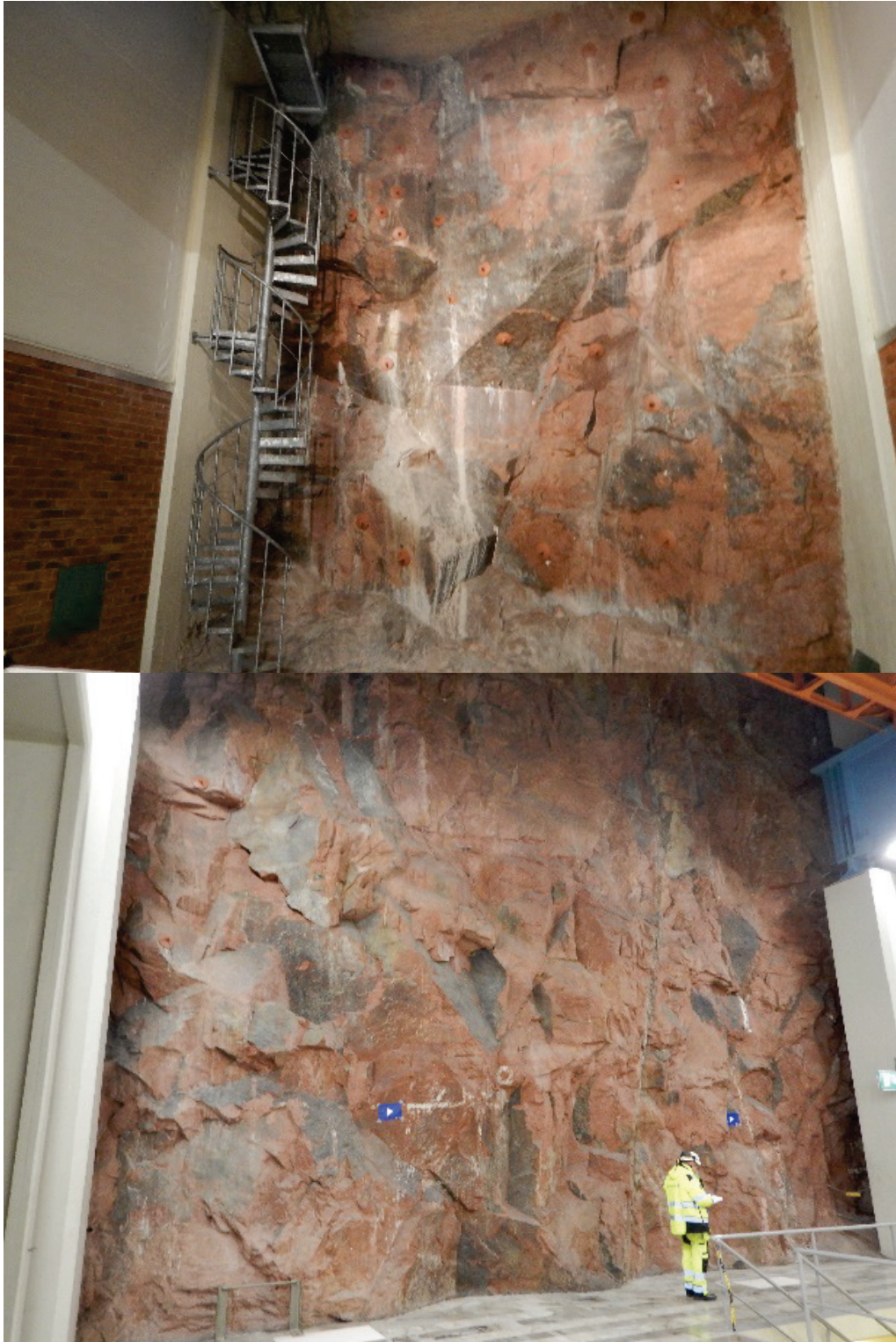


Figur A-15. T.v. Exempel på områden med relativt få bergbult till trots de ogynnsamma strukturerna som stupar in mot bergrummet. Maskinsal, turbinplan.



Figur A-16. T.v. Exempel på insprutat område, vägg i maskinsal. T.h. Exempel på nätat område samt betongkontrefor, bakom innervägg i maskinsal, galleri.

FOTON PLATSBESÖK – ANLÄGGNING 5



Figur A-17. Maskinsalsvägg med relativt sparsam förstärkning, övre bilden med nya bultar med rund bricka, gamla bultar med 4-kantig bricka.

Bilaga B: Underhållsrutiner – Enkätundersökning

 FRÅGEFORMULÄR					
<table border="1"> <tr> <td> UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder </td> <td> UPPDRAGSNUMMER 1081343 </td> </tr> <tr> <td> ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor </td> <td> DATUM 2022-05-04 </td> </tr> </table>		UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder	UPPDRAGSNUMMER 1081343	ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor	DATUM 2022-05-04
UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder	UPPDRAGSNUMMER 1081343				
ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor	DATUM 2022-05-04				
ANSVARIG PART/BESTÄLLARE Norconsult/Energiforsk	ANLÄGGNING 1, 2, 4				
N R	Fråga	Svar			
1	<u>Inspektioner/besiktning</u> Utförs regelbunden bergbesiktning i anläggningen? Utförs bergbesiktning som en del av underhållet i anläggningen? Vem beslutar om bergbesiktning ska utföras? Vem utför bergbesiktning? Utförs besiktning genom egen organisation eller genom upphandling? Vad omfattas av bergbesiktning? Bergmassa? Bergbult? Sprutbetong? Stödkonstruktioner i betong? Annat? Hur dokumenteras utförd besiktning?	Vi besiktar enbart vid ev. nedfall av sten eller liknande mellan skyddsskrotingarna. Besiktningarna utförs internt eller med hjälp av konsult. Besiktningarna redovisas i rapporter. Behovet bestäms internt av gruppen i samråd med teknikansvarig.			

 FRÅGEFORMULÄR					
<table border="1"> <tr> <td> UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder </td> <td> UPPDRAGSNUMMER 1081343 </td> </tr> <tr> <td> ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor </td> <td> DATUM 2022-05-04 </td> </tr> </table>		UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder	UPPDRAGSNUMMER 1081343	ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor	DATUM 2022-05-04
UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder	UPPDRAGSNUMMER 1081343				
ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor	DATUM 2022-05-04				
ANSVARIG PART/BESTÄLLARE Norconsult/Energiforsk	ANLÄGGNING 1, 2, 4				
N R	Fråga				
Svar					
2	<u>Underhåll</u> Utförs regelbundet bergunderhåll i anläggningen? Inom vilket intervall utförs bergunderhåll? Vilken typ av bergunderhåll utförs? Skrotning? Bergbult? Sprutbetong? Stödkonstruktioner i betong? Annat? Vem utför underhåll, egen organisation eller genom upphandling? Finns det en prioriteringsordning för underhåll beroende på typ av utrymme? Är något utrymme mer prioriterat?				
	Vi skyddsskrotar och gör erforderlig förstärkning vart 5:e år enligt plan. Underhållet kan bestå av alla typer av åtgärder. Kem.injektering kan också vara aktuell. Underhåller utförs av vår egen avdelning. Upphandling sker enbart om det behövs sprutbetong. Alla områden i anläggningarna skrotas. Vissa normalt vattenfyllda områden skrotas vid behov eller vid avställningar.				

 FRÅGEFORMULÄR					
<table border="1"> <tr> <td> UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder </td> <td> UPPDRAGSNUMMER 1081343 </td> </tr> <tr> <td> ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor </td> <td> DATUM 2022-05-04 </td> </tr> </table>		UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder	UPPDRAGSNUMMER 1081343	ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor	DATUM 2022-05-04
UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder	UPPDRAGSNUMMER 1081343				
ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor	DATUM 2022-05-04				
ANSVARIG PART/BESTÄLLARE Norconsult/Energiforsk	ANLÄGGNING 1, 2, 4				
N R	Fråga				
Svar					
3	<u>Åtgärder</u> Vem beslutar om åtgärd då skada/brist identifierats? Används några styrande dokument som underlag för beslut om åtgärd? Exempelvis vilken bulttyp som ska användas mängd o.d. Hur dokumenteras utförda åtgärder? På ritning/skiss? Genom inmätning? Genom mängdförteckning? Märkning av nya bultar?				
	Avdelningen bedömer normala åtgärder och ev. större åtgärder beslutas av den tekniskt ansvariga för berg och betong. Det finns instruktioner och riktlinjer för hur åtgärder bör utföras. Åtgärder dokumenteras i rapporter och meddelanden i system. Nya bultar märks med flor som anger år, längd, metod etc.				

 FRÅGEFORMULÄR					
<table border="1"> <tr> <td> UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder </td> <td> UPPDRAGSNUMMER 1081343 </td> </tr> <tr> <td> ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor </td> <td> DATUM 2022-05-04 </td> </tr> </table>		UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder	UPPDRAGSNUMMER 1081343	ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor	DATUM 2022-05-04
UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder	UPPDRAGSNUMMER 1081343				
ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor	DATUM 2022-05-04				
ANSVARIG PART/BESTÄLLARE Norconsult/Energiforsk	ANLÄGGNING 1, 2, 4				
N R	Fråga				
Svar					
4	<u>Befintlig bergförstärkning</u> Finns projekterad förstärkning dokumenterad? Finns äldre kravspecifikationer dokumenterade? Kan ålder på befintliga bergbultar spåras, exempelvis genom dokumentation eller genom märkning? Kontrolleras skick på befintlig bergbult? Hur kontrolleras skick på befintlig bergbult? Upplevs någon bulttyp som sämre över tid? Uppskattningsvis - Hur stor är andel ny (efter 1980) bergbult respektive äldre (före 1980) bergbult i anläggningen?				
	Dokumentation finns till viss del. Ålder kan oftast spåras. Skicket på bulten kontrolleras bara visuellt. Expanderbult, driftsbult är den sämsta typen av bult. Det finns uppskattningsvis hälften ny bult och hälften gammal.				

 FRÅGEFORMULÄR		
UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder		UPPDRAGSNUMMER 1081343
ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor		DATUM 2022-05-04
ANSVARIG PART/BESTÄLLARE Norconsult/Energiforsk	ANLÄGGNING 1, 2, 4	
N R	Fråga	Svar
5	<u>Befintlig sprutbetong</u> Finns projekterad förstärkning dokumenterad? Kan ålder på befintlig sprutbetong spåras, exempelvis genom dokumentation eller genom märkning? Hur kontrolleras skick på befintlig sprutbetong? Upplevs någon typ av sprutbetong som sämre över tid? Uppskattningsvis - Hur stor är andel ny (efter 1980) sprutbetong respektive äldre (före 1980) sprutbetong i anläggningen?	Dokumentationen oftast bristfällig. Sprutbetongen kallas via bomknackning. Den sprutbetong som är oarmerad, utan fiber, är sämst.

 FRÅGEFORMULÄR		
UPPDRAGSNAMN Kartläggning av bergförstärkningsmetoder		UPPDRAGSNUMMER 1081343
ÄMNE Vattenkraftens bergfrågor		DATUM 2022-05-04
ANSVARIG PART/BESTÄLLARE Norconsult/Energiforsk	ANLÄGGNING 1, 2, 4	
N R	Fråga	Svar
6	<u>Befintlig betongförstärkning</u> (Avser betongkonstruktioner avsedda som bergförstärkning, eg. betongtak, betongbågar o.d.) Finns projekterad förstärkning dokumenterad? Kan ålder på befintlig sprutbetong spåras, exempelvis genom dokumentation eller genom märkning? Hur kontrolleras skick på befintlig sprutbetong? Upplevs någon typ av sprutbetong som sämre över tid? Uppskattningsvis - Hur stor är andel ny (efter 1980) betongförstärkning respektive äldre (före 1980) betongförstärkning i anläggningen?	Enklare och/eller mindre stödgjutningar dokumenteras i våra rapporter. Äldre sprutbetong regenererar ofta.

KARTLÄGGNING AV BERGFÖRSTÄRKNINGSMETODER I VATTENKRAFTINDUSTRINS BERGANLÄGGNINGAR

Byggnation av svenska vattenkraftsanläggningar med undermarkförlagda delar har utförts från början av 1900-talet fram till idag. Vattenkraftens berganläggningar är annorlunda när det kommer till konstruktion, geometri, material och lokal miljö jämfört med majoriteten av de berganläggningar som finns i Sverige. Det har hittills saknats en övergripande sammanställning av vilka bergförstärkningsmetoder som förekommer i vattenkraftsanläggningars bergutrymmen. Ett sådant underlag behövs för att kunna utvärdera hur väl metodval och utförande fungerar. Syftet med det här projektet har varit att ge en samlad bild av omfattningen av förekommande bergförstärkningsåtgärder och att utvärdera åtgärdernas prestanda. Rapporten innehåller också rekommendationer till anläggningsägarna.

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