RAPPORT

Bergsikring etter Q-systemet i Jernbanetunneler

OPTIMAL BRUK AV Q-SYSTEMET I JERNBANETUNNELER MED MODERNE FUNKSJONSKRAV TIL ENDELIG INNVENDIG KLEDNING

DOK.NR. 20180273-01-R
REV.NR. 1 / 2019-10-29

NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT
NGI.NO

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentisiteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere denne risikoen og ta fullt ansvar for bruk av dette dokumentet.

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this risk and take full responsibility for use of this document.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGI.

Prosjekt

Prosjekttittel:	Spesialrådgivning om bruk av Q-systemet
Dokumenttittel:	Optimal bruk av Q-systemet til bergsikring av jernbanetunneler med moderne funksjonskrav til endelig innvendig kledning
Dokumentnr.:	20180273-01-R
Dato:	2019-04-25
Rev.nr. / Rev.dato:	1 / 2019-10-29

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver:	Bane NOR SF
Kontaktperson:	Brede Nermoen
Kontraktreferanse:	K 012.192

for NGI

Prosjektleder:	Karl Gunnar Holter
Utarbeidet av:	Karl Gunnar Holter, Eystein Grimstad
Faglig kontroll og gjennomlesning:	Nick Barton
Kontrollert av:	Vidar Kveldsvik

Forord

Q-systemets erfaringsgrunnlag spenner over ca. 50 år. Materialteknologi og funksjonskrav til bergsikring og endelig tunnelkledninger har forandret seg og forandrer seg stadig. Imidlertid er erfaringsgrunnlaget om bergmekanisk stabilitet, spesielt selvbærende bergmasser under gode bergforhold fremdeles aktuelle. Denne rapporten er derfor orientert mot erfaringsgrunnlaget som muliggjør sikring av bergrom basert på en selvbærende bergmasse og en bergsikring som er optimert ut i fra bergforhold og stabilitetsbetraktninger, som er forankret i Q-systemets erfaringsgrunnlag.

Q-systemet inkluderer ikke hensyn til tunnelkledningskonstruksjoner av betong som installeres av andre årsaker enn bergmassestabilisering. I noen jernbanetunneler har kledningskonstruksjoner av betong i kontakt med stabilitetssikret tunnelkontur blitt utført som vann- og frostsikring. Flere jernbanetunneler med denne type endelig kledningskonstruksjon planlegges. Bane NOR har stilt spørsmål om denne type tunnelkledning kan redusere behovet for stabilitetssikring som installeres før den endelige kledningen. Årsaken er at det antas at deler av den endelige tunnelkledningen bidrar til stabilitetssikring av bergmassen. Om dette kan inkluderes i Q-systemet er vurdert i denne rapporten.

NGI retter en stor takk til Eystein Grimstad og Nick Barton for faglige bidrag, spesielt med å fremskaffe og diskutere erfaringsgrunnlaget for anbefalingene som gis.

Sammendrag

Denne rapporten omhandler dagens sikringspraksis ved bygging av nye jernbanetunneler i Norge, og muligheten for å optimalisere sikringsomfanget til et riktig eller optimalt omfang. Anbefalingene som gis i denne rapporten støtter seg på Q-systemets erfaringsgrunnlag.

Q-systemet har de siste ca 40 år vært benyttet til å fastsette bergsikring på norske tunnelanlegg, og har vært benyttet i ca 45 år i stadig økende grad til å dokumentere bergforhold. De siste ca 25 årene har Q-systemet vært benyttet til å systematisk registrere og dokumentere bergforhold ved bygging av de fleste trafikktunneler også i Norge. Fastsetting av bergsikring har imidlertid de senere år fulgt egne sikringsklasser som hhv Statens Vegvesen og Bane NOR har definert.

Bane NORs tekniske regelverk for underbygning omtaler to godkjente metoder for endelig kledning av jernbanetunneler. Kledningen skal enten være kontaktstøp med foliemembran eller sprøytebetong i kombinasjon med sprøytbar membran.
Sikringsklassene som utføres på jernbanetunnelanlegg i dag tar ikke hensyn til effekten av den innvendige endelige kledningen som bygges. Den endelige innvendige kledningen vil nesten alltid medføre økt total tykkelse på sprøytebetongen fra såle til såle pga. utførelsen av utjevningsbetong som er nødvendig for begge de nevnte permanente kledningsalternativene til Bane NOR.

I ferdigbygd tilstand vil man derfor svært ofte i gode bergforhold ende opp med en betydelig oversikret tunnel for begge de godkjente kledningsalternativene.

I bergklassene A, B, C og D dvs Q > 1 kan det anbefales ut i fra Q-systemets erfaringsgrunnlag at man kan utføre betydlig lettere midlertidig bergsikring. Det foreslås spesielt å benytte en korreksjonsfaktor for Q-verdien og en høyere ESR-verdi i de tilfellene ytterligere sprøytebetong eller betongstøp vil bli utført i forbindelse med bygging av endelig kledning. Det anbeflaes å justere bergsikringen under slike forhold ved to nivåer , ved hhv. 1 < Q < 10 og for Q > 10. Justeringen foretas i form av en korreksjonsfaktior for Q og en justert verdi for ESR.

Det er viktig å forstå sikringsklassene som fremkommer ved denne betraktningen, som veiledende anbefalinger om sikringsnivå. Justeringer og detaljbeslutninger om sikring vil alltid måtte foretas på grunnlag av en ingeniørgeologisk vurdering. Dette gjelder spesielt i tilfeller med ugunstig blokkgeometri som ikke blir direkte fanget opp av registreringen av parameterne i Q-systemet. Dette forekommer ofte ved gode bergforhold der det vil være optimalt å detaljtilpasse sikringen til det reelle behovet istedenfor å benytteen systematisk sjablongmessig sikringsklasse.

Innhold

1 Innledning 7
1.1 Bakgrunn 7
1.2 Formål 8
2 Gjennomføring 8
2.1 Prosjektteam 8
2.2 Utført arbeid 8
3 Grunnlagsmateriale 9
4 Aktuell praksis for sikring og kledning av trafikktunneler 10
4.1 Generelt 10
4.2 Sikringsklasser 10
4.3 Funksjonskrav til bergsikring og endelig kledning 12
5 Betraktninger om berg-/sikringsklasse og sikringsnivå 13
5.1 Q-systemets referansegrunnlag 13
6 Vurderinger av nåværende praksis mot virkelig behov for bergsikring 19
7 Anbefalinger om bergsikring 21
7.1 Bergmasseklassifisering 21
7.2 Sikringsklasser 21
8 Referanser 26

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Denne rapporten beskriver en optimalisering av bruken av Q-systemet for å bestemme permanent bergsikring av jernbanetunneler der den endelige tunnelkledningsmetoden antas å bidra til stabilitetssikring av bergmassen. Bruksområdet som omfattes i denne rapporten er følgelig situasjoner der en endelig innvendig kledning vil ha en betydning for det reelle behovet for permanent stabilitetssikring av tunnelen før innvendig kledning installeres.

Tunneler bygges i dag med en bergsikring som utføres med en permanent funksjon, uavhengig av hvilken endelig innvendig kledning som installeres. Innvendige kledninger som tradisjonelt har vært benyttet er hvelvløsninger som er frittstående eller opphengt i bolter, som gir et betydelig luftrom mellom kledning og stabilitetssikret tunnel. På nyere prosjekter har disse vært montert som et separat hvelv. Den mellom-europeiske metoden med kontaktstøpt betonghvelv med foliemembran har bare vært benyttet i fire tunneler i ett prosjekt hittil i Norge.

Følgende permanente innvendige kledningstyper har vært benyttet i jernbanetunneler de senere årene:

1. Vann-/frostsikrings hvelv av PE-skum med et brannhemmende dekksjikt av sprøytebetong
2. Vann/frostsikringshvelv av prefabrikkerte betongelementer med en sveiset foliemembran som er frittliggende og fastmontert på innsiden av elementkledningen
3. Kontaktstøpt (plasstøpt) betonghvelv med drenerende geotekstil og helsveiset heldekkende foliemembran som befinner seg mellom sprøytebetongen og betonghvelvet
4. Sprøytebetonghvelv vanntettet med sprøytbar membran, der membranen befinner seg mellom to lag av sprøytebetong.

I gjeldende teknisk regelverk er kledningsalternativene 3 og 4 godkjent for fremtidige prosjekter. Det har vært vanlig å kontrollere innlekkasjene til tunnelen fra berget i form av forinjeksjon, med ulike krav til tetthet som bl.a. skyldes risiko for setningsskade og miljøkonsekvenser av senkning av grunnvannstand. De to tradisjonelle hvelvløsningene (1 og 2) kan i prinsippet utføres selv med betydelige innlekkasjer. De to sistnevnte moderne kledningsmetodene forutsetter at lekkasjen inn i tunnelen er lav, hvilket ofte vil medføre at forinjeksjon av bergmassen må utføres.

Beslutningsgrunnlaget for bergsikring er per i dag sikringsklasser fastsatt av Bane NOR Utbygging ut i fra Q-systemets bergklasser, som ikke må forveksles med Q-systemets sikringskategorier. Disse sikringsklassene refererer seg imidlertid til Statens Vegvesen Håndbok N500, (som ikke tar hensyn til tunnelens dimensjon) og ikke til

sikringskategoriene som Q-systemet anbefaler. Sikringsklassene fastsatt av Bane NOR Utbygging på nyere prosjekter (Bane NOR 2015) medfører en betydelig minimumstykkelse av sprøytebetong, også for de beste bergklassene der Q-systemets erfaringsgrunnlag tilsier minimal bruk av sprøytebetong. Tunnelkledningsalternativene kontaktstøpt betong med foliemembran og sprøytebetong kombinert med sprøytbar membran, som per i dag utgjør de godkjente kledningsalternativene for Bane NOR for sprengte tunneler, medfører et visst omfang av sprøytebetong til utjevning i hele tunnelprofilet for vanntettingsmembranen. Dette skyldes et varierende avvik mellom utført sprengningsprofil og teoretisk sprengningsprofil. I slike tilfeller vil det være mulig å redusere omfanget av bergsikring utført på stuff til et funksjonelt behov som er optimalt i forhold til bergmassens stabilitet

1.2 Formål

Hovedmålet med denne rapporten er å gi anbefalinger om et veiledende sikringsnivå som er realistisk ut ifra det funksjonelle behovet. Anbefalingene er utarbeidet etter følgende prinsipper:

- Den fullstendige endelige kledningskonstruksjonen tas med i helhetsvurderingen, herunder omfanget av sprøytebetong som utføres som forberedelse for den innvendige kledningen
- Anbefale et funksjonelt riktig sikringsnivå der det uten tvil praktiseres en opplagt oversikring med dagens praksis
- Q-systemets erfarings- og referansegrunnlag brukes som utgangspunkt
- Spesielt inkludere erfaringer der man har forhold som muliggjør selvbærende bergmasse ved de aktuelle tunneltverrsnittene

2 Gjennomføring

2.1 Prosjektteam

Prosjektet er gjennomført med følgende fagpersoner:

Karl Gunnar Holter, NGI (prosjektleder)
Eystein Grimstad, senior rådgiver i Geolog Eystein Grimstad
Nick Barton, senior rådgiver i Nick Barton & Associates
Vidar Kveldsvik (kvalitetssikring)

Deltakelsen fra Eystein Grimstad og Nick Barton har vært avgjørende for å få tilgang til relevant erfaringsmateriale og evaluere dette i lys av prosjektets formål.

2.2 Utført arbeid

Prosjektet har blitt gjennomført med følgende aktiviteter:

- Studie av praksis ved bygging av jernbanetunneler i nyere tid
- Gjennomgang av Q-systemets erfaringsgrunnlag fra 1974, 1993 og 2002
- Gjennomgang av anbefalinger gitt i aktuelle veiledningsdokumenter og håndbøker: NGI 2015, Statens Vegvesen 2016 og Barton & Grimstad 2014
- 1 arbeidsmøte med Eystein Grimstad, Nick Barton, Vidar Kveldsvik
- 3 arbeidsmøter med Eystein Grimstad og Karl Gunnar Holter
- 2 arbeidsmøter med presentasjon for Bane NOR
- Evaluering og diskusjoner pr telefon og epost
- Presentasjon og diskusjon av resultater/anbefalinger på fagseminar Bane NOR Utbygging U2020 i Narvik 12-13. februar 2019
- Sammenstilling av anbefalinger, presentasjoner og rapportering

3 Grunnlagsmateriale

Grunnlagsmateriale som er benyttet i dette prosjektet er vist i tabell 1. Detaljerte referansehenvisninger med dokumentnummer osv. er gitt i avsnittet "Referanser" helt tilslutt i denne rapporten.

Tabell 1 Grunnlagsmateriale for denne studien

Dokument	Årstall	Forfatter / Kilde	Innhold/relevans
NGI Rapport No106. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support	1974	Barton N, Lien R, Lunde J	Opprinnelig faktagrunnlag for sammenheng mellom Q-verdi og bergsikring, ca. 200 case studier
Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics. 6: 4: 189-236	1974	Barton N, Lien R, Lunde J	Opprinnelig faktagrunnlag for sammenheng mellom Q-verdi og bergsikring, illustrert med utvalgte case studier
Updating of the Q-system for NMT	1993	Grimstad E, Barton N	Utvidet erfaringsgrunnlag med ytterligere 1050 case studier. Kalibrering av SRF i forhold til høye spenninger. Innføring av fiberarmert sprøytebetong.
Rock Mass Quality Q used in Designing Reinforced Ribs of Sprayed Concrete and Energy Absorption	2002	Grimstad E, Kankes K, Bhasin R, Wold Magnussen A, Kaynia A	Utvidet erfaringsgrunnlag med ytterligere 800 case studier. RRS og energiabsorpsjon inkludert i Q-systemet
Arbeid foran stuff og stabilitetssikring i vegtunneler	2010	Statens Vegvesen	Betraktninger om sprøytebetongtykkelse og levetid
Publication No 7, Sprayed concrete for rock support	2011	Norsk Betongforening	Anbefalinger om sprøytebetong til bergsikring
Q-system. An illustrated guide following 40 years tunnelling	2014	Barton N, Grimstad E	Oppdatering/oppsummering for praktisk bruk. Omfattende og fullstendig. Betraktning om bergsikring forut for full utstøpning
Bergsikring hovedtunnel Vestfoldbanen Farriseidet-Porsgrunn	2015	Bane NOR Utbygging	Utført bergsikring på nyere prosjekter

Dokument	Årstall	Forfatter / Kilde	Innhold/relevans
Geologisk sluttrapport Dovrebanen Ulvin og Morstuatunnelen	2015	Bane NOR Utbygging	Utført bergsikring på nyere prosjekter
Håndbok: Bruk av Q-systemet. Bergmasseklassifisering og bergforsterkning	2015	NGI	Aktuelle anbefalinger fra NGI. Brukt på norske anlegg (revidert utgave med korreksjoner planlegges i 2019)
Håndbok N500 Vegtunneler	2016	Statens Vegvesen	Statens Vegvesens anbefalinger om bergsikring. Også praktisert for jernbanetunneler
Teknisk regelverk tunneler	2018	Bane NOR Teknologi	Regelverk om godkjente tekniske løsninger for tunnelkledninger i jernbanetunneler

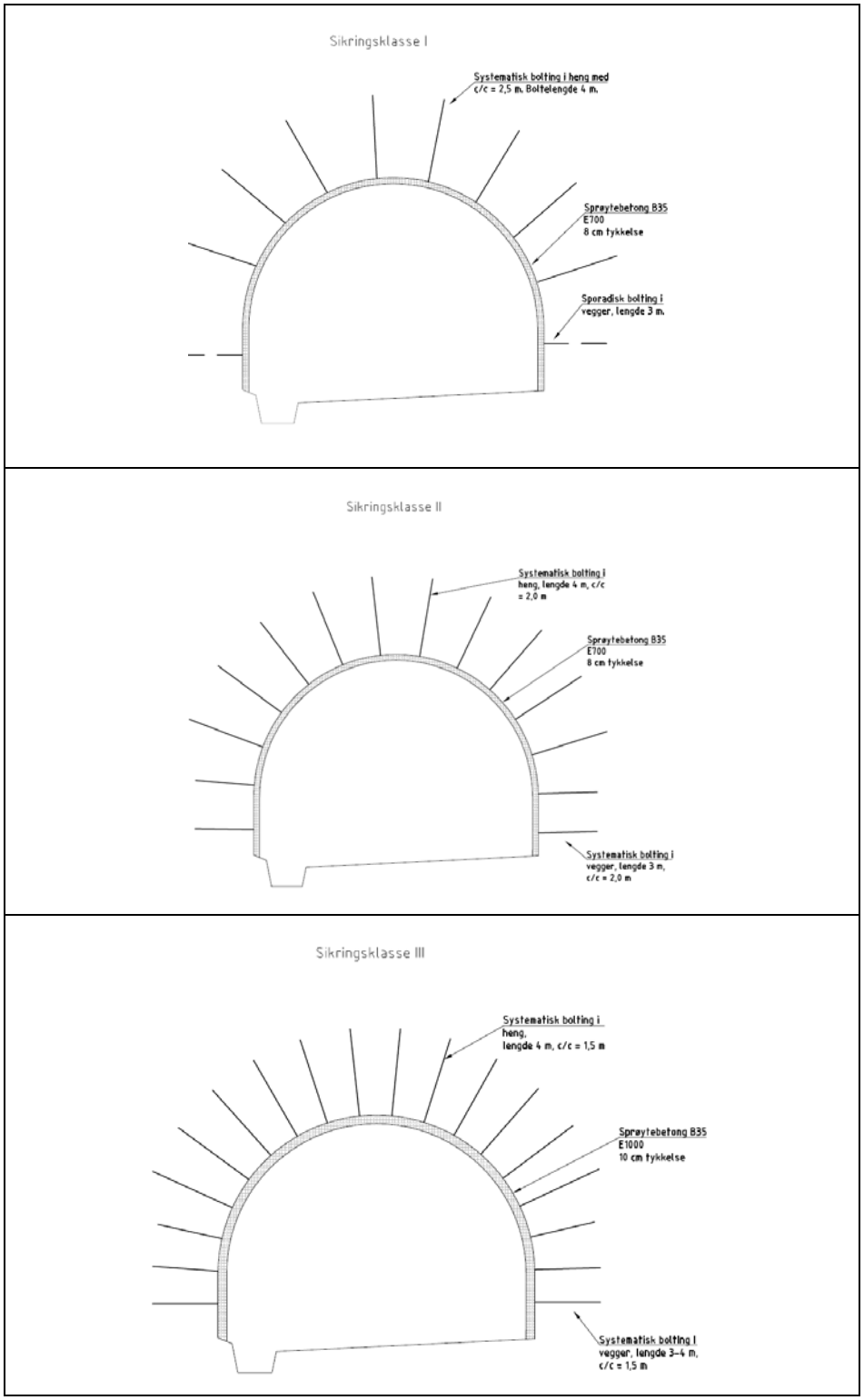
4 Aktuell praksis for sikring og kledning av trafikktunneler

4.1 Generelt

Den eksisterende praksisen for permanent bergsikring av jernbanetunneler har i stor grad fulgt Statens vegvesen sine anbefalinger og retningslinjer for permanent sikring (Statens vegvesen, Håndbok 21 fra 2010 og N500 fra 2016). Bane NOR har fulgt denne praksisen for bygging av jernbanetunneler de siste 10-15 årene. Det har ikke vært praktisert noen differensiering i forhold til den endelige kledningen som bygges. Statens vegvesens håndbøker tar ikke hensyn til tunnelens dimensjon i sine sikringstabeller: Samme sikringsklasse gjelder for T8,5 – T12,5 og for større og mindre tunneltverrsnitt ved samme Q-verdi. Sikringstabellene i Statens Vegvesen sin håndbok N500 (2016) følger heller ikke Q-systemets sikringskategorier.

4.2 Sikringsklasser

Vurderingen av aktuell praksis for bergsikring av jernbanetunneler refererer seg til tunneler som er bygget de senere årene på IC Vestfoldbanen og Fellesprosjektet E6-Dovrebanen. Holmestrandsporten, tunnelene på strekningen Farriseidet-Porsgrunn har vært bygd med vann/frostsikringshvelv av pre-fabrikerte betongelementer. Ulvintunnelen og Morstuatunnelen har vært bygd med kontaktstøp (plasstøpt betonghvelv) med drenerende geotekstil og foliemembran. Forinjeksjon for de to sistnevnte tunnelene ble ikke utført pga. bergmasse som gav liten innlekkasje i tunnelene. Det er benyttet samme bergsikringsklasser i disse prosjektene, uavhengig av den endelige kledningstypen som er valgt. Bergsikringsklassene som er benyttet på disse to prosjektene er vist i figur 1.



Figur 1 Utførte sikringsklasser i moderne jernbanetunneler. Sikringsklasse I i bergklasse A og B (Q > 10), sikringsklasse II i bergklasse C (4 < Q < 10) og sikringsklasse III i bergklasse D (1 < Q < 4).

Begrunnelsen for en minimumstykkelse av sprøytebetong på 8 cm er for å oppnå tilfredsstillende langtids materialbestandighet (Statens Vegvesen, 2010). Dette kravet fører til at alle beslutninger om sprøytebetong til bergsikring medfører 8 cm minimumstykkelse av sprøytebetong, helt uavhengig av bergmassekvalitet eller lekkasjeforhold. Vi ser også at bolteavstanden er betydelig tettere enn anbefalt i Q-systemet i sikringsklasse III og i noen grad i klasse II.

4.3 Funksjonskrav til bergsikring og endelig kledning

For tunnelkledningsalternativene for sprengte tunneler gjelder følgende funksjons- og levetidskrav for bergsikring (Teknisk regelverk, Bane NOR, 2018 og Statens Vegvesen Håndbok N500, 2016):

- Bergmekanisk stabilitet både i byggefasen (arbeidssikring) og med permanent sikring i brukslevetid (100 år)
- Materialbestandighet i prosjektets brukslevetid (100 år)

For permanente tunnelkledninger med vann- og frostsikringshvelv vil man i prinsippet ha et tilnærmet likt funksjonelt behov for bergsikringen som i et åpent trafikkrom. Forskjellen er at man bak hvelvkonstruksjon kan akseptere nedfall av mindre bergfragmenter. Praksis er imidlertid at det sikres med samme funksjonskrav bak vann- og frostsikringshvelv, som om det ikke hadde vært noen vann- og frostsikring.

Permanent kledning med kontaktstøp av betong er nytt i Norge, og hittil kun utført i fire tunneler i ett prosjekt. Utførelsen forløp planmessig og var beskrevet i anbudsgrunnlaget for kontraktstildelingen, og tillot derfor entreprenøren å optimalisere bergsikringen. Det var likevel en del problemer knyttet til overmasser pga sprengingsteknikk, geologiske forhold som tett oppsprekking, og derfor betydelig ekstra behov for utjevning og fylling av volumer for å skape en egnet overflate for geotekstil og foliemembran. Begrunnelsen for dette er å fjerne/redusere sannsynlighet for revning og lekkasje gjennom skjøtene i membranen.

Permanent kledning med sprøytebetong og sprøytbar membran er utført i to tunneler med svært forskjellige bergforhold. I begge tilfellene med sprøytbar membran ble utførelsen besluttet etter at tunnelene var ferdig drevet og utført som tilleggs-/regningsarbeid. En optimalisering av bergsikringen var derfor ikke mulig.

Begge de i Norge nye kledningsalternativene, kontaktstøp med foliemembran og sprøytebetongkledning med sprøytbar membran, medfører muligheter for ekstra sprøytebetong for utjevningsformål til membraner. Det har ikke vært vanlig å ta denne sprøytebetongen med i betraktning ved beslutning om bergsikring fortløpende under driving.

Bergsikring definert av det reelle behovet ved bruk av plasstøpt betong eller sprøytebetong som endelig kledning vil kunne tilsi at sikringen vil kunne reduseres. Dette er spesielt tilfellet der sprøytebetong i vegger kan elimineres fra bergtekniske og stabilitetsmessige hensyn. Hensyn til detaljstabilitet som i praksis kun krever noen få cm sprøytebetong kan løses med utjevningsbetongen som sprøytes senere. Som utjevningsbetong vil en betydelig rimeligere betongresept kunne benyttes, der krav til høy tidligfasthet og høy energiabsorpsjon ikke er nødvendig. Utjevnings-sprøytebetongen må imidlertid tilfredsstille krav til bestandighet og langtidsholdbarhet.

Den stabilitetsmessige effekten av kontaktstøpen som skal holde den drenerende geotekstilen og foliemembranen oppe er ikke tatt hensyn til ved bruk av denne metoden i Norge hittil. En støpt betongkledning med minimumstykkelse 30 eller 40 cm, ofte med betydelig høyere tykkelse der sprekkeflater forårsaker overmasser (ved Jn/Jr $\geq$ 6), har stor overkapasitet til å hindre nedfall av små blokker og bergframenter som et tynt lag sprøytebetong ellers kan hindre.

Prosjekteringen som har vært praktisert av kontakstøpt betonghvelv med drenerende geotekstil for jernbanetunneler forutsetter at kledningkonstruksjonen er fullstendig drenert, dvs fullstendig avlastet for et eventuelt grunnvannstrykk. Langtidseffekter av drenerende vann i form av utlutning av bergsikringssprøytebetongen i riss som kan føre til utfellinger og redusert virkning av dreneringen har ikke vært hensyntatt.

5 Betraktninger om berg-/sikringsklasse og sikringsnivå

5.1 Q-systemets referansegrunnlag

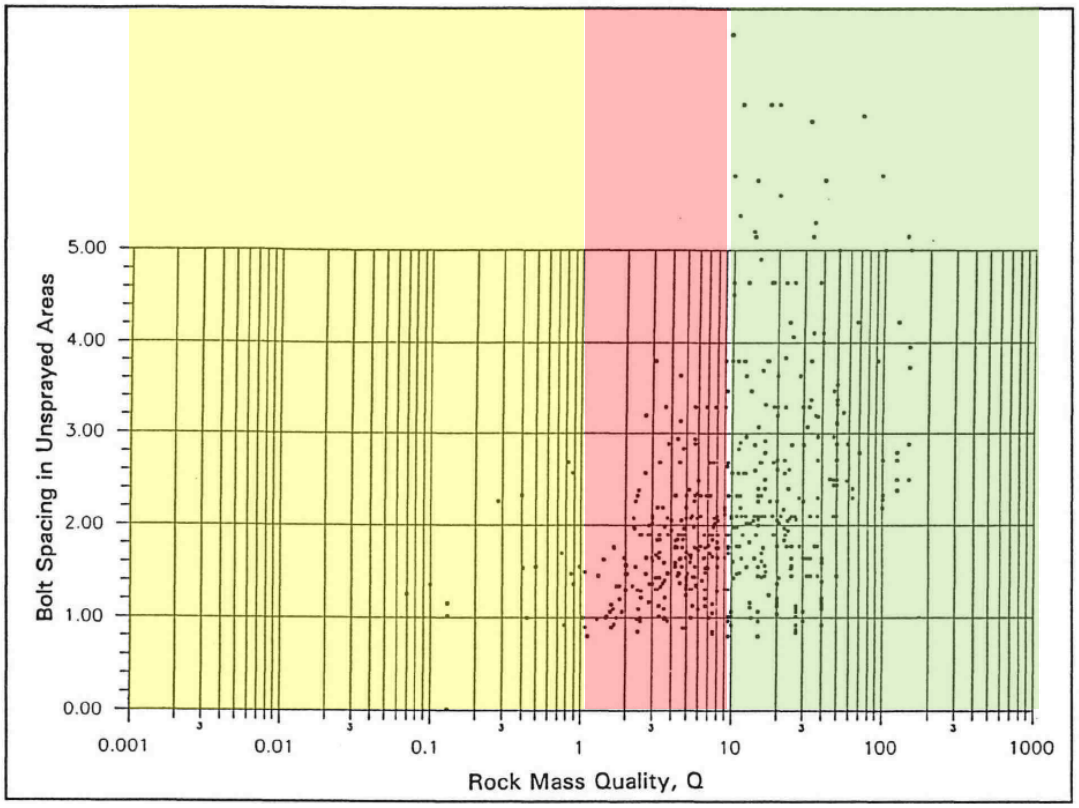
Tunneler bygget i 1960 årene og begynnelsen av 1970 årene dannet grunnlaget for Q-systemet som ble publisert i 1974. Referansegrunnlaget for oppdateringen i 1993 er hentet fra tunneler som ble bygget på 1980-tallet og begynnelsen på 1990-tallet, da fiberarmert sprøytebetong var kommet i vidstrakt bruk. Dette referansegrunnlaget inneholder erfaringsmateriale der Q-systemet kun svært sjelden har vært benyttet som metode for å bestemme sikringen. Referansegrunnlaget fra midten av 1990 tallet frem mot 2002 er tatt fra tunneler hvor Q-systemet har vært brukt for bestemmelse av sikring i mange av tunnelene. Erfaringsmaterialet fra oppdateringen i 2002 er derfor også "ekte" empirisk, og refererer seg for det meste til tilfeller der det er foretatt en registrering av bergmasseforholdene ihht Q-systemet, men Q-systemets sikringskategorier bare delvis er benyttet som metode for å beslutte bergsikringen. De viktigste publikasjonene som omtaler Q-systemets referansegrunnlag er vist i tabell 2.

Tabell 2 Referansegrunnlag fra utviklingen og oppdateringen av Q-systemet som er benyttet i denne studien

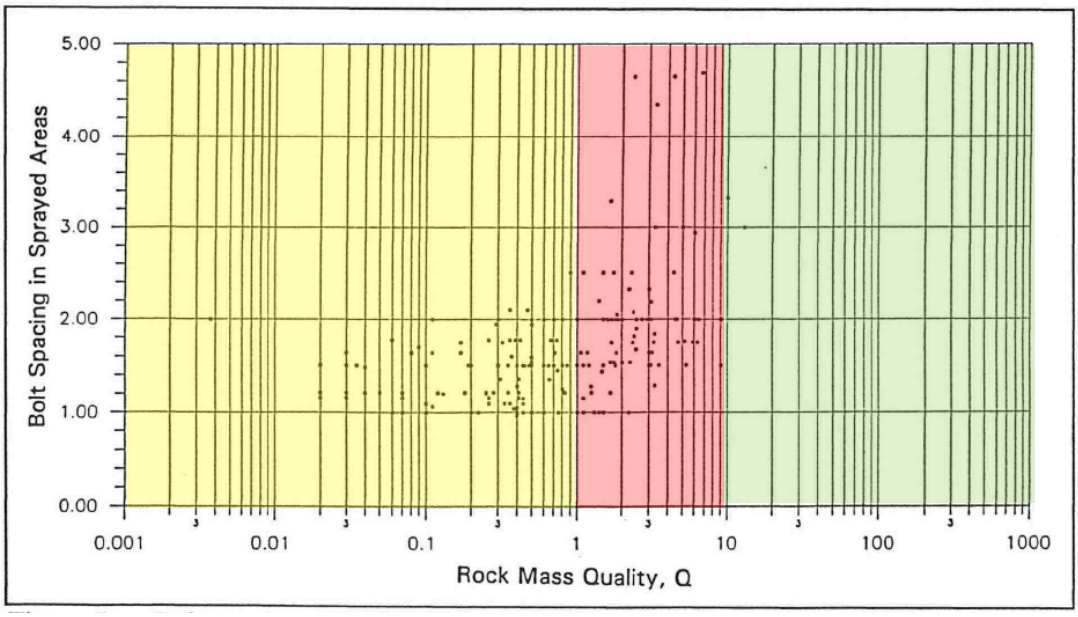
Dokument	Årstall, forfattere	Betydning / relevans for denne studien
NGI Rapport 106, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support	1974, Barton, Lien og Lunde	Opprinnelige vurderinger bergforhold og sikringsbehov, ca. 200 case studier
Updating of the Q-system for NMT	1993, Grimstad og Barton	Ytterligere 1050 case studier inkludert. SRF ble kalibrert i forhold til høye spenninger, og fiberarmert sprøytebetong var tatt i bruk
Rock Mass Quality Q used in Designing Reinforced Ribs of Sprayed Concrete and Energy Absorption	2002, Grimstad, Kankes, Bhasin, Wold Magnussen og Kaynia	Ytterligere 800 case studier inkludert, RRS og energiabsorpsjon inkludert
Q-system. An illustrated guide following 40 years tunnelling	2014, Barton og Grimstad	Oppdaterte anbefalinger. Bergsikring før kontaktstøp inkludert. Aktuell praksis i store deler av verden for anvendelse av Q-systemet
Håndbok: Bruk av Q-systemet. Bergmasseklassifisering og bergforsterkning	2015, NGI	Aktuell praksis i Norge for anvendelse av Q-systemet. Revidert utgave med korreksjoner planlegges 2019

For $Q > 10$ vil det i svært mange tilfeller være selvbærende bergmasser, med behov for detaljsikring for å ivareta funksjonskravene. For bergklasser i intervallet $1 < Q < 10$ vil det i hovedsak være selvbærende berg, men økende detaljsikringsbehov for å ivareta detaljstabilitet. Spesielt i gradvis økende grad med dårlig berg, vil det være behov for et økende sikringsnivå. Dette er illustrert i figurene 2-5, som refererer seg til 1050 case-studier som danner grunnlaget for oppdateringen i 1993 (Grimstad og Barton, 1993). I hver figur er bergklasser med $Q > 10$ visualisert med et grønt felt og $1 < Q < 10$ med rosa felt. Det gule feltet $Q < 1$ illustrerer bergklasser der et betydelig sikringsomfang er nødvendig. Omfanget av bergsikring med bergbolter uten sprøytebetong er vist i figur 2. Figur 2 viser at et stort antall observasjonspunkter uten bruk av sprøytebetong i intervallet $1< Q < 10$. En stor del av disse observasjonene er foretatt i veitunneler i Sogn og Fjordane, hvor størsteparten av tunnelene var drevet i egen regi av Stans Vegvesen. Sikringen var basert på vegvesenets egne erfaringer under driving og senere vedlikehold av tunnelene Erfaringsgrunnlaget for disse tunnelene tilsier en ESR verdi på 1.

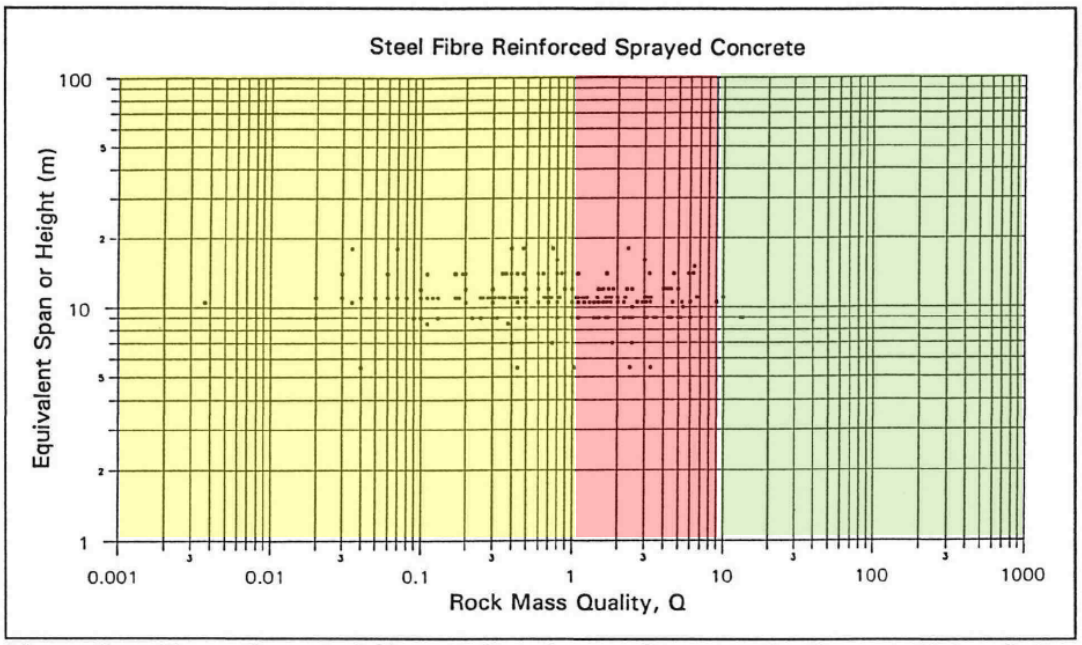
Bolteavstand i kombinasjon med sprøytebetong er vist i figur 3. Det fremkommer tydelig at det er lite til moderat bruk av sprøytebetong for $1 < Q < 4$ og for $Q > 4$ er bruken av sprøytebetong sporadisk. Figur 4 illustrerer dokumentert bruk av fiberarmert sprøytebetong med varierende Q-verdier og varierende spennvidder/høyder i bergrommet. Figur 5 viser tykkelsen i fiberarmert sprøytebetong relatert til observerte Q-verdier. Det fremkommer tydelig at det for bergforhold med registrerte Q-verdier > 10 har vært svært få tilfeller med bruk av sprøytebetong i perioden 1980 til 1993. Fordi disse tunnelene kun i liten grad var sikret med sprøytebetong og i mange tilfeller bare i heng og vederlag, var det mulig å registrere Q-systemets parametere også lenge etter driving, mens tunnelene var i bruk.



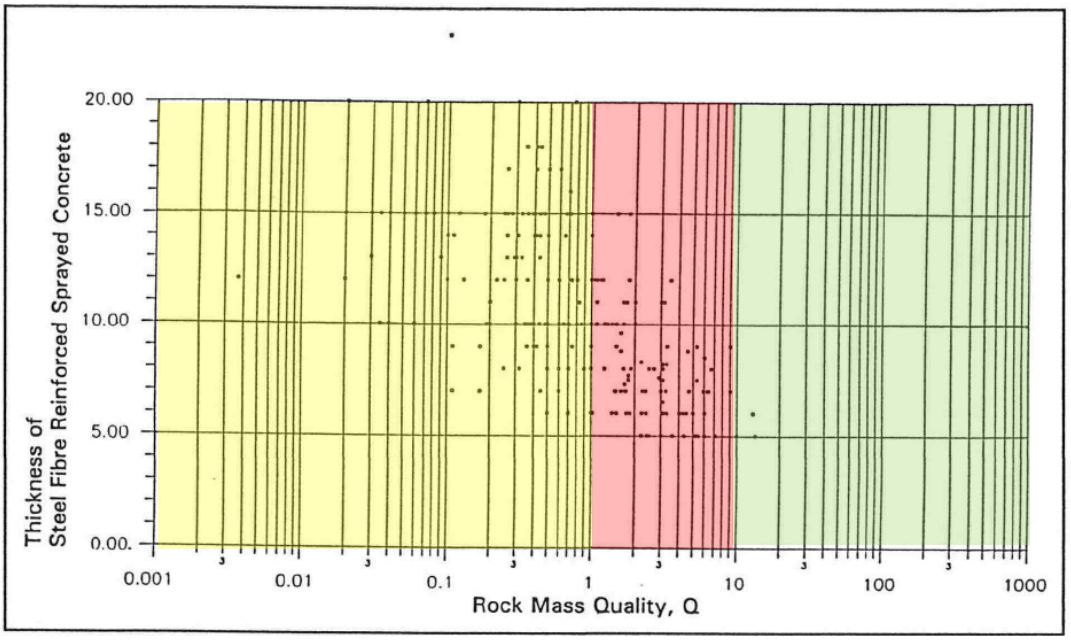
*Figur 2 Bolteavstand i relasjon til Q-verdi i bergmasser **uten** sprøytebetongsikring (Grimstad og Barton, 1993).*



*Figur 3 Bolteavstand i relasjon til Q-verdi i områder **med** sprøytebetongsikring (Grimstad og Barton, 1993).*



Figur 4 Registrerte tilfeller med fiberarmert sprøytebetong i relasjon til kartlagt Q-verdi og spennvidde/høyde i bergrommet (Grimstad og Barton, 1993).



Figur 5 Registrerte tilfeller med angivelse av tykkelse av utført fiberarmert sprøytebetong i relasjon til kartlagt Q-verdi (Grimstad og Barton, 1993).

I Norge eksisterer det ikke erfaringsgrunnlag med bergsikring utført som midlertidig sikring før systematisk bruk av kontaktstøpt betonghvelv over lengre tunnelstrekninger. Vurdering av det nødvendige eller optimale bergsikringsomfanget før kontaktstøp er på plass er derfor basert på case studier, i hovedsak i harde bergarter i Hong Kong. Her har det vært foretatt en systematisk registrering av bergforhold etter Q-systemet, utført bergsikring basert på erfaring og ingeniørgeologiske vurderinger, for det meste støttet av Q-systemet med korreksjonsfaktor. Både den utførte (og reduserte) bergsikringen og virkelige Q-verdier har vært registrert. Derfor er dette materialet egnet som et realistisk erfaringsgrunnlag. Det vurderes som meget relevant for oppgaven i denne rapporten.
Hovedresultatene fra denne studien, gjengitt i Barton og Grimstad, 2014, er vist i figur 6. Erfaringene med denne praksisen tilsier at man som "tommelfingerregel" benytter en korreksjonsfaktor fem for Q-verdien ($5 \times Q$) og en verdi for ESR *Excavation Support Ratio* på 1,5 for slike midlertidige sikringstilfeller.

Using the Q-system for temporary support prior to NATM concrete lining

When the Q-system was first published in 1974, it was designed to provide guidance on suitable permanent support for a variety of tunnel and cavern sizes. By way of a footnote, it was suggested that the Q-system could also be used for guiding *temporary support* selection. The suggested rule-of-thumb was '5Q and 1.5 ESR'. This means a diagonal shift, downwards and to the right, on a Q-support chart, as illustrated by the example in Figure 20. This method has been used systematically by Hong Kong road, rail, and metro authorities for at least 25 years, as the preliminary stage of NATM-style tunneling and station cavern development.

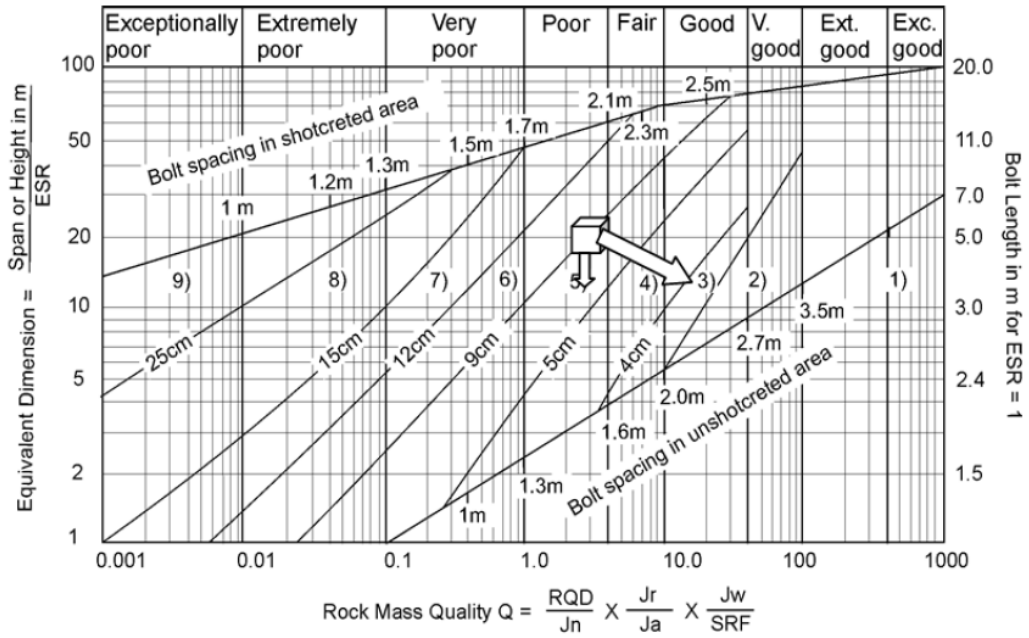


Figure 20 Using the 1993 Q-support chart as illustration, the Barton et al. (1974) 'rule-of-thumb' for selecting temporary support is shown for the case of NATM-style tunneling in Hong Kong. Applying 5Q and 1.5 ESR, the span-versus-Q coordinate moves downwards and to the right, ensuring less but sufficient B+S(fr) support while waiting 1 or 2 years for the final concrete lining. The first author has gradually learned to accept this practice when reviewing projects in Hong Kong, but was initially surprised by its widespread use already in the 1990's.

Figur 6. Utdrag fra Barton og Grimstad 2014 som blant mye annet oppsummerer "5Q og 1.5 ESR" regelen, der det er utført endelig tunnelkledning med plasstøpt betonghvelv og vanntetting med foliemembran i Hong Kong. Den utførte midlertidige sikringen sammenliknet med sikringsanbefalingene gitt i Q-systemets sikringskategorier er illustrert med en forskyvning nedover og til høyre.

For permanent sikring av *vegger* foreligger anbefalingen vist i tabell 3 og figur 7. Denne differensierer ved Q < 0,1, 0,1<Q<10 og Q >10. For Q < 0,1 anbefales faktisk kartlagt Q-verdi, dvs k = 1.

Tabell 3 Korreksjonsfaktorer for Q-verdier for dimensjonering av permanent bergsikring i vegger (Barton et al 1974, NGI 2015)

Bergforhold	Bergmassekvalitet	Korreksjonsfaktor for Q-verdi for bestemmelse av sikringskategori
Bergmasser med god kvalitet	Q > 10	k = 5
Bergmasser med middels kvalitet	0,1 < Q < 10	k = 2.5 I tilfelle høye bergspenninger, k = 1
Bergmasse med dårlig kvalitet	Q < 0,1	k = 1

1.	*Temporary Support*	a) b) c)	increase ESR to 1.5 × ESR increase Q to 5Q (arch) Increase Q_w to $5Q_w$
2.	*Wall Support* (based on modified quality Q_w for walls)	a) b) c)	select $Q_w = 5Q$ (when $Q > 10$) select $Q_w = 2.5Q$ ($0{,}1 < Q < 10$) select $Q_w = 1.0Q$ (when $Q < 0.1$)
Note 1 Use total excavation height (H) for wall support design. Note 2 Q is the general rock quality observed when inspecting the arch *or* walls of a tunnel. For local variations of rock quality (arch or walls), map locally and change support as appropriate. (Q_w is *not* the observed value of Q in a cavern wall.)			

Figur 7 Opprinnelige anbefalinger (Barton et al 1974) om sikring til midlertidig formål i hele konturen og en egen angivelse for vegger.

6 Vurderinger av nåværende praksis mot virkelig behov for bergsikring

Den aktuelle praksisen for bergsikring av jernbanetunneler, vist i figur 1 representerer en oversikring i forhold til Q-systemets erfaringsgrunnlag. Denne praksisen er gitt av Statens vegvesen (Statens vegvesen 2010, Statens vegvesen 2016) for bergsikring av tunneler der det vil bli montert et endelig innvendig hvelv for vann- og frostsikring med luftrom mellom kledning og sikret tunnelkontur. Begrunnelsen for å benytte sprøytebetong i vegger helt ned til såle har i hovedsak vært:

- Arbeidssikring i forbindelse med montering av vann og frostsikringshvelvet
- Detaljsikring av veggene for sikker ferdsel ved senere inspeksjoner av bergoverflaten bak vann- og frostsikringshvelvet etter mange år

Sprøytebetongsikring, også i vegger medfører generelt en gjennomsnittstykkelse på 8 cm i hele profilet.

Denne praksisen har vært implementert av Bane NOR på alle nyere jernbanetunnelanlegg uten å differensiere mellom ulike endelige kledningstyper. Når den endelige kledningstypen er kontaktstøp eller sprøytebetong med sprøytbar membran

så vil man ikke ha et detaljsikringsbehov av bergoverflaten pga. ferdsel over lang tid. For de to kledningsløsningene som er godkjent i teknisk regelverk kan følgende betraktninger gjøres:

1. Kontaktstøpt betonghvelv med drenerende geotekstil og foliemembran
    a. Det vil være behov for en utjevning av berg- eller bergsikringsoverflaten slik at geotekstilen/foliemembranen ligger jevnt mot underlaget uten å være "spent" opp over knøler eller hulrom i overflaten. Derved unngås revning av membranen forårsaket av trykket fra den ferske flytende betongen under støping og senere vanntrykk.
    b. Utjevningssprøytebetongen kan variere betydelig i tykkelse avhengig av bergkonturens geometri, fra noen få cm opp til meter-størrelsesorden.
    c. Det stilles ikke krav til tidligfasthet eller seighetsegenskaper til utjevningsbetongen. Utjevningsbetongen må imidlertid tilfredsstille krav til sluttfasthet og tetthet/porøsitet/bestandighet identisk med bergsikringssprøytebetongen
    d. Sprøytebetongen på innsiden av kontaktstøpen vil være drenert i permanent tilstand. Dvs. grunnvann vil lekke gjennom riss.
    e. Bergsikringen utført nær stuff, vil ha funksjon som arbeidssikring helt fram til utførelsen av utjevningssprøytebetongen, før bygging av den endelige kledningen. Tiden for dette vil normalt være mellom 6 måneder og ca. 2 år fra drivetidspunktet, avhengig av tunnellengden og bygningslogistikk.

2. Permanent kledning av sprøytebetong og sprøytbar membran
    a. Det vil være behov for en utjevningsbetong som har som formål å redusere overflatens detaljruhet slik at en kontinuerlig membran med gitt minimumstykkelse kan påføres ved sprøyting.
    b. Utjevningssprøytebetongen vil som oftest ha en tykkelse på mellom ca. 3 og 15 cm, men kan være vesentlig større pga. mange sprekkesett (høyt sprekkesettall, Jn) og liten ruhet (lavt sprekkeruhetstall, Jr). Forholdet $Jn/Jr \geq 6$ er viktig for volum av overmasser.
    c. Det stilles ikke krav til tidligfasthet eller seighetsegenskaper til utjevningsbetongen. Utjevningsbetongen må imidlertid tilfredsstille krav til sluttfasthet og tetthet/porøsitet/bestandighet identisk med bergsikringssprøytebetongen
    d. Sprøytebetongen vil med denne kledningstypen være udrenert i permanent tilstand, og vannet må være under kontroll (se nedenfor).
    e. Bergsikringen utført nær stuff, vil ha funksjon som arbeidssikring helt inntil utførelsen av utjevningssprøytebetongen, før bygging av den endelige kledningen. Tiden for dette vil avhenge av entreprenørens tilrettelegging av arbeider. Normalt vil den endelige sprøytebetongbaserte kledningen bli utført etter at hele tunnelen er ferdig drevet. Denne kledningsmetoden gir imidlertid større fleksibilitet i byggeprosessen. Tiden fra bygging av bergsikring til bygging av endelig kledning kan forventes å variere fra ca. 2 måneder til ca. 1 år.

f. Det er så langt antatt her at vannet er kontrollert med forinjeksjon i kombinasjon med lokal drenering. Dette er spesielt viktig for utførelsen av sprøytbar vanntettingsmembran. En maksimal innlekkasjemengde på ca. 5 l/min/100m vil normalt gi egnede forhold for teknisk gjennomførbarhet av sprøytbar vanntettingsmembran av typene man har erfaring med.

For begge disse tekniske løsningene for permanente kledninger for jernbanetunneler vil det altså være behov for en sprøytebetong i veggene før den endelige kledningen bygges. Denne sprøytebetongen vil inngå i den endelige sprøytebetongkonstruksjonen og forsterke bergsikringssprøytebetongen. Forbedringseffektene vil i hovedsak omfatte økt bestandighet pga. økt total tykkelse. I tillegg vil en slik utjevning av sprøytebetongen gi et jevnere tunnelprofil og tilnærming til en bærende bue, som i seg selv gir øket effekt som sikring. Derfor er det mulig under gode bergforhold å behovsvurdere sprøytebetong i veggene, og som utgangspunkt utføre den umiddelbare bergsikringen kun med selektiv bruk av sprøytebetong i veggene.

Tidsaspektet for driving og umiddelbar sikring av tunnelen og bygging av endelig kledning medfører en differensiering av det temporære sikringsbehovet. Svakt berg med tunge sikringsklasser vil generelt kreve det tilnærmet samme sikringsnivået temporært som permanent. Dette vil medføre at det temporære sikringsbehovet i hele konturen må vurderes som om det var en permanent kledning. For en viss bergklasse og lavere (klasse E eller F i Q-systemet), vil det derfor ikke være riktig å anbefale en praksis med lettere temporær sikring i veggene.

7 Anbefalinger om bergsikring

7.1 Bergmasseklassifisering

Bergmasseklassifiseringen etter Q-systemet (Barton & Grimstad 2014, NGI 2015) forutsettes utført i henhold til gjeldende praksis. Det foreslås ingen endringer av dette.

7.2 Sikringsklasser

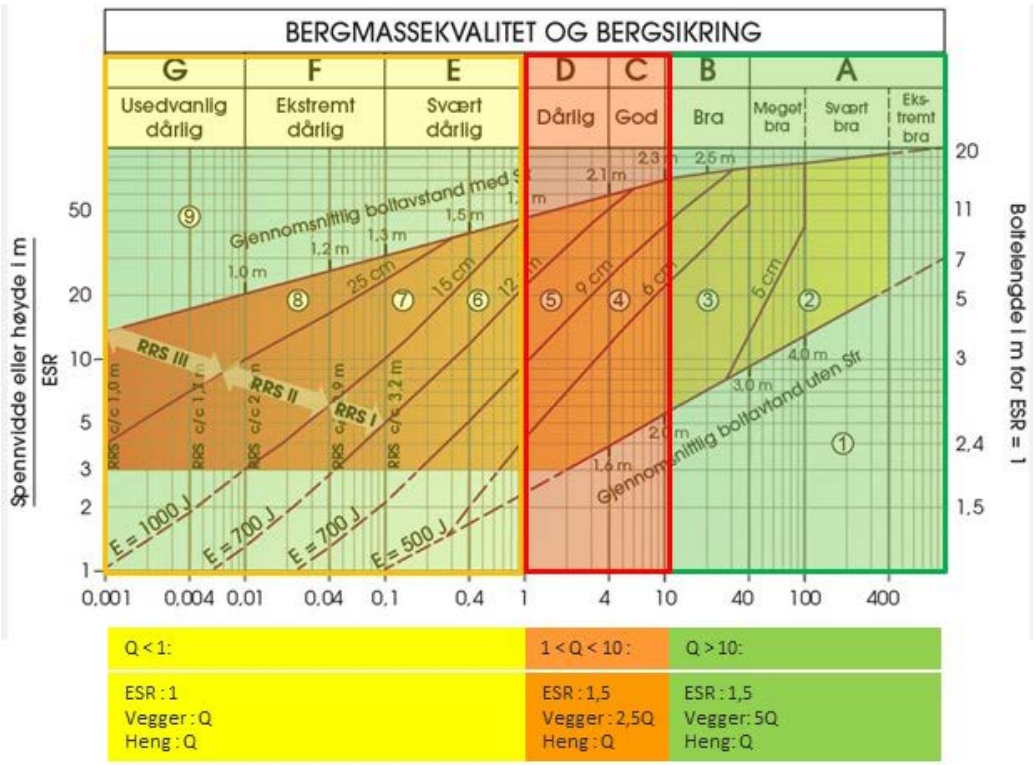
For fastsetting av sikringsklasser der det skal kontaktstøpes eller legges på sprøytemembran, anbefales det at det benyttes en justering av eksisterende praksis med en korreksjonsfaktor for Q og en justert ESR verdi. Dette er sammenfattet i tabell 4 og figur 8.

Det foreslås to verdier for bergklasse som utgangspunkt for justering av Q verdi og ESR-verdi. Begrunnelsen for intervallet $1 < Q < 10$ er at i dette variasjonsområdet så vil i flere tilfeller $Jn/Jr > 6$ og $RQD/Jn < 10$ kunne forekomme, hvilket erfaringsmessig har gitt småfallent berg med sikringsbehov større enn bare Q verdien skulle tilsi (Grimstad og Barton, 1993).

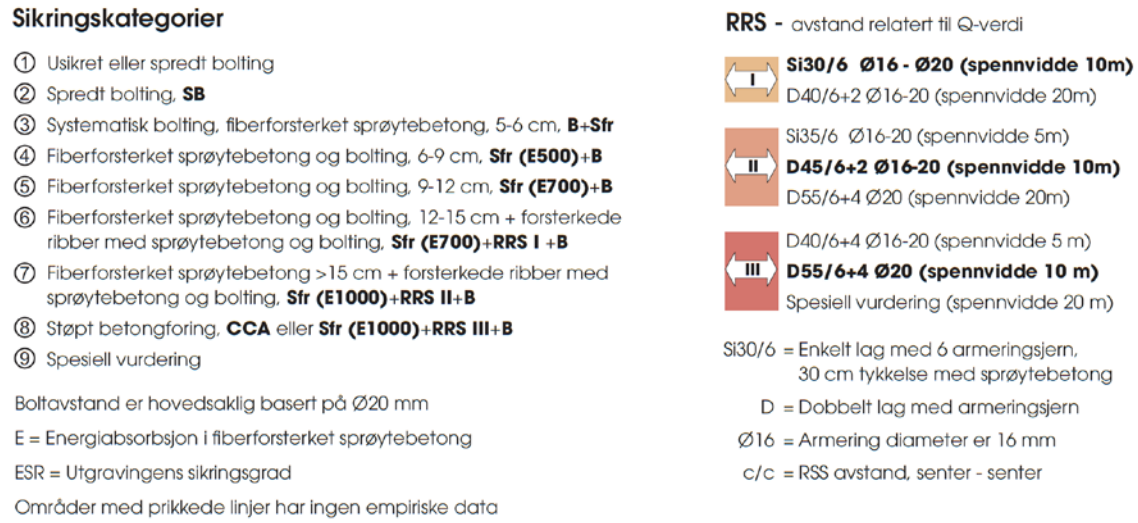
En bør bruke denne anbefalingen som en veiledning om et sikringsnivå. Det vil forekomme situasjoner der det vil være lokalt behov for detaljtilpasset sikring som kan skyldes f.eks. geometrien til sprekkesettene, geometrien til enkeltblokker som må sikres, eller lokalt skifrige og "småfalne" bergpartier som kan kreve sprøytebetong utover det gjennomsnittlige behovet for en gitt bergklasse. Dette er illustrert grafisk i figur 14.

Tabell 4 Veiledende verdier for ESR og korreksjonsfaktor k for Q for ulike bergklasser og deler av tunnelprofilet, gjeldende for midlertidig sikring der det blir installert en endelig permanent kledning med kontaktstøp eller permanent sprøytebetongbasert kledning.

Bergklasse / Q-verdi	Vegger		Heng og vederlag	
	k	ESR	k	ESR
Q > 10	5	1,5	1	1,5
1 < Q < 10	2.5	1,5	1	1,5
Q < 1	1	1	1	1

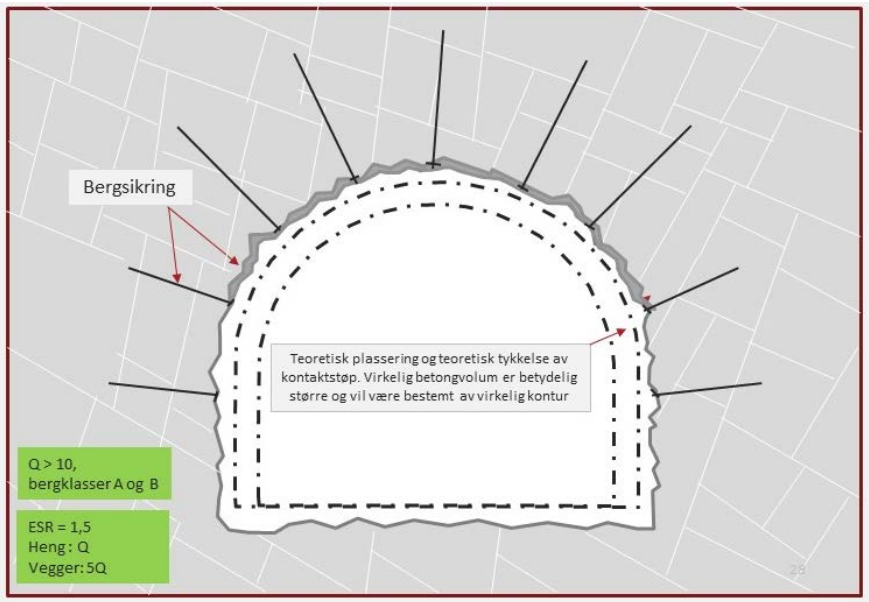


Figur 8 Grafisk illustrasjon med sikringskategorier og anbefalte korreksjonsfaktorer for Q og verdier for ESR vist i tabell 4. Sikringskategoriene RRS er justert fra tidligere versjon (NGI, 2015), slik at de disse korrekt følger bergklassen for ulike spennvidder og Q-verdier.

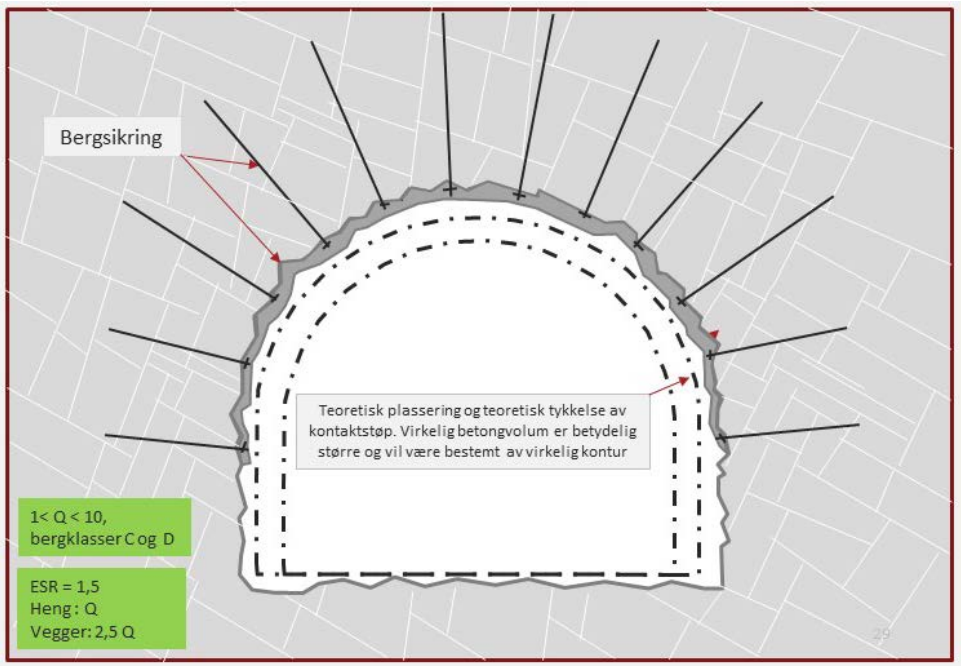


Figur 9 Oversikt over sikringskategorier (NGI 2015).

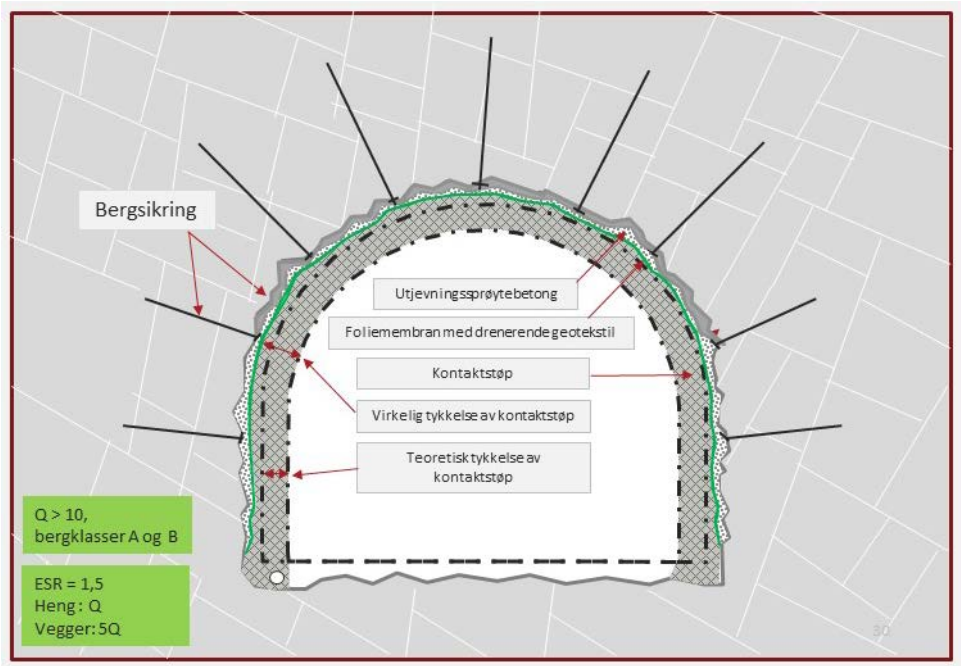
Sikringsanbefalingene er illustrert i figurene 10, 11, 12 og 13 med utvalgte eksempler og vist i sammenheng med den endelige kledningskonstruksjonen som vil bli bygd. Figur 10 viser anbefalt bergsikring for bergklassene A og B, Q > 10. Figur 11 viser anbefalt bergsikring for bergklassene C og D, 1 < Q < 10. Figurene 12 og 13 viser eksempler på fullstendig tunnelkonstruksjon med bergsikring og endelig kledning med hhv kontakstøp og sprøytebetong i kombinasjon med sprøytbar vanntettingsmembran Anbefalingene for bergsikring utført på stuff for Q > 10 og 1 < Q < 10 er sammenfattet i tabell 4.



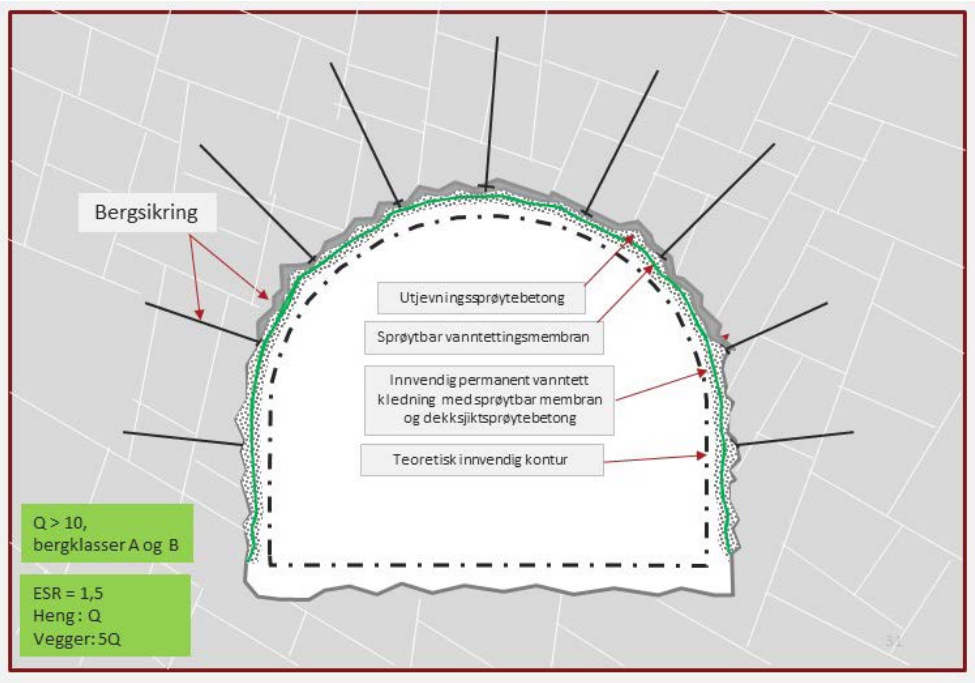
Figur 10 Prinsippskisse med anbefaling for bergsikring utført på stuff for bergklasser A og B. Sprøytebetongtykkelsen er minimum 6 cm og fastsettes, sammen med bolteavstand og boltelengder i henhold til sikringskategoriene i figurene 8 og 9.



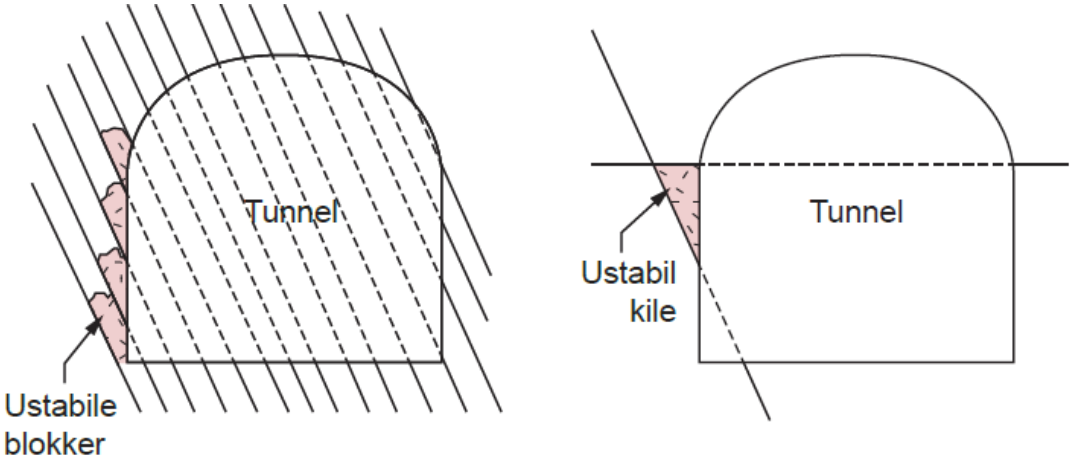
Figur 11 Prinsippskisse med anbefaling for bergsikring utført på stuff for bergklasser C og D. Sprøytebetongtykkelsen er minimum 6 cm og fastsettes, sammen med bolteavstand og boltelengder i henhold til sikringskategoriene i figurene 8 og 9.



Figur 12 Prinsippskisse, med illustrasjon bergklassene A og B, med permanent og fullstendig kledningskonstruksjon av plasstøpt innvendig betonghvelv med bergsikring og utjevnings-sprøytebetong. For permanent sikring er ESR =1.



Figur 13 Prinsippskisse, med illustrasjon bergklassene A og B, av fullstendig endelig kledning med innvendig sprøytebetongkledning vanntettet med sprøytbar membran med bergsikring og utjevningssprøytebetong. For permanent sikring er ESR =1.



Figur 14. Situasjoner med bergforhold som ikke direkte eller bare delvis fanges opp av parameterne i Q-systemet, krever spesiell vurdering utover den veiledende anbefalingen som sikringsklassene representerer. Slike forhold kan være ugunstige orienterte sprekkesett.

8 Referanser

Barton N, Lien R, Lunde J (1974) Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, NGI Publication No 106

Barton N, Lien R, Lunde J (1974) Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Rock Mechanics. 6: 4: 189-236

Grimstad E & Barton N (1993) Updating of the Q-System for NMT. Proceedings of the International Symposium on Wet Mix Sprayed Concrete, Fagernes

Grimstad E & Kankes K, Bhasin R, Wold Magnussen A, Kaynia A (2002) Rock Mass Quality Q used in Designing Reinforced Ribs of Sprayed Concrete and Energy Absorption, Proceedings of the 4th. International Symposium on Sprayed Concrete, Davos. 22-26 September 2002.

Norsk Betongforening (2011) Publication No 7. Sprayed Concrete for Rock Support

Barton N & Grimstad E (2014) Q-system. An Illustrated Guide Following Forty Years Tunnelling, *www.nickbarton.com*.

Bane NOR (2015) Modernisering av Vestfoldbanen Telemark Grense – Porsgrunn, Byggeplan – underbygning – geologi, Bergsikring hovedtunnel, tegning nr UVB-22-V-31060

Bane NOR (2015) Modernisering av Vestfoldbanen Telemark Grense – Porsgrunn, Byggeplan – underbygning – geologi, Bergsikring tverrslag tegning nr UVB-22-V-31061

Bane NOR (2015) Geologisk Sluttrapport, Eidsvoll-Hamar Dovrebanen, Ulvin og Morstuatunnelen, UEH-24-00182

NGI (2015) Håndbok. Bruk av Q-systemet. Bergmasseklassifisering (norsk utgave)

Statens Vegvesen, Teknologiavdelingen, Tunnel- og Betongseksjonen (2010) Rapport Nr 2538. Arbeider foran stuff og stabilitetssikring i vegtunneler

Statens Vegvesen Vegdirektoratet (2010) Håndbok 21, Vegtunneler

Statens Vegvesen Vegdirektoratet (2016) Håndbok N500, Vegtunneler

Kontroll- og referanseside/ Review and reference page

Dokumentinformasjon/*Document information*		
Dokumenttittel/*Document title* Optimal bruk av Q-systemet i jernbanetunneler med moderne funksjonskrav til endelig innvendig kledning		**Dokumentnr./*Document no.*** 20180273-01-R
Dokumenttype/*Type of document* Rapport / Report	**Oppdragsgiver/*Client*** Bane NOR SF	**Dato/*Date*** 2019-04-25
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ *Proprietary rights to the document according to contract* Oppdragsgiver / Client		**Rev.nr.&dato/*Rev.no.&date*** 1 / 2019-10-29
Distribusjon/*Distribution* BEGRENSET: Distribueres til oppdragsgiver og er tilgjengelig for NGIs ansatte / LIMITED: Distributed to client and available for NGI employees		
Emneord/*Keywords* Bergsikring, Q-systemet, jernbanetunneler		

Stedfesting/*Geographical information*	
Land, fylke/*Country* Norge	**Havområde/*Offshore area***
Kommune/*Municipality*	**Feltnavn/*Field name***
Sted/*Location*	**Sted/*Location***
Kartblad/*Map*	**Felt, blokknr./*Field, Block No.***
UTM-koordinater/*UTM-coordinates* **Sone: Øst: Nord:**	**Koordinater/*Coordinates*** **Projeksjon, datum: Øst: Nord:**

Dokumentkontroll/*Document control*
Kvalitetssikring i henhold til/*Quality assurance according to NS-EN ISO9001*

Rev/ Rev.	***Revisjonsgrunnlag/Reason for revision***	**Egenkontroll av/ *Self review by:***	**Sidemanns-kontroll av/ *Colleague review by:***	**Uavhengig kontroll av/ Independent review by:**	**Tverrfaglig kontroll av/ *Inter-disciplinary review by:***
0	Originaldokument	2019-04-19 Karl Gunnar Holter Eystein Grimstad	2019-04-22 Vidar Kveldsvik/ Arnstein Aarset	2019-04-19 Nick Barton	
1	Revisjon / justeringer og korreksjoner	2019-09-25 Karl Gunnar Holter Eystein Grimstad	2019-10-29 Vidar Kveldsvik	2019-09-25 Nick Barton	

Dokument godkjent for utsendelse/ *Document approved for release*	**Dato/*Date***	**Prosjektleder/*Project Manager***
	29. oktober 2019	Karl Gunnar Holter

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen ingeniørrelaterte geofag. Vi tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg, og hvordan jord og berg kan benyttes som byggegrunn og byggemateriale.

Vi arbeider i følgende markeder: Offshore energi – Bygg, anlegg og samferdsel – Naturfare – Miljøteknologi.

NGI er en privat næringsdrivende stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskaper i Houston, Texas, USA og i Perth, Western Australia.

www.ngi.no

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting within the geosciences. NGI develops optimum solutions for society and offers expertise on the behaviour of soil, rock and snow and their interaction with the natural and built environment.

NGI works within the following sectors: Offshore energy – Building, Construction and Transportation – Natural Hazards – Environmental Engineering.

NGI is a private foundation with office and laboratories in Oslo, a branch office in Trondheim and daughter companies in Houston, Texas, USA and in Perth, Western Australia

www.ngi.no

OSLO
TRONDHEIM
HOUSTON
PERTH

NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT
NGI.NO

Hovedkontor Oslo
PB. 3930 Ullevål Stadion
0806 Oslo

Avd. Trondheim
PB. 5687 Torgarden
7485 Trondheim

T 22 02 30 00
F 22 23 04 48
NGI@ngi.no

BANK
KONTO 5096 05 01281
ORG.NR 958 254 318MVA

ISO 9001/14001
CERTIFIED BY BSI
FS 32989/EMS 612006