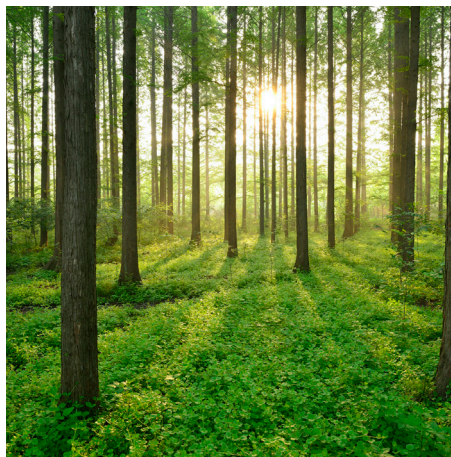


MONTAGE OCH KONTROLL AV BERGBULTAR

RAPPORT 2026:1210



VATTENKRAFTENS BERGFRÅGOR



Montage och kontroll av bergbultar

Praktiska råd om montage av nya
och tillståndskontroll av befintliga bergbultar

ULF LINDFORS OCH IVAN EDEBLOM

ISBN 978-91-89917-53-8 | © Energiforsk augusti 2026

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

Förord

Det här projektet har syftat till att ta fram råd och rekommendationer till beställare och entreprenörer som arbetar med bergförstärkning av vattenkraftens berganläggningar, utifrån två perspektiv: tillståndskontroll och montage av bergbultar.

Uppdraget har genomförts inom programmet Vattenkraftens bergfrågor, som fokuserar på att stärka och bredda den forskning och utveckling som finns om bergtekniska frågor inom vattenkraftsområdet i Sverige. Programmet koordineras av Energiforsk och finansieras av Vattenfall Vattenkraft AB, Fortum Sverige AB, Sydkraft Hydropower AB, Statkraft Sverige AB, Skellefteå Kraft AB, Holmen Energi AB, Jämtkraft AB, Tekniska verken i Linköping AB, Mälarenergi Vattenkraft AB, Karlstads Energi AB, Sollefteåforsens AB och Jönköping Energi AB.

Författare till rapporten är Ulf Lindfors, Nordic GeoMechanics AB, och Ivan Edeblom, Sarek Consult AB, konsulter med expertis inom bergfrågor.

Referensgruppen bestod av Christian Bernstone, Vattenfall, Kjell Nilsson, Sydkraft Hydropower, Niklas Widenberg, Vattenregleringsföretagen, Mats Persson, Vattenfall, Annika Strömkvist, Skellefteå Kraft, och Andreas Larsson, Energiforsk

Rapportförfattarna ansvarar för alla resultat och slutsatser i rapporten.

Sammanfattning

Det finns ett behov av råd och riktlinjer för tillståndskontroll av cementinjekterade bultar och montage av bergbultar riktade till beställare och entreprenörer som arbetar med bergförstärkning av vattenkraftens berganläggningar.

Arbetet har omfattat två steg, en litteraturgenomgång med sökning i databaser som innehåller nationella och internationella studier i ämnena. I den andra delen har typfall för montage av bergförstärkning med bergbult samt när och hur tillståndskontroll kan användas tagits fram.

Resultaten från litteraturstudien visar att lämpligaste för en bult är om den installeras med en vinkel mot blockets avgränsande sprickplan eller bergmassans strukturer med 30–50° vid glidning längs en eller flera sprickplan.

I slänter och tak i en undermarksanläggning är det stor möjlighet att placera bergbultarna så att de i huvudsak har dragbelastning om de bergmekaniska förutsättningarna projekteras på plats. Vid bergförstärkning av väggar i en undermarksanläggning blir det betydligt svårare att undvika skjuvbelastning på bergbultarna vid förstärkning av block.

Ingjutningslängden för en bergbult med diametern mellan 20 och 32 mm behöver egentligen inte vara över 40 cm men för att täcka osäkerheter kring sprickplanens orientering mm bör förankringslängden för en bergbult vara 1 m.

Valet mellan bergbultar av olika stål och ytbehandlingar bör naturligtvis baseras på platsens miljö men idag är det relativt lite prisskillnad mellan de olika varianterna av bergbult så att välja en bult med överdimensionerat skydd medför inte någon större skillnad prismässigt. Säkraste sättet att försäkra en viss livslängd hos bergbulten är dock fortfarande att den är korrekt ingjuten och att ingjutningen är intakt över tiden. Ingjutningsbetongens kvalitet och vct är av stor betydelse för bultens funktion, kravet (vct 0,3) enligt svensk branschnorm kan ses som det lämpligaste valet i nuläget.

Totalt visas i rapporten 6 st typfall med beskrivning av bergförstärkning, 2 fall för slänter och 4 fall för underjordsanläggningar. För underjordsanläggningarna är dock ett fall mer övergripande beskrivet.

Även övergripande förslag på genomförande av tillstands- och kvalitetskontroll beskrivs, både inför, under och efter nya bergbultar samt på äldre befintliga bergbultar.

Att orientera bergbultarna kräver kunskap om den aktuella bergmassa vilket innebär behov av projektering vilket inkluderar både bergkvalitet, geometrier och behovet av förstärkning.

För att få ett lyckat och korrekt montage av bergbultar är det bra om en tydlig kravställning finns specifikt för projektet, ha noggrann uppföljning på plats vid installation. En annan framgångsfaktor är att vid projektstart informera och utbilda utförarna varför vissa saker vid installation är viktiga. Detta ökar medvetenheten och kan ses som en kvalitetshöjning.

Nyckelord

Bergbultning, Rock bolting, Testing rock bolts, Testing PC bolt, Field measurements, Rock bolt installation, Rock bolt grouting, Rock bolt grout, Rock bolt embedment length, Korrosion bergbult, Livslängd bergbultar, Beständighet bulttyper, Durability rock bolts, Rock bolt design.

Summary

There is a need for advice and guidelines for testing cement-injected bolts and installation of rock bolts aimed at clients and contractors working with rock reinforcement of hydropower rock facilities.

The work has included two stages, a literature review with a search in databases containing national and international studies on the subjects. In the second part, typical cases for the installation of rock reinforcement with rock bolts and when and how monitoring can be used have been developed.

The results from the literature study show that it is most suitable for a bolt if it is installed at an angle to the block's boundary fracture plane or the rock mass structures with 30–50° when sliding along one or more fracture planes.

In slopes and roofs of an underground facility, there is possibilities to place the rock bolts so that they mainly have tensile loads if the rock mechanical conditions are investigated on site. When reinforcing the walls in an underground facility, it becomes significantly more difficult to avoid shear loads on the rock bolts when reinforcing blocks.

An embedment length for a rock bolt with a diameter between 20 and 32 mm does not actually need to be more than 40 cm, but to cover uncertainties about the orientation of the fracture plane, etc., the anchorage length for a rock bolt should be 1 m.

The choice between rock bolts of different steels and surface treatments should of course be based on the site's environment, but today there is relatively little price difference between the different variants of rock bolts, so choosing a bolt with oversized protection does not entail any major difference in price. However, the safest way to ensure a certain lifespan of the rock bolt is still that it is correctly cast and that the cast is intact over time. The quality and wcr of the casting concrete are of great importance for the function of the bolt, the requirement (wcr 0.3) according to the Swedish industry standard can be seen as the most appropriate choice at present.

In total, the report shows 6 typical cases with descriptions of bolts, 2 cases for slopes and 4 cases for underground facilities. For underground facilities, however, one case is described more comprehensively. Overall proposals for implementing condition and quality control are also described, both before, during and after new rock bolts and on older existing rock bolts.

Orienting the rock bolts requires knowledge of the current rock mass, which means the need for design, which includes both rock quality, geometry and the need for reinforcement. To achieve a successful and correct installation of rock bolts, it is good if there are clear requirements specifically for the project, and to have careful follow-up on site during installation. Another successful factor is to inform and train the contractors at the start of the project to explain why certain things during installation are important. This increases awareness and can be seen as a quality increase.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Bakgrund	9
1.2	Syfte	9
1.3	Omfattning och avgränsningar	9
2	Studiemetodik	11
2.1	Studiens genomförande	11
2.2	Diskussionsgrupp	11
2.3	Referensgrupp	12
3	Bulttyper och övrigt material	13
3.1	Inledning	13
3.2	Typer av cementingjutna bultar	13
3.2.1	Funktion slakingjuten och förspänd bult	14
3.2.2	Belastningsförmåga, deformationer och brott för olika bulttyper	15
3.3	Bultbruk och korrosivitetsskydd	16
4	Montage av bergbult	21
4.1	Inledning	21
4.2	Bult- och förankringslängd	23
4.3	Borrhålsdimensioner och ingjutningsmetod	26
4.4	Orientering bult	27
4.5	Bultning slänt	27
4.6	Bultning underjordsanläggning	29
4.7	Vattenförande bulthål	30
5	Typfall montage bergbult	32
5.1	Beskrivning och bakgrund typfall	32
5.2	Utförande typfall	34
5.2.1	Generellt alla typfall	35
5.2.2	Typfall A Bergslänter – Glidning enskilt block	36
5.2.3	Typfall B Bergslänter– Överstjälpling block	36
5.2.4	Typfall C Tunnlar och bergrum – upphängning av bergblock	37
5.2.5	Typfall D Tunnlar och bergrum – skiktat berg	38
5.2.6	Typfall E Tunnlar och bergrum – upphängning av lösmassa och valvbildande bultning	39
5.2.7	Bergförstärkning vid dynamisk belastning	39
6	Tillstånds- och kvalitetskontroll	40
6.1	Inledning	40
6.2	Förprovning	40
6.3	Okulär kontroll installation	41
6.4	Icke förstörande provning	41
6.4.1	Rock bolt tester och Boltometer	41

6.4.2	Cavimeter	42
6.5	Förstörande provning	42
6.5.1	Utdragsprov	42
6.5.2	Urborrning av bult	42
6.5.3	Borttagning av bruk med vattenblästring	43
6.6	Rörelsemätningar	43
7	Genomförande tillstånds- och kvalitetskontroll bergbult	44
8	Diskussion	45
9	Referenslista	47
Bilaga A:	Beskrivning olika typer av bultar	51
Bilaga B:	Tillbehör bergbultar	55
Bilaga C:	Bultförstärkningssystem	56

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Det finns ett behov av råd och riktlinjer riktade till beställare och entreprenörer som arbetar med bergförstärkning av vattenkraftens berganläggningar. Det gäller både metoder för tillståndskontroll av befintliga cementinjekterade bultar och montage av bergbultar för att deras kapacitet skall användas på bästa sätt.

1.2 SYFTE

Syftet med föreliggande rapport är att ta fram råd och rekommendationer för både tillståndskontroll och montage av bergbultar. Montageanvisningarna redovisas genom ett antal olika typfall.

1.3 OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR

Uppdraget omfattar en litteraturstudie som beaktar nationella och internationella studier gällande montage av nya bergbultar (bergförstärkning) och tillståndskontroll av befintliga bergbultar. Det ingår även att ta fram typfall för bergförstärkning med cementinjekterad bult med hänsyn till situationer där bultar utsätts för skjuvning. Typfallen ska kunna användas som råd till entreprenörer för situationer som ska eftersträvas respektive undvikas.

Föreliggande rapport omfattar enbart cementinjekterade permanenta bergbultar. Med bergbult avses en homogen kamstålsbult av någon form av stål som ska ingå i en permanent bergförstärkning. För att hålla studien till en tydlig och begränsad omfattning omfattas inte bergbultar av annat material eller rörbultar och inte heller samverkan med annan förstärkning som exempelvis sprutbetong eller bergnät. Kabelbultar bestående av vajrar ingår inte heller i studien.

Studien omfattar inte råd eller riktlinjer gällande sandinblandning eller tillsatser till cementingjutningen men beskriver lämpliga vattencement-värden, vct-värden, samt om vct enkelt kan eller bör mätas i fält. Studien belyser ungefärliga livslängder som kan förväntas av bergbultar av olika stålmateriäl eller korrosionsskydd i olika miljöer.

Lastöglor för uppgångning av traverser etc i tunneltak fästes normalt med ändförankrade bultar och ses inte som förstärkande element. De resulterar i en tillkommande yttre last och ingår inte i studien.

Det finns även andra behov av bergbultförstärkning, t.ex. vid dynamisk belastning av bergmassan som kräver andra modeller av bergbultar än vad som anges i detta dokument, exempelvis D-bolt. Dessa förstärkningsbehov och bulttyper ligger utanför omfattningen för detta arbete.

Andra förstärkningsbehov är förankring av mindre eller större betongkonstruktioner men även dessa ingår inte inom detta arbete, här finns andra dokument som väl beskriver hur dessa förankringar ska ske^{1,2}.

¹ Lundkvist P., Bernstone C., Marklund A. & Nilsson C-O., (2020). Rekommendationer för hantering av vattenkraftens spännstag. Dimensionering, utförande och hantering av spännstag. Energiforsk, Betongtekniskt program Vattenkraft. ISBN 978-91-7673-688-3. www.energiforsk.se.

² Lundkvist P., Bernstone C., Marklund A. & Nilsson C-O., (2022). Riktlinjer för hantering av spännstag i vattenbyggnadskonstruktioner av betong. Energiforsk, Betongtekniskt program Vattenkraft. ISBN 978-91-7673-834-4. www.energiforsk.se.

2 Studiemetodik

2.1 STUDIENS GENOMFÖRANDE

Hela arbetet har genomförts i två steg, den första delen omfattar en litteraturgenomgång med sökning av nationella och internationella studier i ämnet. Sökorden har varit på svenska och engelska, några exempel på sökord är; Bergbultning, Rock bolting, Testing rock bolts, Testing PC bolt, Field measurements, Rock bolt installation, Rock bolt grouting, Rock bolt grout, Rock bolt embedment length, Korrosion bergbult, Livslängd bergbultar, Beständighet bulttyper, Durability rock bolts, Rock bolt design etc. Vid litteratursökningen har bidragande material till detta dokument hittats på nätverkssidor för konferenser, universitet, myndigheter och för forskningsrapporter, som exempelvis www.sciencedirect.com eller www.researchgate.com. Utöver detta har material även hämtats från författarnas egna samlingar av litteratur i ämnet.

Baserat på resultaten från litteraturstudien har arbetet gått vidare i den andra delen där typfall för montage av bergförstärkning med bergbult samt när och hur tillståndskontroll kan användas tagits fram. Fallen visar på situationer där bultar riskerar att utsättas för skjuvning och ska kunna användas som råd till entreprenörer för situationer som ska eftersträvas respektive undvikas. I detta steg har även erfarenheter från referensgrupp, diskussionsgrupp och skribenterna bidragit.

Resultaten från litteraturstudien är sammanställt i kapitel 3, kapitel 4 och kapitel 6. Beskrivning av olika typfall finns i kapitel 5 och rekommenderat genomförande tillståndskontroll i kapitel 7. Slutligen förs en diskussion om arbetet och resultatet av rapporten i kapitel 8.

2.2 DISKUSSIONSGRUPP

Under projektets gång har en diskussionsgrupp bestående av experter från olika yrkesroller konsulterats. Experterna har mångårig erfarenhet avseende projektering, installation och kravställning av bergbultar. Följande experter har varit med i projektet:

Tomas Karlberg – Iterio AB

Karl-Martin Carlsson – Trafikverket

Henrik Ingebrigtsen – YZ Gruv & Berg AB

Konsultationen har skett genom online-möten där olika frågeställningar har diskuterats enskilt med de olika medlemmarna i diskussionsgruppen, inga större gemensamma möten har skett, diskussionsgruppens medlemmar har inte heller tillhandahållit egen text. Vid varje diskussionstillfälle har ett antal i förväg bestämda frågor behandlats enligt nedan för både *montage av bult* samt *kontroll och verifiering av funktion*:

1. Vad brukar bli fel?
2. Hur löses det på plats?

3. Hur skulle du vilja lösa det?
4. Orsak?
5. Hur ser ett bra genomförande ut?
6. Vad anser du är viktigast för att få så bra genomförande?
7. Vad är det största riskerna med dåliga genomförande?

Till dessa frågor tillkom även dessa detaljfrågor:

1. Krävs täckskikt om bultarna är korrosionskyddade?
2. Eget förslag på krav på ingjutningslängd?
3. Hur kontrolleras vct i fält?
4. Hur kontrollerar man vct efter installation?
5. Hur kontrollerar man installation = kvalitet på ingjutning, under och efter installation?
6. Hur kontrollerar man installation = bultorienteringen?
7. Vilken rikt ska bulten ha?
8. Ska brickor sprutas in eller inte? Vid vilka tillfällen ska de sprutas in
9. När krävs en rostfri bult?

Utöver dessa frågor diskuterades ofta närliggande problem och åtgärder. Erfarenheter och kunskap från diskussionsgruppen har vävts in i texten.

2.3 REFERENSGRUPP

Arbetet har även fått stöd av en referensgrupp som aktivt deltagit i arbetet via arbetsmöten, de som ingått i referensgruppen är följande:

Andreas Larson – Energiforsk

Christian Bernstone – Vattenfall

Niklas Widenberg – Vattenregleringsföretagen

Kjell Nilsson – Uniper

Mats Persson – Vattenfall

Annika Strömkvist – Skellefteå Kraft

3 Bulttyper och övrigt material

3.1 INLEDNING

Det finns ett antal olika typer av bergbultar som kan inkluderas som cement-ingjutna bergbultar. Hur dessa fungerar, bör installeras och tillståndskontrolleras kan variera mellan de olika typerna och därför sammanställs de olika typer som finns angivna i litteraturstudien nedan. Olika bulttyper har även olika syften och förväntade livslängder. Detaljerade egenskaper samt för- och nackdelar redovisas i Bilaga A där bultarna presenteras med följande beskrivningar:

1. Beskrivning
2. Hur de installeras
3. Fördelar och nackdelar

I Bilaga A finns beskrivet bulttyper som inte ingår i denna studie och i Bilaga B beskrivs tillbehör till bergbultar. Hur bergbultar blir belastade beror även i vilket syfte de har installerats. Ibland installeras bergbultar för att enskilt förstärka bergblock, dvs utan att samverka med andra bultar eller andra förstärknings-element, då installeras de som *selektiv bultning*. Sedan kan bergbultar installeras där de samverkar och är en del av ett system av bergbultar, då installeras de som *systematisk bultning*. Vid *selektiv bultning* kan bergbultarna som regel installeras så att deras förstärkande kapacitet maximeras. Vilket innebär att de installeras så att belastningen i huvudsakligen är dragbelastning och så lite som möjligt skjuv-belastning. När bergbultarna ingår i ett system av bergbultar kan varje enskild bult inte individuellt orienteras för att uppnå bästa möjliga förstärkning. De enskilda bergbultarna måste underordna sig bultsystemets behov av bultorienteringar för att systemet ska uppnå bästa möjliga förstärkningseffekt. Detta medför att olika bergbultar i ett förstärkningssystem belastas olika. Exempel på hur systematisk bultning kan nyttjas vid olika belastningssituation beskrivs kortfattat i Bilaga C.

3.2 TYPER AV CEMENTINGJUTNA BULTAR

Val av bulttyp, bultlängd, dimension, kvantitet och placering baseras normalt på geologiska, geometriska och belastningsförutsättningar. Detta kapitel ger en kort beskrivning av användningen av de vanligaste typerna av cementingjutna bultar. Bergbultar kan översiktligt indelas i följande kategorier:

1. Kamstålsbult
 - a. Helt cementingjuten
 - b. Delvis cementingjuten
2. Kombinationsbult
3. Deformationsbult
4. Kabel/Vajerbult
 - a. Helt cementingjuten
 - b. Delvis cementingjuten

Det finns andra ingjutningsmaterial än cement som har andra egenskaper, som exempelvis snabbare härdning, men dessa används i inte samma utsträckning.

Olika typer av bultar har olika förutsättningar och kapaciteter att förstärka bergmassan. I denna studie behandlas kontroll och montage av kategori 1, ”Kamstålsbult” samt till viss del kategori 2, ”Kombinationsbult”. Oavsett om dessa bultar är helt cementingjutna (kategori 1a) eller delvis cementingjutna (kategori 1b) kan dessa bultar installeras på två olika sätt:

1. Slakingjutna
2. Förspända

3.2.1 Funktion slakingjuten och förspänd bult

Förstärkning med bergbult sker antingen med förspända bultar eller fullt ingjutna slaka bultar. En slakingjuten bult kan installeras med eller utan bergbricka som mothåll mot bergöverytan.

Den slakingjutna bergbultens mothållande kraft aktiveras inte förrän en viss, initial, deformation uppstår i bulten, det sker vanligtvis vid 1–3 mm rörelse av bergmassan som bulten är installerad i. Ska denna rörelse reduceras i ett block eller bergvägg ska bultbrickan appliceras med fullständig kontakt mot bergytan. Ett sätt att än mer reducera möjlighet till rörelse längs sprickplan är att använda förspända bultar. Dessa skapar direkt ett ökat normaltryck över sprickplanet om den förspända bulten tvärar sprickplanet med någorlunda stor vinkel, vilket ökar sprickplanets förmåga att ta upp skjuvkrafter.

En förspänd bergbult förankras och så fort förankringen tillåter så spänns bergbulten upp. Bulten bör förspännas upp till 60%^{3,4,5} av sin karakteristiska draghållfasthet vilket medför att bergbulten har en förstärkande funktion direkt efter förspänningen skett. Det finns även angivet upp till 70% av sin draghållfasthet^{6,7} eller att förspänningen görs upp till 200–400 Nm⁸. Kombinationsbultar installeras normalt med mutterdragare och har inga krav på moment de ska dras med och räknas därför inte som förspända bultar. I norska processkoder för vägkontrakt finns däremot krav att kombinationsbultar ska förspännas med 50 kN⁹.

I tunnlar är det vanligast med slaka bergbultar eftersom bergmassans deformation i samband med bergguttar gör att bergbultarna tar last om de installeras i samband med tunneldrivning. I takt med att tunneldrivningen pågår så sker en spänningsomfördelning vilken fortsätter även när tunnelgaveln drivs längre bort från den installerade bergförstärkningen. Denna spänningsomfördelning kan medföra mindre deformationer och rörelser i bergmassan som då lågt belastar bergbulten och därmed ”spänner upp” bergbulten på ett naturligt sätt. Därmed är det oftast ingen stor fördel att installera förspända bultar i tunnlar.

³ AMA Anläggning, (2023). Svensk Byggtjänst.

⁴ Stillborg B., (1994). Professional User's Handbook for Rock Bolting. (2nd edition). TransTech. Pub

⁵ Lundkvist P., Bernstone C., Marklund A. & Nilsson C-O. (2022).

⁶ www.rocsience.com, (2025). Practical-Rock-Engineering/Chapter 16. Rock bolts and cables.

⁷ Hoek E., Kaiser P.K., & Bawden W.F., (1993). Support of Underground Excavations in Hard Rock.

⁸ Norwegian Tunneling Society, (2023). Norwegian Rock Bolting. Publ. 31. ISBN 978-82-92641-53-8.

⁹ Statens Vegvesen, (2018). Håndbok R761. Prosesskode 1. Standard beskrivelse for vegkontrakter.

I bergslänter kan det finnas ett större behov att förspänna bergbulten då fördelen med en förspänd bult är att de direkt ger en ökad normalkraft över sprickplan och därmed ökat skjuvmotstånd längs sprickplan. För icke förspänd bult krävs att viss rörelse sker innan bulten ger ett motstånd, vilket kan medföra att sprickplanets hållfasthetsparametrar reduceras till residualhållfasthet innan bulten ger motstånd.

Viktigt att ta i beaktande med en förspänd bult är att förspänningen släpper något under bultens livslängd vilket måste tas i beaktande vid dimensionering¹⁰. Det är även viktigt att ha ett kontinuerligt övervakningsprogram för att säkerställa att förspänningen upprätthåller den dimensionerande förspänningen under hela dess livslängd. Dessutom förbrukas en del av den lastupptagande förmågan samt deformationskapaciteten. Detta eftersom bulten belastas vid förspänningen och deformationen av bulten påbörjas även om deformationen fortfarande är liten och elastisk. Härmed har alltså en del av den elastiska kapaciteten hos bulten redan förbrukats i och med förspänningen.

3.2.2 Belastningsförmåga, deformationer och brott för olika bulttyper

Enligt en tidig studie med skjuvning av bergbultar i granitblock kommer en bergbult gå sönder i dragbrott om vinkeln mot skjuvplanet är lägre än 35 grader oberoende av dimension på bult¹¹. Det är däremot inte alltid praktiskt möjligt att installera bergbultar med en flackare lutning än 35 grader.

Laboratorietester¹² för att bestämma skjuvhållfastheten hos bultade bergssprickor indikerar att störst hållfasthet utvecklas när en ingjuten bult installeras i en vinkel på cirka 35–50° mot sprickplan. Enligt studien kräver bultar med lägre styvhet mindre installationsvinklar mellan bult och sprickplan för att inte skjuvas av. Användning av bultar med lägre styvhet, till exempel delvis ingjutna bultar, kan motiveras om förväntade deformationer är mycket stora eller om andra element som ingår i samma förstärkningssystem har reducerad styvhet. Bultdesign eller förstärkningsdesign bör alltid vara kompatibel med den förväntade deformationen.

Installation av helt ingjutna bultar innan skjuvspänningar uppkommer längs sprickplan i samband med bergarbeten kan leda till att en oproportionerligt stor belastning överförs till bultarna då all berglast då kommer tas upp av bultarna. Målet bör vara att fördela belastningen mellan sprickorna och bultarna¹³. Dynamisk belastning och tillhörande blockrörelser kan vara så kraftiga att rörelser inte kan motstås och därför måste absorberas av förstärkningssystemet. I sådana fall krävs flexibla, töjningshårdande bultar, vilket kännetecknas av låglegerade stål, som kan absorbera lokala töjningar på över 20%.

Bultar belastas på fyra olika sätt: Axial belastning, böjning, skjuvning och torsion. Belastning med torsion är ovanligt och sker främst när bulten aktivt belastas med

¹⁰ Lundkvist P., Bernstone C., Marklund A. & Nilsson C-O., (2020).

¹¹ Bjurström S., (1974). Shear strength of hard rock joints reinforced by grouted untensioned bolts. In: Proc.3rd Cong.ISRM, Denver 2 1194–1199.

¹² Barton N. & Bakhtar K., (1983). Bolt design based on shear strength. Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting, Abisko, Sweden, pages 367-376.

¹³ Barton N., (1982). Characterizing rock masses to improve excavation design. Panel report, Theme II-Tunnelling and Excavation, 4th Congress IAEG, New Delhi.

rotation. Vanligtvis om en bult belastas med skjuvkrafter kommer bulten till viss del böjas eftersom bulten är styvare än bultbruket och berget vilket resulterar i både drag- och skjuvkraft i bulten¹⁴.

Olika typer av brott kan ske i bultsystemet. Brott kan ske i själva bulten, bultbruket, berget eller i kontaktytorna mellan bult/bultbruk/berg¹⁵.

1. Om berget är svagare än bultbruket och om förankringslängden är otillräcklig, då kommer brott i bultsystemet inträffa vid kontaktytan mellan bultbruk och berg, vilket är den svagaste punkten. När skjuvhållfastheten överskrids i kontaktytan kommer brottet progressera längs med bulten från punkten där maximala belastningen skedde.
2. Om bultbruket är svagare än berget, då kommer skjuvbrott att ske i kontaktytan mellan bult och bultbruk. Om förankringslängden är otillräcklig kommer brottet resultera i att bulten släpper. Skjuvspänningen är högre mellan bult-bultbruk än bultbruk-berg eftersom kontaktytan är mindre mellan bult-bultbruk.
3. Om det finns tillräcklig förankringslängd för hela stål-bultens kapacitet, oavsett egenskaperna hos bultbruk och bult, då kommer själva bulten gå i brott om belastningen överskrider bultens hållfasthet. Däremot kommer lokalt brott ske i bultbruk eller berg före bulten går i brott eftersom bulten har en högre duktilitet (sträckbarhet/seghet) vilket medför att den kan ta högre deformation än bultbruk och berg.

3.3 BULTBRUK OCH KORROSIVITETSSKYDD

För att erhålla en ingjutning som ger en erforderlig vidhäftning och lång livslängd krävs, förutom korrekt bultbruk och blandning, att bulten är fullt ingjuten och centrerad i hålet. Bultbruket ska även ha ett lågt vattencementtal, vct. Med ett lågt vct avses vct under ca 0,4 eftersom det då finns ett överskott på cementkorn som inte reagerat med vatten. Kommer vatten i kontakt med bultbruket reagerar de fria cementkornen med vattnet och bidrar till självläkning av vattenförande sprickor¹⁶. Enligt svensk branschnorm är kravet på vct $\leq 0,3$ ¹⁷ men i flera projekt har även vct $\leq 0,32$ använts med gott resultat baserat på erfarenhet från författare. Det får inte förekomma håligheter eller sprickor i bultbruket med samtidig vattenförekomst då detta kan innebära att bulten blir rostangripen¹⁸. Det är därför viktigt med följande om bultarna ska erhålla en lång livslängd:

1. Bultar installeras enbart i torra hål, se kapitel 4.7 avseende vattenförande bulthål.
2. Bultbruket runt slakgjutna bultar ska vara minst 10 mm runt bulten¹⁹.

¹⁴ Signer S.P., (2000). Load behavior of grouted bolts in sedimentary rock. DHHS (NIOSH) Publication No. 2000-151. New technology for coal mine Roof Support. National Institute for Occupational safety and Health (NIOSH).

¹⁵ Lundkvist P., Bernstone C., Marklund A. & Nilsson C-O., (2020).

¹⁶ Windelhed K., Lagerblad B. & Sandberg B., (2002). Cementingjutna bultars beständighet. SveBeFo-rapport 58.

¹⁷ AMA Anläggning, (2023).

¹⁸ Windelhed K., Lagerblad B. & Sandberg B., (2002).

¹⁹ AMA Anläggning, (2023).

3. Bultbruk för slakgjutna bultar ska vara cementbruk av typ CEM I-SR3²⁰.
4. Bultbruket har ett lågt vct.
5. Bulten är installerad centrerat i hålet. För att möjliggöra detta ska centreringsfjädrar användas så tätt att bulten hålls rak i borrhålet. Avståndet varierar med diametern på bulten. Erfarenhetsmässigt (författarna) bör avstånd maximalt vara 2,0 m mellan fjädrarna för bultar diameter 25 mm, samt att de installeras i varje ände av bulten vid slakingjutna bultar. Smalare bultar kräver tätare avstånd mellan fjädrarna. För optimering av avståndet kan enkla försök utföras på en plan yta. Äldre modell på centreringsfjädrar är av stål och medför ibland att bulten fastnar vid installation. Nyare modeller är lättare att använda.

Direkt mätning av vct är inte möjligt att göra när bruket väl är blandat på ett sätt som inte kräver laborationsundersökning enligt diskussionsgrupp och erfarenhet från författare. Densitet av nyblandat bultbruk kan mätas med hjälp av Mud balance²¹ och indirekt kan därmed vct mätas med Mud balance prov på nyblandat bultbruk. Detta kräver att exakt mängd av endera vattnet eller cement är känd. Konsistensen av nyblandat bultbruk kan även mätas med så kallat sättkon²². Dock finns inga standardiserade krav satta i Sverige och erfarenhetsmässigt från diskussionsgrupp och författare är att sättkon sällan därför används. I Norge finns det däremot krav på utflytningen vid sättkonsmätning för bultbruk för förankringsbultar i jord och berg för konstruktioner²³.

Förspända bultar som gjuts in till fullo ska vara av typ kombinationsbult men det finns inga krav på vct eller cementbruk specificerade i AMA Anläggning 2023²⁴, där anges att bult ska gjutas in enligt tillverkarens anvisningar.

Vid ingjutning av bultar är det viktigt att bruket förbereds och blandas enligt tillverkarens instruktioner. Vid ingjutning av bultar som trycks in i ett cementfyllt hål är det viktigt att hålet fylls från botten och upp med en mängd som medför att lite bultbruk pressas ut när bulten installeras. Vid ett för löst bruk (högt vct) stannar inte bruket i hålet vid uppåtriktade hål²⁵ samt att hållfastheten²⁶ och livslängden²⁷ kan påverkas. Ett för lågt vct medför att bruket blir för styvt och svårt att pumpa. Det är vanligt enligt erfarenhet från diskussionsgrupp och författare att felaktigt (för högt) vct används vid montage. Detta kan bero okunskap om syftet med korrekt vct samt stress/tidspress.

²⁰ SS-EN 197-1:2011, (2011). Cement - Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement.

²¹ Stille B., & Vuorinen J., (2010). Utvärdering av injekteringsbruks egenskaper över tiden. SBUF-projekt 12117.

²² Betongrapport nr 10, (2020). Självkompakterande betong. Rekommendationer för användning. Betongrapport nr 10, utgåva 2.

²³ Statens Vegvesen, (2018). Håndbok R762. Prosesskode 2. Standard beskrivelse for bruer og kaier.

²⁴ AMA Anläggning, (2023).

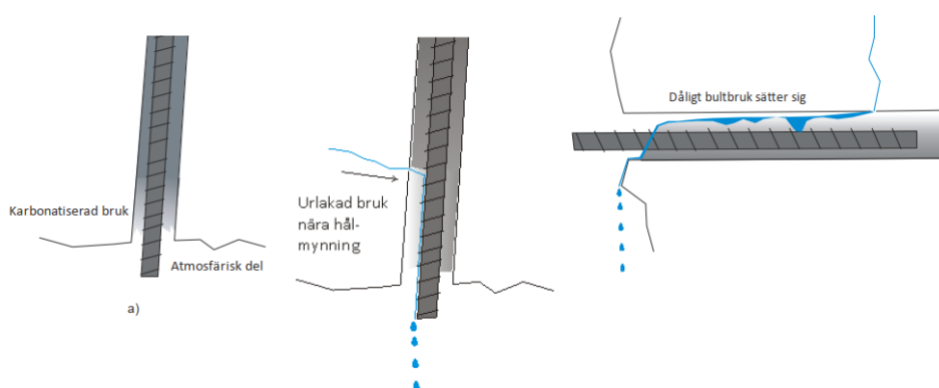
²⁵ Norwegian Tunneling Society, (2023).

²⁶ Li C., Kristjansson G. & Håvard Høien A., (2016). Critical embedment length and bond strength of fully encapsulated rebar rockbolts. Department of Geology and Mineral Resources Engineering, The Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Norway.

²⁷ Windelhed K., Lagerblad B & Sandberg B., (2002).

Livslängden på en bult kan påverkas om den utsätts för en sådan deformation att bultbruket spricker upp. Detta kan då medföra att vatten kan tränga in och orsaka rostangrepp.

I **Figur 1** ges exempel på tre principfall som bedöms kunna äventyra bergbultars livslängd²⁸. Om luftfuktigheten är > 70 % korroderar stål i delen som finns utanför hålet. Bultbruket i hålmynningen kan svälla och kalva ut av karbonisering. Om för löst bruk används kan det rinna ut ur hålmynningen eller att vattenförande sprickor lakar ut bruk nära bergytan. Vid flacka hål kan ett för löst bruk sätta sig då det rinner ut ur hålmynning vilket kan göra att kanaler bildas för vatten som kan laka ut bultbruket.



Figur 1 Illustration på tre principfall som bedöms kunna äventyra bergbultars livslängd. Från Bogdanoff (2013).

En studie med korrosionsprovning av delvis ingjutna bergbultar har pågått i åtta år och i resultaten redovisas undersökningen av bultar av olika stålqualität. I undersökningen ingick bergbultar av obelagt kolstål, rostfritt stål, varmförzinkat samt varmförzinkat och epoxibelagt. Slutsatsen var att välinjekterade bultar kommer få en lång livslängd så länge den alkaliska miljön runt bultarna är intakt. Noterbart är att korrosionsskydd med varmförzinkning ger en relativt kortvarig skyddsverkan om inte epoxibeläggning också utförs. Kolstål som exponerats i trafikutrymmet var kraftigt korroderat efter åtta års exponering²⁹. För att säkerställa en lång livslängd på utstickande delar i aggressiva miljöer rekommenderas det att täckspruta brickorna med sprutbetong³⁰. Erfarenhetsmässigt från diskussionsgrupp och författare så är det stor risk att bultarnas korrosionsskydd skadas vid montage och mellanlagring eftersom det ofta tar för lång tid att hantera varje enskild bult varsamt. Speciellt längre bultar som är svårare att hantera har större risk för skador.

Enligt krav från Trafikverket ska luftexponerade bultar och tillhörande delar som exempelvis bultbrickor ha en ytbehandling som består av varmförzinkning

²⁸ Bogdanoff I., (2013). Degradering av berg, förstärkningar och injektering i tunnlar. Rapport 2013:26. Strålsäkerhetsmyndigheten. ISSN:200-0456.

²⁹ Sederholm B. & Pahverk H., (2019). Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar i tunnlar – långtidsexponering. BeFo Rapport 193. Stiftelsen bergteknisk forskning rock engineering research foundation.

³⁰ Knudsen O. Ø., (2015). Korrosjonsbeskyttelse i tunneler. Rapportnummer 410. Statens vegvesens rapporter.

kombinerat med ytskydd av värmehärdad epoxi³¹. Ett korrosionskyddsystem som uppfyller krav för TLK120³² (Teknisk livslängdsklass 120 år) i korrosivitetsklass C3 har ytskydd av zink 60 µm och epoxi 60 µm. I korrosivitetsklass C4 och C5 ska täcksikt utföras enligt TSFS (Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd) 2018:57³³ vilket innebär att upp till 50 mm kan behövas beroende på exponeringsklass och vct.

Korrosivitetstester utförda i tre svenska³⁴ och tre norska tunnlar³⁵ visar på att korrosionshastigheterna skiljer sig mellan olika material, se Tabell 1 för de olika korrosivitetsklasserna. Exempelvis kan stål uppvisa en korrosionshastighet motsvarande korrosivitetsklass C2-C3 samtidigt som Zink uppvisar en korrosionshastighet motsvarande korrosivitetsklass C3-C5 i samma miljö. För att säkerställa att rätt korrosivitetsklass används bör därför tester avseende vilken korrosivitetsklass som förekommer i anläggningen för olika material utföras så tidigt som möjligt i projekt.

Om korrosivitetsklassen är känd kan teoretiskt sett livslängden beräknas för olika material hos bultar eller ytbehandling utifrån Tabell 1. Tabellen visar medelavfrätningen för dessa klasser för olika material/ytbehandlingar efter första installationsåret. Teoretiskt kan då totala avfrätningen på en bult efter ett visst antal år bestämmas men inga bevis har hittats att materialen korroderar linjärt genom hela materialet och under en längre tid än ett år. Bultens funktion (livslängd) är även avhängt av intakt tvärsnittsarea hos bulten i kombination med den last som bulten är utsatt för. Är bulten lågt belastad fungerar den även om viss del av tvärsnittet är påverkat av avfrätning, medan en högt belastad bult kan nå brottslasten redan vid liten avfrätning. Dessutom visar erfarenheter från diskussionsgruppen att det finns osäkerheter kring hur ytbehandlingen slutligen fungerar på grund av skador som nästan ofrånkomligen uppstår på bultytan vid hantering och installation för att kunna garantera en viss livslängd.

³¹ Trafikverket, (2025). Tunnelbyggnad. TRVINFA-00233. Krav med Rådtext. Version 2.0.

³² Mattson H-Å. & Karlberg T., (2020). Tekniska krav vid dimensionering och utformning av berganläggningar. Vägval för vattenkraftbranschens framtida bergbyggande. Energiforsk. ISBN 978-91-7673-668-5. www.energiforsk.se

³³ Transportstyrelsen, (2022). Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av eurokoder. TSFS 2018:57. Ändringar införda t.o.m. TSFS 2022:50.

³⁴ Engblom J. & Sederholm B., (2020). Rekommendationer för materialval i tunnelmiljöer – Slutrapport. Rapportnummer: KIMAB – 2020 – 12408-6.

³⁵ Knudsen O. Ø., (2018). Korrosivitet i tunneler. Rapportnummer 394. Statens vegvesens rapporter.

Tabell 1 Medelavfrätning för olika korrosivitetsskisser. Tabell från SS-EN ISO 12944-2:2017³⁶.

Corrosivity category	Mass loss per unit surface/thickness loss (after first year of exposure)				Examples of typical environments (informative only)	
	Low-carbon steel		Zinc		Exterior	Interior
	Mass loss g/m ²	Thickness loss µm	Mass loss g/m ²	Thickness loss µm		
C1 very low	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	—	Heated buildings with clean atmospheres, e.g. offices, shops, schools, hotels
C2 low	> 10 to 200	> 1,3 to 25	> 0,7 to 5	> 0,1 to 0,7	Atmospheres with low level of pollution: mostly rural areas	Unheated buildings where condensation can occur, e.g. depots, sports halls
C3 medium	> 200 to 400	> 25 to 50	> 5 to 15	> 0,7 to 2,1	Urban and industrial atmospheres, moderate sulfur dioxide pollution; coastal areas with low salinity	Production rooms with high humidity and some air pollution, e.g. food-processing plants, laundries, breweries, dairies
C4 high	> 400 to 650	> 50 to 80	> 15 to 30	> 2,1 to 4,2	Industrial areas and coastal areas with moderate salinity	Chemical plants, swimming pools, coastal ship and boatyards
C5 very high	> 650 to 1 500	> 80 to 200	> 30 to 60	> 4,2 to 8,4	Industrial areas with high humidity and aggressive atmosphere and coastal areas with high salinity	Buildings or areas with almost permanent condensation and with high pollution
CX extreme	> 1 500 to 5 500	> 200 to 700	> 60 to 180	> 8,4 to 25	Offshore areas with high salinity and industrial areas with extreme humidity and aggressive atmosphere and sub-tropical and tropical atmospheres	Industrial areas with extreme humidity and aggressive atmosphere

NOTE The loss values used for the corrosivity categories are identical to those given in ISO 9223.

³⁶ SS-EN ISO 12944-2:2017, (2017). Färg och lack – Korrosionsskydd av stålkonstruktioner genom målning – Del 2: Klassificering av miljöer, Stockholm: SIS Förlag.

4 Montage av bergbult

4.1 INLEDNING

Generellt installeras bergbultar antingen som systematisk bultning eller selektiv bultning. Vid systematisk bultning installeras bultarna i ett specifikt mönster med bultavstånd 1,0 – 2,5 m i de flesta fallen enligt erfarenhet från diskussionsgrupp och författare. Systematisk bultning används normalt vid berg som bedöms som blockigare eller "svagare" i förhållande rådande bergspänningar. Vid systematisk bultning anges ett avstånd mellan bultarna i riktning tvärs tunneln och ett avstånd mellan bultarna längs tunneln. Denna typ av bultning sker ofta tillsammans med en kompletterande ytförstärkning, som exempelvis sprutbetong eller bergnät, och tillsammans utgör de en förstärkningsplan. Beslut om det ska vara selektiv eller systematisk bultning avgörs av flera faktorer och sker vid design av bergförstärkningen och är projektunikt. Vid selektiv bultning installeras varje enskild bult i ett förmodat löst block eller lös bergskiva utan att de är anordnade i ett förbestämt mönster. Den systematiskt installerade bergbulten ska klara den dimensionerande last som bergblocket utgör. Selektiva bultar kan även komplettera en systematisk bultning. Vid systematisk bultning ska hela det förstärkande systemet (berg, bult, och ytförstärkning) klara den dimensionerande lasten.

Ett korrekt utförande vid installation av bultarna är viktigt för att bulten ska klara av att ta den avsedda lasten under hela dess avsedda livslängd. Installationen bör därför utföras av kvalificerad, utbildad och erfaren personal. För att säkerställa att detta sker behöver det krävas i bygghandlingen.

En korrekt utformning av bergbultförstärkning är beroende av att både bergmassans och bergbultarnas hållfasthets- och deformationsegenskaper är kompatibla. Ett förstärkningssystem med bergbultar kan vara för styvt eller svagt. Vid ett för styvt förstärkningssystem kan plötsliga, mycket snabba brottsförlopp ske om lasten på förstärkningen trots allt är för hög. Med ett för svagt förstärkningssystem tillåts deformationerna ske utan att förstärkningssystemet ger ett tillräckligt mothåll. För att säkerställa att förstärkningssystemet klarar av bergmassans beteende behöver en projektering utföras där beteende beräknas eller bedöms. Utifrån resultaten väljs sedan lämpligt förstärkningssystem, tex val av bulttyp som är anpassad att tåla den typ av belastning som uppstår på grund av bergmassans egenskaper.

Tidpunkten för installation av förstärkningen är också viktig. Om fullt ingjutna bergbultar installeras innan några skjuvspänningar har utvecklats kommer bultarnas höga styvhet vid varje "sprickkorsning" att leda till att bultarna utsätts för hela den skjuvspänning som uppstår vid bergguttaget, med liten eller ingen hjälp från sprickornas inneboende hållfasthet. Det svåruppnåeliga idealet är en bult som når flytgränsen precis när sprickplanet har mobiliserat sin skjuvhållfasthet fullt ut³⁷.

³⁷ Barton N. & Bakhtar K., (1983).

För förstärkning av enstaka block med selektiv bultning i slänter, schakt och tunnlar används normalt slakgjutna bultar eller kombinationsbultar. Vid en selektiv bultning görs bedömning av:

1. Volym och densitet på blocket (pådrivande kraft),
2. Övriga pådrivande krafter på blocket, t.ex. från höga bergspänningar nära randen på tunneln/rummet,
3. Mothållande krafter på blocket, t.ex. från friktionsvinklar och normalkrafter på sprickor, och
4. Bultens bärförmåga (mothållande kraft).

Bultar bör monteras så att draghållfastheten hos bulten nyttjas så mycket som möjligt. Används ändförankrade bultar är orienteringen speciellt viktigt då samverkan ska ske med bultbrickan. För att undvika skjuvbelastning på bultbrickan är det viktigt att vinkeln mellan bulten och brickan inte underskrider 70 grader³⁸. Bultbrickor, halvsfärer och muttrar ska vara tillverkade av samma material och ha samma skydd mot korrosion som bulten (se avsnitt 7.6.2).

Ett sätt att uppnå kontakt mellan bultbrick och bergvägg är att en lämplig understoppning eller så kallad "paltning" genomförs. Med paltning tätas glappet mellan bergväggen och bultbrickan. En studie³⁹, visar på paltningens mekaniska effekt vid fyra olika typfall. För typfallet med lutande bergyta ser det dock ut som om den numeriska modellen inte fullt ut är jämförbar med ett verkligt scenario. En annan studie⁴⁰ sammanställer bla paltningens effekt som rostskydd och därmed livslängd på installerad bult. Resultaten är inte helt tydliga men tolkningen är att paltning hjälper till att minska risken för korrosion. Studierna visar alltså på olika resultat av paltning men oavsett kan det hjälpa att avjämna bergväggen för att få en mer gynnsam vinkel mellan bergbulten och bultbrickan.

Under grundläggning av dammar eller högre slänter kan det ofta förekomma längre och förspända spännstag. Kraven på installation och kontroll^{41,42} på spännstag under vattenkraftsanläggningar eller från slänter skiljer sig från de stela cementingjutna bergbultar som avses i denna rapport.

Vid projektering av bultförstärkning är det viktigt att ta arbetsmiljön i beaktande. Exempelvis kombinationsbultar kan vara fördel ur arbetsmiljösynpunkt jämfört med kamstålsbultar⁴³. En kombinationsbult installeras i tomt borrhål och hålet fylls därefter med betong vilket är betydligt lättare att utföra manuellt jämfört med att installera en konventionell bergbult som trycks in i ett betongfyllt hål. Det medför även mindre risk för betongspill på bultsättaren vid användande av kombinationsbult. Vid användning av bultar med större dimensionen eller längre bultar kan det

³⁸ Statens Vegvesen, (2024). Håndbok N500 Vegtunneler. Norge: Statens Vegvesen.

³⁹ Blomster, E. & Litton Fredriksson, S., (2021). Understopning av bergbultsbricka. Examensarbete, Högscoleingenjörsutbildning inom Byggt teknik och Design, KTH. ABE TRITA-ABE-MTB-2237.

⁴⁰ Liski, J., (2024). Paltning av bergbultar och dess mekaniska inverkan. Examensarbete, Civilingenjörsutbildning, Avdelningen för betongbyggnad, KTH. TRITA-ABE-MBT-24373. ISBN 978-91-8040-989-6.

⁴¹ Lundkvist P., Bernstone C., Marklund A. & Nilsson C-O., (2020).

⁴² Lundkvist P., Bernstone C., Marklund A. & Nilsson C-O., (2022).

⁴³ Rhen. I-M. & Forsman M., (2019). Bultsättning vid tunnelbyggen. Biomekanisk belastning vid användning av tre olika bulttyper. Centrum för arbets- och miljömedicin. Rapport 2019:03. ISBN: 978-91-88361-19-6.

även vara fördelaktigt att använda självborrande stag för att minska belastningen på bergarbetarna. Ett självborrande stag är i princip ett borrhåle med borrhålskrona, och när hålet är borrarat gängas hela borrhålet inklusive borrhålskronan av från borrhålskronan och lämnas kvar i borrhålet som sedan fylls med betong.

4.2 BULT- OCH FÖRANKRINGSLÄNGD

Bestämning av bultlängd och bultavstånd har länge varit ett diskussionsämne och en begränsning kan vara det fria utrymmet vid installation. För bultförstärkning av slänter är det sällan ett problem men vid trånga utrymmen under jord kan det vara ett stort problem. Bultarnas och borrhålsens längd är självklara faktorer som kan skapa problem om det är trånga utrymmen men både bultar och borrhåls kan idag skarvas. Vad som dock ofta anges som begränsande är storleken på borrhålsens borrhålsbommar. Ofta anges ur produktionspunkt att bultlängden bör vara mindre än hälften av tvärsnittets höjd/bredd för att underlätta installationen av bergbulten.

Litteraturstudien visar att det har gjorts ett stort antal försök när det kommer till bestämning av förankringslängd. Vad som bland annat styr behovet av förankringslängd är vilken av brottmekanismerna som kan accepteras när en bult belastas. Brottmekanismer för en installerad bergbult eller spännstag är någon av följande:

1. Brott i stålet (drag-eller skjuvbrott, eller kombination av dem).
2. Vidhäftningsbrott mellan stål och bultbruk.
3. Vidhäftningsbrott mellan bultbruk och berg.
4. Brott i bergmassan runt bulten.

Normalt eftersträvas det att brottmekanism 1 ska vara dimensionerande, dvs. att det är själva bulten som ska gå i brott om hållfastheten överskrider.

Vid vidhäftningsbrott mellan bultbruk och stål samt mellan bultbruk och berg bidrar sammantaget tre olika mekanismer:

1. Adhesion mellan stål och bultbruk.
2. Friktion i kontaktzon.
3. Mekaniska förtagningseffekter p.g.a. stålets geometri, exempelvis gängorna på stålet eller ändrad form på bulten.

Vid kortare förankringslängder, som i de flesta fall av bergbultning, är det främst adhesionen som står för bärförmågan. För längre förankringslängder som ofta är fallet vid förspända stag eller linor så kommer alla tre mekanismerna bidra till bärförmågan. Aktivering av friktion längs kontaktytan samt effekten av förtagningar i ytorna är beroende av att en förslutning sker i kontaktzonen⁴⁴.

En serie utdragningsprover har utförts på 20 mm kamstålssbultar⁴⁵ som visar hur den fungerande ingjutningslängden beror på kontakten mellan bulten och bultbruket där brukets enaxiella tryckhållfasthet, UCS (Uniaxial Compressive Strength), har störst betydelse. Eftersom vct är direkt korrelerad med UCS har även

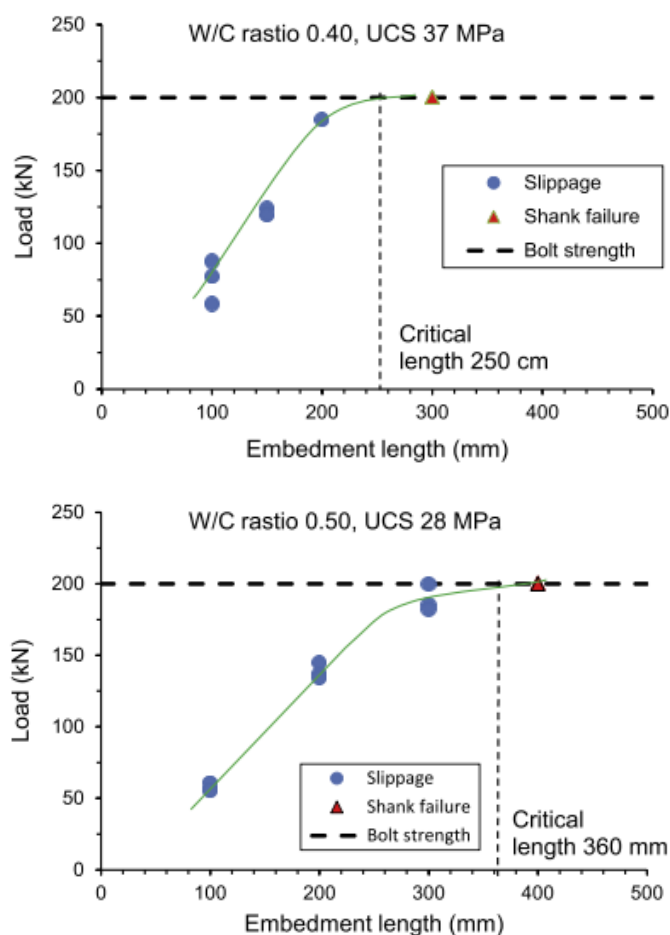
⁴⁴ Lundkvist P., Bernstone C., Marklund A. & Nilsson C-O., (2020).

⁴⁵ Li C., Kristjansson G. & Håvard Høien A., (2016).

vct stor betydelse. Kritisk ingjutningslängd för 20 mm kamstålsbult enligt studien var:

- 25 cm för bruk med UCS = 37 MPa (vct 0,4).
- 32 cm för bruk med UCS = 32 MPa (vct 0,46).
- 36 cm för bruk med UCS = 28 MPa (vct 0,5).

Lastkurvorna för vct 0,4 och 0,5 visas i Figur 2.



Figur 2 Kritisk förankringslängd, övre bilden med vct = 0,4 (enaxiell tryckhållfasthet 37 MPa), nedre bilden med vct = 0,5 (enaxiell tryckhållfasthet 28 MPa)⁴⁶.

Erforderlig ingjutningslängd för elastisk respektive plastisk deformation kan även beräknas⁴⁷ enligt:

$$L_{CE} = \frac{F_y}{\tau_m \cdot \pi \cdot d_b} \quad \text{Ekvation (1)}$$

⁴⁶ Li C., Kristjansson G. & Håvard Høien A., (2016).

⁴⁷ Håvard Høien A., Li. C. & Zhang N., (2021). Pull-out and Critical Embedment Length of Grouted Rebar Rock Bolts-Mechanisms When Approaching and Reaching the Ultimate Load. Rock Mechanics and Rock Engineering (2021) 54:1431–1447. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02318-6>.

$$L_{CP} = \frac{F_u - F_y}{\tau_{RA} \pi \cdot d_b} \quad \text{Ekvation (2)}$$

Där L_{CE} är kritisk elastisk ingjutningslängd, F_y är stålets sträcklast, d_b är bultens diameter och τ_m är vidhäftningshållfasthet mellan stål och bultbruk i Ekvation 1. För Ekvation 2 är L_{PE} kritisk plastisk ingjutningslängd, F_u är stålets maximala draghållfasthet, d_b är bultens diameter och τ_{RA} är medelvärdet för vidhäftningshållfasthet mellan stål och bultbruk.

En motsvarande formel används för bestämning av ingjutningslängd avseende vidhäftningsbrott mellan stål och bultbruk samt bultbruk och berg för mantelburna stålplåtar. I denna studie visas att dimensionerande vidhäftningsspänningen (vidhäftningshållfasthet) mellan stål och betong i säkerhetsklass 3 är 3,25 MPa för betong K40⁴⁸. Detta värde är något lägre än resultaten från andra studier⁴⁹ som redovisar att vidhäftningshållfastheten är 10–20 % av brukets UCS vid användandet av kamstålsbult. Samma rapport anger att vidhäftningshållfastheten mellan berg och bultbruk kan antas vara 10 % av bergmassans enaxiella hållfasthet upp till ett maxvärde på 4,2 MPa.

Resultatet från en studie på 80 bultar monterade i basalt block visar att brott sker mellan bulten och bultbruket. Resultaten visar även att vidhäftningshållfasthet mellan en kamstålsbult och bultbruk för vct = 0,4 är 1,8 MPa efter en dag, 7,5 MPa efter 7 dagar och 8,4 MPa efter 35 dagar. Hållfastheten på bruket ökar kraftigt fram till ca 7 dagar för att sedan öka saktare. Rekommendationen från studien är att använda ett vct för ingjutningsbruket mellan 0,34 och 0,4⁵⁰. Svenska byggnormer⁵¹ anger dock att vct ≤ 0,3 användas vilket då ger högre vidhäftningshållfasthet än 0,4. Andra källor ger att vct 0,3 – 0,35 är lämpligt^{52,53}.

Vid dimensionering av bultförstärkning är det som regel bergbultens hållfasthet som används vilket då kräver att ingjutningslängden ökar med grövre bult, i annat fall kommer brottet ske i ingjutningen, vilket det inte är dimensionerat för. Anledningen till detta är att en grövre bult helt enkelt klarar högre last, så om två bultar har samma ingjutningslängd men en bult har smalare diameter tål den en lägre last innan den deformeras jämfört med den bulten med grövre diameter. Om betongförankringen hos den valda ingjutningslängden för dessa två bultar har en hållfasthetskapaletet som ligger mellan maximal lastkapacitet hos dessa två olika grova bultar erhålls två olika brott. Vid den smalare bulten erhålls brottet i bulten när bulten successivt belastas och belastningen passerar bultens hållfasthet men inte ingjutningens hållfasthet. Vid den grövre bulten erhålls brottet i ingjutningen när bulten successivt belastas och belastningen passerar ingjutningens hållfasthet

⁴⁸ Bredenberg H., (2000). Stålkärnepålar. Anvisningar för projektering, dimensionering, utförande och kontroll. Rapport 97. Pålkommisionen.

⁴⁹ Kim H-K. & Cho N.J., (2012). A design method to incur ductile failure of rock anchors subjected to tensile loads, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* vol. 17, s. 2737-2746.

⁵⁰ Kilic A., Yasar E. & Celiki A.G., (2002). Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rockbolts. Department of Mining Engineering, Cukurova University, 01330 Balcali, Adana, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology* 17 (2002) 355–362.

⁵¹ AMA Anläggning, (2023).

⁵² Hoek E., Kaiser P.K., & Bawden W.F., (1993).

⁵³ Stillborg B., (1994).

men inte bultens. Vid design av bultförstärkning eftersträvas att det är bultens draghållfasthet som ska vara dimensionerande, inte ingjutningen då bultens hållfasthet är lättare att kravställa och kontrollera.

Används vidhäftningshållfasthetsvärden på 3,25 MPa⁵⁴ samt bultbruk med hållfasthet 40 MPa, blir erforderlig ingjutningslängd = 0,8 m för en 20 mm kamstålsbult och 0,96 m för en 25 mm kamstålsbult enligt Ekvation 1.

Används vidhäftningshållfasthet 8,4 MPa enligt resultaten från andra studier⁵⁵ blir den erforderliga ingjutningslängden = 0,30 m för en 20 mm kamstålsbult och 0,37 m för en 25 mm kamstålsbult. Viktigt att ta i beaktande är att dessa framräknade värden bygger på resultat av utdragningsprov och inte är justerade efter partialkoefficienter/ säkerhetsfaktorer. Dessa resultat stämmer väl överens med resultaten från en omfattande kampanj av utdragsförsök⁵⁶. Dock gäller enligt AMA Anläggning 2023 att ska bultar vara förankrade 1 m i fast berg⁵⁷. Detta gäller för bergförankring med bultar utan förspänning.

4.3 BORRHÅLSDIMENSIONER OCH INGJUTNINGSMETOD

Borrhålet som skall användas för en bergbult skall borras minst 100 mm längre än den planerade bergbultens längd i bergmassan. När en fullt ingjuten kamstålsbult ska installeras skall borrhålets fyllas med bruket från botten av hålet med en slang som sakta dras ut för att säkerställa att hela borrhålet fylls med bruk. Det är viktigt att säkerställa att slangen alltid är i kontakt med bruket så det inte bildas luftfickor. Används korrekt vct rinner inte betongen ut ur hålet. När hålet är fyllt pressas bulten in i hålet genom bruket^{58,59,60}. För en kombinationsbult monteras bulten först och sedan pumpas bultbruk igenom bulten och fyller hålet inifrån och ut. Det är även möjligt att med hjälp av luftslang gjuta in ändförankrade bultar från bultbrickan och inåt^{61,62}.

Diametern på borrhålet samt relationen mellan borrhålets och bergbultens diameter påverkar till viss del förankringskapaciteten. Generellt minskar den med en ökande diameter på borrhålet. Detta förklaras av att styvheten i förankringszonen minskar med ökande mängd injekteringsbruk⁶³. För cementingjutna bergbultar ska borrhålets diameter vara mellan 10 och 30 mm större än bultens diameter⁶⁴. Då ingjutningsmaterialet ofta har en hög hållfasthet spelar en rimlig

⁵⁴ Bredenberg H., (2000).

⁵⁵ Kilic A., Yasar E. & Celiki A.G., (2002).

⁵⁶ Li C., Kristjansson G. & Håvard Høien A., (2016).

⁵⁷ AMA Anläggning, (2023).

⁵⁸ www.rocscience.com., (2025).

⁵⁹ Hoek E., Kaiser P.K., & Bawden W.F., (1993).

⁶⁰ Stillborg B., (1994).

⁶¹ Norwegian Tunnelling Society., (2023).

⁶² Hoek E., Kaiser P.K., & Bawden W.F., (1993).

⁶³ Tistel J., Grimstad G. & Eiksund G., (2017). Testing and modeling of cyclically loaded rock anchors, Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, vol. 9, s. 1010-1030.

⁶⁴ Norwegian Tunnelling Society, (2023).

variation i borrhålsdiametern en mindre roll men risken för krympsprickor ökar när borrhålsdiametern ökar⁶⁵.

4.4 ORIENTERING BULT

Bultning i slänter som inte är åtkomligt med bultrigg, kran eller skylift utförs normalt av personal i klätterrep vilket kan vara tidskrävande. Speciellt tidskrävande är bultning med bultar längre än 6 m då dessa ofta kräver grövre hål på grund av skarvhylsor i borrhastagen. Dessutom blir bultarnas vikt ett problem då de inte längre kan monteras av en person.

Bultar ska sättas in så att dragkapaciteten utnyttjas i så stor utsträckning som möjligt men ändå verka över sprickplanet. Mellan en icke förspänd bergbult och glidplan är optimala installationsvinkeln teoretiskt ca 30° mellan bult och glidplan. Att exakt hitta denna vinkel är praktiskt svårt därför anges intervallet på vinkeln mellan 15–45° i de första studierna⁶⁶. Vissa andra senare styrande dokument⁶⁷ rekommenderar ett något brantare spann, 30–50° se även Figur 3. Orsaken anges inte i referensen. För att kunna nyttja bultens hållfasthet fullt ut krävs dock att sfäriskt säte (beskrivning i Bilaga C) mellan bult och bricka används när bultarna vinklas⁶⁸.

För de fall där bergbultarna måste installeras vinkelrät mot sprickplanen finns en viss osäkerhet förknippad med den dimensionerande hållfastheten hos bultarna när de då utsätts för ren skjuvning i berget^{69,70,71}. Detta beror delvis på brottytans beskaffenhet och därmed brottsekvensen, tillsammans med typen av bult. Skjuvhållfastheten hos en bult är enligt von Mises skjuvkriterium $1/\sqrt{3}$ av draghållfastheten, men ofta avrundas skjuvhållfastheten till 50% av draghållfastheten⁷².

4.5 BULTNING SLÄNT

Flera studier rekommenderar som tidigare nämnts en vinkel mellan det kritiska sprickplanet och bultens längdaxel på 30–50°, se även Figur 3. Men förstärkningen längs en bergsslänt kan behöva anpassas även i samma profil av slänten beroende på vad som kan orsaka instabiliteten i slänten, ett exempel på det visas i Figur 4⁷³.

Brott i slänter och skärningar i fasta bergmassor med väldefinierat diskontinuitetsmönster medför vanligen:

⁶⁵ Bjurström S. & Heimersson M., (1975). Bergbultning. Dimensionering, praxis och tillämpningar. BeFo. Rapport nr 8.

⁶⁶ Bjurström S. & Heimersson M., (1975).

⁶⁷ Norwegian Tunneling Society, (2023).

⁶⁸ Bjurström S. & Heimersson M., (1975).

⁶⁹ Bergman, S.G.A. & Bjurström, S., (1983). Swedish experience of rock bolting. A keynote lecture. Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting, Abisko, Sweden, pages 243-255.

⁷⁰ Bjurström, S. (1974).

⁷¹ Nilsen B. & Hagen R., (1990). Stabilitetsproblemer og forslag til ukonvensjonell sikring ved Tellnes dagbrudd. Fjellsprengningsteknikk /Bergmekanikk/Geoteknikk 1990 (23: s.1-20).

⁷² Malm R., Johansson F., Hellgren R. & Bayona F. R., (2017). Load capacity of grouted rock bolts due to degradation. Energiforsk. ISBN 978-91-7673-374-5.

⁷³ Wyllie D. & Mah C. (2004) Rock Slope Engineering. Civil and mining. 4th Edition.

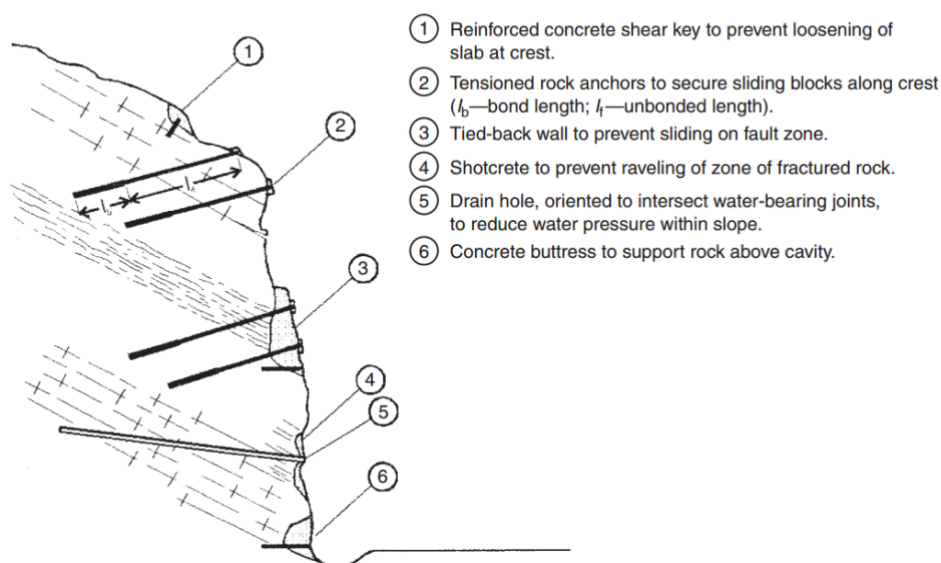
1. Glidning av block eller bergskilar.
2. Stjälpning av block eller skivor.
3. En kombination av stjälpning och glidning.

Vilken av dessa fall som uppstår beror på orientering av sprickplan samt lutningen hos släntytan i förhållande till lutningen på sprickplanen. Viktigt att när vatten-tryck i sprickor kan uppkomma ska detta tas i beaktande när förstärkning dimensioneras. Som stabiliseringsmetod kan både slagjutna bultar och förspända bultar användas.



Figur 3 Föreslagna vinklar bult i slänt med sprickplan⁷⁴.

⁷⁴ Norwegian Tunnelling Society, (2023).



Figur 4 Olika val av bultar med avseende på vad som ska förstärkas⁷⁵.

4.6 BULTNING UNDERJORDSANLÄGGNING

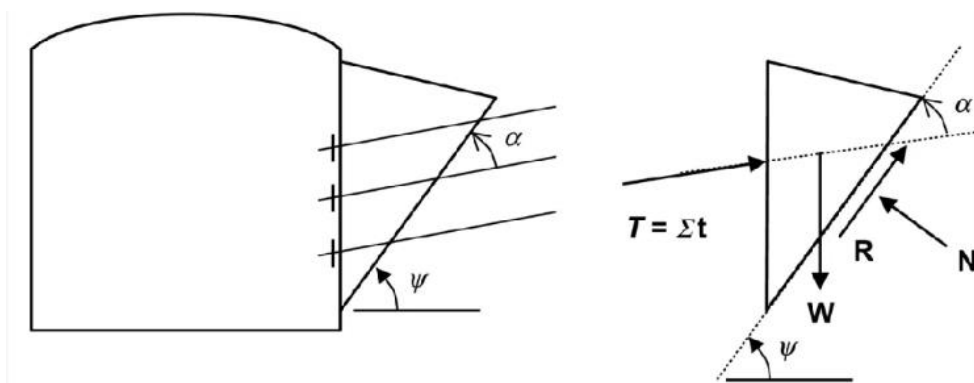
Bergblock i tak i ytnära berganläggningar belastas ofta enbart av gravitativa laster och bergbultar kommer därmed främst belastas i draglast⁷⁶. Bultar kan därmed i regel monteras vinkelrätt mot taket. Vid djupt belägna anläggningar erhålls höga, omfördelade bergspänningar som skapar skjuvbrott i bergmassan. Vid dessa lastfall belastas bergbulten med en skjuvlast. Vid dessa situationer ingår som regel bergbultarna i förstärkningssystem där det är svårt att individuellt anpassa bergbultarna efter skjuvbrottet i bergmassan.

Principen för att stabilisera ett bergblock i vägg illustreras i Figur 5 nedan. Ett eventuellt block i väggen kommer glida på ett sprickplan där belastningen utgörs av dödvikten på blocket och den mothållande kraften är bergbultarna samt friktionen i sprickplanet. Normalt antas ingen kohesion förekomma i sprickplan nära en tunnel då sprängningen riskerar att ha påverkat kohesionen⁷⁷.

⁷⁵ Wyllie D. & Mah C., (2004).

⁷⁶ Li C., (2017). Rockbolting. Principles and Applications. First Edition. Department of Geoscience and Petroleum, The Norwegian University of Science and Technology.

⁷⁷ Li C., (2017).



Figur 5 Principen för att stabilisera ett bergblock i vägg med bult i tunnelvägg med sprickplan. Bild från Li Charlie Chunlin (2017)⁷⁸.

4.7 VATTENFÖRANDE BULTHÅL

Bultar får inte monteras i vattenförande bulthål och med vattenförande bulthål avses ett borrhål med inläckage ≥ 1 droppe per minut⁷⁹. Vid designen av bergtunneln beslutas utifrån förutsättningarna om tunneln kan anses som torr, dvs acceptabelt vatteninläckage förväntas via sprickor eller borrhål. Bedöms tunneln få ett för högt vatteninläckage tas en injekteringsplan fram så att bergmassan närmast tunneln får acceptabelt inflöde. Den injekterade zonen dimensioneras normalt att sträcka sig från tunnelranden och ca 5–10 m ut från randen beroende på spännvidd och inläckagekrav (erfarenhet från författare). Därmed anses förutsättningarna för både dimensionering av bergförstärkning och tunneldrivningen att acceptabelt torra förhållanden råder i bergmassan efter det att injektering har utförts. Med detta antagande dimensioneras en viss mängd förstärkning och indriftshastigheten på tunneln baseras på att alla bultar som installeras inte behöver ersättas av nya bultar. Därför är åtgärdandet av vattenförande bulthål inte systematiskt inplanerat i produktion av tunneln och blir produktionsstörande då detta arbete är både tids- och kostnadskrävande. Hantering vid vattenförande bulthål är följande⁸⁰:

1. Läckande bulthål ska omedelbart efter borrhåll förseglas med demonterbar manschett/packer med anordning för att släppa ut det samlade vattnet bakom manschetten/packern inför injektering.
2. Läckande bulthål ska injekteras med cementbaserat bruk. Efter utförd injektering ska borrhålet borras om och ny bult installeras.
3. Injektering av läckande bulthål ska utföras med ett cementbaserat injekteringsmedel av CEM I kvalitet. Injekteringsmedel ska vara stabilt med vattenseparation $< 5\%$ Cementbruket ska ha, ett maximalt vattencement tal på 1,2 och en maximal kornstorlek $D_{95} < 20\ \mu\text{m}$. Injekteringsmedelsblandning ska passera 300 ml med filterpump och filtervidd $90\ \mu\text{m}$.

Erfarenhetsmässigt, enligt författare och diskussionsgrupp, är det bra att pröva borra ett nytt hål nära det vattenförande hålet och lite längre. Eventuellt också luta

⁷⁸ Li C., (2017).

⁷⁹ AMA Anläggning, (2023).

⁸⁰ Khodaverdian H. & Zetterlund M., (2020). Läckande bulthål i berg – Orsaker och åtgärder. Stiftelsen bergteknisk forskning. Befo Rapport 208.

så hålen nästan går ihop i hålslut. Detta kan med lite tur resultera i att antingen det nya hålet är torrt eller att det nya hålet träffar den vattenförande sprickan och dränerar det så det gamla hålet blir torrt. Vid samtal med diskussionsgrupp och andra bergarbetare så framkom det att många har provat att montera bult i droppande bulthål med förhoppning att bultbruket hinner härda innan vattnet letar sig ut och därmed stoppa upp vattenföringen. Detta har i de flesta fall resulterat i vattnet ändå letat sig ut och efterinjektering eller ny bultsättning har varit nödvändigt.

5 Typfall montage bergbult

5.1 BESKRIVNING OCH BAKGRUND TYPFALL

Hur bergbultar ska monteras beror på flera faktorer, geometri av block som ska förstärkas eller vilken typ av brott i bergmassan som uppstår. Det kan även skilja sig mellan installation av selektiv bult och bult som ingår i systematisk bultning men även om bergbulten ska installeras i en underjordsanläggning eller i en slänt. Slutligen gör det skillnad om bergbulten ska förspännas eller vara en slakingjuten bult. Alla dessa faktorer inverkan finns beskrivet tidigare i kapitel 4. Nedan kommer typfall av förstärkning beskrivas för bergslänter och för underjordsanläggningar.

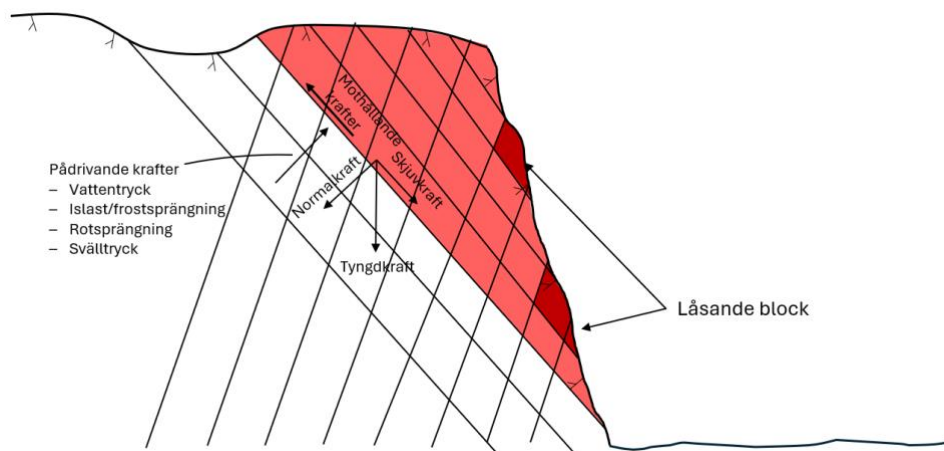
För en slänt kan även cirkulärt brott ske men det kräver oftast en viss höjd på slänten/skärningen i kombination med en bergmassa av låg kvalitet och är inte ett troligt scenario i vattenkraftsanläggningar. Cirkulära brott i bergmassan kan som regel inte förstärkas emot med bergbultar utan denna typ av brott i bergmassan måste hanteras med på ett annat sätt, exempelvis med att ha låga släntvinklar och dränera slänten.

Vid beskrivning av slänters stabilitet anges ofta övergripande stabilitet, global stabilitet alternativt storskalig stabilitet eller lokal stabilitet. De tre förstnämnda (övergripande, global och storskalig) beskriver egentligen ungefär samma volym av bergmassa. Det avser ofta i svensk och internationell litteratur stora volymer av en slänt, ofta naturliga höga slänter eller höga slänter i dagbrott. Med höga slänter avses oftast vad som exempelvis kan vara flera pallhöjder i ett dagbrott, ca 30 m eller högre. Det kan också utgöra en hel sida av ett dagbrott eller naturlig bergslänt, med andra ord betydligt mer volym av bergmassa och högre höjd än vad som är vanligt för en bergslänt i svenska infrastrukturprojekt.

Med lokal stabilitet avses, mindre, oftast enstaka bergblock där utfall av dessa ibland kan accepteras för att de inte påverkar släntens globala stabilitet. Notera att mycket utfall av mindre bergblock eller att ett enstaka så kallad "låsand block" kan påverka den övergripande stabiliteten. Men då bör det bedömas som ett övergripande stabilitetsproblem. Lokal stabilitet kan emellertid medföra personfara och påverka underhållsbehov liksom släntens gestaltning, se Figur 6 för illustration över pådrivande och mothållande krafter på sprickplan med låsande block.

Andra effekter av utfall av enstaka block kan vara att exempelvis kraft från vatten vid spill längs en utloppskanal påverkar övriga delar av en schaktvägg eller att vattnet styrs ut ur kanalen. Därför skall både globala och lokala stabilitet behandlas vid dimensionering och vid byggskedet av slänter.

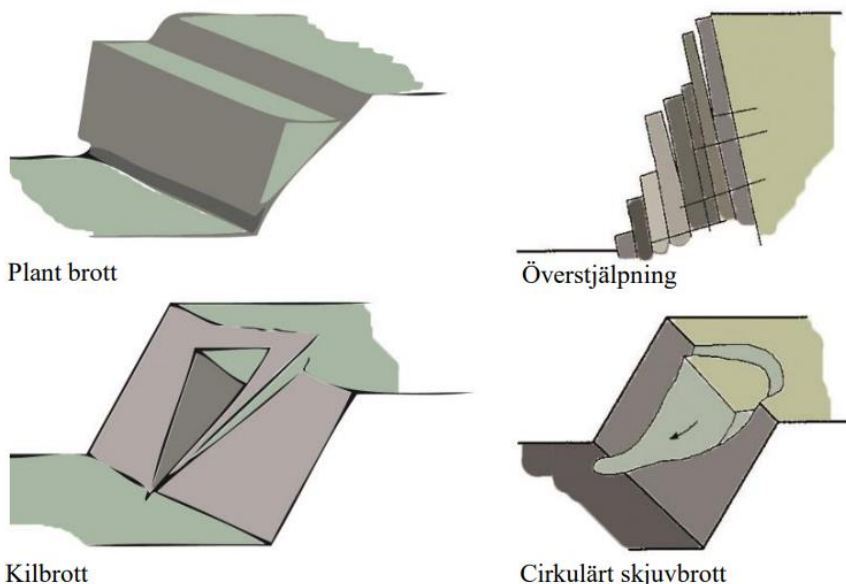
Ofta sker endast stabilitetsanalyser för globala stabiliteten i slänter. Mindre enstaka bergblock skrotas ned eller förstärks med selektiv bult och nät vid behov. Alternativt att de även stabiliseras om stabiliserande åtgärder utförs för totalstabiliteten.



Figur 6 Illustration av pådrivande och mothållande krafter på sprickplan med låsande block.

Olika typer av släntbrott är associerade med olika geologiska strukturer och det är viktigt att känna igen potentiella stabilitetsproblem under de tidiga stadierna av ett projekt. I Figur 7 anges de fyra typerna av möjliga släntbrott och hur de kan åskådliggöras. De olika typerna av släntbrott har alla olika behov av stabilitetsanalyser och det är avgörande att rätt metodik och metod av stabilitetsberäkning används vid design. Det ska även noteras att flera av de olika släntbrotten kan förekomma i samma slänt.

Vid kilbrott, överstjälpling och plana brott i lägre slänter är det ofta tillräckligt att förstärka med fullt ingjutna bultar som inte förspänns där beaktande enbart tas till hållfastheten i stålet.



Figur 7 Olika möjliga brott i en bergslänt. Plant skjuvbrott, överstjälpling (toppling), kilbrott eller cirkulärt skjuvbrott⁸¹.

⁸¹ Eriksson M., Kiilsgaard R. & Bertilsson R., (2015). Slänter i berg. Inventering av kunskapsläge och behov. Statens geotekniska institut, SGI Publikation 22, Linköping.

Valet om det räcker med selektiv bultning eller om det krävs systematisk bultning avgörs av bergmassans beskaffenhet och belastning (bergspänningar). Valet ska baseras på geologiska och bergmekaniska förutsättningar.

Eurokod 7 ställer upp ett antal kriterier för och vid dimensionering av bergslänt som kan sammanfattas till att stabilitet ska kontrolleras och utföras för följande:

1. Kontroll mot blockutfall i form av glidning, stjälpning eller en kombination av dessa.
2. Kontroll mot cirkulärt brott.
3. Hänsyn tas till egentyngd, vattentryck och externa laster som exempelvis jordlager, närliggande konstruktioner, maskiner etc.

Eurokod ger ännu inga riktlinjer av användande av bergbultar som bergförstärkning för undermarksanläggningar. Det pågår för närvarande arbeten med att försöka implementera detta i Eurokod 7. Som komplement till kraven angivna i Eurokod 7 är det viktigt att poängtera att en bedömning av sannolikheten att block skapas måste beaktas tillsammans med en konsekvens-analys. Det är inte rimligt att dimensionera alla slänter för block med oändliga spricklängder. I stället kan krav på designens giltighet sättas beroende på observationer.

Idag sker bland annat bergförstärkning där livslängden förväntas vara upp till 120 år. Än idag finns egentligen ingen garanti att så är fallet, se bland annat på förväntad livslängd på bultars ytbehandling. Därför anges här att kontroll av bergbultarnas funktion sker med regelbundenhet även under drifttid, se rekommendationer i kapitel 7. Kontroller ska göras före, under och efter montage vilket också ställer krav på bultutstick, se kapitel 5.2.1.

5.2 UTFÖRANDE TYPFALL

Utförande av typfallen beskrivs nedan med en allmän beskrivning som gäller för allt montage av bergbultar, oavsett om de installeras i en bergskärning/ slänt eller i en underjordsanläggning, se kapitel 5.2.1. Därefter kommer specifika krav/ riktlinjer på utförande för de olika angivna typfallen, se kapitel 5.2.2 till 5.2.6. Kontroll av montage och kvalitet anges i kapitel 7.

För bergskärning visas här 2 st typfall:

- Glidning av enstaka block (Plant brott/kilbrott).
- Överstjälpning av bergblock (Övertippning av skiktade bergblock).

För underjordsanläggningar visas bultförstärkning av de som bedöms som vanligaste förstärkningssituationer, här 4 st typfall:

- Upphängning av bergblock (block/Kil-utfall i tak eller vägg).
- Horisontell skikta berg som knäcks och faller ut i tak.
- Skiktat berg med svaghetsplanen parallella med tak eller vägg.
- Trasigt (homogent trasigt).

Utöver typfallen beskrivs kort bergförstärkning vid dynamisk belastning.

5.2.1 Generellt alla typfall

Montage av bergbultar utförs till stor del på samma sätt oavsett bergbulten är installerad i en bergslänt eller under jord samt oavsett lastförutsättningar. Här anges de gemensamma krav på utförande för alla beskrivna typfall:

1. Borrhållslängden anpassas så att den är 0,1 m längre än vald bultlängd.
2. Borrhållsdiametern ska vara 20 mm större än bultdiametern.
3. Alla bultar förses med bultbricka och mutter om samverkan ska ske med ytförstärkning eller om bultarna är ändförankrade. Brickor ska även användas om yttersta (mot fria ytan) delen av bulten ($<0,4 \text{ m}^{82}$) är i löst berg. Ibland kan även brickor installeras med upplevd säkerhet som skäl i exempelvis bergslänter nära gångstråk där brickorna ger ett intryck av att bultarna "bättre håller fast bergblocken". Om brickan inte kan monteras med en vinkel mellan $70\text{--}90^\circ$ mot bulten ska ett sfäriskt säte av samma kvalitet som bulten monteras mellan bricka och mutter. Alternativt skall brickan "paltas" så att brickan kan monteras vinkelrät mot bulten.
4. Alla slakingjutna bultar ska vara fullt ingjutna och eventuell bultbricka ska ligga an mot bergytan och vara åtdragen med muttern.
5. Förspända bergbultar kan enderas vare helt eller delvis ingjuten.
6. Vid krav på livslängd ska bultarna centreras med fjäder eller annan metod.
7. Vid krav på livslängd ska bultbruket vara CEM I-SR3 med vct 0,3.
8. Vid krav på livslängd ska korrosionsskydd på bergbultar användas om korrosivitetsklassen är C3, C4, C5 eller CX. Täcksikt på utstickande bultände och brickorna ska appliceras om det inte är möjligt att ersätta brickor i senare skede eller om korrosivitetsklass är C4, C5 eller CX. Täcksikt enligt TSFS 2018:57⁸³.
9. Bergbultarna, bricka, mutter och eventuellt sfäriskt säte ska vara av samma material och vara behandlade på samma sätt som bergbulten.
10. Förspända bergbultar appliceras med en förspänningskraft som är 50–60% av flytgränsen.
11. Utstick av bultbush ska vara så långt att bultbricka, sfäriskt säte och mutter ryms. Om kontroll av bergbultar planeras gäller att utsticket ska (utöver utrymmet för bultbricka, sfäriskt säte och mutter) vara minst:
 - a. 10 cm för kontroller med RBT/Boltometer (*icke förstörande provning*).
 - b. 10–30 cm för utdragsförsök (*förstörande provning*) beroende på utrustning.
12. Vid vattenförande borrhål borras ett nytt intill liggande borrhål. Detta hål ska vara något längre än det föregående hålet. Om båda hålen fortfarande är vattenförande ska hålen injekteras och ett av borrhålet borras om och ny bult installeras.
13. Kontroll av kvalitet och utförande sker enligt kapitel 6 och 7.

Specifika utförande för olika situationer anges dock under respektive typfall.

⁸² AMA Anläggning, (2023).

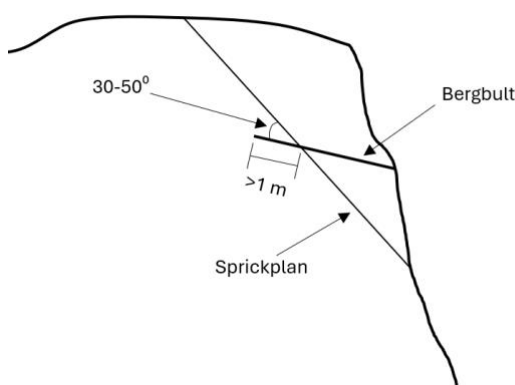
⁸³ Transportstyrelsen, (2022).

5.2.2 Typfall A Bergslänter – Glidning enskilt block

Förankring av enskilda bergblock som har identifierats vid projektering eller kartering på plats. Här får oftast både selektiv (enstaka) bult eller systematisk installerad bult en kombination av drag- och skjuvbelastning när blocket glider ut från bergväggen. Det blir sällan en ren skjuv- eller dragbelastning då enda påskjutande kraften är gravitationen, inga inbyggda bergspänningar agerar på bergbulten i slänten.

Valet om det räcker med selektiv bultning eller om det krävs systematisk bultning samt om förspända bultar behövs avgörs av blocket/blockens storlek och antal. Valet ska baseras på geologiska och bergmekaniska förutsättningar. Utöver angivna krav i kapitel 5.2.1 bör både selektiv och systematisk bultning ske enligt följande:

1. Borrhålen borrar så att installerad bergbult korsar det sprickplan som skapar blockets bakkant med en vinkel mellan 30 och 50°. I mindre block där lasten på bulten är <50 % av draghållfastheten är det tillräckligt om bulten går igenom sprickplanet enligt punkt 2 oavsett orientering.
2. Längden på bulten anpassas så att den förankras 1 m bakom det sprickplan som skapar baksidan av blocket. Detta tar då hänsyn till osäkerheter i bedömning av sprickplanets läge, 0,5 m förankring räcker för att stålets draghållfasthet ska bli dimensionerande.
3. Välj om slakingjutna eller förspända bergbultar ska användas, valet ska baseras på om:
 - a. Godtas viss förskjutning av blocket, använd slakingjuten bult
 - b. Ingen förskjutning av blocket godtas eller mycket stora block ska förankras, använd förspänd bult.



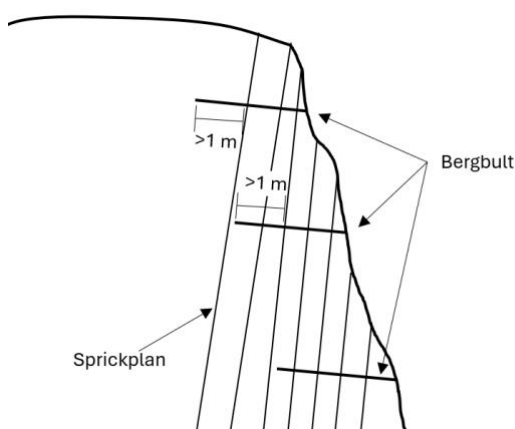
Figur 8 Illustration över placering av bergbult vid glidning av enskilt block.

5.2.3 Typfall B Bergslänter– Överstjälpling block

I bergslänter med genomgående branta sprickor som stupar in i väggen finns en risk att överstjälpling av block inträffar, även kallat toppling. Tack vare de brantstående sprickorna får oftast installerade bergbultar en dragbelastning när bergblocket roterar/faller ut.

Valet om det räcker med selektiv bultning eller om det krävs systematisk bultning avgörs av blocket/blockens storlek och antal. Valet ska baseras på geologiska och bergmekaniska förutsättningar. Utöver angivna krav i kapitel 5.2.1 bör både selektiv och systematisk bultning ske enligt följande:

1. Borrhålen borraras så att enskild bergbult installeras ~vinkelrätt sprickplan där eventuell överstjälpning kan ske.
2. Längden på enskild bult anpassas så att förankring sker minst 1 m bakom det sprickplan som skapar baksidan av blocket som riskerar att överstjälpas ut. Vid flera sprickor behöver hänsyn tas till var bergmassan är stabil att förankra i. Detta tar då hänsyn till osäkerheter i bedömning av sprickplanets läge, 0,5 m förankring räcker för att stålets draghållfasthet ska bli dimensionerande.



Figur 9 illustration över placering av bergbult i en slänt där överstjälpning riskerar att ske.

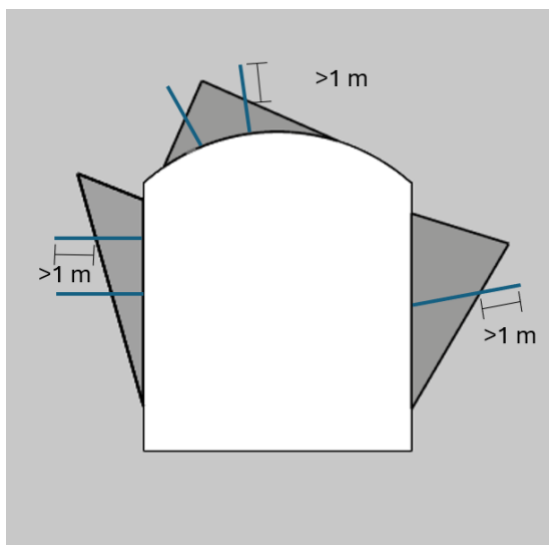
5.2.4 Typfall C Tunnlar och bergrum – upphängning av bergblock

Förankring av enskilda bergblock som har identifierats vid projektering eller kartering på plats. Om enstaka block i tunneltak ska förstärkas är det som regel mot gravitativt utfall, placeras bergbulten vinkelrät mot taket blir den då som regel belastad med en dragbelastning. I väggarna kan det bli kombination av skjuv- och dragbelastning beroende på orienteringen på sprickorna.

Valet om det räcker med selektiv bultning eller om det krävs systematisk bultning avgörs av blockens storlek och antal av förekommande block. Valet ska baseras på geologiska och bergmekaniska förutsättningar. Utöver angivna krav i kapitel 5.2.1 bör både selektiv och systematisk bultning ske enligt följande:

1. I tak borraras borrhålet så att installerad bergbult placeras vinkelrät takytan.
2. I vägg borraras borrhålen borraras så att installerad bergbult korsar det sprickplan som skapar blockets bakkant i vägg med en vinkel mellan:
 - a. 30° till 50° om glidning/skjuvning förväntas längs sprickplanen dvs sprickplanet anses stupa $\leq 60^\circ$ mot horisontalplanet.
 - b. 90° om utfall förväntas längs sprickplanen dvs sprickplanet anses stupa $> 60-70^\circ$ mot horisontalplanet, nu får bergbulten endast tillgodoräkna 50% av sin dragkapacitet.
3. Längden på enskilda bultar anpassas så att de förankras med 1 m bakom det sprickplan som skapar baksidan av blocket. Detta tar då hänsyn till

osäkerheter i bedömning av sprickplanets läge, 0,5 m förankring räcker för att stålets draghållfasthet ska bli dimensionerande.



Figur 10 Illustration av bultsättning vid enskilda block.

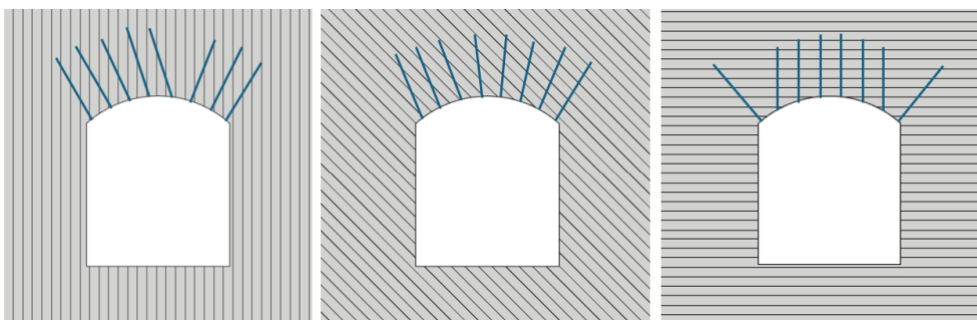
5.2.5 Typfall D Tunnlar och bergrum – skiktat berg

Vid horisontellt skiktad bergmassa erhålls en nedböjning av de olika skikten i bergmassan. Genom att "binda samman" lagren till mäktigare lager ökar den bärande kapaciteten i bergmassan samt att enstaka block förankras. Detta är nödvändigt för att få bärighet i bergmassan. I detta typfall gäller systematisk bergbultning. Vid horisontellt skiktade lager belastas bergbultarna i tunneltaket huvudsakligen i drag vinkelrät mot taket. Vid vertikalt skiktat berg erhålls andra belastningar på bergbultarna, här uppstår både skjuv- och dragbelastning på bergbultarna.

Valet om det räcker med selektiv bultning eller om det krävs systematisk bultning avgörs främst av sprickavståndet. Valet ska baseras på geologiska och bergmekaniska förutsättningar. Utöver angivna krav i kapitel 5.2.1 bör både selektiv och systematisk bultning ske enligt följande:

1. Borrhålen borrar enligt den förstärkningsplan som projekterats fram så att rätt antal bergbultar med rätt avstånd mellan bergbultarna erhålls både i profil och längs tunnel.
2. Borrhålen borrar enligt den förstärkningsplan där kraven på framtagna riktning och längd på bergbultarna följs.
 - a. Beaktande behöver tas till generell sprickorientering/foliation och orienteringen på bultarna kan behöva justeras så de inte ska gå parallellt med sprickorna

Vid systembultning och selektiv bultning vid strukturstyrda brott (block- eller skivutfall) är det viktigt att bultarna går igenom sprickplanen tillräckligt djupt. Beaktande behöver tas till generell sprickorientering/foliation och orienteringen på bultarna kan behöva justeras så de inte ska gå parallellt med sprickorna, se **Figur 11**.



Figur 11 Exempel på riktning av bultar vid olika orienteringar på sprickor/foliation.

5.2.6 Typfall E Tunnlar och bergrum – upphängning av lösmassa och valvbildande bultning

När det kommer till upphängning av lösmassa fungerar inte selektiv (enstaka) bult, här krävs systematisk installerad bult i samverkan med ytförstärkning. Här bedöms bergmassan belasta bergbultarna huvudsakligen i drag då bergmassan ses som homogen (men trasig). Inga tydliga strukturer ingår i detta belastningsfall.

Systematisk bultning ska installeras enligt följande:

1. Borrhålen borrar enligt den förstärkningsplan som projekterats fram så att rätt antal bergbultar med rätt avstånd mellan bergbultarna erhålls både i profil och längs tunnel.
2. Borrhålen borrar enligt den förstärkningsplan där kraven på framtagna riktning och längd på bergbultarna följs.
3. Bultbricka, sfäriskt säte och mutter ska användas om bergbultarna ska samverka med ytförstärkning.

5.2.7 Bergförstärkning vid dynamisk belastning

Energiabsorberande bergbultar (deformationsbult, se bilaga A) bör användas i områden med höga spänningar där dynamisk last kan uppstå på bergförstärkningen som exempelvis smällberg eller andra seismiska händelser. För att kunna hantera dynamiska lasterna bör systematisk bultning användas i samverkan med ytförstärkning anpassad för dynamiska belastningsförlopp.

Dynamiska laster kan även uppstå pga. vattenrörelser, som exempelvis vid start och stopp av vattenkraftsturbin. Bergförstärkning i dessa fall sker normalt med slakgjutna kamstålsbultar eller förspända bultar.

Systematisk bultning ska installeras enligt följande:

1. Borrhålen borrar enligt den förstärkningsplan som projekterats fram så att rätt antal bergbultar med rätt avstånd mellan bergbultarna erhålls både i profil och längs tunnel.
2. Borrhålen borrar enligt den förstärkningsplan där kraven på framtagna riktning och längd på bergbultarna följs.
3. Bultbricka, sfäriskt säte och mutter ska användas.

6 Tillstånds- och kvalitetskontroll

6.1 INLEDNING

Vid kontroll av nya (vid installation) bultar finns en beskrivande text (AMA Anläggning 23) framtagen⁸⁴. Där anges en metodik som gäller enligt följande: "Kontroll, genom analys av mekaniska vågor eller med annan icke förstörande provning, ska inledningsvis utföras för 10 procent av de 200 första bultarna. Erhålls godtagbara resultat kan provningsomfattningen minskas till 2 procent". Det finns däremot ingen information vad som ska utföras om godtagbara resultat inte erhålls. Utöver text i AMA Anläggning 23 har inga övriga direkta forskningsstudier hittats kring metodiker för tillståndskontroller, exempelvis hur ofta kontroller ska utföras, fortsatt process vid underkända kontrollresultat eller vid vilket tillfälle de ska utföras. Vid infrastrukturprojekt tas det däremot fram projektspecifika kontrollprogram. Däremot finns referenser kring utförande av vissa olika försöksmetoder.

Tillstånds- och kvalitetskontroller av installation och funktion av bergbultar genomförs vid flera olika tidpunkter och på flera olika sätt:

1. I tidigt skede med *förprovning*, som ofta inkluderar så kallad *förstörande provning*.
2. Inför, under och efter installation, med *okulära kontroll* som kontroll av betongkvalitet och betongmängd samt av installation applicering av bult och bultbricka.
3. Under och efter installation, med användande av *icke förstörande provning* och *förstörande provning*. Efter installation kan även kontroll av bergblockets/bergmassans rörelser mätas via *rörelsemätningar*. Därmed kan belastning på bulten kontrolleras via beräkningar och därmed dess funktion.
4. Under drift av anläggning med *okulära kontroll* av installation eller användande av *icke förstörande provning* och *förstörande provning*. Även kontroll av bergblockets/bergmassans rörelser kan utföras (*rörelsemätningar*). Därmed kan belastning på bulten kontrolleras via beräkningar och därmed dess funktion.

Nedan beskrivs mer detaljerat: *förprovning*, *okulära kontroll*, *icke förstörande provning* och *förstörande provning*. *Rörelsemätningar* beskrivs mer kortfattat då de inte ligger inom ramen för detta arbete.

6.2 FÖRPROVNING

Innan bultsättning påbörjas finns ibland krav på förprovning av bultbruk och utförande. Generellt för de flesta projekt är att utföraren ska redovisa receptet för bultbruk som ska användas till beställaren. Förprovning av bultinstallation kan ske genom att installera bergbulten i genomskinligt plaströr och efterhand kan även plaströren sågas upp. Då kan ingjutningens kvalitet granskas med avseende på hålfyllnadsgraden. På detta sätt kan pumputrustningen bl.a. kontrollera om:

⁸⁴ AMA Anläggning, (2023).

1. Utrustningen har tillräcklig kapacitet att trycka in bultbruket i den längd som krävs.
2. Det finns risk för luftfickor kring bergbulten på grund av centreringsfjädrar eller bulten utformning.
3. Bultbrukets konsistens inte är för löst eller för tjockt.

Kontroll av den valda ingjutningsmassans recept kan göras genom utdragsförsök på provbultar installerad i samma geologiska formation som för anläggningen. I alla förprovningar som ska utföras är det viktigt att bultar och bultbruk är av samma material och dimension som de bultar som ska installeras i anläggningen.

6.3 OKULÄR KONTROLL INSTALLATION

Okulära kontroller inför, under och efter slutförd installation av bergbultar bör ske och omfatta följande:

1. Att bulthålen har rätt dimensioner, både längd och diameter.
2. Att bultarna har rätt dimensioner, både längd och diameter.
3. Att bultar, brickor, muttrar och sfäriska säten är av rätt kvalitet och inte skadade vid installation.
4. Att bultbruk har trängt ut ur borrhålet vid installation indikerar, men garanterar inte, att borrhålet är korrekt fyllt med ingjutningsmassa. Vid ingjutningen av bergbultar ska det alltid kontrolleras att bultbruk tryckts ut ur bulthålet. Vid installation av kombinationsbultar ska bultbruk pumpas fram till dess bultbruk kommer ut ur inspektionshålet i bultbrickan. Bultbruk ska inte rinna ut efter bultbruket är monterat.
5. Att bultbricka är rätt applicerad mot bergytan, med det avses att:
 - a. vinkeln bultaxel och brickan lika med eller större än 70°.
 - b. bultbricka inte är lös utan sitter fast mot bergytan.
6. Att det inte droppar vatten ur bulthålet.

6.4 ICKE FÖRSTÖRANDE PROVNING

6.4.1 Rock bolt tester och Boltometer

Instrumentet Rock Bolt Tester (RBT)⁸⁵ och Boltometer används som en icke förstörande metod för att kontrollera ingjutningen av fullt ingjutna bultar baserat på ultraljud, där RBT är en vidareutveckling av Boltometerutrustningen. Boltometern skickar elastiska vågor in i bultens ena ände och en reflektion av vågorna sker i bultens andra ände. Utseendet av den reflekterade vågen påverkas av bulten och bultbruket runt bulten samt av det omgivande berget. Under förutsättning att vågens gånghastighet är känd kan bultens längd beräknas utifrån tiden det tar för vågen att reflektera tillbaka^{86,87}. Begränsningen med RBT och Boltometer är att de i nuläget enbart kan användas för att kontrollera ingjutningen

⁸⁵ Stepinski T. & Mattson K-J., (2015). Instrument for rock bolt inspection by means of ultrasound. conference: 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). DOI:10.1109/ULTSYM.2015.0343.

⁸⁶ Stillborg B., (1994).

⁸⁷ Hassanzadeh M., Malm R. & Ulriksen P., (2017). Förankringsstag i berg och betong. Samverkan mellan förankringsstag, bruk och berg – förstudie. Befo Rapport 168. ISSN 1104-1773.

runt kamstålsbultar. De kan därmed inte ännu användas för ihåliga bultar som exempelvis PC- och CT-bult⁸⁸. För att kontrollera dessa bulttyper krävs att den så kallade cavimetermetoden används, se beskrivning i kapitel 6.4.2.

6.4.2 Cavimeter

Cavimeter är en direkt mätmetod som nyttjar kvävgas för att detektera håligheter och sprickor i bultbruket. Ett plaströr med slitsar monteras längs bulten före installation. Efter bulten är installerad ansluts en gasbehållare till plaströret och tryckfallet registreras. Volymen på håligheter samt sprickigheter i bultbruket kan då bestämmas⁸⁹.

Fördelen med cavimeter är att det fungerar på alla sorters ingjutna bultar. Nackdelen är att plaströret måste monteras innan installation av bulten samt att enbart håligheter och sprickor i direkt anslutning till plaströret kan mätas.

6.5 FÖRSTÖRANDE PROVNING

6.5.1 Utdragsprov

Utdragningsprov utförs normalt med en hydraulisk domkraft där kraften kan mätas. Utdragsprov kan utföras enligt standard ASTM D4435-13⁹⁰. Kraften som utdraget utförs med är normalt upp till 80 % av bultens draghållfasthet⁹¹. Med avseende på att det normalt är tillräckligt med 0,25 – 0,4 m förankringslängd (Kapitel 4.2) är det väldigt ovanligt att utdragningsprov blir underkända på fullt ingjutna bultar. Utdragningsprov ger ingen information om ingjutningens kvalitet, enbart att hållfastheten i bulten är tillräcklig.

Förankringens faktiska bärförmåga kan även kontrolleras med utdragsprov. I dessa fall är det viktigt att provningsmetoden liknar det faktiska belastningsfallet. Exempelvis kan en bergbult dras ut med hjälp av grävmaskin eller truck som inte tar mothåll mot bergmassan nära bulten. Utdragskraften kan mätas med en kraftgivare mellan maskin och bergbult⁹².

6.5.2 Urborrning av bult

En metod för att kontrollera ingjutningen är att borra ut bulten. Genom att detta förstör bulten så används det mer i utredande syfte. En svårighet med metoden är att kärnborrningen behöver utföras med exakt samma riktigt som bulten vilket är mycket svårt, speciellt vid längre bultar eller bultar med kort eller inget utstick.

⁸⁸ Krekula S. Lanaro F & Stepinski T., (2021). Development of the instrument RBT with respect to rock bolt types PC- and CT-bolt and similar combination bolt. Stiftelsen bergteknisk forskning (BeFo). Rapport nr 215.

⁸⁹ Rock Safety Systems, (2025). Mätssystem Cavimetern. <http://rocksafety.se/wp-content/uploads/2016/06/Produktspec-Cavimeter.pdf>.

⁹⁰ D4435, (2013). Standard Test Method for Rock Bolt Anchor Pull Test. ASTM D4435-13.

⁹¹ Li C., (2017).

⁹² Hassanzadeh M., Malm R. & Ulriksen P., (2017).

6.5.3 Borttagning av bruk med vattenblästring

En metod som väldigt sällan används men som är möjlig för att inspektera yttre delen av bergbultar är att vattenblästra yttersta 20–25 cm av bulten. Denna del är ofta den svaga länken i bulten och är den som har högst risk för korrosion. Längre in krävs sprickor med flödande syresatt vatten som lokalt lakar ut bruket för att angrepp ska uppstå. Vid inspektion av bultar bör det därmed vara rimligt att fokusera på den yttre delen. Efter att inspektionen är utförd behöver bulten injekteras med nytt bultbruk⁹³.

6.6 RÖRELSEMÄTNINGAR

En slutlig kontroll eller övervakning av bergbultarnas funktion är att faktiskt mäta det enskilda förstärkta bergblockets eller bergmassans rörelse. Detta är oftast ett relativt enkelt och kostnadseffektiv metod, den visar inte direkt bultens kvalitet eller tillstånd men den visar bultens förmåga att förstärka blocket eller bergmassan. Bultens förutsättningar kan ändras över tid, exempelvis förändras lastsituationen, eller försvagas bulten med tiden och deformeras. Detta är svårt att detektera såvida inte bultarna går i brott. Detta medför kanske en omfattande kontroll av ett stort antal bultar, desto lättare är att mäta bergmassans beteende och vid avvikelser från det förväntade kan mer omfattande kontrollprogram av bergbultarna initieras.

Rörelsemätningar av enskilda bergblock kan ske med ett flertal olika metoder som extensometrar installerade i borrhål, mätbultar, konvergensmätningar med exempelvis prismor etc. men dessa beskrivs inte i detta dokument.

⁹³ Sandberg, B., (2007). Dagens kunskapsnivå – korrosion på bergbultar. Grupp: 74. KIMAB:s referensnummer: 746693-745, Uppdragsrapport till GECON AB.

7 Genomförande tillstånds- och kvalitetskontroll bergbult

Arbetet med kontroll av tillstånd hos nya bergbultar bör starta redan innan bultarna installeras för att undvika kvalitetsproblem längre fram under installation och produktion. I arbetet med tillståndskontroll bör kontroll av kvalitet och montage ingå för nya bergbultar. Projektets eller anläggningens krav utifrån risk- och konsekvensbild avgör om alla eller bara delar av nedanstående typer av kontroller bör ske. De kontroller som avses och utförande är:

1. *Förprovning* enligt kapitel 6.2, utförs före bultmontage. Erfarenhetsmässigt från diskussionsgrupp är det viktigt att beställaren och även i vissa fall projektör är aktiv i förprovningen för att se till att allt material betar sig enligt krav i handlingen.
2. *Okulär kontroll installation* enligt kapitel 6.3, utförs före och under bultmontage. Utöver detta bör även inför start av ingjutningen av bergbultarna det så kallade "handsktestet" utföras. Vid "handsktestet" tas cementpasta upp i handen. Efter att cementpastans konsistens känns av, vänds handen upp och ned. All pasta ska då släppa i en klump och handsken bli ren.
3. *Icke förstörande provning* enligt kapitel 6.4, utförs under och efter bultmontage. En i förväg planerad strategi för kontrollerna ska finnas framtagen. Här ska krav på antal godkända provresultat finnas framtagen samt krav på fortsatta provningar ifall provresultaten inte är godkända. I AMA Anläggning 2023⁹⁴ står det enligt följande: "Kontroll, genom analys av mekaniska vågor eller med annan icke förstörande provning, ska inledningsvis utföras för 10 procent av de 200 första bultarna. Erhålls godtagbara resultat kan provningsomfattningen minskas till 2 procent." Det finns dock ingen information vad som ska utföras om godtagbara resultat inte erhålls.
4. *Förstörande provning* enligt kapitel 6.5, utförs efter bultmontage. Genomförs om föregående metoder anses inte täcka behovet av kontroll av bultkvalitet. En i förväg planerad strategi för kontrollerna ska finnas framtagen. Här ska krav på antal godkända provresultat finnas framtagen samt krav på fortsatta provningar ifall provresultaten inte är godkända.
5. *Rörelsemätningar* enligt kapitel 6.6, utförs efter bultmontage. En i förväg planerad strategi för kontrollerna ska finnas framtagen. Föreslås för större block eller bergmassa.

Omfattningen av tillståndskontroll för befintliga bergbultar bör avgöras av projektet/anläggningens krav utifrån risk- och konsekvensbild. Enda skillnaden är att vid kontroll av tillstånd hos befintliga bergbultar kan inte förebyggande kontroller genomföras.

Förfarandet för tillstånds- och kvalitetskontroll bergbult enligt steg 1–5 gäller för alla angivna typfall i kapitel 5. För metodik vid kontroll av befintliga bultar har inga studier eller styrande riktlinjer hittats i litteratur.

⁹⁴ AMA Anläggning, (2023).

8 Diskussion

Mycket av material som idag finns tillgängligt är ofta skrivet av samma författare eller grupp av författare, eller institutioner. Detta kan medföra risk för ensidig form av studier, bedömning och tolkning av resultaten.

Studier av bergbultarnas funktion tog fart under början av 80-talet och mycket av resultatet från de tidigare studierna är fortfarande giltiga och verifieras i princip i många av dagens studier.

Ett resultat från de tidigaste studierna som i princip återupprepade gånger verifieras är vilken vinkel mellan sprickplan och bultaxeln som det är bäst att installera en bergbult. Att det sker beror på att frågeställningen egentligen inte ändras, det är samma geometrier och i princip samma material då som nu.

Ingjutningsbetongens konsistens och kvalitet har också varit frågor som studerats en längre tid, här syns dock vissa skillnader främst vid bedömningen av lämpligt vct. Samma sak gäller för studier av nödvändig ingjutningslängd av en bergbult.

För bägge frågorna har det utförts både fält-, laboratorie- och analytiska studier och som regel erhåller de flesta studierna ungefär samma svar, lite beroende på vilken parameter som studerats. Dock finns de studier som avviker, det är dock inte alltid helt klart om de angivna parametervärdena i dessa studier då är materialens karaktäristiska eller dimensionerande.

Det är tydligt att vct har stor betydelse på bultens funktion, både hur fort den tar last, maximal lastkapacitet, förankringslängd samtidigt finns alltid praktiska problem med för lågt eller högt vct. Att välja, eller eftersträva $vct = 0,3$ vilket är kravet enligt svensk branschnorm kan nog ses som det lämpligaste valet i nuläget trots att detta ibland kan anses vara på gränsen till för styvt bruk vid installation av kombinationsbultar.

De flesta studierna visar att med bergbultar av kamstålstyp och de vanligaste diametrarna mellan 20 och 32 mm krävs en ganska kort ingjutningslängd för att bulten inte dras ut ur bergblocket. Ingjutningslängden över 0,3 till 0,5 m garanterar att bulten inte kan dras ut ur bergblocket utan att deformationen i stället sker i bultstålet.

Det finns flera parametrar som kan styra behovet av valda bultlängder, inkluderat behovd förankringslängd. När det kommer till behovd förankringslängd är kanske den största osäkerheten var exakt bulten kommer korsa det sprickplan som avgränsar det bergblock eller bergmassa man vill förankra. Den enligt svensk branschnorm valda förankringslängd 1 m jämfört med trolig behovd ingjutningslängd 0,5 m, ger en riskreducering mot missbedömt läge på styrande strukturer eller felaktigt riktade borrhål.

För skandinaviska energi- och infrastrukturanläggningar som projekteras idag och sedan en tid tillbaka anges att valda bergförstärkning ska ha en livslängd på 100 till 120 år.

Detta medför då att de ingående förstärkningselementen ska ha motsvarande livslängd och därför väljs ofta ytbehandlade bergbultar och tillbehör. Vad som dock inte framgår är att vissa av dessa ytbehandlingars ingående material inte har en livslängd på 100–120 år utan måste påföras bulten efter 40 till 60 år enligt produktens specifikation. Det kan även tilläggas att i Norge är kravet på epoxylagret 33% tjockare jämfört med kraven i Sverige. Till det kan man alltid fråga sig hur hel den ytbehandlingen är efter att bergbulten är installerad i borrhålet. Det som troligen är den största garantin till att bergbulten fungerar är att den är korrekt ingjuten och att ingjutningen är intakt över tiden.

Att välja mellan bergbultar av obelagt kolstål, rostfritt stål, varmförzinkat samt varmförzinkat och epoxibelagt bör baseras på behovet vilket kan variera stort, dock är det idag relativt lite prisskillnad mellan de olika varianterna av bergbult.

Detta medför att kontroller av ingående material och utförande vid installation av bergbulten är av yttersta vikt. Vissa parametrar som vct är dock svåra att mäta när väl betongen installeras eller har installerats, vissa mer enkla och "handfasta" ger snarare en indikation att rätt vct används. Att mäta bultarnas ingjutning kan alltid utföras och metoderna för dessa finns lättillgängliga och väl beskrivna, däremot finns inte direkt studier på lämpliga metodiker utan dessa fastställs som regel efter bedömt behov inom projektet eller delar av projektet.

Att fastställa bergbultarnas kvalitet och funktion genom att direkt mäta på bergbultarna är bra men det finns alltid en risk för att den felande bergbulten missas om inte alla bultar kontrolleras eller om vissa mätningar misslyckas. Frågan är om större vikt bör läggas på genomförandet och kontroll av bergbultarnas funktion genom övervakning av bergdeformationer.

De beskrivna typfallen kan ses omfatta de flesta möjliga situationerna men det finns naturligtvis situationer som inte omfattas. För de flesta fallen i slänter går det relativt bra att orientera bergbultarna så att de i stort sett bara dragbelastas. För väggbultning i underjordsanläggning (tunnlar eller bergrum) är det svårare av rent utrymmesskäl att ha alltid orienterat bergbultarna så att de endast dragbelastas. Här måste det i stället accepteras att bulten blir både skjuv- och dragbelastad och i stället hanteras den reducerade hållfasthetskapaciteten med fler bultar.

Att orientera bergbultarna kräver dock kunskap om den aktuella bergmassan vilket innebär behov av projektering vilket inkluderar både bergkvalitet, geometrier och behovet av förstärkning.

För att få ett lyckat och korrekt montage av bergbultar är det bra om en tydlig kravställning finns specifikt för projektet, samt ha en noggrann uppföljning på plats vid installation. En annan framgångsfaktor är att vid projektstart informera och utbilda utförarna varför vissa saker vid installation är viktiga. Detta ökar medvetenheten och kan ses som en kvalitetshöjning eller -försäkring.

9 Referenslista

- AMA Anläggning, (2023). Svensk Byggtjänst, 2023.
- Barton N., (1982). Characterizing rock masses to improve excavation design. Panel report, Theme II- Tunnelling and Excavation, 4th Congress IAEG, New Dehli.
- Barton N. & Bakhtar K., (1983). Bolt design based on shear strength. Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting, Abisko, Sweden, pages 367-376.
- Bergman, S.G.A. & Bjurström, S., (1983). Swedish experience of rock bolting. A keynote lecture. Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting, Abisko, Sweden, pages 243-255.
- Betongrapport nr 10, (2020). Självkompakterande betong. Rekommendationer för användning. Betongrapport nr 10, utgåva 2.
- Bredenberg H., (2000). Stålkärnepålar. Anvisningar för projektering, dimensionering, utförande och kontroll. Rapport 97. Pålkommisionen.
- Bjurstrom S., (1974). Shear strength of hard rock joints reinforced by grouted untensioned bolts. In: Proc.3rd Cong.ISRM, Denver 2 1194–1199.
- Bjurström, S & Heimersson, M. (1975). Bergbultning. Dimensionering, praxis och tillämpningar. Stiftelsen bergteknisk forskning (BeFo). Rapport nr 8.
- Blomster, E. & Litton Fredriksson, S. (2021). Understoppning av bergbultsbricka. Examensarbete, Högskoleingenjörsutbildning inom Byggteknik och Design, KTH. ABE TRITA-ABE-MTB-2237.
- Bogdanoff I., (2013). Degradering av berg, förstärkningar och injektering i tunnlar. Rapport 2013:26. Strålsäkerhetsmyndigheten. ISSN:200-0456.
- D4435, (2013). Standard Test Method for Rock Bolt Anchor Pull Test. ASTM D4435-13.
- Engblom J. & Sederholm B., (2020). Rekommendationer för materialval i tunnelmiljöer – Slutrapport. Rapportnummer: KIMAB – 2020 – 12408-6.
- Eriksson M., Kiilsgaard R. & Bertilsson R., (2015). Slänter i berg. Inventering av kunskapsläge och behov. Statens geotekniska institut, SGI Publikation 22, Linköping.
- Johansson F. & Svartsjaern M., (2024). Verifiering av analytisk modell för beräkning av valvstabilitet. Stiftelsen bergteknisk forskning. BeFo Rapport 245.
- Hassanzadeh M., Malm R. & Ulriksen P., (2017). Förankringsstag i berg och betong. Samverkan mellan förankringsstag, bruk och berg – förstudie. BeFo Rapport 168. ISSN 1104-1773.

- Hoek E., Kaiser P.K., & Bawden W.F., (1993). Support of Underground Excavations in Hard Rock.
- Håvard Høien A., Li. C. & Zhang N., (2021). Pull-out and Critical Embedment Length of Grouted Rebar Rock Bolts-Mechanisms When Approaching and Reaching the Ultimate Load. *Rock Mechanics and Rock Engineering* (2021) 54:1431–1447. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02318-6>
- Khodaverdian H. & Zetterlund M., (2020). Läckande bulthål i berg – Orsaker och åtgärder. Stiftelsen bergteknisk forskning. Befo Rapport 208.
- Kilic A., Yasar E. & Celiki A.G., (2002). Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted. Department of Mining Engineering, Cukurova University, 01330 Balcali, Adana, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology* 17 (2002) 355–362.
- Kim H-K. & Cho N.J., (2012) A design method to incur ductile failure of rock anchors subjected to tensile loads, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* vol. 17, s. 2737-2746.
<https://www.scribd.com/document/467851624/A-Design-Method-to-Incur-Ductile-Failure-of-Rock-Anchors>.
- Knudsen O. Ø., (2015) Korrosjonsbeskyttelse i tunneler. Rapportnummer 410. Statens vegvesens rapporter.
- Knudsen O. Ø., (2018) Korrosivitet i tunneler. Rapportnummer 394. Statens vegvesens rapporter.
- Krekula S. Lanaro F & Stepinski T., (2021) Development of the instrument RBT with respect to rock bolt types PC- and CT-bolt and similar combination bolt. Stiftelsen bergteknisk forskning (BeFo). Rapport nr 215.
- Lundkvist P., Bernstone C., Marklund A. & Nilsson C-O., (2020). Rekommendationer för hantering av vattenkraftens spännstag. Dimensionering, utförande och hantering av spännstag. Energiforsk, Betongtekniskt program Vattenkraft. ISBN 978-91-7673-688-3. www.energiforsk.se.
- Lundkvist P., Bernstone C., Marklund A. & Nilsson C-O., (2022). Riktlinjer för hantering av spännstag i vattenbyggnadskonstruktioner av betong. Energiforsk, Betongtekniskt program Vattenkraft. ISBN 978-91-7673-834-4. www.energiforsk.se
- Li C., Kristjansson G. & Håvard Høien A., (2016). Critical embedment length and bond strength of fully encapsulated rebar rockbolts. Department of Geology and Mineral Resources Engineering, The Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Norway.
- Li C., (2017) Rockboltning. Principles and Applications. First Edition. Department of Geoscience and Petroleum, The Norwegian University of Science and Technology.

- Liski, J., (2024). Paltning av bergbultar och dess mekaniska inverkan. Examensarbete, Civilingenjörsutbildning, Avdelningen för betongbyggnad, KTH. TRITA-ABE-MBT-24373. ISBN 978-91-8040-989-6.
- Malm R., Johansson F., Hellgren R. & Bayona F., R. (2017). Load capacity of grouted rock bolts due to degradation. Energiforsk. ISBN 978-91-7673-374-5. www.energiforsk.se
- Mattson H-Å. & Karlberg T., (2020). Tekniska krav vid dimensionering och utformning av berganläggningar. Vägval för vattenkraftbranschens framtida bergbyggande. Energiforsk. ISBN ISBN 978-91-7673-668-5. www.energiforsk.se
- Nilsen B. & Hagen, R., (1990). Stabilitetsproblemer og forslag til ukonvensjonell sikring ved Tellnes dagbrudd. Fjellsprenningsteknikk /Bergmekanikk/Geoteknikk 1990 (23: s.1-20).
- Norwegian Tunneling Society, (2023). Norwegian Rock Bolting. Publication 31. ISBN 978-82-92641-53-8.
- Rhen. I-M. & Forsman M., (2019). Bultsättning vid tunnelbyggen. Biomekanisk belastning vid användning av tre olika bulttyper. Centrum för arbets- och miljömedicin. Rapport 2019:03. ISBN: 978-91-88361-19-6
- Rock Safety Systems, (2025) Mätssystem Cavimetern. <http://rocksafety.se/wp-content/uploads/2016/06/Produktspec-Cavimeter.pdf>
- Sandberg, B., (2007). Dagens kunskapsnivå – korrosion på bergbultar. Grupp: 74. KIMAB:s referensnummer: 746693-745, Uppdragsrapport till GECON AB.
- Sederholm B. & Pahverk H., (2019). Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar i tunnlar – långtidsexponering. Stiftelsen bergteknisk forskning. BeFo Rapport 193.
- Signer S.P., (2000). Load behavior of grouted bolts in sedimentary rock. DHHS (NIOSH) Publication No. 2000-151. New technology for coal mine Roof Support. National Institute for Occupational safety and Health (NIOSH).
- SS-EN 197-1:2011, (2011). Cement - Del 1: Sammansättning och fordringar för ordinära cement.
- SS-EN ISO 12944-2:2017, (2017). Färg och lack – Korrosionsskydd av stålkonstruktioner genom målning – Del 2: Klassificering av miljöer, Stockholm: SIS Förlag.
- Statens Vegvesen, (2018). Håndbok R761. Prosesskode 1. Standard beskrivelse for vegkontrakter.
- Statens Vegvesen, (2018). Håndbok R762. Prosesskode 2. Standard beskrivelse for bruer og kaier.
- Statens Vegvesen, (2024). Håndbok N500 Vegtunneler. Norge: Statens Vegvesen.

- Stepinski T. & Mattson K-J., (2015). Instrument for rock bolt inspection by means of ultrasound. conference: 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). DOI:10.1109/ULTSYM.2015.0343
- Stillborg B., (1994). Professional User's Handbook for Rock Bolting. (2nd edition). TransTech. Pub.
- Stille B., & Vuorinen J., (2010) Utvärdering av injekteringsbruks egenskaper över tiden. SBUF-projekt 12117.
- Tistel J., Grimstad G. & Eiksund G., (2017) Testing and modelling of cyclically loaded rock anchors, Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, vol. 9, s. 1010-1030.
- Trafikverket, (2019) Projektering av bergkonstruktioner. Version 1.1. Publikationsnummer: 2019:062.
- Trafikverket, (2025) Tunnelbyggande. TRVINFRA-00233. Krav med Rådtext. Version 2.0.
- Transportstyrelsen, (2022). Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av eurokoder. TSFS 2018:57. Ändringar införda t.o.m. TSFS 2022:50.
- Windelhed K., Lagerblad B & Sandberg B., (2002) Cementingjutna bultars beständighet. SveBeFo-rapport 58.
- Wyllie D. & Mah C., (2004) Rock Slope Engineering. Civil and mining. 4th Edition.
- www.rocscience.com., (2025). Practical-Rock-Engineering/Chapter 16. Rock bolts and cables.

Bilaga A: Beskrivning olika typer av bultar

FULLT INGJUTEN KAMSTÅLSBULT

Användningsområde:

Som bergförstärkning vid alla typer av berg där det inte förekommer mycket höga bergdeformationer.

Eftersom bulten inte är förspänd tar den last när deformation börjar ske.

Installation:

Bultbruk pumpas in i bulthålet och sedan trycks bulten in genom bultbruket i bulthålet.

Fördel:

Snabb och enkel att installeras. Finns stor variation på längd och dimension.

Nackdel:

Ger förstärkningseffekt först när cementen har brunnit samt när deformation sker. Fungerar dåligt vid förekomst av rinnande vatten i borrhålet. Arbetsmiljömässigt problematiskt vid manuell installation vid långa och/eller många bergbultar.

DELVIS INGJUTEN KAMSTÅLSBULT

Användningsområde:

Kan används som infästningsbult när lasten från bulten behöver fördelas ut en bit in i bergmassan från bulthuvudet. Även användas för att ge bulten en möjlighet att ta upp mer deformation jämför med en fullt ingjuten bult. Kan även förspännas.

Installation:

En cement eller kemisk patron sätts in i hålet med bulten. Bulten pressas genom cementen/kemiska massan som då fördelas runt innersta delen av bulten. För att få mer kontroll på längden av bulten som är ingjuten kan även bulten förberedas genom att en plasthylsa med fett skyddar den del av bulten som inte ska gjutas fast i borrhålet.

Fördel:

Snabb och enkel att installeras. Finns stor variation på längd och dimension.

Nackdel:

Ger förstärkningseffekt först när cementen har brunnit samt när deformation sker. Fungerar dåligt vid förekomst av rinnande vatten i borrhålet. Arbetsmiljömässigt problematiskt vid manuell installation vid långa och/eller många bergbultar.

KOMBINATIONSBULTAR

En kombinationsbult är en bult som är mekaniskt ändförankrad men som även kan gjutas in i efterhand. Syftet med kombinationsbulten är att den ska kunna ta last direkt vid installation.

Vanliga kombinationsbultar är följande: PC-bult, NC bult och CT bult.

Användningsområde:

Genom att den blir fullt ingjuten fungerar den i alla typer av berg. Vid mycket dåligt berg kan den mekaniska ändförankringen fungera dåligt vilket gör att bulten i dessa fall kan ta last först när den är ingjuten och cementen brunnit klart.

Installation:

Bulten installeras och förspänns genom att skruva fast muttern mot brickan och berget. Sedan pumpas bultbruk genom plaströret i CT och NC bult eller genom själva bulten om det är en PC-bult. Bultbruket ska pumpas till dess det trycker ut genom ett inspektionshål i brickan.

Fördel:

Tar last direkt med ändförankringen. Plastskyddet vid CT- och NC-bulten ger ytterligare korrosionsskydd, speciellt vid vattenförande berg.

Nackdel:

Ändförankringen fungerar dåligt vid mycket dåligt berg i läget för den mekaniska förankringen.

DEFORMATIONSBULT

Deformationsbultar eller energiabsorberande bultar är bultar som är gjorda för stora och/eller snabba deformationer. De är normalt släta med en eller flera ankarpunkter. Deformationsbultar tar upp deformation antingen genom att överskrida bultbrukets hållfasthet så bultbruket krossas eller genom att själva stålet tar upp last och deformerar över en längre sträcka på bulten.

Användningsområde:

Används främst i områden med höga eller snabba deformationer.

Installation:

Bultbruk pumpas in i hålet helt eller delvis och sedan trycks bulten in i hålet. Kemisk massa kan även användas.

Fördel:

Relativt snabb installation. Genom att bulten är fullt ingjuten klarar den av de flesta typer av berg.

Nackdel:

Ger stabilitet först när cementen har brunnit samt när deformation sker. Fungerar dåligt vid förekomst av rinnande vatten. Arbetsmiljömässigt problematiskt vid manuell installation. Vid hög deformation kan korrosionsskyddet nötas av.

SLAKGJUTEN KABELBULT/VAJERBULT**Användningsområde:**

Slakgjutna kabelbultar/vajerbultar används ofta i situationer där långa bultar krävs men utrymmet är för litet för att installera styva bultar. De kan vara billigare och arbetsmiljömässigt enklare att montera jämfört med att montera bult som ska skarvas.

Installation:

Vajern och en slang för bultbruk matas in i bulthålet samtidigt. Pumpningen av bultbruk utförs och slangen trycks ut ur hålet med pumptrycket vilket lämnar en fullt ingjuten vajer. Vajrar kan även monteras i hål som i förväg fylls med bultbruk, vilket dock är svårt i längre bulthål.

Fördel:

Långa vajrar kan installeras från relativt små utrymmen. Finns stora möjligheter till olika dimensioner och längder på vajrar.

Nackdel:

Kan vara svårt att kontrollera att ingjutningen blivit bra. Vajrarna har normalt inte korrosionsskydd. Sämre kapacitet i skjuvning jämfört med vanliga styva bultar.

FÖRSPÄND KABELBULT/VAJERBULT**Användningsområde:**

Förspända vajerbultar används ofta vid konstruktioner där långa förankringsdjup krävs, exempelvis till att stabilisera slänter.

Installation:

Vajern och en slang för bultbruk matas in i bulthålet samtidigt. Pumpningen av bultbruk utförs och slangen trycks ut ur hålet med pumptrycket vilket lämnar en fullt ingjuten vajer. Vajrar kan även monteras i hål som i förväg fylls med bultbruk. Detta är svårare i längre bulthål.

Permanent vajrar har ofta ett skyddande plaströr på utsidan av vajern som ett extra korrosionsskydd. Ibland längs hela vajern och ibland bara den fria delen.

Fördel:

Långa vajrar kan installeras från relativt små utrymmen. Finns stora möjligheter till olika dimensioner och längder på vajrar.

Nackdel:

Installationen av vajrar med hög förspänning och lång livslängd är svår och kräver stor erfarenhet/kunnande av kabelinstallationer.

Kan vara svårt att kontrollera att ingjutningen blivit bra. Vajrarna har normalt inte korrosionsskydd. Sämre kapacitet i skjuvning jämfört med vanliga styva bultar.

Bilaga B: Tillbehör bergbultar

BULTBRICKOR

Det finns flertalet olika bultbrickor på marknaden. De vanligaste är runda brickor med diameter 150–200 mm och tjocklek 5–6 mm men det förekommer även ibland trekantsbrickor med dimension 400x500 mm och tjocklek 5 mm. Bultbrickan ska vara av samma stålqualität och ha samma ytskydd som bergbulten, skall alltid appliceras dikt an mot underlaget om inget annat föreskrivs i konstruktions eller kontraktshandlingarna.

MUTTER

Bultmutter (mutter) används när bultbrickor används och ska vara av samma stålqualität och ha samma ytskydd som bergbulten.

SFÄRISKT SÄTE

Ett sfäriskt säte används för att hjälpa bultbrickan att överföra last från ytberget till bergbulten. Används när vinkeln mellan bult och bultbricka inte är vinkelrät och ska vara av samma stålqualität och ha samma ytskydd som bergbulten.



Figur 12 Exempel på sfäriskt säte Prettec (<https://www.prettec.se>).

CENTRUMFJÄDRAR

Centrumfjädrar används för att centrera bulten i borrhålet. Normalt brukar centrumfjädrar monteras med 2 m avstånd samt i bultändarna om bulten inte har någon annan anordning som gör att den centreras i någon av bultändarna. Centrumfjädrar används normalt enbart när det är krav på livslängd för att säkerställa att cementbruket omger bulten som ett rostskydd.



Figur 13 Exempel på centrumfjädrar med Dywidag (<https://dywidag.com>) till vänster och Prettec (<https://www.prettec.se>) till höger.

Bilaga C: Bultförstärkningssystem

VALVBILDANDE BULTNING

Det generella syftet med valvbildande bultning är att hålla ihop uppsprucket berg så det bildas ett tryckt valv runt tunneln. Bultarna hjälper därmed bergmassan att bära sig själv. Bergbultar kan även ha som syfte att hålla upp enskilda lösa bergblock eller lösa partier.

Enligt Bergman och Bjurström (1983)⁹⁵ är det en fördel om slakgjutna bultar används eftersom bergmassan då tillåts deformera mer enhetligt. Det kan även vara möjligt att med hjälp av bultning av enstaka nyckelblock erhålls ett stabilt valv.

Beskrivning av beräkning av bultavstånd och bultlängd finns i Trafikverkets rådgivande dokument⁹⁶ och Johansson och Svartsjaern (2024)⁹⁷. Om valvbildande bultning används ska dessa installeras vinkelrätt mot teoretiskt tunneltak så de skapar ett jämnt valv i bergmassan. Vid större utfall som påverkar valvet i tunneln behöver placering, bultlängd och bultavstånd verifieras för det nya valvet.

GENOMGÅENDE BULTNING

Genomgående bultning används normalt till att förstärka pelare eller liknande där access finns till båda sidorna. En bult monteras genom pelaren och brickor monteras på båda sidorna av bulten och bulten förspänns något. Detta ger då ett mothåll på sidorna av pelaren vilket gör att den kan ta upp mer last.

UPPHÄNGNINGSBULTNING

I vissa tillfällen när ett lager svagare berg förekommer i tunneltak kan detta säkras upp genom att bultar installeras in i stabilt och bättre berg ovanför. Det svagare berget kommer då "hänga" i bultarna som är förankrade i stabilt berg.

IHOPHÅLLANDE BULTNING

I folierat berg eller flera horisontella sprickplan med låg hållfasthet kan förstärkning utgöras genom att de olika bergskikten bultas ihop med bergbultar så det bildas en tjockare och därmed starkare balk. Mekanismen fungerar genom att bultarna ökar friktionen mellan sprickorna/lagren så att rörelser i sprickorna/lagren minskar och därmed även nedböjningen.

⁹⁵ Bergman, S.G.A. & Bjurström, S., (1983).

⁹⁶ Trafikverket, (2019). Projektering av bergkonstruktioner. Version 1.1. Publikationsnummer: 2019:062.

⁹⁷ Johansson F. och Svartsjaern M., (2024). Verifiering av analytisk modell för beräkning av valvstabilitet. Stiftelsen bergteknisk forsknin. Befo Rapport 245.

BERGBULTNING VID HÖGA/SNABBA DEFORMATIONER

Energiabsorberande bultar, exempelvis D-bult, installeras i områden där bergmassan kan förväntas ha höga deformationer alternativt där smällberg kan förekomma. I områden med smällberg behöver även bultningen kombineras med ytförstärkning som klarar av deformationer, som exempelvis bergnät.

MONTAGE OCH KONTROLL AV BERGBULTAR

För att bergbulten i huvudsak ska bli dragbelastad bör den installeras med en vinkel 30–50° mot bergblockets avgränsande sprickplan eller bergmassans strukturer. I slänter och tak i en undermarksanläggning är det ofta möjligt att placera bergbultarna så att de i huvudsak har dragbelastning om de bergmekaniska förutsättningarna projekteras på plats. Vid bergförstärkning av väggar i en undermarksanläggning blir det betydligt svårare att undvika skjuvbelastning på bergbultarna vid förstärkning av block. Blir bergbulten skjuvbelastad bör bultens dimensionerande draghållfasthet sänkas med ca 50%.

Är ingjutningslängden över 40 cm för en bergbult med diametern mellan 20 och 32 mm är det bultens draghållfasthet som blir dimensionerande för bultens förstärkningskapacitet. Men för att täcka osäkerheter kring sprick-planens orientering mm vid förankring av bergblock bör vald förankringslängd för en bergbult vara 1 m.

Valet mellan bergbultar av obelagt kolstål, rostfritt stål, varmförzinkat samt varmförzinkat och epoxibelagt bör baseras på platsens miljö vilket kan variera stort. Idag är det relativt lite prisskillnad mellan de olika varianterna av berg-bult så att välja en bult med överdimensionerat skydd medför inte någon större skillnad kostnadsmässigt. Det finns dock risk för övertro på ytskydd av bultarna då skyddet fort kan skadas. Säkrate sättet att försäkra en viss livslängd hos bergbulten är att den är korrekt ingjuten och att ingjutningen är intakt över tid.

Att välja bultbruk med $v_{ct} = 0,3$, vilket är kravet enligt svensk branschnorm, kan ses som det lämpligast valet i nuläget.

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.