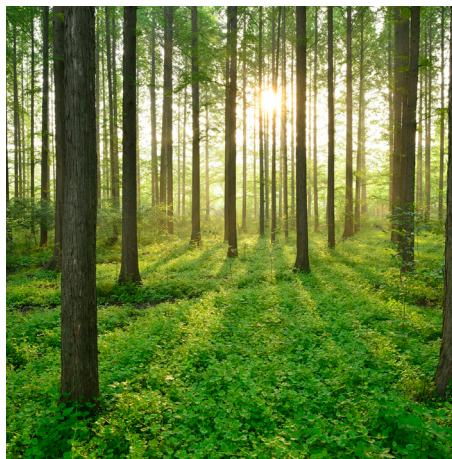
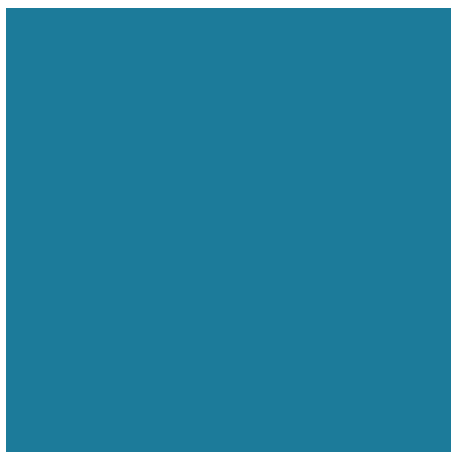


SKONSAMT UTTAG AV BERG SOM METOD FÖR VATTENKRAFTINDUSTRINS BERGARBETEN

RAPPORT 2024:1007



VATTENKRAFTENS BERGFRÅGOR



Skonsamt uttag av berg som metod för vattenkraftindustrins bergarbeten

**ROBERT SWINDELL, ULF LINDFORS
STAFFAN RISBERG, GÖRAN MANELL**

ISBN 978-91-89919-07-5 | © Energiforsk mars 2024

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

Förord

Majoriteten av Sveriges aktiva vattenkraftanläggningar är i dag i behov av utbyggnad eller underhåll. Den här rapporten beskriver metoderna skonsam sprängning, sågning, spräckning och borrarning samt resonerar kring hur dessa metoder kan tillämpas för skonsamt berguttag i anslutning till befintliga vattenkraftverk.

Projektet Skonsamt uttag av berg som metod för vattenkraftindustrins bergarbeten har utförts av Robert Swindell, Ulf Lindfors, Staffan Risberg och Göran Manell, konsulter med expertis inom bergfrågor på Itasca Consultants AB. Projektet har finansierats av Energiforsk genom FoU-programmet Vattenkraftens bergfrågor, etapp 2023–2025. Vattenkraftens bergfrågor syftar till att ta fram verktyg, riktlinjer, utförandebeskrivningar och ny teknik så att förvaltningsåtgärder och investeringar kan genomföras kostnadseffektivt vid rätt tidpunkt och med rätt utförande.

Programmets intressenter är Vattenfall AB, Fortum Sverige AB, Uniper/Sydkraft Hydropower AB, Statkraft Sverige AB, Skellefteå Kraft AB, Jämtkraft AB, Karlstads Energi AB, Jönköpings Energi AB, Tekniska verken i Linköping AB, Mälarenergi Vattenkraft AB, Holmen Energi AB, Sollefteåforsens AB. Projektets referensgrupp har utgjorts av programmets styrgrupp.

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

Sammanfattning

En stor del av Sveriges idag aktiva vattenkraftanläggningar byggdes för 50 till 100 år sedan och många är i dag i behov av utbyggnad eller underhåll. Denna rapport beskriver ett antal skonsamma bergschaktningsmetoder som lämpar sig för skonsamt berguttag i anslutning till dessa vattenkraftanläggningar.

Rapporten beskriver metoderna skonsam sprängning, sågning, spräckning och borrarning samt resonerar kring hur dessa metoder kan tillämpas för skonsamt berguttag i anslutning till befintliga vattenkraftverk. Rapporten bygger på en litteraturstudie och en genomförd intervjustudie med utvalda sakkunniga i branschen som har jobbat med ovannämnda uttagsmetoder. Exempel på implementering av metoderna tillhandahålls utifrån definierade fiktiva scenarion för bergschaktarbeten som kan vara aktuella för vattenkraftindustrin. En diskussion om metodernas tillämpbarhet ges och inkluderar tids- och kostnadsaspekter för respektive metod.

Det har konstaterats att borrarning och sprängning i de flesta fall är den mest effektiva metoden för berguttag vid en kraftstation om uttaget kan utföras med en acceptabel risk och uppfyller krav på omgivningspåverkan. Borrarning och sprängning kan ersättas med hydraulisk eller kemisk spräckning om uttaget, eller delar av uttaget, bedöms vara för riskfyllt. Val av spräckningsmetod beror till stor del på storleken på uttaget och tillgängligt utrymme. Sågning används främst om det ställs höga krav på plana ytor, t.ex. fyrkantiga schakt och bergskärningar. De olika borraringsmetoderna; raiseborrning, fullortsborrning (TBM), kärnborrning och hammarborrning, är av naturliga anledningar mest lämpliga för cirkulära berguttag med höga krav på skonsamhet. I många fall kan flera metoder användas för ett känsligt berguttag.

De metoder och den erfarenhet som finns i bergbranchen för skonsamma berguttag gör att komplicerade uttag kan utföras framgångsrikt med acceptabel risknivå och omgivningspåverkan. Detta under förutsättning att det planeras noggrant både under projekteringen och utförandet. Det är även av stor vikt att ersättningsmodellen ger rätt incitament för entreprenören att genomföra ett arbete som ger bra resultat. Entreprenörens erfarenhet och kompetens inom relevant uttagsmetod är också kritisk och bör säkerställas i samband med upphandling av dessa typer av arbeten.

Nyckelord

Skonsamt berguttag, Vattenkraft, Schaktmetoder, Projektering, Skonsam sprängning, Vajersågning, Spräckning, Borrarning

Summary

The majority of hydroelectric power plants in Sweden have been in operation for between 50 and 100 years and require continuous maintenance and work to bring them up to an acceptable standard. This report describes a number of careful excavation methods that can be suitable for rock excavation in close proximity to sensitive structures that comprise these facilities.

Rock excavation methods using careful blasting, rock cutting, splitting and drilling are summarized and their applicability for use in or around hydroelectric facilities is described. The report is based on results of a comprehensive literature study and a number of interviews conducted with experts within the various excavation methods. A number of fictive excavation scenarios for hydroelectric power plants were defined and a discussion on the applicability of the various methods for the scenarios is presented in the report. A comparison of time and cost aspects between the methods is also provided.

The study has found that in most cases the most effective method for rock excavation is drill and blast provided the work can be conducted with an acceptable level of risk and that requirements for blast induced vibrations can be met. Drill and blast can be replaced by hydraulic or chemical splitting methods for portions of the excavation where the risk is deemed too great or where requirements for blast vibrations cannot be met. Choice of splitting method depends on the size of the excavation and the available space for equipment. Excavation using rock cutting methods is most commonly used for planar surfaces, for example square or rectangular shafts or open cuts where overbreak cannot be accepted. The various drilling methods (raise boring, TBM, core drilling and percussion drilling) are for obvious reasons most suitable for circular excavations with high demands on the excavated section. In many cases a combination of methods can be applied for critical rock excavations.

Excavation of extremely complex geometries can be achieved due to the wide range of methods available and the experience that has been gained in recent years for these types of excavation. However, such excavations require excellent planning both during the design and construction phases. Consideration also needs to be given to the type of contract to provide a framework for the contractor to perform the works to a high standard. The skill and experience of the contractor is also of vital importance to ensure a successful rock excavation.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Bakgrund	9
1.2	Syfte	9
1.3	Genomförande	9
2	Skonsamma metoder	11
3	Skonsam sprängning	12
3.1	Slätsprängning	14
3.1.1	Beskrivning	14
3.1.2	Förutsättningar och begränsningar	15
3.1.3	Tekniska risker och arbetsmiljö	16
3.1.4	Planering och projektering	16
3.2	Förspräckning	17
3.2.1	Beskrivning	17
3.2.2	Förutsättningar och begränsningar	18
3.2.3	Tekniska risker och arbetsmiljö	18
3.2.4	Planering och projektering	18
4	Sågning	19
4.1	Start- och slutsågning	19
4.1.1	Beskrivning	19
4.1.2	Förutsättningar och begränsningar	21
4.1.3	Tekniska risker och arbetsmiljö	22
4.1.4	Planering och projektering	22
4.2	Blind cut-sågning	23
4.2.1	Beskrivning	23
4.2.2	Förutsättningar och begränsningar	24
4.2.3	Tekniska risker och arbetsmiljö	24
4.2.4	Planering och projektering	24
4.3	Klingsågning	24
4.3.1	Beskrivning	24
4.3.2	Förutsättningar och begränsningar	26
4.3.3	Tekniska risker och arbetsmiljö	26
4.3.4	Planering och projektering	27
5	Spräckning	28
5.1	Hydraulisk Spräckning	29
5.1.1	Beskrivning	29
5.1.2	Förutsättningar och begränsningar	33
5.1.3	Tekniska risker och arbetsmiljö	33
5.1.4	Planering och projektering	34
5.2	Kemisk spräckning	34

5.2.1	Beskrivning	34
5.2.2	Förutsättningar och begränsningar	35
5.2.3	Tekniska risker och arbetsmiljö	36
5.2.4	Planering och projektering	36
6	Borring	38
6.1	Raiseborring	38
6.1.1	Beskrivning	38
6.1.2	Förutsättningar och begränsningar	39
6.1.3	Tekniska risker och arbetsmiljö	39
6.1.4	Planering och projektering	39
6.2	Fullortsborring	40
6.2.1	Beskrivning	40
6.2.2	Förutsättningar och begränsningar	42
6.2.3	Tekniska risker och arbetsmiljö	43
6.2.4	Planering och projektering	43
6.3	Slitsborring	43
6.4	Kärnborring	44
6.5	Hammarborring	44
7	Övriga metoder	45
8	Tid- och kostnadsuppskattning	46
8.1	Kvantitativa tid- och kostnadsuppskattningar	46
8.1.1	Skonsam sprängning	46
8.1.2	Vajersågning	46
8.1.3	Klingsågning	46
8.1.4	Hydraulisk spräckning	46
8.1.5	Kemisk spräckning	47
8.1.6	Raiseborring	47
8.1.7	Fullortsborring	47
8.1.8	Kärnborring	47
8.1.9	Hammarborring	48
8.1.10	Slitsborring	48
8.2	Kvalitativ bedömning och jämförelse av metoderna	48
9	Applicering av metoder vid vattenkraftverk	50
9.1	Etablering av typfall	50
9.2	Typfall 1 - Schakt till befintlig anläggning	50
9.2.1	Beskrivning	50
9.2.2	Förslag till uttagsmetoder för galleriet	51
9.2.3	Förslag till uttagsmetoder för schaktet	52
9.3	Typfall 2 - Ökat tvärsnitt av intags-/utloppstunnel	53
9.3.1	Beskrivning	53
9.3.2	Förslag till uttagsmetoder för utloppstunneln	54

9.3.3	Förslag till uttagsmetoder för intagstunneln	54
9.4	Typfall 3 - Ökat tvärsnitt ytutskov	55
9.4.1	Beskrivning	55
9.4.2	Förslag till uttagsmetoder för energidödarbassäng	56
9.5	Typfall 4 - Berguttag för betongkonstruktion	57
9.5.1	Beskrivning	57
9.5.2	Förslag till uttagsmetoder för grundläggning av betongkonstruktionen	58
9.6	Typfall 5 - Anslutning mellan två bergrum	58
9.6.1	Beskrivning	58
9.6.2	Förslag till uttagsmetoder för förbindelsetunnel	59
10	Diskussion och slutsats	61
11	Referenslista	63

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Vattenkraftindustrin har samlats via Energiforsks FoU-program "Vattenkraftens bergfrågor" för diskussioner och gemensam forskning inom bergteknik. Programmet ska resultera i verktyg, riktlinjer, utförandebeskrivningar och ny teknik med avsikt att förvaltningsåtgärder och investeringar ska kunna utföras med rätt utförande, vid rätt tid och kostnadseffektivt. Detta projekt har utförts inom ramen för Energiforsks FoU-program "Vattenkraftens bergfrågor".

Stor del av dagens aktiva vattenkraftanläggningar byggdes för 50 till 100 år sedan. För att fortsätta ha hög tillgänglighet, säkerställa en stabil kapacitet i leverans av energi och bemöta förändringar i miljöförutsättningar i framtiden behövs utbyggnad och åtgärder som kräver bergschakt i dessa anläggningar. Det kan röra sig om att t.ex. anlägga ett nytt aggregat, utöka avbördningskapaciteten eller förbättra redundansen i systemet. Dessa åtgärder får inte påverka anläggningens dämmande och avbördande funktion under byggnation utan detta måste kunna ske med samma säkerhet som under normala förhållanden. Det finns många alternativa skonsamma bergschaktmetoder som kan vara aktuella för dessa typer av projekt. Val av metod för olika ändamål är dock inte självklart och beror på många faktorer så som tillgänglighet, geometriska och geologiska förutsättningar, omgivningskrav, mm. Av denna anledning har programmet "Vattenkraftens bergfrågor" initierat detta projekt.

1.2 SYFTE

Syftet med detta projekt är att studera, sammanställa och informera om vilka skonsamma berguttagsmetoder som tillämpas i bergbranschen idag och som är lämpliga för de förhållanden som den svenska vattenkraftindustrin har. Exempel där skonsamma metoder för uttag av berg har använts ska också presenteras. Vidare ska fiktiva situationer (typfall) för berguttag i och omkring en vattenkraftanläggning beskrivas och ett resonemang om lämpliga skonsamma bergschaktmetoder tas upp, där även kostnadsaspekter ingår. Slutligen ska rekommendationer om olika metoders tillämpbarhet som även beaktar konstnadsaspekter redovisas.

1.3 GENOMFÖRANDE

En litteraturgenomgång har initialt utförts för att utvärdera vanligt förekommande metoder för skonsamt berguttag och när de kan vara tillämpbara. Praktiska aspekter som rör en viss metods förutsättningar, begränsningar, tekniska risker, arbetsmiljö, tidsåtgång och kostnad, har visat sig vara svåra att tillgå i litteraturen. Denna kunskap grundar sig sannolikt i erfarenheter från utförare och verkar inte ha dokumenterats och överförts till litteraturen i någon större utsträckning. Av denna anledning har litteraturstudien kompletterats med intervjuer med utvalda sakkunniga i branschen som jobbat med skonsamma uttagsmetoder. Intervjugruppen redovisas i Tabell 1.

Tabell 1 Intervjugrupp (sakkunniga).

Namn	Tillhörighet (Roll)	Huvudsakligt kunskapsområde	Intervjudatum
Hallgrímur Indrídason	Sweco Sverige AB (Projektör)	Projektering skonsamma uttag	2023-08-29
Monika Hogeland	M.H Drilling & Sawing AB (Entreprenör)	Vajersågning	2023-08-31
Mats Olsson	EDZ Consulting AB (Sprängkonsult)	Skonsam sprängning	2023-08-29
Mats Persson	Vattenfall AB (Beställare)	Vattenkraftanläggningar	2023-08-28
Car-Oscar Nilsson	Uniper Sverige (Beställare)	Vattenkraftanläggningar	2023-08-29
Aron Bodén	Veidekke Entreprenad AB (Entreprenör)	Planering av utförande för skonsamma uttag	2023-08-31
Anders Svanholm	Styrud Ingenjörskfirma AB (Entreprenör)	Borrning	2023-08-28
Magnus Svensson	Fortum (Beställare)	Byggplatsuppföljning/projektledning skonsamma uttag för vattenkraft	2023-08-30
Christer Skönnerud	C Skönnerud Bergarbeten AB (Entreprenör)	Spräckning	2023-11-17

Fem fiktiva scenarion (typfall) har definierats för bergschaktarbeten som kan vara aktuella för ett vattenkraftverk. Dessa fall har definierats i samråd med projektets referensgrupp. Referensgruppen bestod av Mats Persson (Vattenfall), Christian Bernstone (Vattenfall), Niklas Widenberg (Vattenregleringsföretagen) och Andreas Larsson (Energiforsk, projektledare). För varje typfall ges ett tekniskt resonemang om metodernas tillämpbarhet baserat på givna förhållanden. Det ska poängteras att det finns många faktorer som i slutändan styr val av metod, t.ex. tillgängligt utrymme, tillgänglighet, tidsbegränsningar, vibrationskrav, förutsättningar för avstängning, storlek på berguttag, bergförhållanden, mm. Istället för att definiera alla förutsättningar för respektive typfall ges en övergripande diskussion om lämpliga skonsamma metoders tillämpbarhet utifrån en generell beskrivning av varje typfall.

Projektet (och denna rapport) avslutas med ett generellt resonemang om tid och kostnader för de olika skonsamma metoderna samt deras tillämpbarhet inom vattenkraftindustrin.

2 Skonsamma metoder

Ett antal skonsamma metoder som bedöms kunna vara aktuella för bergschaktarbeten för vattenkraftanläggningar har identifierats av Energiforsk, intervjustudien, litteraturstudien samt författarnas egna erfarenheter. Dessa sammanfattas i Tabell 2.

Tabell 2 Identifierade skonsamma bergschaktsmetoder aktuella för vattenkraftindustrin.

Metod	Submetod
Skonsam sprängning	Slätsprängning
	Förspräckning
Sågning	Start- och slutsågning
	Blind cut-sågning
	Klingsågning
Spräckning	Hydraulisk spräckning
	Kemisk spräckning
Borrning	Raiseborrning
	Fullortsborrning (TBM/MTBM)
	Slitsborrning
	Kärnborrning
	Hammarborrning

För att kunna jämföra metoder sinsemellan på ett så objektivt sätt som möjligt har metoderna studerats utifrån samma aspekter:

- Beskrivning av metod
- Förutsättningar och begränsningar
- Tekniska risker och arbetsmiljö
- Planering och projektering

Ovanstående punkter har beskrivits för respektive skonsam metod baserat på litteraturgenomgången och intervjustudien och redovisas i de efterföljande kapitlen 3 till 7.

3 Skonsam sprängning

Skonsam sprängning är ett begrepp som används i branschen för att beskriva sprängning där speciella krav ställs på bergets slutkontur¹. Metoden ska inte förväxlas med försiktig sprängning som syftar till att begränsa påverkan på närliggande byggnader eller konstruktioner orsakat av kast och vibrationer.

Det finns två primära metoder som används för skonsam sprängning:

- Slätsprängning
- Förspräckning

Dessa metoder beskrivs i detalj av Olofsson². Trafikverkets handbok för ovanjordssprängning¹ är också en bra referens för en djupare beskrivning av teoretiska och praktiska aspekter av just ovanjordssprängning. Skillnaden i dessa metoder beror främst på laddning och tändordning för de olika hålen i en salva. Hålnomenklatur för ovanjords- och underjordssprängning redovisas i Figur 1 och Figur 2. Konturhålen är de yttre borrhål som avgränsar konturen. Innanför borrar hjälparhålen. Kontur- och hjälparhål borrar i regel med tätare hålsättning (avståndet mellan hål) för att minimera överberg (oavsiktligt uttag utanför kontur) och sprängskador. Bottenhålen (eller sulhålen) avgränsar tunnelsulan. Dessa utgör del av konturhålen men laddas hårdare för att kompensera för tyngden av berget ovan. Killhål är de hål som borrar i tunnelfronten som syftar till att skapa tillräcklig fri yta för effektiv strossning. Dessa laddas också hårdare för att överkomma bergets inspanning och begränsning av fri yta. Livhål, salvhål, strosshål och produktionshål är gemensamma begrepp för de resterande hål som avser strossning utan speciell hänsyn till ovanstående faktorer.

Material och utförandekrav för sprängningsarbeten brukar specificeras i tekniska beskrivningar baserat på AMA (Allmän material-och arbetsbeskrivning för anläggningsarbeten) under kapitel CBC Bergschakt^{3,4}. I AMA anges etablerade bergschaktningsklasser som kan avropas i tekniska beskrivningar. Genom att avropa en viss bergschaktningsklass för en slutkontur styrs följande:

- Geometrier för konturhål
- Sprängskadezon och indirekt kravställning för maximal laddningskoncentration
- Toleranser för överberg

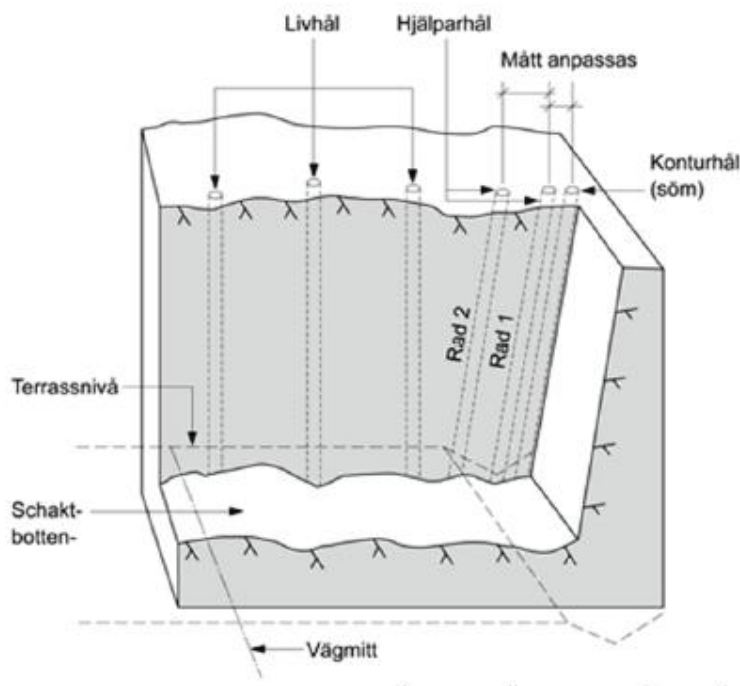
De strängaste kraven som ger de mest skonsamma resultaten hör till bergschaktningsklass 1.

¹ Trafikverket. *Trafikverkets handbok för ovanjordssprängning*. Trafikverket, 2014.

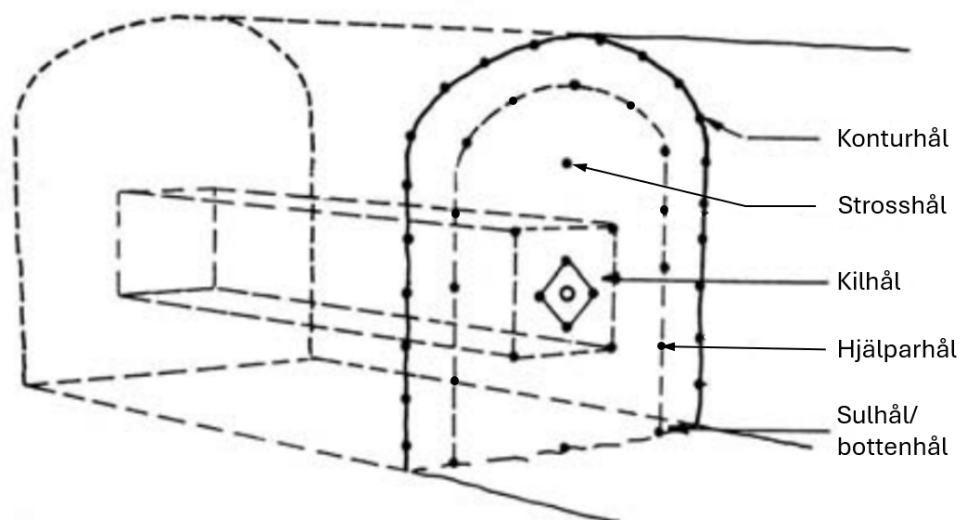
² S. O. Olofsson. *Modern bergsprängningsteknik*. Årila: APPEX, 2007.

³ AMA *Anläggning 17*. Svensk byggtjänst, 2017.

⁴ AMA *Anläggning 23*. Svensk byggtjänst, 2023.



Figur 1 Benämning av hål för ovanjordssprängning enligt AMA 17³.



Figur 2 Benämning av hål för underjordssprängning⁵.

Skonsam sprängning kan kombineras med andra metoder, så som slitsborrning, vadersågning och spräckning, där huvuddelen av berguttaget utförs med sprängning men att andra metoder används för schakt intill slutkonturen. I avsnittet nedan ges en generell beskrivning av principerna för de skonsamma sprängningsmetoderna; slätsprängning och förspräckning.

⁵ M. Heiniö. *Rock excavation handbook*. Sandvik Tamrock Corp, 1999.

3.1 SLÄTSPRÄNGNING

3.1.1 Beskrivning

Slätsprängning innebär att konturhålen sprängs sist i salvan och tillämpas för att reducera skador på berget i slutkonturen. Skador på slutkonturen kan reduceras på flera sätt. T.ex. genom att använda en borrplan med tätare hålsättning och svagare laddning av hålen. Svagare laddning kan innebära en ökad frikopplingsgrad, vilket betyder att laddningens diameter minskas i förhållande till borrhålets diameter. Detta reducerar borrhålstrycket och därmed också risken för sprängskador. Hålen kan även laddas med sprängämnen med lägre detonationshastighet än vid konventionell sprängning, vilket också minskar borrhålstrycket. Dessutom har valet av sprängkapslar och intervalltider en stor inverkan på kvalitén på slutkonturen.

Hålsättningen för slätsprängning är tätare i kontur- och hjälparhålen jämfört med motsvarande avstånd i en vanlig salva. Slätsprängning under jord med konturhålsavstånd 150–300 mm brukar, av författarnas erfarenheter, resultera i mycket god konturhållning i normala bergförhållanden. Med 150 mm hålavstånd laddas endast vartannat hål. I ovanjordsberg har 600–800 mm hålavstånd visat sig ge bra resultat¹, men vid känsliga berguttag kan kortare avstånd erfordras. Stickningen (utåtvinkling av konturhålen för att skapa plats för borring av nästkommande salva) begränsas vanligen till max 300 mm vid slätsprängning med höga krav på skonsamheten. Ofta ställs det också stränga krav på borrhålsavvikelsen, t.ex. max 3% avvikelse av borrhålslängden.

Laddning är ett kritiskt arbetsmoment vid skonsam sprängning och det är viktigt att samtliga hål laddas med rätt mängd sprängämne. För att säkerställa rätt laddningskoncentration och minimera risk för strängbrott, dvs. när det bildas ett glapp i laddsträngen vid laddning av emulsionssprängämne, kan laddning med patronerat sprängämne vara ett alternativ. Tändning av salvor med t.ex. elektroniska sprängkapslar ger också god kontroll på tändningsförloppet vilket bidrar till god konturhållning och hjälper även till att begränsa spränginducerade vibrationer.

Vid kritiska berguttag kan slätsprängning även kombineras med uppdelning av salvor, t.ex. genom pilot och stross. Detta innebär att man först spränger en mindre del av tunnelsektionen (pilot) som sedan utvidgas (strossas). Vid slätsprängning i kombination med pilot och stross kan kontur- och hjälparhålen sprängas separat för att minimera risken för överberg. De största fördelarna med sådana uppdelningar är att säkerställa fritt utslag (dvs. sprängning mot fri yta) vid sprängning av konturen och möjliggöra anpassning av strossalvan baserat på resultatet av tidigare uttagen pilot. I dåligt berg och/eller för kritiska berguttag kan även förförstärkning i form av bergbultar, stag eller dylikt vara ett alternativ för att minimera bergutfall. Stöd för förförstärkning (så kallad bakåtförankring) kan också vara nödvändigt som upplag för förbultar.

Ett omfattande forskningsarbete, som i huvudsak finansierats av SKB, har utförts i syfte att undersöka hur sprängskadezoner kan begränsas⁶. Forskningen visar att de viktigaste parametrarna för att begränsa skadezonen är att se till att sprängämnet är frikopplat, att inget vatten finns i hålen samt att hålen initieras momentant (dvs. samtliga konturhål sprängs samtidigt).

3.1.2 Förutsättningar och begränsningar

Borrning och sprängning är en flexibel och välbeprövad bergschaktmetod. Det finns en nästintill obegränsad mängd utrustning för borrning, laddning och tändning som kan användas i olika situationer. Metoden kan även användas i kombination med andra schaktmetoder.

En betydande begränsning med all typ av sprängning är de spränginducerade vibrationer som följer. Erfarenheter har visat att dessa vibrationer kan orsaka skada på närliggande byggnader och anläggningar. Ofta fastställs gränsvärden för maximala tillåtna vibrationshastigheter beroende på anläggningens/byggnadens känslighet. Detta eftersom erfarenheter har visat att vibrationshastigheten är direkt proportionell till de spränginducerade påkänningar som byggnader utsätts för. Dessa gränsvärden kan variera mellan 0–150 mm/s, där strängare gränsvärden kan ligga omkring 20–50 mm/s². Vibrationshastigheten beror till stor del på bergets egenskaper, avståndet till byggnaden/anläggningen, typ av grundläggning/konstruktion och samverkande laddning (dvs. momentant detonerande laddning). För mycket känsliga anläggningar kan även accelerationskrav ställas, t.ex. 0,1 g eller 3 g².

Vibrationsgränsvärden för närliggande byggnader och anläggningar brukar anges i ett förfrågningsunderlag som en separat handling "Riskanalys för vibrationsalstrande arbete" och utgör en viktig förutsättning för planering av bergschaktarbete.

Utöver spränginducerade vibrationer finns även andra aspekter som kan begränsa tillämpningen av sprängning som schaktmetod, till exempel:

- Hög omgivningspåverkan (t.ex. spränggaser, risk för kast och utsläpp av kväve).
- Avsaknad av kontroll under sprängningsförloppet som medför oacceptabel risk.
- Kräver särskilt tillstånd för hantering av sprängmedel.

Ovannämnda punkter gäller alla typer av sprängningsarbeten. Det som skiljer skonsam sprängning ur praktisk synpunkt är den extra tid och kostnad som följer vid, bland annat, tätare och noggrannare hålsättning, laddning av dyrare sprängämnen och användning av elektroniska sprängkapslar, gentemot konventionell sprängning som är en snabbare och billigare metod.

⁶ M. Olsson, I. Markström, A. Pettersson, & M. Sträng. *Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel, Äspö HRL*. Stockholm: SKB, 2009.

3.1.3 Tekniska risker och arbetsmiljö

Författarnas erfarenhet är att de största riskerna för misslyckade resultat är kopplade till kompetensen (och i viss mån gällande förutsättningar) hos de som projekterar och utför bergschakt med borrhning och sprängning, snarare än de tekniska riskerna kopplade till själva metoderna. Tvister mellan beställare och entreprenörer är relativt vanligt förekommande när sprängningsresultatet avviker från de angivna bergschaktningsklasserna enligt AMA. Orsaken till avvikelserna kan vara svårt att fastställa och i många fall handlar tvisten om huruvida avvikelserna beror på bergförhållandena eller utförandet. För att minimera risker för oönskat schaktningsresultat vid kritiska bergguttar är författarnas erfarenhet att följande bör beaktas:

- Ta fram en genomarbetad kravställning (projekterad lösning) skriven av en bergsakkunnig med praktisk erfarenhet av sprängteknik. Kravställningen bör formuleras i syfte att ställa relevanta utförandekrav och där så är möjligt, lämna frihetsgrader för entreprenören att utforma egna lösningar.
- Implementera en bra ersättningsmodell för komplexa och riskfyllda bergguttar. Vid mycket komplexa bergguttar kan löpande räkning med genomtänkta incitament för framdrift och kvalitet vara att föredra där man även uppmuntrar entreprenören att bidra med egna tekniska lösningar. Exempel på incitament kan vara en ekonomisk bonus för åstadkommande av fördefinierade milstolpar.
- Säkerställa att entreprenörens kompetens inom skonsam sprängning i svenska bergförhållanden krävs på ett lämpligt sätt, t.ex. genom att krävställa erfarenhet från referensprojekt i liknande förhållanden.

Bergschaktarbete med borrhning och sprängning är, av uppenbar anledning, ett arbetsmoment som kräver speciell hantering ur ett arbetsmiljöperspektiv. Det finns ett flertal regler och specifika föreskrifter för spräng- och bergarbeten som måste följas. För mer information se <https://www.av.se/7>.

3.1.4 Planering och projektering

De grundläggande kravställningar som ges i AMA 23⁴, med tillhörande rådstexter under kapitel CBC, ger en bra grund för beskrivning av bergschaktarbete med borrhning och sprängning. I nedanstående punktlista ges förslag på aspekter som kan beskrivas i en teknisk beskrivning för skonsamt bergguttar med borrhning och sprängning. Observera att listan är framtagen baserat på författarnas personliga erfarenheter och bör ses som ett komplement till befintliga krav- och rådstexter i AMA.

- Tullgränser (förbestämda hållpunkter) bör införas i handlingar som en riskbehandlingsåtgärd för att reducera tekniska osäkerheter. När entreprenörens produktion når en tullgräns (t.ex. en kritisk schaktetapp), ska en utvärdering av de platsspecifika förutsättningarna utföras. Detta kan t.ex. omfatta (i) kontroll och verifiering av de geologiska förutsättningarna, samt, (ii) kontroll och utvärdering av rörelser i bergmassan⁸.

⁷ Arbetsmiljöverket. 2023. <https://www.av.se/>

⁸ Trafikverket. *Projektering av bergkonstruktioner*. Trafikverket, 2019.

- Vid kritiska berguttag bör en arbetsberedning för det kritiska berguttaget genomföras. Detta innebär att entreprenören utför en riskanalys och gedigen planering av arbetet som presenteras skriftligt till beställaren för godkännande. Därefter hålls en genomgång av arbetsberedningen med den grupp som ska genomföra arbetet (yrkesarbetare, arbetsledare mm.)⁹. Krav på arbetsberedningens innehåll och genomförande bör specificeras i bygghandlingar.
- Inför berguttag, genomföra geologisk kartering av berget både innanför och utanför planerat uttag (t.ex. bakom slänkrön). I samband med detta bör eventuell förstärkning och anpassning av borrh-, ladd- och tändplan för aktuell geologi och spricksystem göras. Detta kräver ett viktigt samspel mellan de olika involverade (geolog, bergsprängare och beställare). Förutsättningar för denna kontroll bör krävas noggrant i bygghandlingen (avtäckning/rensning, markering av teoretisk kontur på berget, längdmätningar, mm.).
- Införa tilläggskrav till bergschaktningsklasser, t.ex. ange maximalt hålavstånd i kontur, laddning av konturhåll med patronerat sprängämne, upptändning med elektroniska sprängkapslar, mm.
- Vid borrhning av längre hål, t.ex. för pallsprängning ovanjord, införa lämpliga tilläggskrav för borrhningsmoment, t.ex. borrhning med reducerat matningstryck, borrhning med sänkhammare, inmätning för kontroll av raket mm.
- Ställa krav på inmätning och kontroll av sprängd sektion innan och under skrotning för att undvika onödig bortskrotning av berg utanför teoretisk kontur.
- Ställa krav på försiktig skrotning i dåligt berg för att undvika onödig bortskrotning av berg utanför teoretisk kontur.
- Kravställa kartering/syn av berget av beställarens bergsakkunnig efter varje salva.
- Ställa tydliga krav på maximal salvlängd, pallhöjd eller salvindelning (t.ex. pilot och stross) i den tekniska beskrivning som tas fram vid projekteringsarbetet.
- Införa lämpliga restriktioner för maximal oförstärkt slänthöjd eller yta i den tekniska beskrivningen. Större oförstärkta ytor ökar risken för okontrollerat bergutfall och dessa ytor begränsas därav.
- Kravställa om/när förstärkning ska installeras samt vem som ansvarar för förstärkning. Även detta görs utefter en bedömning av risken för bergutfall och specificeras i den tekniska beskrivningen.

3.2 FÖRSPRÄCKNING

3.2.1 Beskrivning

Förspräckning skiljer från slätsprängning genom att konturraden sprängs innan övriga delar av salvan. Förspräckningen kan utföras först i en salva (s.k. aktiv förspräckning), eller som en helt separat salva¹. Tekniken bygger på att

⁹ M. Persson. Arbetsberedning med www.ByggAi.se. Sveriges Byggindustrier, 2012.

åstadkomma en spricka mellan konturradens hål som sedan skall avskärma slutlig kontur från inverkan av övriga hål i salvan. Detta görs för att minimera skador på konturen. Utförandet går ut på att borra konturhål med tät hålsättning, ladda dessa med låg laddningskoncentration och initiera samtliga konturhål momentant.

3.2.2 Förutsättningar och begränsningar

Eftersom flera hål initieras momentant fås oftast högre vibrationer i samband med förspräckning och även luftstöt vågen blir vanligtvis större jämfört med slätsprängning. Risken för stenkast vid förspräckning är stor och kräver därför noggrann och genomtänkt skydd mot stenkast genom täckning med sprängmattor eller liknande². Förspräckning är sällan ett alternativ för underjordssprängning eller vid ovanjordssprängning i tätbyggda område där risken för omgivningspåverkan är stor (risk för stenkast eller vibrationspåverkan). Däremot kan en välutförd förspräckning ge mycket bra konturhållning i bergslänter i mindre känsliga områden. I övrigt gäller samma aspekter som för skonsam sprängning i sin helhet, se avsnitt 3.1.2.

3.2.3 Tekniska risker och arbetsmiljö

Se avsnitt 3.1.3.

3.2.4 Planering och projektering

Borrningsprecisionen är viktig för det slutliga resultatet och även små borrhålsavvikelser kan påverka resultatet negativt. Det är därför viktigt att ställa tydliga krav på borrhålsavvikelsen och kontroll av raket inför sprängning. Övriga aspekter beskrivs i avsnitt 3.1.4.

4 Sågning

4.1 START- OCH SLUTSÅGNING

4.1.1 Beskrivning

Vajersågning, eller wiresågning, har främst utvecklats för uttag av större intakta stenblock i dagbrott, men eftersom metoden är flexibel med låg omgivningspåverkan har den därför blivit alltmer populär även inom anläggningsindustrin. Vajersågning används vanligen där konventionell sprängning inte tillåts eller vid mer komplexa berguttag, ofta i kombination med andra metoder som spräckning eller sprängning. Vajersågning är idag en väletablerad metod och det finns flertalet fall där vajersågning använts vid komplexa berguttag, t.ex. har vertikala schakt och rulltrappschakt tagits ut med hjälp av vajersågning i projekt så som Norra Länken och Citybanan i Stockholm.

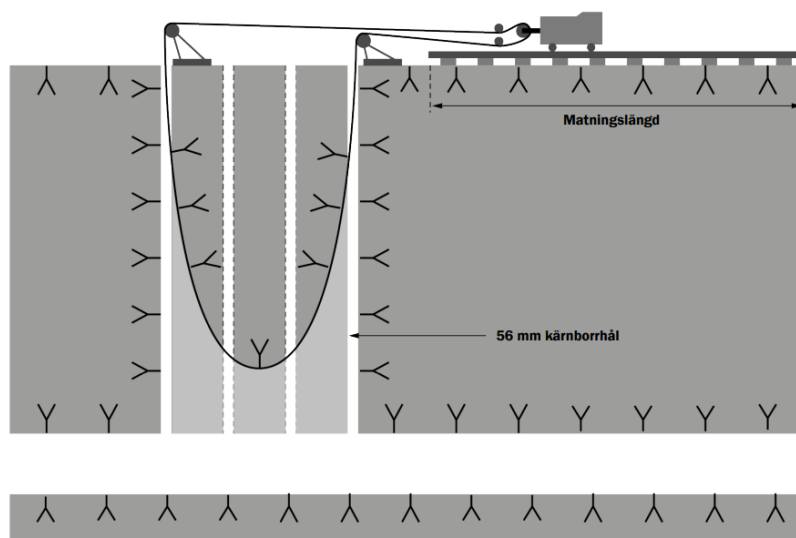
Sågningen sker med en vajer försedd med diamantimpregnerade ringar (Figur 3) som drivs av en motor. Start- och slutsågning, även kallat konventionell vajersågning, kräver tillgång till två fria bergytter, t.ex. mellan markyta och bergrum, där vajern löper genom förborrade hål i varje hörn (Figur 4). Vajern spänns under sågningens gång genom att maskinen flyttas längst en räls enligt figuren. Vatten spolas kontinuerligt för att kyla vajern¹⁰. Vajerns diameter varierar vanligen mellan 6 och 15 mm, där större sågsnitt kräver tjockare vajer och starkare sågmaskin.



Figur 3 Vajer med diamantimpregnerade ringar¹¹.

¹⁰ K. Hedgårde. *En jämförelse mellan raiseborrning och vajersågning för drivning av vertikala schakt i berg*. Masterexamensarbete, Luleå tekniska universitet, 2017.

¹¹ Dexpan. 2023. 100ft Diamond Wire for Granite Stone Quarrying and Cutting Wire Saw Machine. <https://www.dexpan.com/products/diamond-wire-for-granite-sandstone-quarrying-squaring-profiling>



Figur 4 Start- och slutsågning med vajer¹².

Borrhålen som vajern löper genom borrar vanligen med kärnborrning för att erhålla tillräcklig precision^{13,10}. På så sätt erhålls även borrhålen som möjliggör kartering av berget och planering av förstärkning. Hammarborrning är däremot billigare och kan användas då kravet på precision inte är lika högt, t.ex. vid borrning av kortare hål i mer homogent berg.

Sågmaskinen monteras på en plan yta som t.ex. en utfylld bädd av makadam, det krävs oftast inget gjutet fundament. Placering av maskinen beror på tillgänglig yta i närheten av den bergvolym som ska sågas. Om sågmaskinen inte kan placeras i direkt anslutning till sågsnittet kan flera hjul monteras för att leda vajern till sågmaskinen, se exempel i Figur 5. En nackdel med montering av flera hjul är dock att en del av sågmaskinens effekt tappas och sågningen tar därav längre tid. Rälsen bör vara 5–10 m lång då kortare räls medför fler stopp då maskinen måste flyttas flera gånger under sågningens gång.

¹² Styrud Ingenjörskontor AB. 2023. Vajersågning – Metodblad. <https://styrud.se/wp-content/uploads/2018/05/Vajersagning.pdf>

¹³ N. Gustafsson. *Wire cutting as a complement to drill and blast in vibration sensitive environments*. Masterexamensarbete, Chalmers tekniska högskola, 2011.



Figur 5 Sågning av ett vertikalt snitt med konventionell vadersågning och flera hjul. Foto från blå tunnelbana station T-centralen, projekt Citybanan (Foto: Robert Swindell).

4.1.2 Förutsättningar och begränsningar

Metoden är flexibel då bergblocken kan sågas i många olika utföranden men kräver etablering och noggrant utförda borrhål. En sammanfattning av förutsättningar och vanligt förekommande begränsningar ges nedan^{10,13,14,15,16}:

- Metoden förutsätter höga krav på noggrannhet vid bormning vilket ofta kräver kärnbormning av vajerhålen.
- Uppsprucket berg kan ge avvikande borrhål och sågsnitt. Detta då både borr och vajer tenderar att följa sprickplanen.
- Berg med höga kiselhalter sliter mycket på vajer och minskar vajerns effektivitet.
- Vid många små snitt går mycket tid åt för att ometablara sågmaskin, dra om vajer och borra hål.
- Sågsnitt som är större än 3–5 m mellan borrhål minskar vajerns effekt och riskerar att bli ojämna.
- Tunnelkonturer med plana bergsnitt resulterar i ogynnsamma bergspänningar och ger sämre valvverkan.
- Kräver plan yta och plats för 5–10 m räls för etablering av sågmaskin.
- Tillgång till vatten krävs för spolning och kylning av vajer.
- Tillgång till el/elverk till sågmaskin (ca 75–150 A). Bränsledrivna sågar är ovanliga i Sverige.

¹⁴ R. Christiansson, T. Lehtimäki, S. Pettersson & M. Olsson. *Studie av vadersågning för deponeringstunnlar*. Stockholm: SKB, 2013.

¹⁵ C. Davidsson. *Tunneldrivning i tätort*. Masterexamensarbete, Luleå tekniska universitet, 2013.

¹⁶ A. Lönnelid. *Alternativa metoder för berguttag i urban miljö*. Masterexamensarbete, Luleå tekniska universitet, 2021.

4.1.3 Tekniska risker och arbetsmiljö

Uttag av vertikala schakt med vadersågning förutsätter ofta att sågade bergblock faller ut för att sedan bearbetas undertill. Detta ställer höga krav vid projektering och planering då förseningar ofta uppstår när berget inte faller ut som planerat, vilket även medför en betydande arbetsmiljörisk för spontant bergutfall¹⁰. Lossning av fastkilade bergblock görs i regel med sprängning, spräckning eller knackning. Vid borring av språnghål för lossning måste plattformar byggas för maskiner då dessa inte kan placeras på instabil bergmassa¹⁵. Riskerna sammanfattas nedan:

- Vajer kilar fast på grund av höga bergspänningar.
- Vajer kilar fast mot vikten av sågat bergblock.
- Vajer kilar fast i berg på grund av ojämnheter i sågsnitt.
- Vajer tenderar att följa ojämnheter i berg som t.ex. foliation och sprickor vilket resulterar i ojämna sågsnitt.
- Fastkilat berg behöver knackas eller sprängas bort vilket förlänger utförandetiden.
- Svårt att identifiera svagheter på sågad bergyta, ökad risk för spontana utfall.

Buller är generellt inget problem vid sågning som är en relativt tyst metod. Eftersom vajern spolas bildas vanligtvis inte mycket damm, men farliga partiklar kan förekomma i ångan som bildas vilket då ställer krav på skyddsmask för operatörer. Vid vajerbrott kan splitter slungas och orsaka skada, avspärrning är därför nödvändigt och ett säkerhetsområde bör upprättas längst vajerns löpriktning¹³. Om lossågade bergblock riskerar att dra i vajern, kan sågmaskinen behöva förankras.

4.1.4 Planering och projektering

Vid projektering av start- och slutsågning bör följande aspekter tas i beaktande^{10,15}:

- Provtä och utföra labtester på berget för uppskattning av sågtid och slitage på vajer. Berg som innehåller mycket kisel sliter mycket på vajern och tar längre tid att såga genom.
- Ställa tydliga krav på noggrann planering av sågsnitt och redovisning i en arbetsberedning för att minska risken för ojämna snitt, fastkilning av vajer eller fastkilning av bergblock.
- Ställa tydliga krav på accepterad avvikelse för sågsnitt från teoretisk sektion.
- Definiera tydliga frihetsgrader för entreprenörer gällande utformning av slutgiltig geometri, t.ex. val av snittens lutning.
- Eventuellt krav på tillfälligt stöd av frisågad bergmassa och tydliggöra dess funktion.
- Kravställa lämpliga kontroller under utförande som exempelvis inmätning av såghål (start och slut) och utsättning av snittets teoretiska läge (över- och underkant).
- Kravställa acceptabla toleranser för borrhålsavvikelse för såghål.
- Vid behov specificera acceptabel fallhöjd för lossågad bergmassa.
- Vid risk för vattenförande berg kravställa förinjektering av berget.
- Vid etablering, borra flera hål för lossållning för att undvika att behöva borra i frisågade bergblock.

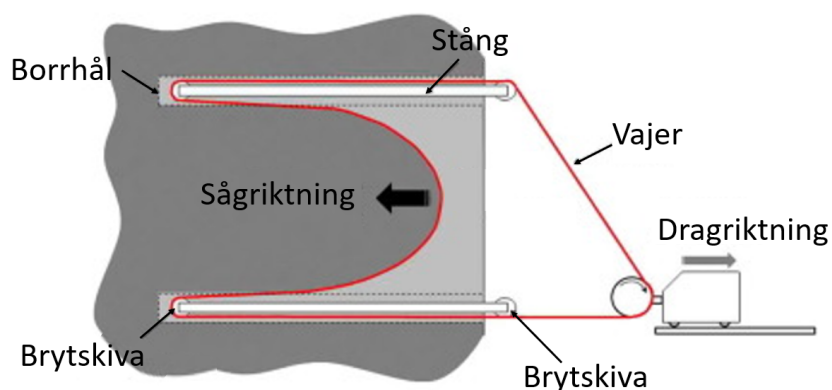
- Kravställa tillräcklig kompetens hos entreprenören som utför sågningen.
- Säkerställa tillräckligt utrymme för borrar av såghål och etablering av sågmaskin.

4.2 BLIND CUT-SÅGNING

4.2.1 Beskrivning

Blind cut är en alternativ sågmetod som endast kräver tillgång till en fri yta. Genomförandet går ut på att pressa vajern mot berget genom att löpa denna fram och tillbaka i två borrhål med hjälp av brytskivor som förs in i borrhålen. Metoden illustreras i Figur 6. För att erhålla tillräckligt utrymme för brytskivorna krävs att borrhålen är minst 150–250 mm stora, helst 250 mm. Ju större och färre brytskivor, desto högre effekt och mindre risk för vajerbrott. Borrhålen borrar vanligtvis med kärnborrade pilothål för att erhålla tillräcklig noggrannhet. Därefter kan hålen rymmas med antingen topphammardrivning eller sänkbörning. Det går även att kärnbörja 250 mm kärnborrhål. Detta passar bättre för korta hål, men är mindre lämpligt för längre hål på grund av ökad tidsåtgång och krävande hantering av stora borrhärnor.

Under 2011–2012 genomfördes ett forskningsprojekt i samband med uttaget av Citybanan i syfte att utvärdera tillämpbarheten för vajersågning av tunnelkonturen för SKB:s deponeringstunnlar¹⁴. I det projektet sågades tunnelkonturen med blind cut och varje hörn kärnborrades med 76 mm borrhål som sedan upprymdes med sänkbörning, se Figur 7. Detta gjordes i två omgångar; från 76 till 165 mm och sedan från 165 till 255 mm.



Figur 6 Blind cut-sågning¹⁷.

¹⁷ J. H. Lee, S. K. Ahn, K. C. Lee, C. S. Bang, J. H. Cho & M. Sagong. Wire saw cutting model development and performance investigation for vibration reduced tunnel excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63, 144–153. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.11.011>



Figur 7 Horisontell tunneldrivning med vadersågad kontur i Citybanan¹⁴.

4.2.2 Förutsättningar och begränsningar

Blind cut-sågning har en reducerad effekt på ca 35–50% jämfört med start- och slutsågning. Detta främst på grund av att vjern inte kan tryckas lika hårt mot berget då den riskerar att gå till brott vid snäva krökningar runt brytskivor. Utöver de begränsningar som nämns i avsnitt 4.1.2, tillkommer nedanstående^{10,13,16}:

- Reducerad sågeffekt jämfört med konventionell sågning då vajer inte kan tryckas lika hårt mot berget.
- Kräver stora borrhål, minst 150–250 mm för utrymme till brytskivor.
- Få entreprenörer har utrustning för bormning av större borrhål.
- Längre borrhål kräver maskiner för montering av stänger för brytskivor.
- Borrhålen för stänger och brytskivor måste vara 2–3 m längre än planerat snitt då vjern inte kan tryckas genom hela snittet, se tunneltaket i Figur 7.

4.2.3 Tekniska risker och arbetsmiljö

För blind cut sågning gäller i princip samma aspekter som nämnts i avsnitt 4.1.3.

4.2.4 Planering och projektering

Generellt bör samma aspekter beaktas som i start- och slutsågning, se avsnitt 4.1.4.

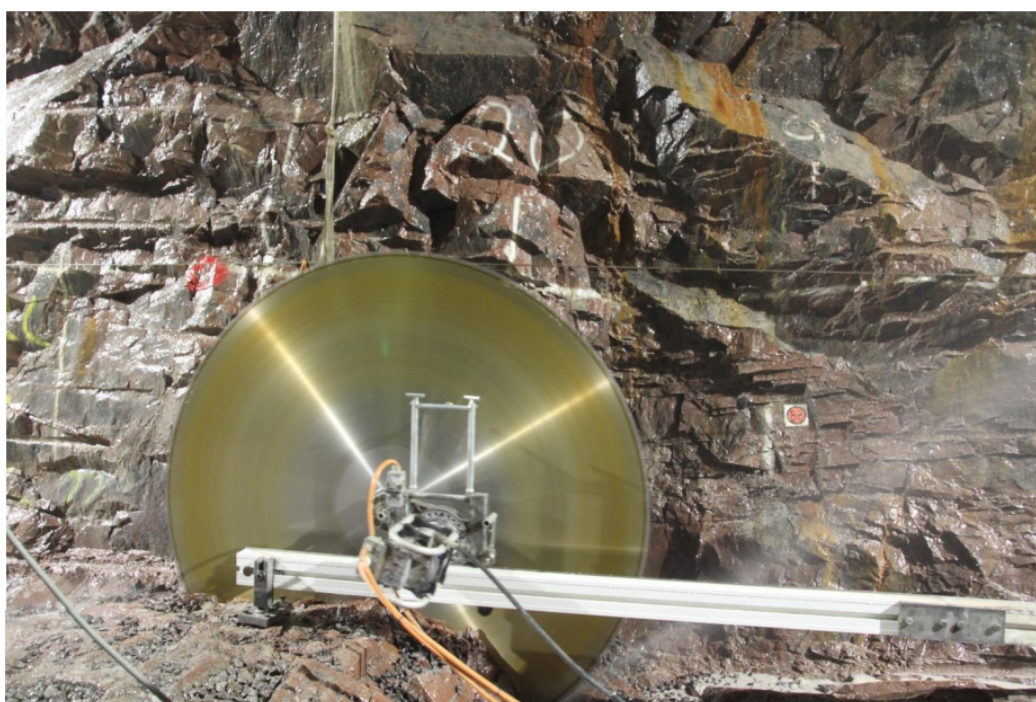
4.3 KLINGSÅGNING

4.3.1 Beskrivning

Klingsågning är vanligt inom byggindustrin för att såga genom betong, men användningen sträcker sig även till berguttag i begränsad omfattning¹⁸. Klingsågarna monteras på räls eller grävmaskiner och är vanligen försedda med

¹⁸ R. Enér. *Fallstudie och analys av vadersågningsentreprenad: i Äspölaboratoriet*. Högskoleexamensarbete, Luleå tekniska universitet, 2017

diamantsegment som slipar ner berget, likt vadersågning. De största sågarna monteras på grävmaskiner och kan vara upp mot 3600 mm i diameter^{19,20,21}. Klingsågning används vanligen i kombination med andra uttagsmetoder som spräckning och vadersågning. I Figur 8 används en rälsmonterad klingsåg för att såga vertikala slitsar i Äspölaboratoriet, där vajer ska löpa för att såga ut tunnelsulan¹⁸. I Figur 9 sågas vertikala slitsar i tunnelfronten med en grävmaskin för att skapa en fri yta för spräckning²². Med den senare metoden kunde tunneln avanceras 4–5 m per dag. Klingsågning med grävmaskin är dock inte etablerat i någon större utsträckning i Sverige. Detta beror troligen på grund av att sågningen blir dyr och tidskrävande i hårt kristallint berg.



Figur 8 Klingsåg på räls i Äspölaboratoriet¹⁸.

¹⁹ Yichen Environment Tech co. Ltd. Rock Saw. u.å. Rock Saw.

<https://ycattachments.com/products/rock-saw/>

²⁰ Echidna Diamond Tools & Machinery. u.å. D6HP Diamond Rocksaw.

<https://echidna.com.au/products/Diamond-Rocksaws/D6HP%20Diamond%20Rocksaw.php>

²¹ Aardvark Rock Tools. u.å. Rock Saws - Carbide & Diamond Cutting Systems.

<http://aardvarkrocktools.weebly.com/>

²² Yichen Environment Tech co. Ltd. 2023. Application of Rock Saw in Tunnel.

<https://ycattachments.com/application-of-rock-saw-in-tunnel-excavation/>



Figur 9 Klingsågning med grävmaskin i tunnel²².

4.3.2 Förutsättningar och begränsningar

Klingsågning begränsas till stor del av sågdjupet. De största sågarna på marknaden kan såga maximalt runt 1,5 m djupa snitt. Vid dessa större djup, kan det bli svårt för kylvattnet att tränga hela vägen ned i slitsen och kan då leda till ökat slitage på sågen. Detta gäller speciellt vid sågning av horisontella snitt, då spolvattnet dräneras från snittet²³. Eftersom sågklingan är cirkulär måste sågningen ofta kompletteras med slitsborrning i hörn.

Sågningen begränsas även av bergets egenskaper. Det är inte bara bergets hårdhet som styr utan även till stor del bergets kvartsinnehåll, ju högre kvartshalt desto mer slitage på klingan²³.

4.3.3 Tekniska risker och arbetsmiljö

Under sågning är det viktigt att ingen befinner sig inom sågbladets plan då flygande sten utgör stor risk för skada. Sågar monterade på räls kan radiostyras. Vid montering av såg på grävmaskin måste denna ha tillräckligt skydd mot stenkast eller splitter från klinga^{24,25}. Klingan måste vara stabil under sågningens

²³ Echidna Diamond Tools & Machinery. u.å. Frequently Asked Questions (FAQs). <https://echidna.com.au/KnowledgeCorner/FAQs.php?FAQ=13>

²⁴ Aardvark Rock Tools. u.å. Rock Saws – Operational Notes. <http://aardvarkrocktools.weebly.com/rock-saws---operational-notes.html>

²⁵ Solution Plant Hire. 2017. Essential Safety Equipment for Operating Excavator Saw. <https://www.solutionplanthire.com.au/blog/essential-safety-equipment-operating-excavator-saw/>

gång då plötsliga rörelser kan leda till att klingan splittras och skadar omgivning, detta ställer höga krav på operatören²⁴.

Eftersom sågen spolats under drift bildas inte mycket damm^{21,24}, men om ånga bildas kan den innehålla farliga partiklar och ställa krav på skyddsmask. Ett vanligt förekommande problem är att klingan kilar fast i berget. Detta kan bero på att:

- Klingan nyper fast på grund av höga bergspänningar.
- Klingan nyper fast på grund av icke-rigid montering.
- Klingan nyper fast på grund av underdimensionerad såg.

Mycket av utförandetiden för klingsågningen i Äspölaboratoriet (Figur 8) gick åt till att lossa klingor som kört fast i berget¹⁸.

4.3.4 Planering och projektering

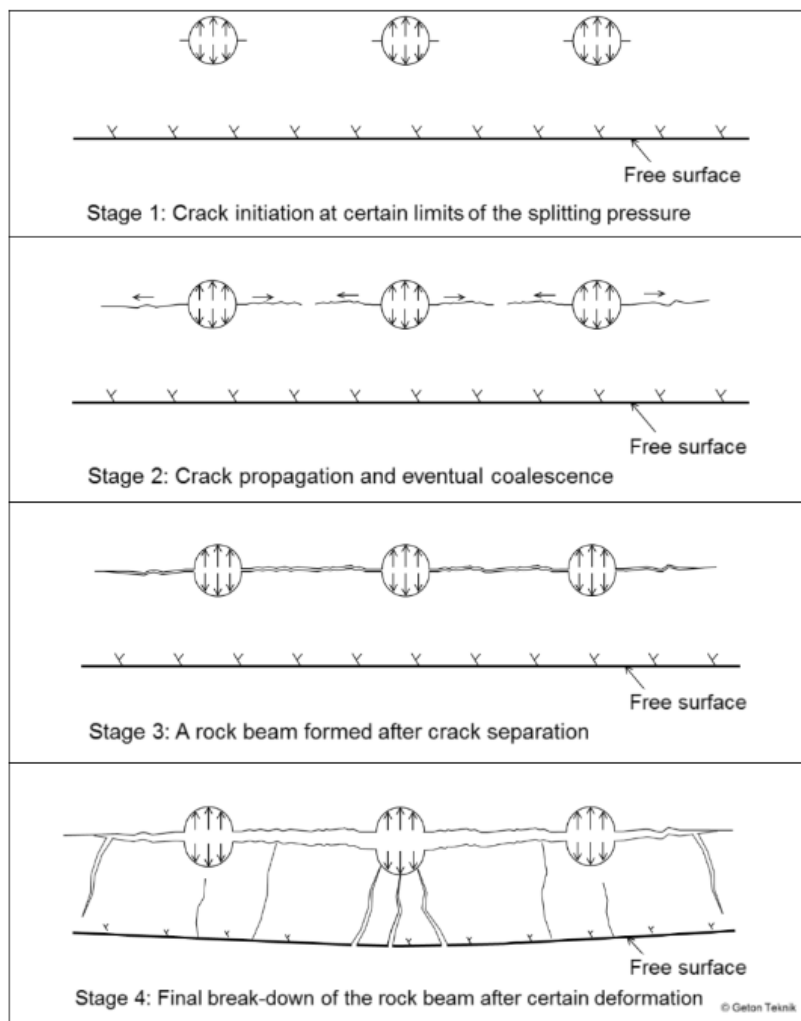
Sågning med klingsåg är en specifik och sällan använd metod för berguttag som kräver speciell kompetens. Av denna anledning kan det vara lämpligt att beskriva krav på den slutförda produkten (sågsnitt) med avseende på noggrannhet och acceptabla toleranser för avvikelse från teoretiskt läge och låta entreprenören bestämma metod för uttag och beskriva förfarandet i en arbetsberedning.

För att minimera risken för driftstopp och säkerställa bra arbetsmiljö bör följande aspekter beaktas vid planering av bergarbete med klingsåg^{18,24,25}:

- Säkerställa tillräckligt stark klingsåg för att minimera risk för driftstopp.
- Säkerställa fördefinierade åtgärder för lossning av klinga, t.ex. slitsborrning.
- Se till att splitterskyddad grävmaskin används om sågen monteras på sådan.
- Kravställa tillräcklig avspärrning för att undvika skador om klingan splittras.

5 Spräckning

Spräckning innebär succesiv sprickbildning i berg genom att överskrida bergets draghållfasthet. Detta görs genom att borra hål i berget och trycksätta borrhållsväggar, antingen genom en mekanisk, hydraulisk eller kemisk process, utan sprängmedel. Principen för mekanisk och hydraulisk spräckning är i regel densamma och i många fall är metoderna svåra att särskilja då den mekaniska processen ofta drivs hydrauliskt. I denna rapport klassas därför alla metoder som använder hydrauliska krafter för att spräcka berget som hydraulisk spräckning. Spräckning utförs från hål som angränsar till en fri yta, principen beskrivs i Figur 10. Spräckning utförs där det förekommer stränga krav på begränsning av vibrationer eller vid korta avstånd till känsliga konstruktioner. Vid tunneldrivning utförs spräckning oftast i kombination med sågning eller slitsborrning för att skapa fria ytor att spräcka mot¹⁶.



Figur 10 Spräckinitiering vid spräckning²⁶.

²⁶ U. Håkansson, Y. Chang & E. Ahnberg. *Hydraulic Splitting – An environment friendly rock excavation method*. Stockholm: SBUF, 2018.

5.1 HYDRAULISK SPRÄCKNING

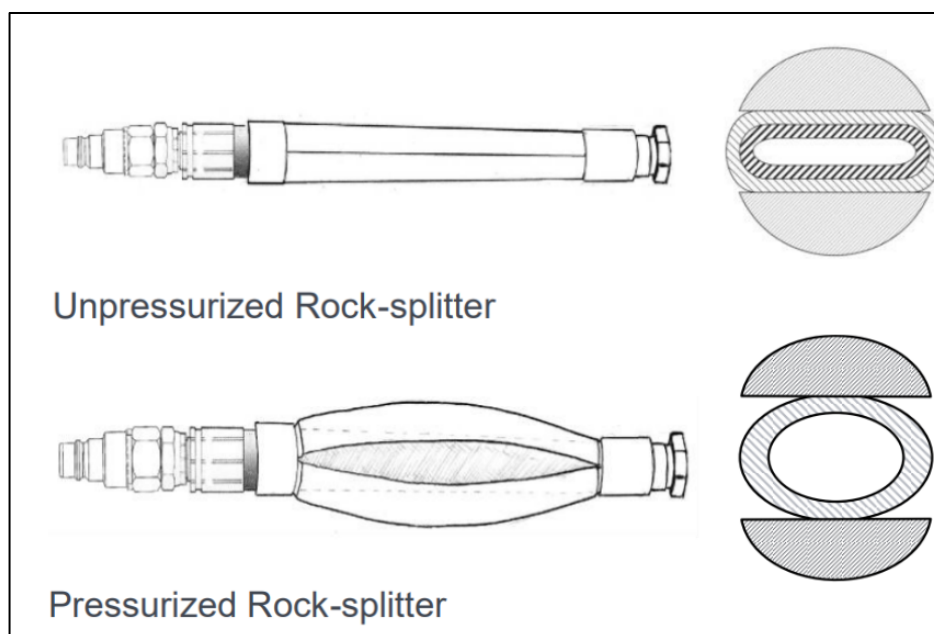
Hydraulisk spräckning är en bred term som omfattar all typ av sprickbildning i berg orsakat av hydraulisk vätska. Begreppet omfattar även fracking, som är vanligt förekommande i oljeindustrin och hydraulisk spräckning för bergspänningsmätningar. Hydraulisk spräckning som bergguttagsmetod definieras i detta avseende som spräckning med hydraulisk splitter.

Hydraulisk spräckning bör inte förväxlas med vattenspräckning som innebär skjutning av spräckpatroner i vattenfyllda borrhål²⁷. Vattenspräckning är inte lika skonsamt som hydraulisk spräckning och kommer därför inte att vidare beskrivas i denna rapport.

5.1.1 Beskrivning

Sprickbildningen initieras med en splitter som drivs hydrauliskt. Dessa kan vara handhållna eller monterade på maskiner. Exempel på vanligt förekommande varumärken är Darda, Rockbreaker Tools AB (SuperWedge) och Yamamoto. SBUF (Svenska Byggbranschens UtvecklingsFond) genomförde 2018 en förstudie för tillämpbarheten för hydraulisk spräckning inom bergbranchen²⁶.

Spräckningsutrustningen bestod av en splitter med en tillplattad hydraulisk slang och två stålplattor på vardera sida om slangen, se Figur 11. Splittern fungerar likt en tryckmanschett som placeras i borrhål och trycksätts med vatten. Detta gör att splittern expanderar och spräcker berget som sedan kan schaktas bort. Detta gjordes bland annat vid byggnationen av Nya Karolinska Solna, se Figur 12.



Figur 11 Hydraulisk splitter²⁶.

²⁷ E. Westerlund & A. Westerlund. *Icke-explosiva brytningsmetoder*. Filipstad: MinBaS II, 2011.
<http://www.minfo.se/minbas/122.pdf>



Figur 12 Spräckning av berg vid Nya Karolinska Solna med hydrauliska splitters²⁶.

Metoden har även använts framgångsrik i Follobaneprojektet i Norge för ett antal kritiska passager med befintliga tunnlar²⁸. I Follobaneprojektet borrades 656 hål i tunnelfronten som hade en tvärsnittsarea på ca 80 m², se Figur 13.

²⁸ T. K. Weydahl. *Ingeniørgeologisk analyse av resultater fra tunneldriving basert på "Drill & Split" ved Follobanen*. Examensarbete, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet NTNU Open, 2017



Figur 13 Borrad tunnelfront inför hydraulisk spräckning i Follobaneprojektet²⁸.

Borrhålen hade en diameter på 76 mm och en hållängd mellan 1,4–2 m. Spräckningen inleddes i mitten av stoffen där en fri yta hade etablerats genom slitsborrning (överlappande borrhål, se Figur 13). I projektet utfördes spräckningen med en hydraulisk SuperWedge-splitter, monterad på en grävmaskin, se Figur 14. Det har även funnits exempel där utrustningen har monterats direkt på borbommen på borrhägar.

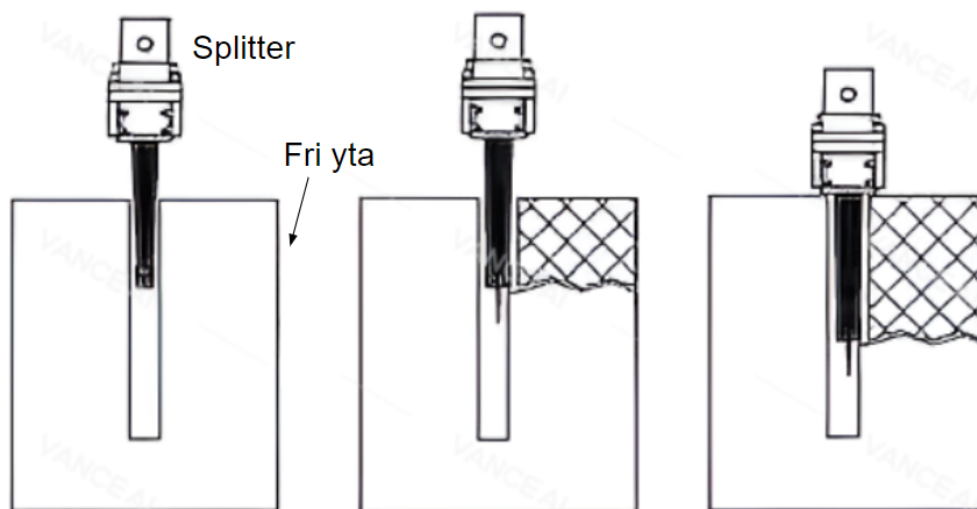


Figur 14 SuperWedge monterat på grävmaskin²⁸.

Den hydrauliska splittern har en total längd på ca 2 m som inkluderar en kil på 0,7–1 m. Kilen består av tre delar; två vinklade ytterkilar med en hydrauliskt driven kil emellan. Kilen förs in i borrhålen och den mittersta kilen pressas in i hålet så att de yttre kilarna expanderar och spräcker berget. Beroende på borrhållängden kan spräckningen behöva utföras i två omgångar, se Figur 15. Den nedre delen av hålet kan behövas skyddas med plaströr. Tidsåtgången för

spräckning är störst för spräckning av inspända delar i sektion, särskilt i hörn mellan vägg och botten. I vissa fall kan spräckning utföras för att utvidga en tidigare sprängd tunnel (t.ex. en pilotunnel).

Tunneldrivning för Follobaneprojektet utfördes med en framdrift mellan 0,5–1 m/dag med en 80 m² tunnelfront. Detta gjordes i kristallint berg med en intakt tryckhållfasthet runt ca 100–150 MPa. Framdriften ökar vid sämre berg och det är en fördel om bergets Q -värde är <10. Uppsprucket berg med mycket sprickfyllnad är fördelaktigt för spräckning, men även maskinförarens erfarenhet har också viss betydelse för spräckningshastigheten.



Figur 15 Spräckning av hål i två omgångar, modifierad efter²⁹.

Hydraulisk spräckning kombineras ofta med andra metoder som sågning och/eller kemisk spräckning. Figur 16 visar exempel på bergschaktarbete vid Henriksdals reningsverk som utfördes genom en kombination av hydraulisk spräckning, kemisk spräckning och blind cut-sågning.

²⁹ M. F. Lawton, H. K. Andersen, H. W. Sagen, J. B. Jansen, G. O. Larsen. Jernbaneverket. *Drill and split, a feasible option to careful blasting – The Follo Line Project*. Oslo: Fjellsprengningsdagen 2016.



Figur 16 Berguttag i Henriksdals reningsverk som gjorts i kombination med flera metoder. Tunneltaket är uttaget med kemisk spräckning, väggarna är blind cut-sågade och resten har brutits med hydraulisk spräckning (Foto: Christer Skönnerud).

5.1.2 Förutsättningar och begränsningar

Spräckningen förutsätter en närliggande fri yta. I samband med tunneldrivning är berget inneslutet och då krävs sågning, sprängning eller slitsborrning för att skapa en fri yta att spräcka mot. Borrhålen måste även vara tätborrade för att erhålla tillräcklig spräckningskapacitet vilket tar lång tid. En sammanfattning av identifierade begränsningar och förutsättningskrav ges nedan:

- Kräver fri yta att spräcka mot.
- Kräver tätborrade hål vilket tar lång tid att borra.
- Kräver hög noggrannhet på hålavstånden.
- Spräckningen tar ofta lång tid, speciellt i inneslutet och inspänt berg.
- Kan inte spräcka mer än ca 1 m djupt, djupare uttag måste göras i omgångar.
- Berget kan behöva lossas med hydraulhammare efter spräckning.

5.1.3 Tekniska risker och arbetsmiljö

En kontrollerad sprickbildning medför inga större arbetsmiljörisker. Metoden bildar varken mycket damm eller buller och det bildas inga gaser i samband med uttaget. Spräckningen kan medföra viss risk för stenkast och utfall från tunneltak.

Dessa risker förekommer även vid efterföljande moment som knackning och skrotning, men är inte högre jämfört med skrotning efter sprängning¹⁶.

5.1.4 Planering och projektering

Berguttag med hydraulisk spräckning kräver speciell kompetens. Av denna anledning kan det vara lämpligt att specificera bergvolymen som ska tas ut och ställa krav på den slutförda produkten (slutgiltig kontur) i form av acceptabla toleranser för avvikelser från teoretiskt läge och lämna viss frihet för entreprenören att själv styra utförandet.

5.2 KEMISK SPRÄCKNING

5.2.1 Beskrivning

Kemisk spräckning genomförs med expanderande bruk, även kallat expanderande kemikalier, spräckmedel eller expansivcement. På engelska samlas dessa under det mer enhetliga begreppet "*Soundless chemical demolition agents*" (SCDA).

Snigeldynamit, Snigamit och Dynacem är exempel på vanligt förekommande produkter. Metoden går ut på att fylla borrhål med ett kalkbaserat bruk som, när det blandas med vatten, härdar och expanderar. Detta utvecklar ett tryck som spräcker berget, se Figur 17. Förloppet tar olika lång tid beroende på vilket tryck som krävs och hur snabbt trycket kan utvecklas. Detta kan ta mellan ett par timmar upp till 3 dygn. Efter spräckning knackas berget loss med maskin. I övrigt liknar uttagssekvensen den för konventionell sprängning där ofta samma maskiner kan användas^{27,30}.



Figur 17 Kemisk spräckning av ovanjordsberg³¹.

På senare år har intresset för metoden ökat avsevärt. Trots detta har den ännu inte prövats som ett fullständigt substitut till konventionell tunneldrivning under

³⁰ K. M. Habib, S. Shnorhokian & H. Mitri. Evaluating the application of rock breakage without explosives in underground construction—a critical review of chemical demolition agents. *Minerals*, 12(2), 220. 2022. <https://doi.org/10.3390/min12020220>

³¹ Dexpan. 2005. Swimming Pool Rock Excavation, Cracking, Removal. Dexpan Project R002. <https://www.dexpan.com/pages/dexpan-project-r002-swimming-pool-rock-excavation>

jord³⁰. Detta beror främst på att berg under jord kräver högre tryck för att spräckas, dels på grund av begränsningen av fria ytor, men också för att berget ofta är mindre eroderat och mer kompetent. I praktiska sammanhang tar det för lång tid för bruket att utveckla det tryck som krävs för att spräcka berg för konventionellt berguttag under jord. Metoden används därför oftast för spräckning av betong eller ovanjordsberg och den erfarenhet och forskning som finns idag är främst riktad mot detta användande. Dock finns exempel på tillämpning under jord för speciella uttag där det ställts höga krav på skonsamhet, t.ex. vid byggnationen av Henriksdals reningsverk, se Figur 18.



Figur 18 Tunnelkontur efter kemisk spräckning under jord vid Henriksdals reningsverk (Foto: Christer Skönnerud).

5.2.2 Förutsättningar och begränsningar

Kemisk spräckning föredras i homogent berg. Vid brytning av kontur i uppsprucket berg finns risk för att konturen tränger in djupare än planerat¹⁶. Metoden begränsas till stor del av den tid det tar för bruket att härda och uppnå tillräckligt tryck för spräckning av hårt berg.

Det finns olika bruk för olika temperaturer, men generellt är bruket känsligt för låga temperaturer³² och kan vara svårt att använda i berg vid temperaturer under 5 °C. Värmemattor kan användas för att spräcka i låga temperaturer eller för att påskynda hårdningen. Höga temperaturer i berg eller bruk ökar risken för utblåsning, vilket innebär att bruket härdar för fort och sprutar/blåses ur hålet.

³² A. S. Natanzi. (2017). *Soundless chemical demolition agents performance under cold and cool temperatures in concrete and masonry structures*. Doktorsavhandling, Irland: University College Dublin, 2017

Högre vattenhalt minskar brukets tryckkapacitet³³. Borrhålen måste därför vara torra vid laddning för att inte påverka vattenhalten i bruket. I vattenförande berg kan plaststrumpor installeras i borrhålen för att hindra vatteninläckage.

5.2.3 Tekniska risker och arbetsmiljö

Vid större uttag där spräckning utförs i flera hål samtidigt kan sprickinitieringen vara svår att förutse och kontrollera. Då ökar risken för oönskat berguttag och skada på konturen. Vid större uttag kan det därför krävas speciell kompetens vid bestämning av hålsättning och laddning av bruk.

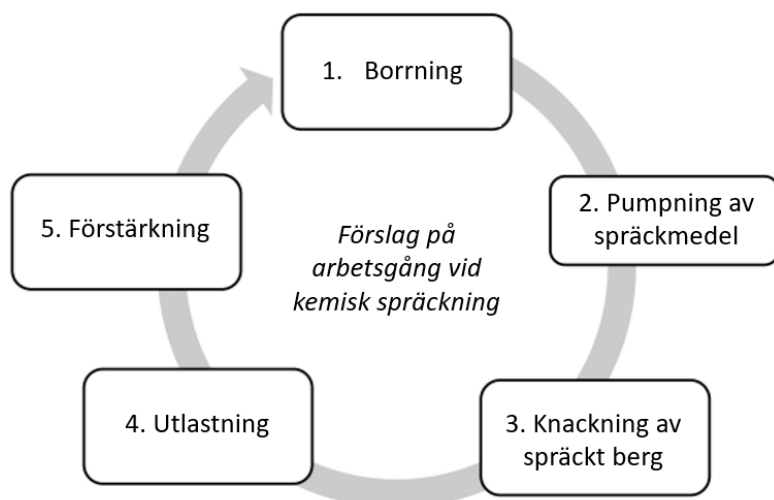
Kemisk spräckning är en relativt säker metod ur ett arbetsmiljöperspektiv. Metoden orsakar inte mycket vibrationer, buller, stenkast, eller gaser³⁰. Bruket består av osläckt kalk och kan damma vilket ställer krav på andningsmask och skyddsglasögon. Extra försiktighet bör vidtas vid laddning i varmt berg, t.ex. i ovanjordsberg på sommarhalvåret, då risken för utblåsning är stor.

5.2.4 Planering och projektering

Vid projektering av kemisk spräckning kan det vara fördelaktigt att planera arbetet utifrån spräckningstiden för att minimera stillestånd. Tiden det tar för tillräcklig sprickbildning varierar beroende på rådande förutsättningar och kan vara svår att förutse. Det finns metoder för uppskattning av tryckökning utifrån bland annat tid och temperatur³⁴ men i praktiska sammanhang kan det vara fördelaktigt att uppskatta spräcktiden utifrån in-situ experiment i det rådande berget och planera uttagssekvensen utefter observerade resultat. Arbetsförloppet är relativt enkelt och uttag kan liknas med konventionell sprängning, se Figur 19. Vid komplicerade uttag, t.ex. vid höga krav på konturhållning eller svår geometri, bör speciell kompetens krävas. Detta eftersom sprickförloppet kan vara svårt att kontrollera vid laddning av flera hål samtidigt. Likt hydraulisk spräckning, kan det vara fördelaktigt att specificera toleranskrav på konturen och lämna frihet åt entreprenören att själv planera utförandet, om denne erhåller tillräcklig kompetens.

³³ J. Hinze & J. Brown. Properties of soundless chemical demolition agents. *Journal of construction engineering and management*, 120(4), 816–827. 1994. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1994\)120:4\(816\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1994)120:4(816))

³⁴ R. V. De Silva, R. Pathegama Gamage & M. S. Anne Perera. An alternative to conventional rock fragmentation methods using SCDA: a review. *Energies*, 9(11), 958. 2016. <https://doi.org/10.3390/en9110958>



Figur 19 Arbetsgång vid tunneldrivning med kemisk spräckning³⁰.

6 Borrning

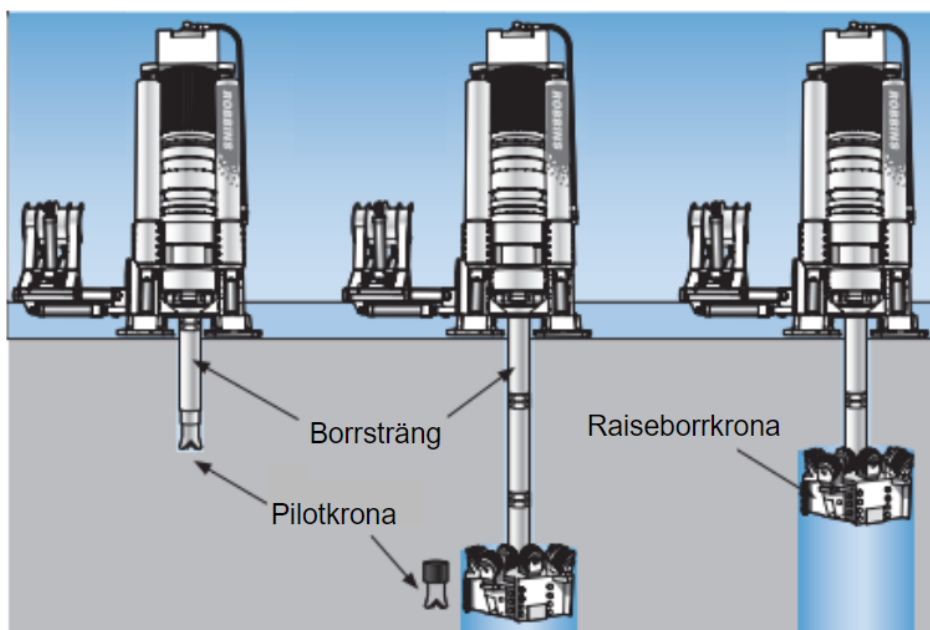
6.1 RAISEBORRNING

Detta avsnitt avser endast rymning mellan två nivåer (s.k. backreaming). Uppåt- och nedåtriktad rymning (upreaming/downreaming) kräver endast en nivå men är i övrigt likartade³⁵.

6.1.1 Beskrivning

Raiseborrning används för uttag av större berghål mellan två nivåer, två bergrum eller mellan bergrum och markyta. Utförandet sker i två steg: först borras ett pilothål. Efter genombrytning ersätts borrkronan med en större raiseborrkrona som borras/dras tillbaka och utvidgar borrhålet på tillbakavägen, så kallat rymning, se Figur 20. Borrkaxet faller till undre bergrummet där det lastas ut³⁵. Diameter på schakten kan variera mellan 0,3–8 m och längder mellan 10–2 000 m^{36,37}. Schakten borras vanligtvis i lutningar mellan 45–90° från horisontalplan men maskiner kan ofta modifieras för ännu flackare schakt, men då krävs att borrkaxet lastas ut eller spolat ut med vatten^{10,35}.

Metoden medför höga initiala kostnader och används därför i regel för uttag av längre schakt.



Figur 20 Raiseborrningsprocess³⁸.

³⁵ M. Elgenklöw. Atlas Copco Rock Drills AB. *Mekanisk borrning av öppningsstigar - Raiseboring*. Örebro: Svenska Bergteknikdagen 2002.

³⁶ Styrud Ingenjörskontor AB. u.å. Raiseborrning – Metodblad. <https://styrud.se/metod/raiseborrning/>

³⁷ Herrenknecht. 2023. Raise Boring Reaming Heads and Cutting Tools.

<https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/raise-boring-reaming-heads-and-cutting-tools/>

³⁸ M. Eklind. *Raiseboring in Mining and Construction*. Atlas Copco Rock Drills AB, 2008.

6.1.2 Förutsättningar och begränsningar

Raiseborrning begränsas till stor del av den tid och kostnad som krävs för etablering. Borrmaskinen kräver en stabil borrhålsplats som oftast innebär ett gjutet betongfundament som maskinen monteras på. Vid borrning i sämre berg krävs injektering av bergmassan, dels vid pilotborrning för att erhålla tillräckligt vattentryck för spolning av borrhaxet, men också vid rymning för att minska risken att borrhålskronan fastnar³⁹. Begränsningar och förutsättningar för metoden sammanfattas nedan^{10,38,39}:

- Maskinen måste oftast etableras på betongfundament vilket är tidskrävande.
- Högt investeringskostnad för maskin.
- Vattentillgång och system för vattenrening vid borrning av pilothål.
- Det kan krävas förinjektering av bergmassan för att förhindra rasrisk och minska risken för att pilot- eller raiseborrhålskronan kör fast.
- Vid borrning av längre hål med höga precisionskrav krävs styrd pilotborrning.
- Borrmaskinen kräver mycket ström.
- Kräver ca 6x10 m utrymme för borrhåls och utrymme för upplag av borrhålssträngar.
- Det är besvärligt att förstärka under borrningens gång, berget bör därför vara tillräckligt stabilt för att förhindra ras.

På grund av de höga initiala kostnaderna kan vadersåkning ofta vara ett lämpligare alternativ för kortare schakt¹⁰.

6.1.3 Tekniska risker och arbetsmiljö

Vid strömbrott under pilotborrning slutar spolvattnet att cirkulera och borrhaxet sjunker till borrhålsbotten som då fastnar och kan vara mycket svårt att lossa. Det kan därför vara fördelaktigt med reservaggregat för el³⁹.

Innan påbörjad rymning bör bergytan ovan kronan vara tillräckligt utjämnad för att undvika ojämna stresspåslag på borrhålskronan. Under rymning faller borrhaxet ner genom schaktet och måste lastas underifrån vilket utgör en risk för maskiner och personal som kan skadas av fallande block. Detta kan till viss del motverkas genom att sätta upp en skärm/kjol under schaktet för att skydda mot fallande berg. I sämre berg kan schaktet kollapsa under borrhålskronan och sätta igen schaktet vilket inte tillåter borrhaxet att falla. Bergmassorna måste då avlägsnas/sprängas innan rymningen kan fortsätta³⁹. Dåligt berg kan även riskera att borrhålskrona och sträng kör fast under borrning. Det är inte möjligt att förstärka berget under rymningens gång.

6.1.4 Planering och projektering

Vid projektering inför raiseborrning bör följande tas till hänsyn³⁹:

- Kravställa kartering av pilothål om de ska borraras med kärnborrning.
- Krav på tillgång till nödströmsförsörjning för spolning vid pilotborrning.
- Tydliggöra krav på tillåten avvikelse för pilotborrhål.

³⁹ P. Stakne. Basic considerations and practical experience with the boring of deep shafts by the raise boring process. *Geomechanics and Tunneling* 8, No. 1. 2015. <https://doi.org/10.1002/geot.201400056>

- Se till att bergytan ovanför borrhkronan är tillräckligt jämn innan denna monteras.
- Kravställa toleranser för avvikelse av pilothål.
- Säkerställa att inget borrhkax kan studsas på kaxhögen och skada personal eller maskineri. T.ex. genom att kräva montering av skärm/kjol runt botten av schaktet.

6.2 FULLORTSBORRNING

6.2.1 Beskrivning

Fullortsborrning görs med en fullortsbormaskin (TBM) som krossar berget med hjälp av en cirkulär borrhkrona⁴⁰. Principen liknar den för raiseborrning men där hela maskinen istället befinner sig i utrymmet den skapar och driver sig själv framåt genom att trycka mot omgivande berg eller befintlig lining. Maskinerna finns i flertalet olika utföranden beroende på bland annat bergets egenskaper och behov av förstärkning. Dessa sammanfattas översiktligt i Figur 21. Ofta skräddarsys maskinen efter projektspecifika förhållanden vilket leder till lång uppstartstid och höga investeringskostnader. Fullortsborrning lämpar sig därför oftast för längre, kilometerlånga tunnlar⁴⁰.

Microtunnling är en liknande metod och är i princip en mindre TBM (MTBM) med en diameter runt 1–3 m, se Figur 22. Dessa används vanligen för dragning av kablar eller dagvattentunnlar. Metoden är mer flexibel och kan implementeras med kortare uppstartstid än konventionell fullortsborrning. MTBM-tunnlar lämpar sig för kortare sträckor, under 1 km^{40,41}.

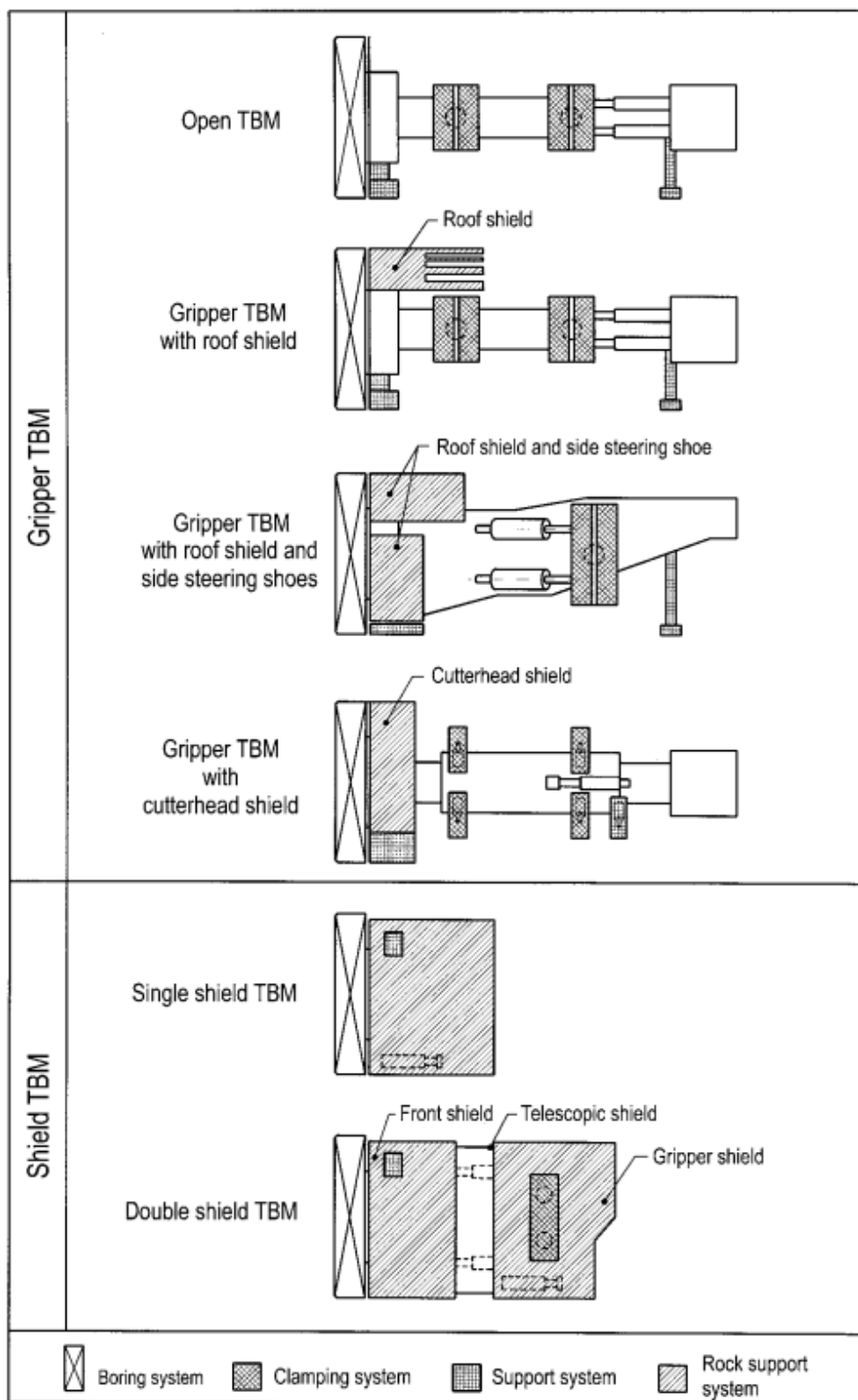
Uttag med fullortsborrning är en automatiserad process med låga arbets-/personalkostnader och bra arbetsförhållanden. Tunnelprofilen blir i regel mycket jämn med lite överberg. Metoden kräver dock utförliga geologiska undersökningar och relativt homogent berg för att kunna tillämpas i rimlig mån⁴⁰.

Exempel på ett projekt där fullortsborrning genomförts i Sverige är borrningen Ormentunneln 1992. Tunneln borrades med en 3,5 m TBM som återanvändes från borrningen av Saltsjötunneln 1987. Berget längst den 2735 m långa tunnelsträckan bestod till största del av gnejs och granit och borrades med en genomsnittlig drivningshastighet runt 2 m/h. Fullortsborrningen tog 1 år att borra och kostade ca 40 miljoner kr⁴².

⁴⁰ B. Maidl, L. Schmid, W. Ritz & M. Herrenknecht. (2008). *Hardrock tunnel boring machines*. Berlin: Ernst & Sohn, 2008.

⁴¹ J. Lundberg. JohanLundbergAB. 2023. Mikrotunnling, TBM (metod). <https://johanlundberg.se/wiki/mikrotunnling-tbm-metod/>

⁴² N-O. Sundin & B. Karlsson. *Fullbörning av Ormentunneln, Stockholm*. Stockholm: Stiftelsen Bergteknisk Forskning - BeFo, 1992. <https://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/217/R451192.pdf>



Figur 21 Sammanfattning av olika utföranden för fullortsbormaskiner⁴⁰.



Figur 22 Installation av en MTBM i schakt (Foto: BAB Rörtryckning AB).

6.2.2 Förutsättningar och begränsningar

Fullortsborrning kan ge höga drivningshastigheter under rätta förhållanden men saknar den flexibilitet som finns gentemot konventionell sprängning och övriga metoder. Trots att maskinerna kan anpassas till många olika geologiska förutsättningar kan varierande geologi ge upphov till frekventa driftstopp, t.ex. för byte av kuttrar, avlägsnande av material eller injektering av bergmassan, vilket påverkar drivningshastigheten avsevärt^{40,43}. Ofta utgör effektiv borrning endast en bråkdel (~15–50%) av den totala arbetstiden^{40,42}. Övriga begränsningar sammanfattas nedan^{40,42,44}:

- Metoden saknar flexibilitet för variationer i geometri och bergförhållanden.
- Tunnelprofilen begränsas av borrhjuls cirkulära form.
- Ger en cirkulär tunnelbotten.
- Kräver mycket bra kännedom om rådande geologi vid projektering.
- Uttag av snäva kurvor är inte möjligt.
- Har icke-flexibla lösningar för injektering och bergförstärkning.
- Kräver relativt homogena geologiska förutsättningar.
- Hårt berg sliter mycket på kutters som då måste bytas oftare.
- Kräver mycket ström.
- Kräver hantering av borrhjul som är svårt att återanvända.
- Kostsam och tidskrävande etablering.
- Lång uppstartstid för projekt.
- Levereras i segment och måste monteras på plats (med undantag för mindre MTBM). Segmenten kan vara svåra att transportera.
- Begränsas till uttag på en front (per maskin).

⁴³ DAUB-Working Group. *Recommendations for the Selection of Tunnel Boring Machines*. Köln: DAUB, 2022.
https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec1/2021-03_DAUB_Recommendations_for_the_selection_of_tunnel_boring_machines.pdf

⁴⁴ Tyrens. *Teknisk och Miljömässig Utredning – Alternativ Utsläppspunkt Gryaab*. Tyrens
<https://www.gryaab.se/wp-content/uploads/2017/09/3-Bilaga-M7-Tekniska-mojligheter-till-en-ny-utslappspunkt-Tyrens.pdf>

- Stora osäkerheter och metodens icke-flexibilitet gör det svårt att uppskatta kostnader.

6.2.3 Tekniska risker och arbetsmiljö

På grund av begränsat utrymme under drift kan alternativa lösningar för injektering och förstärkning av bergmassan vara krångliga att genomföra och ta längre tid än beräknat. Det krävs god kunskap om bergmassans kvalitet och konduktivitet för att rätt typ av fullortsrigg köps eller hyrs in för uppdraget.

Metoden kan anses ge bättre och säkrare arbetsmiljö jämfört med konventionell sprängning⁴². Detta förutsatt att system för hantering av damm och värme fungerar som de ska. Nackdelar är de trånga utrymmen som erhålls då maskinen tar mycket plats.

6.2.4 Planering och projektering

Fullortsborrning är en omfattande metod med många aspekter som måste beaktas. Det anses inte rimligt att beskriva alla relevanta moment och aspekter här, en hänvisning ges till "*Hardrock tunnel boring machines*" av Maidl m.fl.⁴⁰ som beskriver metoden utförligt.

6.3 SLITSBORRNING

Slitsborrning, även kallat sömborrning, utförs genom att borra överlappande hål för att skapa en slits i berget. Detta kan göras i olika utföranden; med hammarborrning eller kärnborrning och med olika håldiametrar. Metoden är mycket flexibel och kan ofta utföras med befintlig borrarutrustning på plats. Slitsborrning är heller inte lika känslig för sämre geologi som vadersågning. En nackdel är att utförandet tar lång tid. Figur 23 visar genomförd slitsborrning i Äspölaboratoriet för att skapa en slits för vadersågning av tunnelsulan.



Figur 23 Slitsbörning i Äspölaboratoriet med sågad tunnelsula¹⁸.

6.4 KÄRNBORRNING

Kärnbörning innebär borrning med en cylinderformad och ofta diamantförsedd, borrarbana som drivs nedåt med borrar i sektioner. Borrningen sker med hög precision och används i sammanhang där stränga krav på avvikelser föreligger. En intakt bergkärna erhålls under borrningen vilket gjort metoden mycket populär vid prospektering och geologisk undersökning av berg. Borrningen kan göras med eller utan styrning och används även för att borrar pilothål för upprymning, t.ex. vid borrning av hål inför blind cut-sågning^{14,45}.

Borrningen sker relativt långsamt, ett 76 mm hål kan borrar i ca 1 m/h i snitt. Vid större kärndiametrar kan kärnhanteringen bli problematisk.

6.5 HAMMARBORRNING

Hammarbörning kan utföras på många olika sätt och används oftast inför ledningsdragning. Borrningen kan göras styrd eller icke-styrd och kan även användas för upprymning av kärnborrhål. Icke-styrd hammarbörning kan inte göras med samma precision som kärnborrhål och avviker lätt vid kontakt med ojämnheter i berget.

Dimensioner kan variera upp till ca 1 m i diameter⁴⁶. Drivningshastigheter varierar runt 3–5 m/h.

⁴⁵ Styrud Ingenjörskontor AB. 2023. Kärnbörning – Metodblad. <https://styrud.se/wp-content/uploads/2023/03/Karborning.pdf>

⁴⁶ Styrud Ingenjörskontor AB. 2023. Hammarbörning – Metodblad. <https://styrud.se/wp-content/uploads/2018/05/Hammarborning.pdf>

7 Övriga metoder

Det finns ett antal speciella skonsamma metoder som inte diskuteras i detta arbete. Detta beror på att metoderna ansetts som för specifika, inte bedömts ekonomiskt hållbara eller inte bedömts som relevanta för uttag i skandinaviskt berg. Detta inkluderar metoder som fräsning, termisk spjälkning, knackning, foam injection (CFI), plasmaprängning (PBT) och brytning med superkritisk koldioxid (SC-CO₂)^{27,30,47}.

⁴⁷ T. Lindqvist. Sprängningsfria metoder för bergchakt. *AMA-nytt – Anläggning*. 2012-11-08.
<https://byggkoll.byggjtjanst.se/artiklar/2012/november/sprangningsfria-metoder-for-bergschakt/>

8 Tid- och kostnadsuppskattning

De metoder som presenteras i denna rapport används vanligtvis för speciella berguttag med unika platsspecifika förutsättningar. Dessa förutsättningar har oftast stor påverkan på både tid och kostnad för berguttaget. Av denna anledning är det svårt att generalisera och ange enhetspriser och tidsuppskattning för de olika metoderna. De angivna kvantitativa tids- och kostnadsuppskattningar för respektive metod måste därför tolkas med stor eftertanke då samtliga värden är mycket beroende på rådande förutsättningar och som i vissa fall är baserade på äldre litteratur som inte nödvändigtvis återspeglar dagens prisnivåer.

8.1 KVANTITATIVA TID- OCH KOSTNADSUPPSKATTNINGAR

8.1.1 Skonsam sprängning

Det hittades inga kvantitativa kostnadsuppskattningar för skonsam sprängning i litteraturstudien. Utifrån de intervjuer som genomförts i arbetet är skonsam sprängning oftast den snabbaste och billigaste metoden för skonsamt berguttag. Metoden är därmed oftast en bergentreprenörs förstahandsval om man kan uppnå ställda krav på skonsamhet och omgivningspåverkan.

8.1.2 Vajersågning

Lönnelid¹⁶ presenterar följande tids- och kostnadsuppskattningar för vajersågning:

- Etablering: 1 h–1 dag och 5 000–50 000 kr, givet färdig bädd till vajersåg, färdigborrade hål och tillgång till el och vatten.
- Sågning: 4–15 m²/h effektiv sågtid. 1 400–4 000 kr/m² för start- och slutsågning och 5 000–8 000 kr/m² för blind cut, beroende på om hålen är färdigborrade eller ej.

8.1.3 Klingsågning

Enér¹⁸ uppskattade den totala kostnaden för klingsågning av 882 m² i Äspölaboratoriet till 2 580 570 kr. Detta motsvarar ca 3 000 kr/m². Varje såg beräknades såga ca 0,5 m²/h effektiv sågtid. Han noterade att sågarna tenderade att nypa fast i berget och att mycket tid gick åt att lossa dem. Sågarna var mellan 800–1 800 mm i diameter och monterades på räls.

8.1.4 Hydraulisk spräckning

Lönnelid¹⁶ anger följande värden:

Etablering inför spräckning innebär transport av maskiner till plats, vilket kostar ungefär 10 000–15 000 kr beroende på transportsträckan.

Ovan jord: 15–50 m³/dag och 1 500–3 000 kr/m³.

Under jord: 2,5–25 m³/dag och 5 000–15 000 kr/m³.

Tid- och kostnadsuppskattningarna ges under olika förutsättningar och varierar till stor del beroende på huruvida vadersågning av tunnelkonturen antas medräknas eller ej.

8.1.5 Kemisk spräckning

Projektet har inte lyckats tillgå mycket information om kostnad för kemisk spräckning. En äldre publikation av SBUF (1986)⁴⁸ anger 1 500 kr/m³ för ovanjordsspräckning, inklusive borrar, laddning och bortschaktning. Bruket kostar ca 40 kr/kg och det rekommenderas 15 kg/m³ berg⁴⁹. Spräckningen tar ofta mellan 5–24 h efter laddning³⁴, men kan ta upp till 3 dygn.

8.1.6 Raiseborrning

Stakne³⁹ anger:

Etablering: 5–7 dagar givet ett färdiggjuttet fundament.

Borrning av pilothål: 0,75–1,5 m/h.

Rymning: 0,2–2 m/h.

Hedgärde¹⁰ anger:

Etablering: 2–5 veckor för förberedning av platsen för borrar, inklusive gjutning och torktid för betongfundamentet och 2–3 dagar för montering av maskin. Kostnad anges mellan 150 000–500 000 kr, det framgår inte vilka moment som inräknas.

Borrning av pilothål: 2 m/h och 3 000–10 000 kr/m.

Rymning: 1 m/h och 10 000–30 000 kr/m.

8.1.7 Fullortsborrning

Det anses inte rimligt att uppskatta generella värden för fullortsborrning med TBM eller MTBM. Vid byggnationen av den 2 735 m långa Ormentunneln 1991, uppskattades fullortsborrningen kosta ca 40 miljoner kr. Maskinen hade en genomsnittlig framdrift på ca 2 m/h under effektiv borrar⁴² (Sundin & Karlsson 1992). Tyréns⁴⁴ uppskattade kostnaden för fullortsborrning av en 11 km lång och 4 m bred ledningstunnel till 750 miljoner kr.

8.1.8 Kärnborrning

Hedgärde¹⁰ anger ca 15–20 m/dag och 1 000–2 500 kr/m för kärnborrning.

⁴⁸ SBUF. *Hålltagning i grundmurar - SBUF informerar*. Nr 86:03. Stockholm: Svenska Byggbranchens Utvecklingsfond, 1986-08-24. <https://www.sbuf.se/projektresultat/projekt?id=51f635d2-e240-468a-a0c4-ee6849090747>

⁴⁹ GG Gnejsgranit AB. 2023. Om Spräckmedel. <https://gnejsgranit.se/snigeldynamit/>

8.1.9 Hammarborrning

Få kostnadsuppskattningar påträffades i litteraturstudien. Vid borrning för bergvärme borrar oftast runt 110–150 mm diameters hål som kostar i genomsnitt ca 300 kr/m borrhål^{50,51}.

8.1.10 Slitsborrning

Inga kostnadsuppskattningar påträffades i litteraturstudien. Metoden kan vara billigare än sågning vid mindre uttag (slitsar) då etableringen är betydligt enklare. För större slitsar är metoden mycket tidskrävande och i dessa fall bör andra metoder som t.ex. sågning övervägas.

8.2 KVALITATIV BEDÖMNING OCH JÄMFÖRELSE AV METODERNA

En kvalitativ bedömning för respektive skonsamma metod har utförts baserat på utförda intervjuer, litteratur och författarnas erfarenhet avseende följande parametrar:

- Tid och kostnad för etablering
- Tid och kostnad för utförande
- Metodens vibrationsalstrande effekt
- Metodens bedömda skonsamhet
- Metodens flexibilitet
- Risk för avvikelse (t.ex. oförutsedda händelser)

Bedömningen har utförts för att i största möjliga mån möjliggöra jämförelse av metoderna. Dock bör det poängteras att många av dessa metoder används i kombination med varandra. Bedömningen redovisas i Tabell 3 och har gjorts utefter en plus/minus skala där +++ innebär mest gynnsamt (snabbast/billigast/bästa resultat) och --- innebär minst gynnsamt (långsammast/dyrast/sämst resultat). En bedömning av risk för avvikelse (dvs. risk för oförutsedda händelser) för respektive metod har också utförts. Riskbedömningen ges enligt en skala mellan 1–5, där 1 representerar mycket låg risk och 5 mycket hög risk.

⁵⁰ Heatio Energy. u.å. Kostnad Borra Bergvärme. <https://bergvarme-kostnad.se/kostnad-borra-bergvarme/>

⁵¹ Sveriges Geologiska Undersökning. 2023. Bergvärme. <https://www.sgu.se/samhallsplanering/energi/Geoenergi-geotermi-och-energilagring/bergvarme/>

Tabell 3 Kvalitativ bedömning av skonsamma uttagsmetoder (+++ = mest gynnsam, och --- = minst gynnsam).
Gradering av risk är mellan 1–5 (1= mycket låg risk, 5 = mycket hög risk).

Metod	Etablering		Utförande		Vibrationer	Skonsamhet	Flexibilitet	Risk
	Tid	Kostnad	Tid	Kostnad				
Skonsam sprängning	+++	+++	++	++	-	-	++	3
TBM/MTBM	---	---	+++	++	++	++	--	3
Raiseborrning	--	--	++	+	++	++	--	1
Hydraulisk spräckning	+++	+++	-	+	+++	++	++	2
Kemisk spräckning	+++	+++	---	+	+++	+	+++	4
Start- och slutsågning	-	-	+	+	+++	++	+	3
Blind cut-sågning	-	--	-	-	+++	++	++	4
Klingsågning	++	-	---	--	+++	++	-	2
Slitsborrning	+++	+++	---	--	++	++	+++	3
Kärnborrning	+++	+++	--	--	+++	+++	++	1
Hammarborrning	+++	+++	+++	+++	+	+	++	1

9 Applicering av metoder vid vattenkraftverk

9.1 ETABLERING AV TYPFALL

Fem fiktiva scenarion (typfall) har definierats för bergschaktarbeten som kan vara aktuella för ett vattenkraftverk. Dessa fall har definierats i samråd med projektets referensgrupp och består av följande:

1. Schakt till befintlig anläggning
2. Ökat tvärsnitt av intags-/utloppstunnel
3. Ökat tvärsnitt ytuskov
4. Berguttag för betongkonstruktion
5. Anslutning mellan två bergrum

För varje typfall ges ett tekniskt resonemang om relevanta metoders tillämpbarhet baserat på givna förhållanden. Det ska poängteras att det finns många faktorer som i slutändan styr val av metod t.ex. tillgängligt utrymme, tillgänglighet, tidsbegränsningar, vibrationskrav, förutsättningar för avstängning, storlek på berguttag, bergförhållanden, mm. Istället för att definiera alla förutsättningar för respektive typfall ges en övergripande diskussion om lämpliga skonsamma metoders tillämpbarhet utifrån en generell beskrivning av varje typfall.

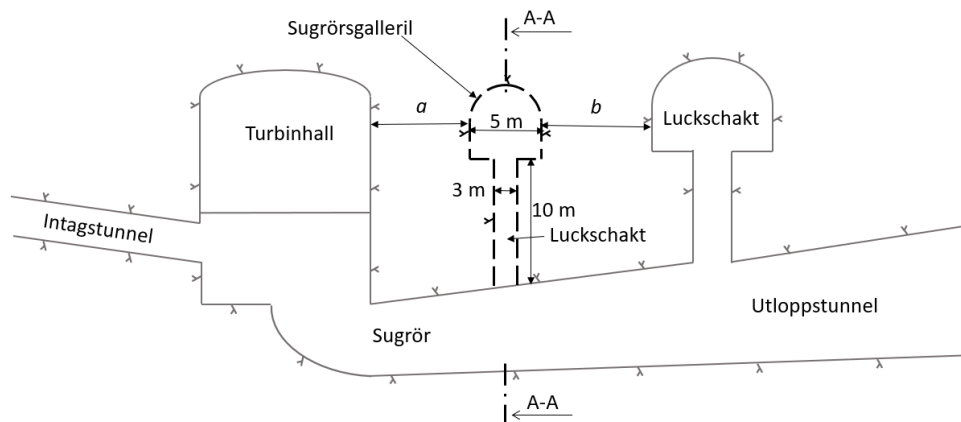
9.2 TYPFALL 1 - SCHAKT TILL BEFINTLIG ANLÄGGNING

9.2.1 Beskrivning

Typfall 1 avser bergschakt för en tillfartstunnel och ett vertikalschakt (luckschakt). Fallet är baserat på ett arbete vid ett vattenkraftverk där ett nytt sugrörsgalleri och sugrörsluckor byggdes i syfte att förbättra arbetsmiljön vid service och underhåll i kraftverket⁵². Sugrörsgalleriet i typfallen är ca 25 m långt och ska förbättra tillgängligheten vid service och underhåll av sugrören och via den tillfartstunnel som också byggs ska det bli möjligt att ta sig ner till galleriet med fordon. Sugrörsluckorna ska förenkla avstängningen av sugrören. Sugrörsgalleriet och luckschaktet tas ut med begränsat avstånd till närliggande befintliga bergrum/berganläggningar, se Figur 24 och Figur 25.

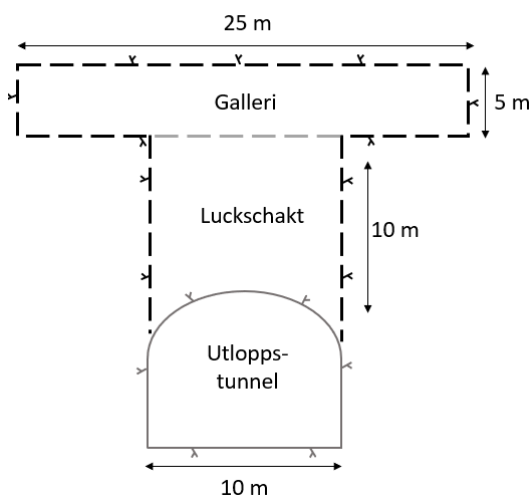
⁵² M. Sjölander. *Numerisk analys för nybyggnation av sugrörsgalleri i Krångede kraftverk*. Masterexamensarbete, Luleå tekniska universitet, 2020

Typfall 1 - Profil



Figur 24 Profil typfall 1, nytt schakt ned till befintlig anläggning. Streckande linjer visar nytt berguttag.

Sektion A-A



Figur 25 Sektion typfall 1, nytt schakt ned till befintlig anläggning. Streckande linjer visar nytt berguttag.

Berguttag av galleritunneln kan utföras under tiden kraftverket är i drift, dock förutsätts stränga krav på tillåtna vibrationer på grund av känslig utrustning i turbinhallen. Utlastning av material från galleri görs via befintlig tillfartstunnel. Under huvuddelen av berguttaget för luckschaktet, måste underliggande utloppstunnel vara stängd och tömd på vatten. Det förutsätts att det är möjligt att transportera in mindre utrustning (mindre hjullastare, arbetsplattformar, mm.) in i utloppstunneln från nedströmssidan samt att uttransport av schaktmassor också kan göras genom samma transportväg.

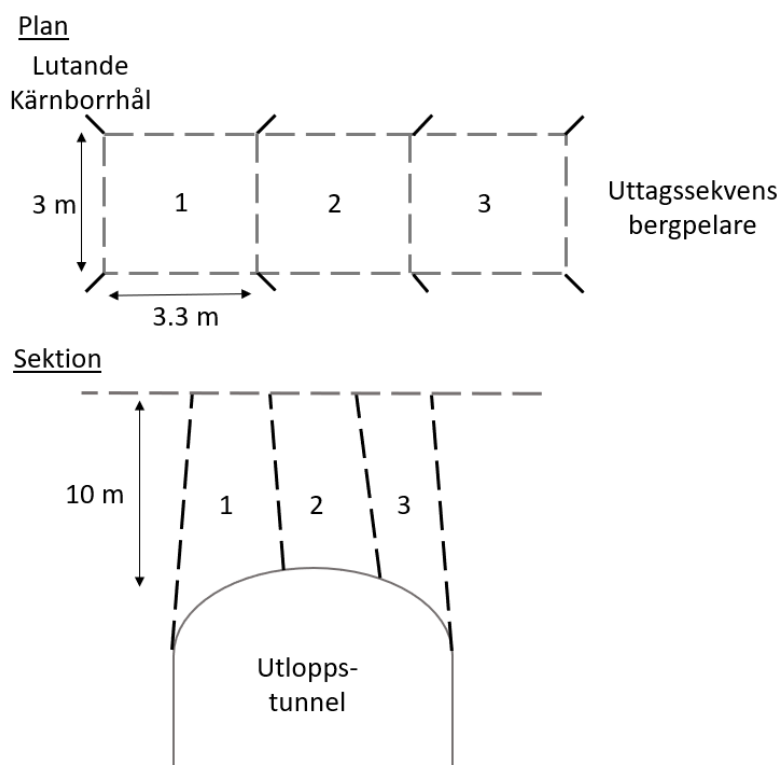
9.2.2 Förslag till uttagsmetoder för galleriet

Galleriet föreslås i första hand att tas ut med skonsam sprängning med tätborrade hål, klana laddningar och elektroniska sprängkapslar i syfte att minimera vibrationer. Om vibrationskraven inte kan uppfyllas bör vadersågning av konturen (till att börja med respektive vägg) vara ett alternativ i syfte att skapa en slits som

till viss del begränsar överföring av vibrationer. Sågning och/eller spräckning kan vara nödvändiga alternativ ifall avstånden a och b i Figur 24 (avstånd till befintlig anläggning) är begränsade och det föreligger risk för bergmekaniska problem på grund av pelarens storlek.

9.2.3 Förslag till uttagsmetoder för schaktet

Uttag av schaktet görs med fördel genom start- och slutsågning. Detta kan göras genom att såga ut 3 st 3,3x3 m breda bergpelare i rad, se Figur 26.



Figur 26 Plan och sektion av möjlig uttagssekvens med sågning för ett luckschakt.

Från galleriet borras 8 st 10 m kärnborrhål med något konisk lutning för att förhindra risken att vajer eller bergpelare kilar fast, se Figur 26. Under tiden vajer träs underifrån kärnborrhålen måste utloppstunneln tas ur drift. Alla 10 st vajrar kan träs i en omgång, men sågas var för sig. Vid sågning av sista snitt för respektive pelare, måste det finnas tillgång till schaktet underifrån och utloppstunneln måste tas ur drift. Efter utfall av respektive bergpelare bearbetas dessa (skut) med sprängning eller spräckning och lastas bort i utloppstunneln. Därefter monteras nödvändig bergförstärkning vilken kräver avstängning av utloppstunneln.

En alternativ metod till sågning är att ta ut schaktet med skonsam sprängning genom ett långhålsborrat schakt. Detta under förutsättning att ställda krav på maximala vibrationer kan uppfyllas. För denna metod borras alla hål parallellt nedåt från galleriet och hela arean borras. På grund av de långa borrhålen ställs det

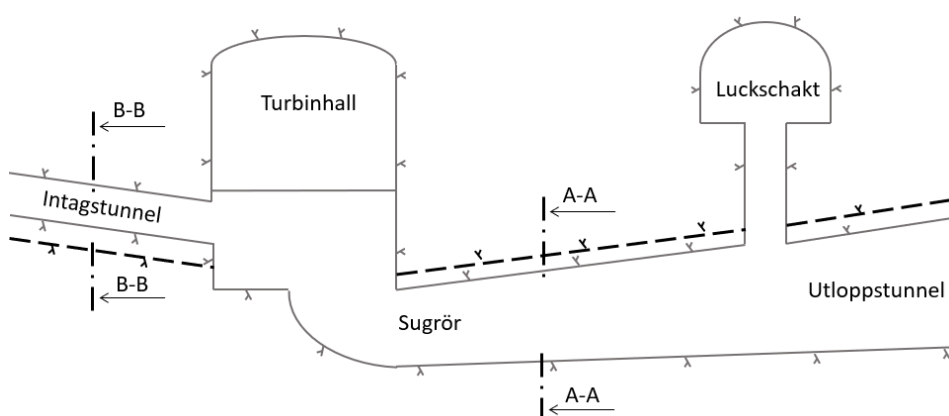
höga krav på borrhoggrannheten. I detta fall kan hammarborrning med sänkhammare eller kärnborrning vara aktuella metoder. Hålet proppas längs ned och laddningarna sänks ned i hålet till korrekt nivå för salvan. För att begränsa vibrationer och säkerställa ett optimalt tändförlopp kan elektroniska sprängkapslar behövas. Hålsättning, salvdjup och tändföljd behöver väljas med omsorg för att säkerställa att salvan går ut korrekt och minimera risk för sprängskador. Bergytans underkant i schaktet utgör den fria ytan för varje salva. Efter varje salva (salvdjup ca 2–3 m) utförs utlastning av massorna i den underliggande tunneln med en mindre fjärrstyrd grävmaskin. Därefter proppas tidigare borrhål på nästa nivå ovanför och laddning och sprängningsprocessen upprepas på samma sätt som för den underliggande nivån. När schaktet är uttagen i sin helhet utförs bergrensning och förstärkning av schaktet uppifrån och nedåt. Utloppstunneln behöver vara avstängd under hela tiden schaktet tas ut.

9.3 TYPFALL 2 - ÖKAT TVÄRSNITT AV INTAGS-/UTLOPPSTUNNEL

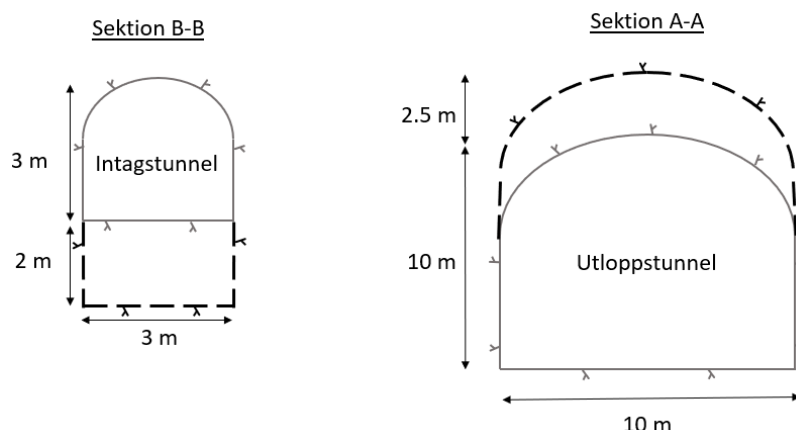
9.3.1 Beskrivning

Typfall 2 avser bergschakt för att utöka tvärsnitt för en befintlig intags- eller utloppstunnel. Typfallet kan även vara relevant för utökning av dimensioner för andra tunnlar i ett vattenkraftverk. För detta typfall förutsätts att det finns stränga krav på tillåtna vibrationer på grund av känslig utrustning i turbinhallen. Det förutsätts även att aktuell tunnel kan stängas av och tömmas på vatten. Uttransport av material från tunnel görs via inlopps- eller utloppstunnel och det antas möjligt att transportera in mindre utrustning (mindre hjullastare, mindre kompakt borrhög, arbetsplattformar, mm.). Typfallen illustreras i Figur 27 och Figur 28.

Typfall 2 - Profil



Figur 27 Profil typfall 2, ökning av tvärsnitt i inlopps- och utloppstunnel. Streckande linjer visar nytt berguttag.



Figur 28 Sektion typfall 2, strossning av befintlig tunnel för ökat tvärsnitt. Streckande linjer visar nytt berguttag.

9.3.2 Förslag till uttagsmetoder för utloppstunneln

Det mest rationella och sannolik billigaste, alternativet för strossning av tunneltaket är konventionell borrhning och sprängning. Den första åtgärd som syftar till ett skonsamt uttag (god konturhållning) är att borra med tätare hålsättning i konturen (c/c max 300 mm mellan konturhål) och spränga med klena laddningar. Vid stränga krav på maximala tillåtna vibrationer kan elektroniska sprängkapslar användas för att undvika att salvhålen detoneras samtidigt och samverkar. Om bergtäckningen till närliggande tunnlar eller bergrum är mycket liten, eller om vibrationskravet inte kan uppnås med borrh- och sprängning, kan losshållning göras med kemisk eller hydraulisk spräckning. Val av metod beror till stor del på storleken på berguttaget samt vilken utrustning som finns tillgänglig. Större och mer lättillgängliga uttag kan strossas med hydraulisk spräckning, medan mindre och mer komplexa uttag kan spräckas kemiskt. Sågning (blind cut eller start- och slutsågning) bedöms vara en mindre lämplig uttagsmetod på grund av det stora antal snitt som behövs för att åstadkomma takkonturen.

9.3.3 Förslag till uttagsmetoder för intagstunneln

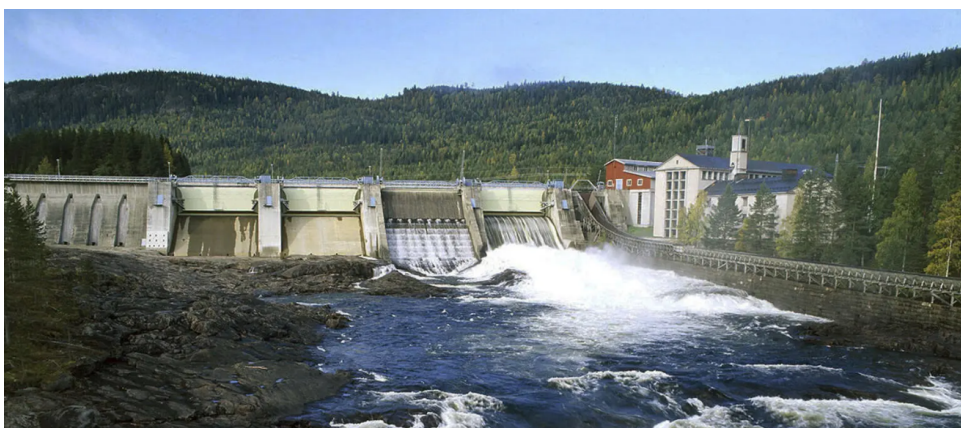
Strossning av intagstunneln innebär uttag i tunnelns botten (pall). Även här bedöms konventionell borrhning och sprängning som den mest rationella metoden under förutsättning att vibrationskraven kan uppfyllas och att det erhålls tillräckliga avstånd till närliggande tunnlar och bergrum. Vid begränsad bergtäckning till närliggande tunnlar eller bergrum, eller alternativt om vibrationskravet inte kan uppnås med konventionell borrhning och sprängning, kan losshållning göras med kemisk eller hydraulisk spräckning. I samtliga fall, oavsett metodval, kan borrhning av vertikala hål (ståndarpall) försvåras på grund av det begränsade utrymmet. Sågning av tunnelvägg och sula med start- och slutsågning kan också vara ett lämpligt alternativ eftersom det kräver färre sågsnitt jämfört med utloppstunneln (strossning av tak). Sågning skulle även resultera i släta ytor i både sulan och tunnelväggarna. Dessa är mindre känsliga för erosion över tid och kräver mindre bergförstärkning och underhåll. Sågning skulle däremot kräva en platt yta för etablering av sågen i nära anslutning till intagstunneln. De

platsspecifika förutsättningarna skulle för detta alternativ ha avgörande betydelse för metodval för strossning av botten i intagstunneln.

9.4 TYPFALL 3 - ÖKAT TVÄRSNITT YTUTSKOV

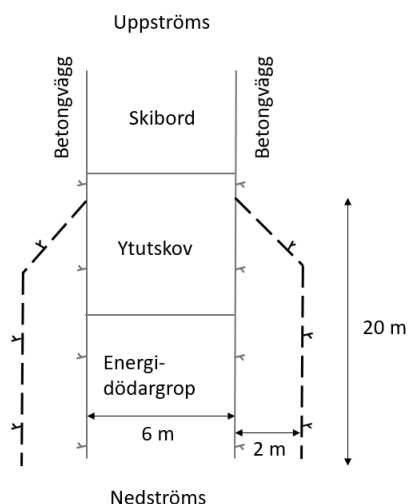
9.4.1 Beskrivning

En åtgärd som kan vara aktuell för att utöka avbördningskapaciteten är att öka tvärsektionen för bergförlagda utskovskanaler. Utskovskanaler och så kallade energidödarbassänger ligger ofta i nära anslutning till känsliga delar av dammkonstruktioner och kraftverk, se t.ex. Figur 29 som visar utskovet vid ett vattenkraftverk.



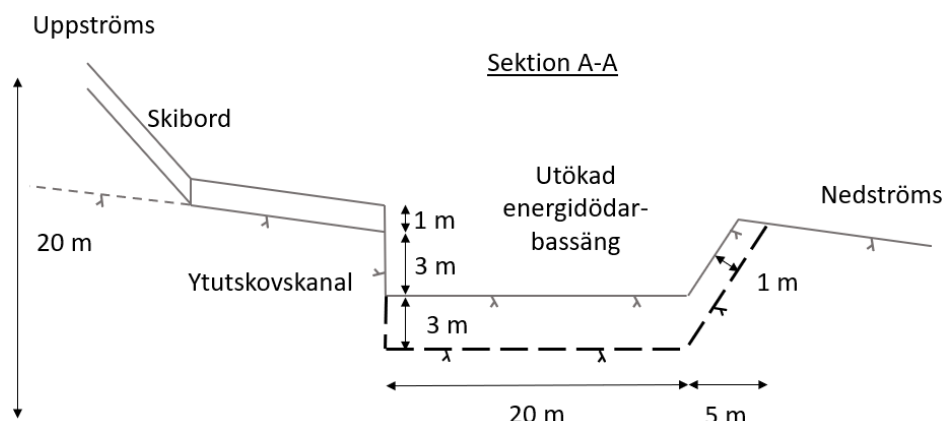
Figur 29 Utskov vid ett vattenkraftverk⁵³.

Typfall 3 innebär breddning och fördjupning av en energidödarbassäng direkt nedströms om ett betongskibord. Typfallet illustreras i Figur 30 och Figur 31.



Figur 30 Plan typfall 3, ökat tvärsnitt för energidödarbassäng. Streckande linjer visar nytt berguttag.

⁵³ Fortum. 2024. Vattenkraftverk [Foto]. <https://www.fortum.com/energy-production/power-plants>



Figur 31 Profil typfall 3, ökat tvärsnitt för energidödarbassäng. Streckande linjer visar nytt berguttag.

Avbördning av vatten genom utskovskanalen bedöms inte vara möjligt under tiden bergschaktarbetet pågår, vilket innebär höga krav på en snabb och effektiv produktion. Det förutsätts även att stränga krav på tillåtna vibrationer gäller på grund av närheten till dammkonstruktionen och vattenkraftverket. Vidare förutsätts också att överberg i bergslänter och eventuell underminering av andra konstruktioner inte kan tillåtas och att kravet på schaktad kontur i förhållande till teoretisk kontur är mycket strängt. Det förutsätts att en arbetsväg kan anläggas för att möjliggöra etablering och avetablering av borrhigar, grävmaskiner och andra maskiner samt borttransport av schaktmassor.

9.4.2 Förslag till uttagsmetoder för energidödarbassäng

Det mest rationella och sannolikt billigaste alternativ för bergschakt av den centrala delen av berguttaget är konventionell borrning och sprängning. Ifall det är svårt att uppnå kravet på maximal tillåtna vibrationer kan elektroniska sprängkapslar användas. Där höga krav ställs på konturhållning (t.ex. på grund av närliggande konstruktioner) kan konturen borras med tät hålsättning och stränga krav på borrhålsavvikelsen, eller alternativt vadersågas. Val av metod beror på bland annat vibrationskrav, tillgänglighet till arbetsplatsen och storleken på det skonsamma uttaget. Ökade krav på skonsamhet och/eller större uttag innebär att vadersågning blir en mer attraktiv metod. Dessa två metoder kan ge kort närvaro i utskovet och snabb evakuering av utrustning ifall älven måste avbördas.

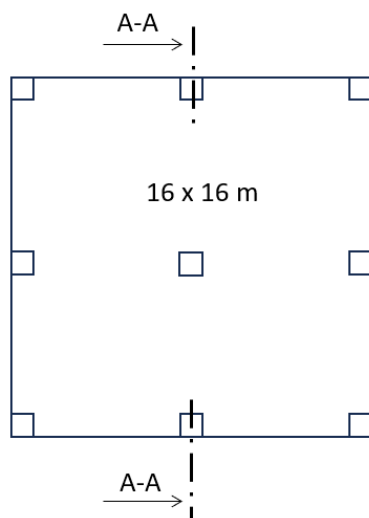
Vid ogynnsamma bergförhållanden kan det även vara nödvändig att förförstärka berget med t.ex. krönbultar. Beroende på omfattningen av den släntarea som kräver extra skonsamhet (dvs. slänter där bergutfall inte kan accepteras) kan även andra skonsamma metoder, som nyttjar samma borrhigg som behövs för borrning och sprängning, vara mer effektiva jämfört med sågning. Om omfattningen av kritiska slänter är begränsad kan slitsborrning eller tät konturhålsborrning i kombination med kemisk spräckning vara fördelaktigt. De platsspecifika förutsättningarna har avgörande betydelse för metodvalet.

9.5 TYPFALL 4 - BERGUTTAG FÖR BETONGKONSTRUKTION

9.5.1 Beskrivning

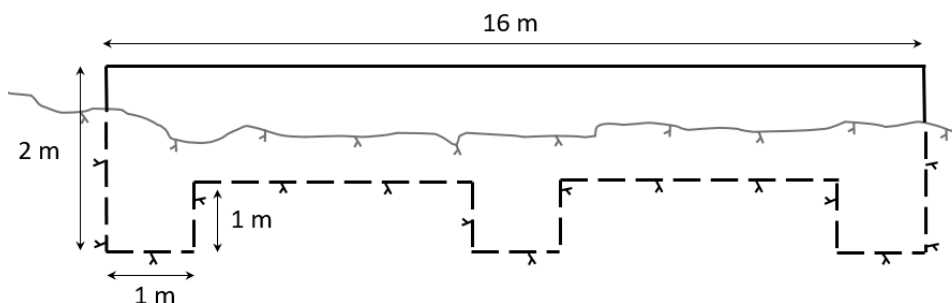
Många betongkonstruktioner som byggs för vattenkraftverk har en funktion att ta upp ett vattentryck. Lasten från dessa konstruktioner behöver överföras till en berggrundläggning. Utformning av berggrundläggningen och val av bergschaktmetod kan ha stor inverkan på omfattning av betongkonstruktionen. Eventuella stagförankringar och risk för vattengenomströmning i bergmassan bakom/under betongkonstruktionen har också stor betydelse. Typfall 4 visar ett konceptuellt berguttag för grundläggning av en betongkonstruktion där 9 st 1x1 m pelare gjuts 1 m ner i fast berg. Det förutsätts att betongkonstruktionen anläggs i syfte att ta upp ett vattentryck. Typfall 4 illustrerats schematiskt i Figur 32 och Figur 33.

Typfall 4 - Plan



Figur 32 Plan typfall 4, dimensioner på betongfundamentet.

Sektion A-A



Figur 33 Sektion typfall 4, berguttag för betongkonstruktion. Streckade linjer visar nytt berguttag.

Det förutsätts att etablering och avetablering av maskiner är oproblematiskt och att bergschaktet inte behöver utföras med exceptionella krav på maximala tillåtna vibrationer eller med speciell hänsyn till närliggande konstruktioner.

9.5.2 Förslag till uttagsmetoder för grundläggning av betongkonstruktionen

Om toleranser för avvikelse från den teoretiska konturen är stränga kan berguttag för betongkonstruktionen utföras med blind cut-sågning där varje pelare i fundament sågas var för sig (dvs. 9 separata berguttag). De horisontella bottensnitten kan utföras genom montering av hjul i respektive hörn som tvingar vajern att såga i horisontell riktning. Bergmassan mellan respektive plint kan också frisågas med start- och slutsågning. Frisågade bergblock (skut) kan fragmenteras med försiktig sprängning eller spräckning (hydraulisk eller kemisk). Denna metod innebär att samtliga schaktade bergytter utförs med sågning och därmed utförs med extrem skonsamhet med minimal risk för överberg. Sågning är däremot en tidskrävande uttagsmetod som enbart bör vara aktuell om kraven på skonsamheten är mycket höga.

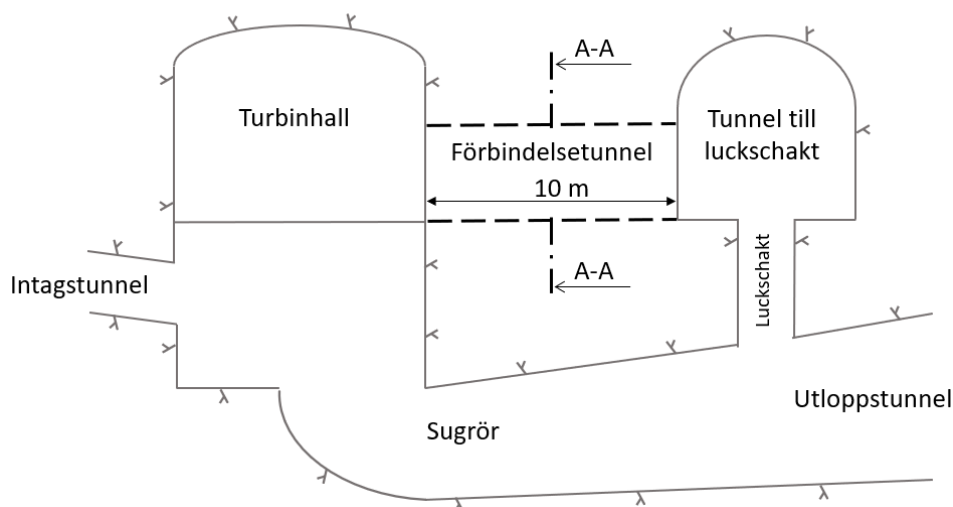
En sannolikt mer rationell uttagsmetod för detta scenario är att ändra utformning av bergschaktet till ett enda större uttag med en jämn bottennivå (2 m under överkant betongkonstruktion i Figur 33). Beroende på toleranser för överberg i schaktväggar kan olika metoder för uttag av konturen implementeras. T.ex. borrar och sprängning med tätsöm (lägre toleranskrav), alternativt slitsbörning eller blind cut-sågning (högre toleranskrav).

9.6 TYPFALL 5 - ANSLUTNING MELLAN TVÅ BERGRUM

9.6.1 Beskrivning

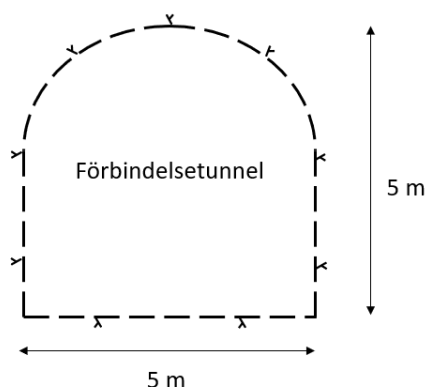
Typfallet avser uttag för ny förbindelsetunnel mellan ett luckschakt och en turbinhall. Uttaget görs med en 10 m lång, 5 m hög och 5 m bred tunnel enligt Figur 34 och Figur 35. Tillgång och transport är möjligt från båda bergrum. Toleranser för överberg i samband med uttag av förbindelsetunneln är mycket stränga (schaktad kontur får maximalt vara 300 mm utanför teoretisk tunnelkontur) och det förutsätts att närliggande bergrum innehåller en vibrationskänslig turbin.

Typfall 5 - Profil



Figur 34 Profil typfall 5, uttag av förbindelsetunnel mellan två berggrum. Streckade linjer visar nytt berguttag.

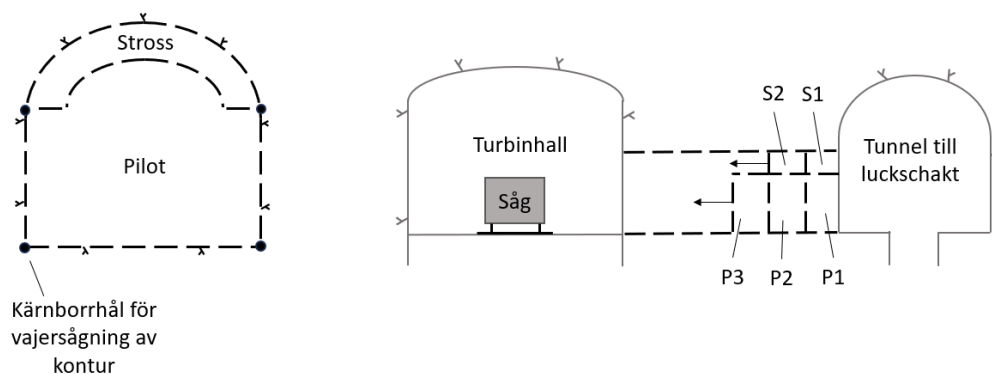
Sektion A-A



Figur 35 Sektion typfall 5. Streckande linjer visar nytt berguttag. Till höger visas ett liknande uttag som gjorts i Henriksdals reningsverk (Foto: Christer Skönnerud).

9.6.2 Förslag till uttagsmetoder för förbindelsetunnel

Tunneln kan med fördel tas ut med pilot och stross, se Figur 36. För att minska spränginducerade vibrationer och bibehålla konturen kan tunnelväggar och sula sågas ut i förhand. Slitsarna i väggarna och sulan skapas genom att först borra fyra kärnborrhål i varje hörn som sedan träs med vajer, se Figur 36. Kärnborrhålen är genomgående och sågningen kan därför göras med start- och slutsågning. Eventuellt kan sulan delas upp i två snitt om berget har sämre kvalitet. Sulan bör sågas innan väggarna för att undvika att vajern kilar fast från vikten av ovanliggande lossgjort berg. Borrning och sågning kan genomföras från antingen turbinhallen eller luckschaktet om utrymmet för etablering begränsas av ena rummets storlek. Tunneltaket sågas inte på grund av det stora antal snitt som krävs för att hålla dess cirkulära kontur.



Figur 36 Plan och sektion av möjlig uttagssekvens med sågning följt av uttag med pilot och stross. P1-P3 illustrerar salvor för uttag av pilot, och S1-S2 strossning.

Losshållning utförs med pilot och stross där piloten tas ut med konventionell sprängning med tät hålsättning och låg samverkande laddning. Detta för att minska spränginducerade vibrationer. Uttaget bör göras från luckschaktet för att minska risken för vibrations- och/eller kastsador på turbin. Om gränserna för maximal tillåtna vibrationer inte kan innehållas kan hydraulisk spräckning vara ett andra alternativ för losshållning av piloten.

Strossen kan med fördel tas ut med kemisk spräckning. Detta kan göras i 3 stycken 3,3 m långa salvor. Om borrhållning kan utföras från turbinhallen kan strossning göras i båda riktningar för att minska utförandetiden. Hydraulisk spräckning kan vara mindre fördelaktigt för uttag av stross då den hydrauliska kilen är kort och stickningen riskerar att bli omfattande. Det kan då bli svårt att hålla god kontur i tunneltaket. Liknande uttag har gjorts vid Henriksdals reningsverk, se Figur 16.

10 Diskussion och slutsats

Denna rapport beskriver ett antal metoder för skonsam bergschaktning som bedöms aktuella för känsliga berguttag i anslutning till vattenkraftverk. Metoderna som beskrivits är skonsam sprängning, sågning, spräckning och borrhning.

Borrhning och sprängning är i de flesta fall den mest effektiva metoden för berguttag vid en kraftstation om uttaget kan utföras med en acceptabel risk och uppfyller krav på omgivningspåverkan. Genom att borra tätare hål och minska laddningsmängden kan skonsamheten ökas och kvaliteten på den schaktade konturen förbättras. Borrhning och sprängning kan ersättas med hydraulisk eller kemisk spräckning om uttaget, eller delar av uttaget, bedöms vara för riskfyllt. Val av spräckningsmetod beror till stor del på storleken på uttaget och tillgängligt utrymme. Kemisk spräckning kan vara ett bra alternativ för mindre uttag i trånga utrymmen. Sågning används främst om det ställs höga krav på plana ytor, t.ex. fyrkantiga schakt och bergskärningar. De olika borrhningsmetoderna; raiseborrning, fullortsborrhning (TBM), kärnborrhning och hammarborrning, är av naturliga anledningar mest lämpliga för cirkulära berguttag med höga krav på skonsamhet. Raiseborrning och TBM är förhållandevis dyra metoder som är mer tillämpbara för större berguttag av t.ex. tunnlar och längre schakt.

Vilken metod som är lämpligast för en viss situation beror på flertalet olika faktorer som bland annat geometrin för berguttaget, bergförhållanden, tillgängligt utrymme för maskiner, tillgänglig tid för arbetet och gällande vibrationskrav. Vid komplexa uttag med stränga krav på omgivningspåverkan finns det sällan ett självklart metodval då varje metod har egna respektive fördelar och nackdelar. Metoderna används dessutom ofta i kombination med varandra. Eftersom metoderna nästan uteslutande används för komplexa berguttag med unika platsförutsättningar är det svårt att generalisera och ange enhetspriser och tidsuppskattningar.

Trots att vibrationsgränsvärden förefaller spela en stor roll i val av metod verkar det saknas tydliga och underbyggda riktlinjer för vilka vibrationskrav som bör ställas för vattenkraftanläggningar. Det är inte tydligt vad nuvarande gränsvärden baseras på och det kan vara fördelaktigt att inventera befintliga anläggningar för att skapa underlag för rimliga bedömningar av vibrationstoleranser.

De viktigaste framgångsfaktorerna för att åstadkomma ett lyckat skonsamt berguttag bedöms vara följande:

1. Säkerställa att kravställningen i bygghandlingen har utformats av personer med gedigen erfarenhet av skonsamma berguttagsmetoder. De geologiska förhållande där berguttaget ska ske bör vara väl undersökta och kravställningen ska ha tagit dessa i beaktande. Kravställningen bör formuleras i syfte att ställa relevanta utförandekrav och där möjligt, lämna frihetsgrader för entreprenören att utforma egna lösningar baserat på givna grundläggande krav.
2. Implementera en bra ersättningsmodell för komplexa och riskfyllda berguttag. Vid mycket komplexa berguttag kan löpande räkning med genomtänkta

incitament för framdrift och kvalitet vara att föredra där man även uppmuntrar entreprenören att bidra med egna tekniska lösningar. Detta dels för att nyttja entreprenörens kompetens och säkra ett bra resultat och dels för att undvika att entreprenören tar riskfyllda genvägar.

3. Säkerställa att bergentreprenören har gedigen kompetens inom de aktuella metoderna i liknande förhållanden.

För att åstadkomma ett lyckat skonsamt uttag krävs en kompetent beställare som är insatt i de tekniska frågeställningarna och kan ge projektören och entreprenören bra och tydliga förutsättningar. Hållpunkter (så kallade tullgränser) bör implementeras i kontraktet där faktiska förhållanden och hitintills vunnen erfarenhet utvärderas på ett strukturerat sätt innan det kritiska berguttaget påbörjas. Vidare bör arbetsberedningar tas fram för de kritiska berguttagen för att säkerställa att alla involverade personer förstår hur berguttaget ska genomföras i detalj. Tullgränser och arbetsberedningar har tidigare tillämpats framgångsrikt i flera projekt med komplexa berguttag och är välbeprövade riskhanteringsverktyg.

11 Referenslista

- Aardvark Rock Tools. u.å. Rock Saws - Carbide & Diamond Cutting Systems.
<http://aardvarkrocktools.weebly.com/> (Hämtad 2024-02-20).
- Aardvark Rock Tools. u.å. Rock Saws – Operational Notes.
<http://aardvarkrocktools.weebly.com/rock-saws---operational-notes.html>
(Hämtad 2024-02-20).
- AMA Anläggning 17. Svensk byggtjänst, 2017.
- AMA Anläggning 23. Svensk byggtjänst, 2023.
- Arbetsmiljöverket. 2023. <https://www.av.se/> (Hämtad 2024-02-20).
- Christiansson, R., Lehtimäki, T., Pettersson, S. & Olsson, M. *Studie av vadersågning för deponeringstunnlar*. Stockholm: SKB, 2013.
<https://www.skb.se/publikation/2685671/R-13-06.pdf> (Hämtad 2024-02-20).
- DAUB-Working Group. *Recommendations for the Selection of Tunnel Boring Machines*. Köln: DAUB, 2022. https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/gtcrec1/2021-03_Daub_Recommendations_for_the_selection_of_tunnel_boring_machines.pdf (Hämtad 2024-02-20).
- Davidsson, C. *Tunneldrivning i tätort*. Masterexamensarbete, Luleå tekniska universitet, 2013.
- De Silva, R. V., Pathegama Gamage, R. & Anne Perera, M. S. An alternative to conventional rock fragmentation methods using SCDA: a review. *Energies*, 9(11), 958. 2016. <https://doi.org/10.3390/en9110958>.
- Dexpan. 2005. Swimming Pool Rock Excavation, Cracking, Removal. Dexpan Project R002. <https://www.dexpan.com/pages/dexpan-project-r002-swimming-pool-rock-excavation> (Hämtad 2024-02-20).
- Dexpan. 2023. 100ft Diamond Wire for Granite Stone Quarrying and Cutting Wire Saw Machine. <https://www.dexpan.com/products/diamond-wire-for-granite-sandstone-quarrying-squaring-profiling> (Hämtad 2024-02-20).
- Echidna Diamond Tools & Machinery. u.å. D6HP Diamond Rocksaw.
<https://echidna.com.au/products/Diamond-Rocksaws/D6HP%20Diamond%20Rocksaw.php> (Hämtad 2024-02-20).
- Echidna Diamond Tools & Machinery. u.å. Frequently Asked Questions (FAQs).
<https://echidna.com.au/KnowledgeCorner/FAQs.php?FAQ=13> (Hämtad 2024-02-20).
- Eklind, M. *Raiseboring in Mining and Construction*. Atlas Copco Rock Drills AB, 2008.

- Elgenklöw, M., Atlas Copco Rock Drills AB. *Mekanisk borrarning av öppningsstigar - Raiseboring*. Örebro: Svenska Bergteknikdagen 2002.
- Enér, R. *Fallstudie och analys av vadersågningsentreprenad: i Äspölaboratoriet*. Höskoleexamensarbete, Luleå tekniska universitet, 2017.
- Fortum. 2024. Vattenkraftverk [Foto]. <https://www.fortum.com/energy-production/power-plants> (Hämtad 2024-02-20).
- GG Gnejsgranit AB. 2023. Om Spräckmedel. <https://gnejsgranit.se/snigeldynamit/> (Hämtad 2024-02-20).
- Gustafsson, N. *Wire cutting as a complement to drill and blast in vibration sensitive environments*. Masterexamensarbete, Chalmers tekniska högskola, 2011.
- Habib, K. M., Shnorhokian, S. & Mitri, H. Evaluating the application of rock breakage without explosives in underground construction—a critical review of chemical demolition agents. *Minerals*, 12(2), 220. 2022. <https://doi.org/10.3390/min12020220>
- Heatio Energy. u.å. Kostnad Borra Bergvärme. <https://bergvarme-kostnad.se/kostnad-borra-bergvarme/> (Hämtad 2024-02-20).
- Hedgärde, K. *En jämförelse mellan raiseborrarning och vadersågning för drivning av vertikala schakt i berg*. Masterexamensarbete, Luleå tekniska universitet, 2017.
- Heiniö, M. *Rock excavation handbook*. Sandvik Tamrock Corp, 1999.
- Herrenknecht. 2023. Raise Boring Reaming Heads and Cutting Tools. <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/raise-boring-reaming-heads-and-cutting-tools/> (Hämtad 2024-02-20).
- Hinze, J. & Brown, J. Properties of soundless chemical demolition agents. *Journal of construction engineering and management*, 120(4), 816–827. 1994. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1994\)120:4\(816\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1994)120:4(816))
- Håkansson, U., Chang, Y. & Ahnberg, E. *Hydraulic Splitting – An environment friendly rock excavation method*. Stockholm: SBUF, 2018. <https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/272583BD-F21A-4035-BCE8-1F0D1D7F4457/FinalReport/SBUF%2012047%20Slutrapport%20Milj%C3%B6v%C3%A4nlig%20bergbrytning%20med%20hydraulisk%20spr%C3%A4ckning.pdf> (Hämtad 2024-02-20).
- Lawton, M., F., Andersen, H., K., Sagen, H., W., Jansen, J., B., Larsen G., O. Jernbaneverket. *Drill and split, a feasible option to careful blasting – The Follo Line Project*. Oslo: Fjellsprengningsdagen 2016.
- Lee, J. H., Ahn, S. K., Lee, K. C., Bang, C. S., Cho, J. H. & Sagong, M. Wire saw cutting model development and performance investigation for vibration reduced tunnel excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63, 144–153. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.11.011>

- Lindqvist, T. Sprängningsfria metoder för bergchakt. *Ama-nytt – Anläggning*. 2012-11-08.
<https://byggkoll.byggjanst.se/artiklar/2012/november/sprangningsfria-metoder-for-bergschakt/> (Hämtad 2024-02-20).
- Lundberg, J., JohanLundbergAB. 2023. Mikrotunnling, TBM (metod).
<https://johanlundberg.se/wiki/mikrotunnling-tbm-metod/> (Hämtad 2024-02-20).
- Lönnelid, A. *Alternativa metoder för berguttag i urban miljö*. Masterexamensarbete, Luleå tekniska universitet, 2021.
- Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W. & Herrenknecht, M. (2008). *Hardrock tunnel boring machines*. Berlin: Ernst & Sohn, 2008.
- Natanzi, A. S. (2017). *Soundless chemical demolition agents performance under cold and cool temperatures in concrete and masonry structures*. Doktorsavhandling, Irland: University College Dublin, 2017.
- Olofsson, S. O. *Modern bergsprängningsteknik*. Ärla: APPEX, 2007.
- Olsson M, Markström I, Pettersson A & Sträng M. *Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel, Åspö HRL*. Stockholm: SKB, 2009.
<https://skb.se/publikation/2005118/R-09-39.pdf> (Hämtad 2024-02-20).
- Persson, M. *Arbetsberedning med www.ByggAi.se*. Sveriges Byggindustrier, 2012.
- SBUF. *Håltagning i grundmurar - SBUF informerar*. Nr 86:03. Stockholm: Svenska Byggbranchens Utvecklingsfond, 1986-08-24.
<https://www.sbuf.se/projektresultat/projekt?id=51f635d2-e240-468a-a0c4-ee6849090747> (Hämtad 2024-02-20).
- Solution Plant Hire. 2017. Essential Safety Equipment for Operating Excavator Saw. <https://www.solutionplanthire.com.au/blog/essential-safety-equipment-operating-excavator-saw/> (Hämtad 2024-02-20).
- Stakne, P. Basic considerations and practical experience with the boring of deep shafts by the raise boring process. *Geomechanics and Tunneling* 8, No. 1. 2015. <https://doi.org/10.1002/geot.201400056>
- Styrud Ingenjörskfirma AB. 2023. Vajersågning – Metodblad. <https://styrud.se/wp-content/uploads/2018/05/Vajersagning.pdf> (Hämtad 2024-02-20).
- Styrud Ingenjörskfirma AB. 2023. Kärnborrning – Metodblad. <https://styrud.se/wp-content/uploads/2023/03/Karnborrning.pdf> (Hämtad 2024-02-20).
- Styrud Ingenjörskfirma AB. 2023. Hammarborrning – Metodblad.
<https://styrud.se/wp-content/uploads/2018/05/Hammarborrning.pdf> (Hämtad 2024-02-20).
- Styrud Ingenjörskfirma AB. u.å. Raiseborrning – Metodblad.
<https://styrud.se/metod/raiseborrning/> (Hämtad 2024-02-20).

- Sundin, N-O. & Karlsson, B. *Fullborrning av Ormentunneln, Stockholm*. Stockholm: Stiftelsen Bergteknisk Forskning - BeFo, 1992.
<https://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/217/R451192.pdf> (Hämtad 2024-02-20).
- Sveriges Geologiska Undersökning. 2023. Bergvärme.
<https://www.sgu.se/samhallsplanering/energi/Geoenergi-geotermi-och-energilagring/bergvarme/> (Hämtad 2024-02-20).
- Sjölander, M. *Numerisk analys för nybyggnation av sugrörsgalleri i Krångede kraftverk*. Masterexamensarbete, Luleå tekniska universitet, 2020.
- Trafikverket. *Projektering av bergkonstruktioner*. Trafikverket, 2019.
<https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1363637/FULLTEXT01.pdf> (Hämtad 2024-02-20).
- Trafikverket. *Trafikverkets handbok för ovanjordssprängning*. Trafikverket, 2014.
https://trafikverket.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1542410&c=15&language=sv&searchType=LIST_LATEST&query=&af=%5B%5D&aq=%5B%5B%5D%5D&aq2=%5B%5B%5D%5D&aqe=%5B%5D&noOfRows=50&sortOrder=author_sort_asc&sortOrder2=title_sort_asc&onlyFullText=false&sf=all (Hämtad 2024-02-20).
- Tyréns. *Teknisk och Miljömässig Utredning – Alternativ Utsläppspunkt Gryaab*. Tyréns
<https://www.gryaab.se/wp-content/uploads/2017/09/3-Bilaga-M7-Tekniska-mojligheter-till-en-ny-utslappspunkt-Tyrens.pdf> (Hämtad 2024-02-20).
- Westerlund, E. & Westerlund, A. *Icke-explosiva brytningsmetoder*. Filipstad: MinBaS II, 2011. <http://www.minfo.se/minbas/122.pdf> (Hämtad 2024-02-20).
- Weydahl, T. K. *Ingeniørgeologisk analyse av resultater fra tunneldriving basert på "Drill & Split" ved Follobanen*. Examensarbete, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet NTNU Open, 2017.
- Yichen Environment Tech co. Ltd. 2023. Application of Rock Saw in Tunnel.
<https://ycattachments.com/application-of-rock-saw-in-tunnel-excavation/> (Hämtad 2024-02-20).
- Yichen Environment Tech co. Ltd. Rock Saw. u.å. Rock Saw.
<https://ycattachments.com/products/rock-saw/> (Hämtad 2024-02-20).

SKONSAMT UTTAG AV BERG SOM METOD FÖR VATTEN- KRAFTINDUSTRINS BERGARBETEN

Syftet med rapporten är att beskriva och sammanställa lämpliga skonsamma uttagsmetoder för berguttag för vattenkraftindustrin. Rapporten bygger på en litteraturstudie och intervjuer som genomförts med sakkunniga som jobbat med skonsamma berguttagsmetoder. Av rapporten framgår att borrar och sprängning normalt sett är den mest effektiva metoden för berguttag vid en kraftstation om uttaget kan utföras med en acceptabel risk och uppfyller krav på omgivningspåverkan. Vid stränga omgivningskrav kan uttaget, eller delar av uttaget, göras med en kombination av spräckning, sågning och borrar. De platsspecifika förutsättningarna är helt styrande för metodvalet. För att säkerställa ett bra resultat bör det ställas tydliga och relevanta kravställningar i projekteringen och nyttja entreprenörens kompetens vid planering av skonsamma berguttag.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

