HÅNDBOOK

Bruk av Q-systemet



Bergmasseklassifisering og bergforsterkning

NGI

Oslo, november 2015

For mer informasjon om denne håndboken, ta kontakt med:
NGI
Postboks 3930
Ullevål Stadion
0806 OSLO
Norge

www.ngi.no

Forsidebilde av Holmestrand Jernbanestasjon av Matthew J. Lato
Trykket av Allkopi AS

NGI tar intet ansvar for mulige feil i håndboken, eller
følgeskader som oppstår ved bruk av informasjonen som står i den.

Forord

NGIs arbeid med utviklingen av Q-systemet for klassifisering av bergmasser begynte tidlig i 70-årene, og ble første gang utgitt i 1974. NGI har kontinuerlig forbedret og oppdatert systemet, og utga i 2013 håndboka "Bruk av Q-systemet" til bergmasseklassifisering og bergforsterkning. I denne revisjonen av håndboka er det foretatt noe tekstoppretting og endret layout.

Innholdsfortegnelse

1 Introduksjon 6
1.1 Historie 6
1.2 Anvendelsesområder 6
1.3 Begrensninger 7

2 Stabilitet av bergmasser 8
2.1 Oppsprekkingsgrad 8
2.2 Friksjonsforhold 8
2.3 Spenningsforhold 9

3 Q-systemet 10

4 Beregning av Q-verdien 11
4.1 Generelt 11
4.2 Oppsprekkingstall (RQD) 11
4.2.1 RQD i utsprengte tunneler og bergrom 14
4.2.2 RQD i skifrige bergarter 14
4.2.3 RQD i svake bergarter 14
4.2.4 RQD i forhold til sementerte sprekker og mineralfylling 15
4.3 Tall for sprekkesett (J_n) 15
4.3.1 J_n i forhold til sprekkelengde 16
4.4 Oppsprekkingsgrad (RQD/J_n) 18
4.5 Sprekkeruhetstall (J_r) 18
4.5.1 J_r i forhold til sprekkefylling 18
4.5.2 J_r i forhold til sprekkeplanhet 19
4.5.3 J_r i forhold til sprekkeorientering 19
4.5.4 J_r i bergmasser uten sprekker 20
4.6 Tall for sprekkefylling (J_a) 21
4.6.1 J_a i forhold til mineraltypen i en sprekkefylling 23
4.7 Friksjonsforhold langs sprekker (J_r/J_a) 23
4.8 Sprekkevannstall (J_w) 24
4.8.1 J_w i forhold til varierende innlekkasjer 24
4.9 Spenningsfaktor (SRF, Stress Reduction Factor) 25

4.9.1 SRF ved svakhetssoner som krysser bergrom (Tilfelle A til E i Tabell 6a) 27
4.9.2 SRF i hardt, kompetent berg, bergspenningsproblemer (Tilfelle F til L i Tabell 6b) 28
4.9.3 SRF i skviseberg (Tilfelle M og N i Tabell 6c) 30
4.9.4 SRF i svellende berg (Tilfelle O og P i Tabell 6d) 30
4.10 Q-parametere relatert til forinjeksjon 31

5 Bruk av Q-systemet for å vurdere bergsikring 32
5.1 Spennvidder og sikkerhetskrav til berganlegg (ESR) 32
5.2 Bergsikringsdiagram 33
5.2.1 Sprøytebetong ved høye Q-verdier 36
5.2.2 Veggsikring 36
5.3 Armerte sprøytebetongbuer 37
5.4 Forbolting 38
5.5 Energiabsorpsjon i sprøytebetong 39
5.6 Sikring av smale svakhetssoner 39
5.7 Ytterligere kommentarer om stabilitet og bergsikring 40

6 Kartlegging i bergrom 42
6.1 Generelt 42
6.2 Ingeniørgeologisk kartlegging 42
6.2.1 Kartlegging av seksjoner 42
6.3 Kartlegging av tunneler drevet med TBM 44

7 Q-systemet ved forundersøkelser 45
7.1 Generelt 45
7.2 Bruk av Q-systemet under feltkartlegging 45
7.3 Bruk av Q-systemet under kjernelogging 46

Referanser 48
Appendiks Tabeller 1 til 8 49
Innstikk Tabeller og Q-system diagram ..... (Innsiden av bakre omslag)

1 Introduksjon

1.1 Historie

Q-systemet ble utviklet av NGI mellom 1971 og 1974 (Barton et al. 1974). Siden introduksjonen av Q-systemet i 1974 har det vært betydelig utvikling både i sikringsfilosofi og -teknologi innen tunneldriving. Flere nye typer av bergbolter er introdusert, og den kontinuerlige utviklingen av fiberarmert sprøytebetong har på mange måter endret sikringsprosedyren. Påføring av sprøytebetong blir også benyttet på bergmasser med god kvalitet på grunn av høye krav til arbeidssikkerhet. Sprøytebetongbuer har i stor grad erstattet betongutstøpning.

Siden Q-systemet ble introdusert i 1974, er sikringsdiagrammet revidert flere ganger og publisert i ved ulike konferanser. En omfattende oppdatering i 1993 var basert på 1050 eksempler, hovedsakelig fra norske tunneler og bergrom (Grimstad and Barton, 1993). I 2002 ble det foretatt en oppdatering basert på 900 nye eksempler fra tunneler og bergrom i Norge, Sveits og India. Denne oppdateringen inkluderte også analytisk forskning med hensyn til dimensjonering av sprøytebetongbuer (RRS) som en funksjon av last og bergmassens kvalitet (Grimstad et al. 2002).

I denne håndboken har retningslinjene for RRS i sikringsdiagrammet blitt oppdatert. Retningslinjene for RRS er forenklet med hensyn til de siste referansetilfellene i Norge.

1.2 Anvendelsesområder

Q-systemet er et klassifiseringssystem for bergmasser med hensyn til stabilitet av tunneler og bergrom. Q-verdien kan brukes for klassifisering av bergmassen rundt bergrom og tunneler så vel som for feltkartlegging i dagen. Q-verdien avhenger av underjordsanleggets bergoverdekning, og er derfor ikke en uavhengig karakterisering av bergmassen. Bergmassens uforstyrrede Q-verdi kan dermed være forskjellig fra den som registreres på stuff.

Q-verdien for en bergmasse er basert på seks parametere, som til sammen angir bergmassens kvalitet. De forskjellige Q-verdiene relateres til forskjellige typer permanent sikring gjennom et skjematisk sikringsdiagram. Dette betyr at gjennom å beregne Q-verdien er det mulig å finne type og mengde sikring som tidligere er brukt i bergmasser med lignende kvaliteter. Q-systemet kan derfor brukes som en retningslinje for å bestemme nødvendig bergsikring og til dokumentasjon av bergmassens kvalitet.

Q-verdien er mest presis når den er basert på kartlegging i tunneler og bergrom. Ved bruk i forbindelse med feltkartlegging i dagen, kjernelogging og undersøkelser i borehull kan noen av parameterne være vanskelig å estimere. Q-verdier fra feltkartlegging og borehull vil derfor ofte være beheftet med større usikkerhet.

1.3 Begrensninger

Hoveddelen av referansetilfellene kommer fra ulike kombinasjoner med hardt og oppsprukket berg. Det er få eksempler fra svake bergarter med få eller ingen brudd. Ved vurdering av sikringsbehov i slike bergarter bør andre metoder vurderes brukt, i tillegg til Q-systemet. Det er viktig å kombinere bruken av Q-systemet med deformasjonsmålinger og numeriske simuleringer i skviseberg eller svært svakt berg (Q<1).

Q-systemet er empirisk med hensyn til permanentsikring av ulike typer bergmasser. Utviklingen i bruk av sprøytebetong har økt betydelig i bergmasser med god kvalitet, slik at sikringsdiagrammet her er konservativ i forhold til angitt stabilitetssikringsbehov.

2 Stabilitet av bergmasser

Ved driving av tunneler og bergrom er det viktig å visuelt observere bergoverflaten nøye i hele tunnelens omkrets før berget dekkes med sprøytebetong. I tillegg til visuell observasjon, vil hamring med et renskespett gi viktige informasjon om mulige svakheter eller avløste partier i berget. Også små bruddstrukturer som ikke vises fra sålenivå kan observeres ved nærmere ettersyn. Svake bergpartier kan ha de samme geologiske strukturene som det opprinnelige, friske og uberørte berget, og kan derfor ofte ikke ses på avstand. For å kunne observere bergmassen på nært hold er det viktig å ha tilkomst til stuffen og hengen ved hjelp av egnet løfteutstyr.

Bergmassens stabilitet påvirkes av flere parametere, men følgende tre faktorer er de viktigste:

- Oppsprekkingsgrad (blokkstørrelse)
- Friksjonsforhold langs sprekker
- Spenningsforhold

2.1 Oppsprekkingsgrad

Oppsprekkingsgrad, eller blokkstørrelsen, bestemmes av sprekkemønsteret, dvs. sprekkenes orientering og avstand. På en bestemt lokasjon i bergmassen vil det ofte være et sprekkemønster som kan være godt eller ikke så godt definert. Vanligvis finnes 2-4 sprekkeretninger systematisk i bergmassen, og de fleste av sprekkene vil være parallelle med en av disse retningene. Nær parallelle sprekker danner sprekkesett og sprekkeavstanden innenfor hvert sett vil vanligvis ha en karakteristisk fordeling. Sprekkeavstanden kan være betydelig redusert langs noen soner i nærliggende berg. Slike soner benevnes som sprekkesoner. Stabiliteten blir vanligvis dårligere når sprekkeavstanden minsker og antallet sprekkesett øker. I svake bergarter der deformasjon kan opptre uavhengig av sprekker, har oppsprekkingsgraden mindre betydning enn i harde bergarter.

2.2 Friksjonsforhold

I harde bergarter vil deformasjon oppstå som forskyvninger langs sprekkeflater. Friksjonsforholdene langs sprekkene vil derfor være avgjørende for bergmassens stabilitet. Friksjonen avhenger av ruheten på sprekkeflaten, og tykkelse og egenskaper til eventuell sprekkefylling. Svært ru sprekker, sprekker uten fylling eller sprekker med bare en tynn, hard mineralfylling vil være gunstig for stabiliteten. På den annen side vil glatte overflater og/eller et tykt lag av et mykt mineral føre til lav friksjon og dårlig stabilitet. I mykt/svakt berg der

deformasjonen er mindre avhengig av sprekker, er friksjonsfaktoren på sprekkene av mindre betydning.

2.3 Spenningsforhold

Spenningene i en bergmasse avhenger vanligvis dybde under overflaten, tektoniske forhold og anisotropiske forhold på grunn av topografi. Stabiliteten av et bergrom vil vanligvis avhenge av størrelsen på spenningene i forhold til bergartens styrke. Moderate spenninger er normalt gunstig for stabiliteten i bergrom, mens manglende innspenning kan gi ustabile forhold. I bergmasser med svakhetssoner bestående av for eksempel leire eller oppknust berg, kan spenningene variere betydelig innenfor ganske små områder. Erfaring fra tunnelprosjekter i Norge har vist at hvis største hovedspenning nærmer seg 1/5 av bergartens trykkfasthet, kan bergslag forekomme. Hvis tangential spenningen overskrider bergartens trykkfasthet, kan det oppstå skvising. Anisotropien av bergmassen spiller en viktig rolle når bergsikringen skal dimensjoneres.

3 Q-systemet

Q-verdien beskriver bergmassens stabilitet i en tunnel eller bergrom. Høye Q-verdier indikerer god stabilitet mens lave verdier betyr dårlig stabilitet. Q-verdien beregnes ut fra 6 parametere ved hjelp av denne ligningen:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

De seks parameterne er:

RQD = Oppsprekkingsfaktor (Rock Quality Designation)

J_n = Tall for sprekkesett

J_r = Sprekkeruhetstall

J_a = Tall for sprekkefylling

J_w = Sprekkevannstall

SRF = Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)

De enkelte parameterne bestemmes gjennom geologisk kartlegging med tabeller som gir numeriske verdier som blir bestemt ut fra en beskrevet situasjon. Hvert ledd i formelen uttrykker de tre hovedfaktorene som beskriver stabiliteten i tunneler og bergrom:

$\frac{RQD}{J_n}$ = Oppsprekkingsgrad (eller blokkstørrelse)

$\frac{J_r}{J_a}$ = Bergmassens minimale skjærfasthet

$\frac{J_w}{SRF}$ = Opptredende spenning

4 Beregning av Q-verdien

4.1 Generelt

Q-verdien bestemmes ved geologisk kartlegging i bergrom under driving, fra kartlegging i dagen eller ved kjernelogging. Hver av de seks parameterne bestemmes ut fra beskrivelse i tilhørende tabeller. Et komplett sett av disse tabellene er lagt inn i bakre omslagsside av håndboken.

Under kartlegging vil det ofte være nødvendig å dele inn området i flere delområder slik at Q-verdien innenfor hvert delområde blir forholdsvis ensartet (samme bergklasse i sikringsdiagrammet). Ved kartlegging av salver med store tverrsnitt kan det være behov for inndeling i flere slike delområder. For å vise denne variasjonen kan histogrammer (Figur 1) brukes under kartleggingen. Det delpartiet med lavest Q-verdi vil i de fleste tilfeller være bestemmende for hvilken sikringsklasse som skal benyttes.

Q-verdiene for et bergrom må baseres på kartlegging i selve bergrommet. Q-verdier som beregnes med andre metoder vil være mer usikre. Antall sprekkesett kan underestimeres fra borkjerner, og estimering av parameterne J_w og SRF kan være vanskelig uten faktiske observasjoner på stedet. Ved overflatekartlegging kan bestemmelsen av J_a være spesielt usikker fordi sprekkemateriale kan være vasket ut, og andre sprekkeparametere kan være vanskelig å observere. I slike tilfeller kan det være en fordel å bruke histogram for å visualisere variasjoner i dataene. Gjennom bruk av maksimum- og minimumsverdier for hver parameter blir variasjonene visualisert, og Q-verdien kan så beregnes ved å bruke snittverdien for hver parameter. I tillegg kan maksimal og minimal Q-verdi også estimeres. Et eksempel fra en lang tunnelseksjon er vist i Figur 1.

Q-verdier varierer mellom 0,001 og 1000. Merk at det er mulig å få høyere verdier og litt lavere verdier gjennom ekstreme kombinasjoner av parametere. I slike spesialtilfeller kan man bruke henholdsvis 0,001 og 1000 for å bestemme sikringsbehovet.

4.2 Oppsprekkingstall (RQD)

RQD står for Rock Quality Designation. RQD ble definert av Deere i 1963 (Deere, 1963) og var tenkt som et enkelt klassifiseringssystem for bergmasser. Fem bergklasser (A-E) er definert med RQD-verdier, som vist i Tabell 1. RQD ble opprinnelig definert ut fra borkjerner som følger:

"Summen av lengdene av alle kjernebiter med lengde over 10 cm i prosent av hele kjernelengden. Ved utregning av RQD skal bare naturlige sprekker tas med"

RQD vil derfor være et prosenttall mellom 0 og 100. Hvis 0 brukes i Q-formelen, får man en Q-verdi på 0. Derfor forhøyes alle RQD-verdier mellom 0 og 10 til 10 når man beregner Q-verdien.

Tabell 1 RQD-verdier og antall sprekker per m³.

1 RQD = Oppsprekkingsfaktor (Rock Quality Designation)			RQD
A	Svært dårlig	(> 27 sprekker per m³)	0-25
B	Dårlig	(20-27 sprekker per m³)	25-50
C	Middels	(13-19 sprekker per m³)	50-75
D	God	(8-12 sprekker per m³)	75-90
E	Utmerket	(0-7 sprekker per m³)	90-100
Merk: i) Der RQD er rapportert eller målt til ≤ 10 (inklusive 0), brukes verdien 10 for å bestemme Q-verdien ii) RQD-intervaller på 5, dvs. 100, 95, 90, osv., er tilstrekkelig nøyaktige			

I en tunnel eller et bergrom er det vanligvis mulig å få et tredimensjonalt bilde av bergmassen slik at antall sprekker per m³ kan anslås forholdsvis nøyaktig. Følgende formel kan brukes for å anslå RQD-verdien (Palmstrøm, 2005):

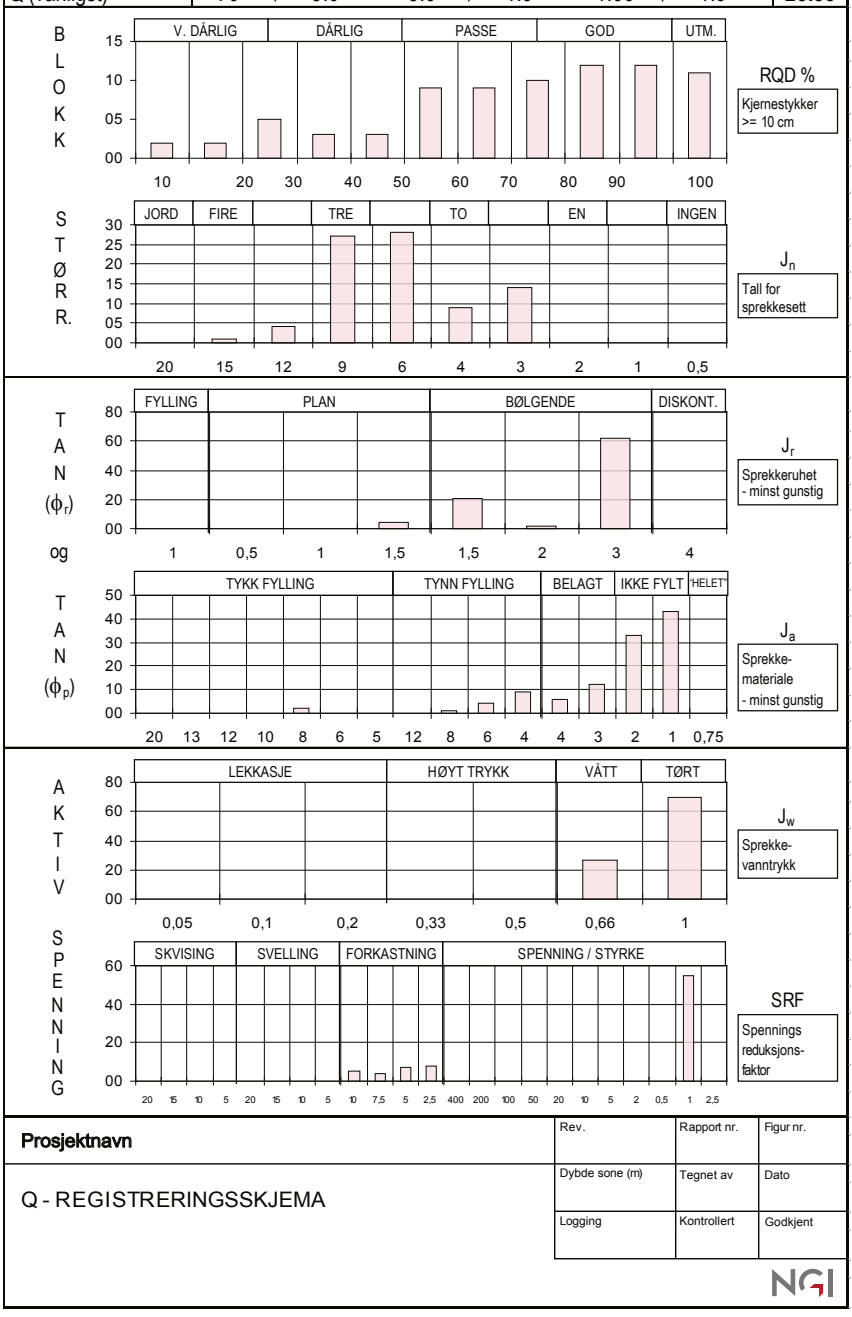
$$RQD = 110 - 2{,}5J_v \text{ (for } J_v \text{ mellom 4 og 44)}$$

der J_v er antallet sprekker per m³

Antall sprekker per m³ med tilhørende RQD-klasse er også vist i Tabell 1. Flere avlesninger av RQD bør tas langs overflater med forskjellig orientering, om mulig vinkelrett på hverandre, og gjennomsnittsverdien kan så brukes i beregningen av Q-verdien. Variasjonen i RQD-verdier kan vises i histogram.

Det er ofte større usikkerhet knyttet til bestemmelse av RQD-verdier på bergblotninger i dagen. Hvis en blotning kun består av en plan bergflate, vil anslaget over antall sprekker være usikkert fordi det kan være vanskelig å anslå sprekkeavstanden for sprekker som er parallelle eller sub-parallelle til denne overflaten.

Q - VERDIER:	(RQD	/	J_n)	*	(J_r	/	J_a)	*	(J_w	/	SRF)	=	Q
Q (typisk min) =	10	/	15.0	*	1.5	/	8.0	*	0.66	/	10.0	=	**0.008**
Q (typisk maks) =	100	/	3.0	*	3.0	/	1.0	*	1.00	/	1.0	=	**100.0**
Q (snittverdi) =	71	/	6.7	*	2.6	/	2.3	*	0.91	/	2.4	=	**4.44**
Q (vanligst) =	70	/	9.0	*	3.0	/	1.0	*	1.00	/	1.0	=	**23.33**



Figur 1 Et eksempel på histogrampresentasjon av Q-parametere fra en lang tunnelseksjon.

4.2.1 RQD i utsprengte tunneler og bergrom

I henhold til den opprinnelige definisjonen av RQD skal bare naturlige sprekker regnes med. I en tunnel vil alle sprekker uansett opprinnelse ha en viss betydning for stabiliteten. Sprengingsriss vil vanligvis bare opptre i en sone på inntil 2 meter fra bergrommet, og vil derfor ikke ha så stor betydning for totalstabiliteten som naturlige sprekker. For stabiliteten av enkeltblokker kan imidlertid sprengningsrissene ha betydning.

Ved å undersøke blokkstørrelser i den utsprengte massen fra ei salve (røysa), kan man få en indikasjon på RQD.

4.2.2 RQD i skifrige bergarter

I noen tilfeller er det tvil om hva som egentlig er sprekker. Dette gjelder i sterkt folierte eller skifrige bergarter. Et skifrighetsplan kan representerer en svakhet i berget uten at det egentlig er en sprekk. På overflaten splitter skifrige bergarter ofte opp i flak på grunn av overflateforvitring, mens noen meter under overflaten kan berget fremstå som massivt. Dermed kan skiferaktige og lagdelte bergarter ha høye RQD-verdier

Borkjerner av skifer kan også oppføre seg på samme måte. Like etter boring er bare noen få brudd synlige, og RQD-verdien kan være 100. Etter at kjernene har tørket i noen uker, kan de bestå av tynne skiver og RQD-verdien kan være null. I slike tilfeller er det vanskelig å si hvilken RQD-verdi som bør brukes for å beregne Q-verdien, og denne usikkerheten må derfor tas med i beregningen når sikringen dimensjoneres.

I berg med sterkt utviklet lagdeling eller forskifring er det ofte nyttig å se på bergmassene som lastes ut ved tunneldriving. Størrelsen på de sprengte blokkene vil gi en god indikasjon av RQD-verdien. I mange tilfeller gir tilsynelatende forskifret berg blokker av betydelig størrelse etter sprenging. Dette betyr at i skifer som ikke har vært eksponert, er bare noen få av overflatene som kommer fra forskifringen virkelige brudd, og bergarter som fyllitt, skifer og glimmerskifer kan derfor i mange tilfeller ha en RQD-verdi på 100.

4.2.3 RQD i svake bergarter

Enkelte svake bergarter kan ha svært få eller ingen sprekker slik at de per definisjon får en høy RQD-verdi. I slike bergarter kan imidlertid deformasjon være uavhengig av sprekkene, noe som kan uttrykkes ved en høy SRF-verdi. Dersom bergartene er så svake og lite konsoliderte at de kan betraktes som jord, vil RQD-verdien være 0 selv om det ikke er sprekker til stedet. I slike tilfeller skal RQD-verdien settes til 10 for bruk i Q-systemet. I svakhetssoner som for eksempel leirsoner skal RQD-verdien settes til 10, siden sonen representerer en svekkelse sammenlignet med berget omkring.

4.2.4 RQD i forhold til sementerte sprekker og mineralfylling

Sprekker som har vokst sammen på grunn av en mineralfylling kan også være vanskelig å vurdere ved bestemmelse av RQD. Det er styrken på selve sprekkefyllingen som er avgjørende for om den er å betrakte som sprekk eller ikke. Mineraler som kloritt, glimmerskifer og leire vil vanligvis gi svake sammenbinding mellom sprekkeflatene, mens epidot, feltspat og kvarts ikke nødvendigvis betyr en svekking av bergmassen. Sprekker med kalkspatfylling behøver i enkelte tilfeller ikke representere en svekkelse av bergmassen. En enkel test er å slå berget med en hammer og se hvor sprekkene oppstår.

4.3 Tall for sprekkesett (J_n)

Størrelsen og formen på blokkene i en bergmasse avhenger av sprekkegeometrien. Sprekker innenfor et sprekkesett vil være nesten parallelle til hverandre og ha en karakteristisk sprekkeavstand. Sprekker som ikke framtrer systematisk eller som har en avstand på flere meter kalles tilfeldige sprekker.

For å få en oversikt over sprekkemønsteret, kan man måle retningen for et visst antall sprekker og plotte observasjonene i et stereonett, se Figur 2. De forskjellige sprekkesettene vil da framstå som konsentrasjoner i stereonettet.

Tabell 2 gir parameterverdiene for J_n i henhold til antall sprekkesett og tilfeldige sprekker. I et bergrom er sprekkesettene ofte ganske lette å identifisere.

Tabell 2 J_n-verdier.

2	J_n = Tall for sprekkesett	J_n
A	Massivt, ingen eller få sprekker	0,5-1,0
B	Ett sprekkesett	2
C	Ett sprekkesett pluss tilfeldige sprekker	3
D	To sprekkesett	4
E	To sprekkesett pluss tilfeldige sprekker	6
F	Tre sprekkesett	9
G	Tre sprekkesett pluss tilfeldige sprekker	12
H	Fire eller flere sprekkesett, tilfeldig og sterkt oppsprukket "sukkerbitberg", osv.	15
J	Knust berg, jordaktig	20

Merk: i) For tunnelkryss, bruk 3 x J_n

ii) For påhug, bruk 2 x J_n

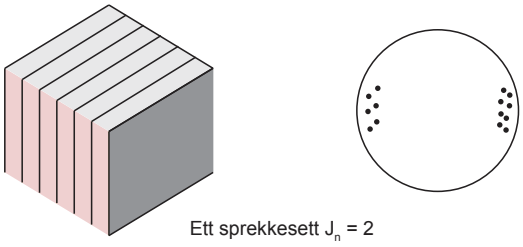
Et sprekkesett defineres som tilnærmet parallelle sprekker som opptrer systematisk med en karakteristisk avstand. Dersom sprekkeavstanden til et sprekkesett er større enn spennvidden eller høyden på tunnelen eller bergrommet anses sprekkene som tilfeldige. Man bør vurdere i hvor stor grad sprekkene påvirker stabiliteten.

Når J_n-verdien beregnes skal man kun ta med sprekkene som finnes på samme lokasjon og danner definerte blokker. I situasjoner der J_n-verdien bestemmes fra sprekkeobservasjoner over lengre seksjoner i en tunnel, vil en oppsummering av alle sprekkesettene føre til en J_n-verdi som er for høy.

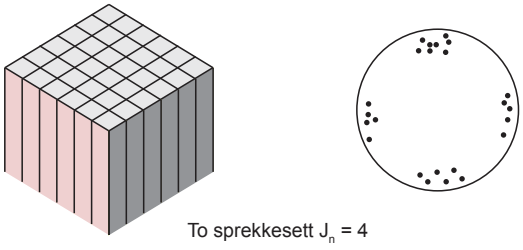
4.3.1 J_n i forhold til sprekkelengde

Lengden på sprekkene inngår ikke direkte i Q-systemet, men har betydning for stabilitetsforholdene. Lange sprekker som er gjennomsettene for hele tverrsnittet av en tunnel/bergrom, vil vanligvis ha større betydning for stabiliteten enn kortere sprekker. Svært korte sprekker, ofte kalt stikk, kan ha betydning for lokalstabilitet somutfall av små blokker. Når korte sprekker generelt ikke bidrar til dannelse av bergblokker kan de anses som tilfeldige selv om de opptrer ganske systematisk. Hvis korte sprekker danner blokker må de anses som et sprekkesett i den spesifikke lokasjonen der de opptrer.

I enkelte tilfeller er det nødvendig ikke bare å se på antall sprekkeretninger, men også vurdere formen på blokkene som dannes og muligheten for at en blokk kan gli ut. Et eksempel er søylebasalt som blant annet forekommer på Island og i Holmestrand, se Figur 2. Søylene er vanligvis sekskantede i formen, dannet av sprekker i tre forskjellige sprekkeretninger. Den eneste retningen et nedfall kan skje, er langs søylenes akser. Så lenge ingen sprekker oppstår på kryss av disse aksene, vil vanligvis ingen blokker falle ned. Selv om det er tre synlige sprekkeretninger som danner søylene, er det ikke riktig å anse disse som tre sprekkesett, dvs. J_n skal vanligvis ikke være 9. En J_n-verdi på 4 er mer rimelig siden søylen kan anses å være formet av to svært bølgete sett av sprekker. Empiriske data fra bergrom i denne type bergarter viser ofte god stabilitet. Tilsvarende forhold kan oppstå i skifrige bergarter som er småfoldet.



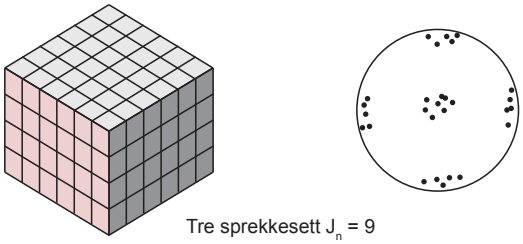
Ett sprekkesett $J_n = 2$



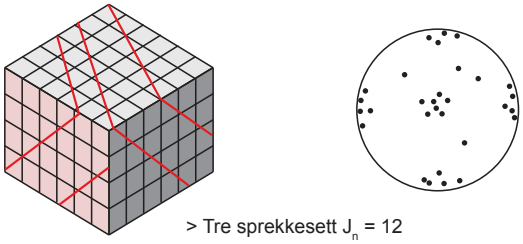
To sprekkesett $J_n = 4$

Merk:

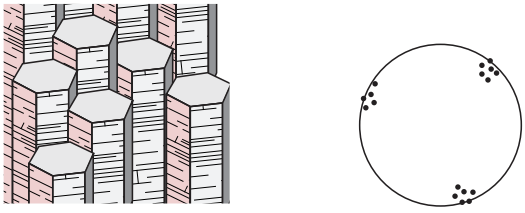
Antall sprekkeretninger er ikke bestandig det samme som antall sprekkesett



Tre sprekkesett $J_n = 9$



> Tre sprekkesett $J_n = 12$



Søylebrudd med tre sprekkeretninger, men $J_n = 4$

Figur 2 Forskjellige sprekkemønster vist som blokkdiagram og i stereonett.

4.4 Oppsprekkingsgrad (RQD/J_n)

Brøken RQD/J_n representerer den relative blokkstørrelsen i bergmassene. I tillegg til RQD og J_n er det også nyttig å notere den faktiske størrelse og formen på blokkene, samt sprekkefrekvensen.

4.5 Sprekkeruhetstall (J_r)

Friksjonsforholdene langs en sprekk avhenger av sprekkeflatens karakter, om den er bølget, plan, ru eller glatt. Sprekkeruhetstallet beskriver disse forholdene og J_r bestemmes ut fra Tabell 3, eller Figur 3. Sprekkebeskrivelsen er basert på ruhet i to skalaer:

1) Begrepene ru, glatt og glidespeil henviser til små strukturer i en skala på centimeter eller millimeter. Dette kan vurderes ved å føre en finger langs sprekkeflaten; småskala ruhet kan da føles.

2) Storskalaruhet måles på en dm til m skala og måles ved å legge en 1 m lang linjal på sprekkeflaten for å bestemme amplituden i storskalaruheten. Begrepene hakket, bølget og plan brukes for storskalaruhet. Storskalaruhet må vurderes i relasjon til blokkstørrelse og også sannsynlig glideretning.

Alle sprekkesett på en lokasjon må evalueres med hensyn til J_r. Når Q-verdien beregnes, må J_r-verdien for det sprekkesettet som er minst gunstig med hensyn til stabilitet brukes, dvs. bruk J_r for det sprekkesettet der skjærdeformasjon er mest sannsynlig.

4.5.1 J_r i forhold til sprekkefylling

Når sprekkens ruhetstall bestemmes, må man også ta sprekkefyllingen i betraktningen. Hvis sprekkene har en tykk fylling av et svakt mineral/leirfylling eller knust bergmateriale som forhindrer bergflatene å få kontakt ved skjærdeformasjon (kategori "c" i Tabell 3), har ruheten ikke lenger noen betydning. Egenskapene til mineralene som fyller sprekken vil da være bestemmende for friksjonen, og J_r = 1 brukes i disse tilfellene. Hvis fyllingen er så tynn at sprekkeflatene vil få kontakt før 10 cm skjærdeformasjon (kategori "b" i Tabell 3), brukes samme sprekkeruhetstall som for sprekker uten fylling (kategori "a" i Tabell 3).

Tykkelsen sprekkefyllingen må ha for å forhindre bergkontakt ved skjærdeformasjon er avhengig av ruhet-planhet. For bølgete, ru sprekker vil en tykkere fylling kreves enn for plane, glatte sprekker, se Figur 4 for illustrasjon.

Tabell 3 J_r – verdier.

3 J_r = Sprekkeruhetstall		J_r
a) *Bergveggkontakt, og* ***b)*** *Bergveggkontakt før skjærbevegelsen har gått 10 cm*		
A	Diskontinuerlige sprekker	4
B	Ru eller ujevn, bølgete	3
C	Glatt, bølgete	2
D	Glidespeil, bølgete	1,5
E	Ru, ujevn, plan	1,5
F	Glatt, plan	1
G	Glidespeil, plan	0,5
Merk: i) Beskrivelse henviser til småskalaegenskaper og mellomskalaegenskaper, i den rekkefølgen		
c) *Ingen bergkontakt ved skjærbevegelse*		
H	Sone som inneholder leirfylling tykk nok til å forhindre bergkontakt ved skjærdeformasjon	1
Merk: ii) Legg til 1 hvis gjennomsnittlig avstand i det relevante sprekkesettet er mer enn 3 m (avhenger av størrelsen på tunnelåpningen) iii) J_r = 0,5 kan brukes for plane glidespeil med lineasjon, forutsatt at lineasjonen er orientert i sannsynlig bevegelsesretning		

4.5.2 J_r i forhold til sprekkeplanhet

Ved vurdering av planhet må dette sees i relasjon til blokkstørrelsen. Når blokkene er mindre enn bølgelengden for uregelmessighetene på sprekkeflaten, vil ikke en bølgete struktur lenger spille så stor rolle med hensyn til utglidning. Ved vurderingen av om en sprekkeflate er bølgete eller plan, må dette derfor vurderes i samme størrelsesorden som blokkenes størrelse.

4.5.3 J_r i forhold til sprekkeorientering

Bølge- og ruhetsstrukturen på en sprekkeflate har ofte en bestemt orientering slik at en sprekkeflate kan være plan i en retning og bølget i en annen retning. I slike tilfeller må sprekkens ruhetstall fastslås ut fra den retningen utglidning mest sannsynlig vil skje. Dette kan spesielt være tilfelle for sprekker med markerte linjestrukturer (glidespeil/slickensides) som kan være glatte i lengden og ru på tvers, eller omvendt.

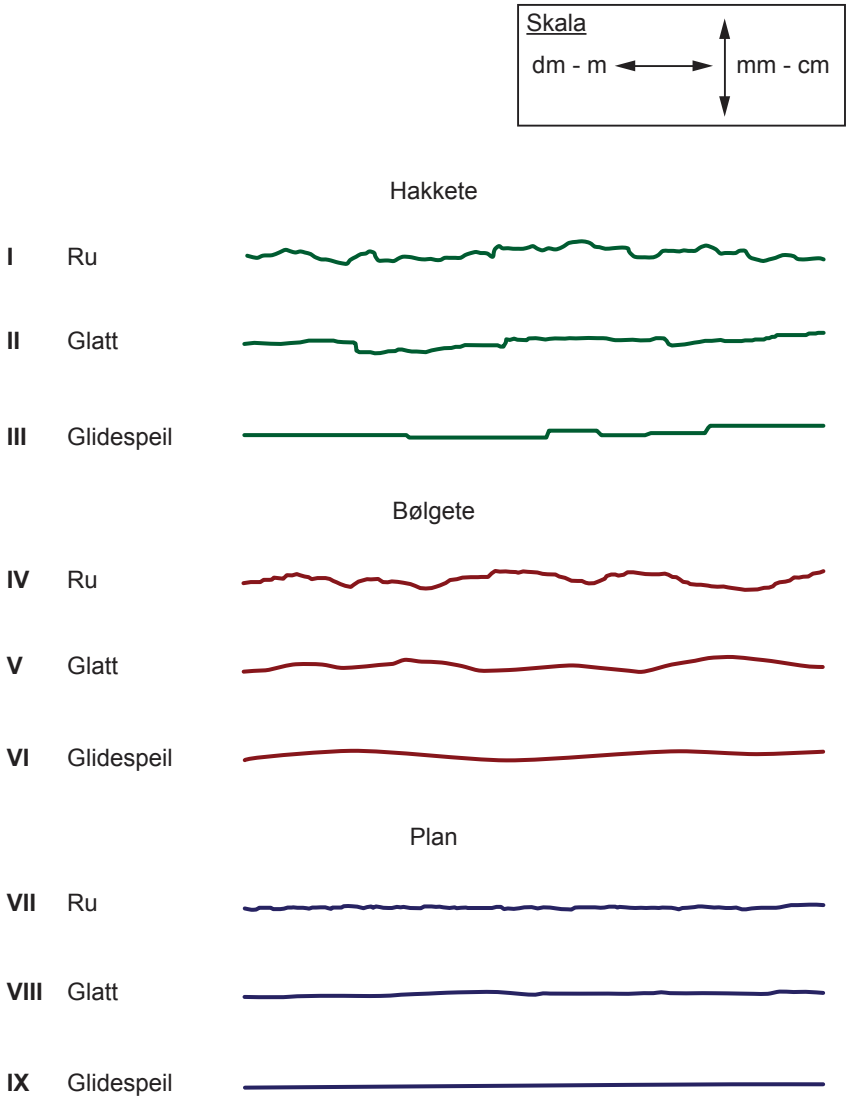
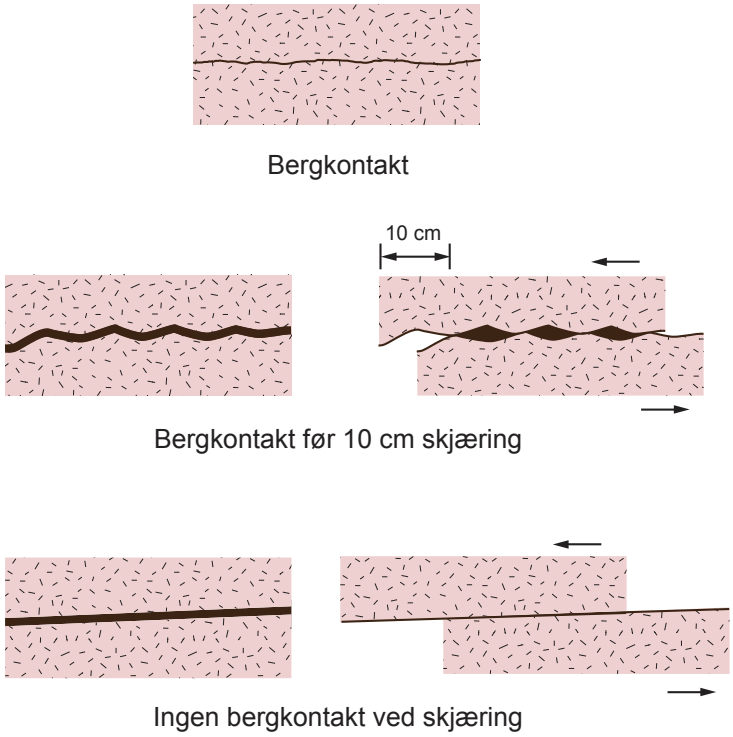


Figure 3 Eksempler på sprekkeflater med forskjellige J_r -verdier. Lengden på hvert profil er i området: 1 - 10 m. De vertikale og horisontale skalaene er like. (Modifisert fra ISRM, 1978)

4.5.4 J_r i bergmasser uten sprekker

Når deformasjonen i bergmassen avhenger av sprekkene, bør J_r gis verdier i henhold til Tabell 3. Noen bergmasser kan være nesten uten sprekker, og i hardt berg settes J_r vanligvis til verdien 4. For mykt/svakt berg uten sprekker bør J_r-verdien settes til 1 hvis materialet kan klassifiseres som jord ($\sigma_c \leq 0{,}25$ MPa i henhold til ISRM, 1978). For svært svake bergarter, sterkere enn jord og uten brudd, kan J_r-verdien være irrelevant, og deformasjonen av materialet



Figur 4 Sprekker med og uten bergkontakt.

kan avhenge av forholdet mellom styrke og spenning. Faktoren SRF er den mest relevante for å beskrive denne situasjonen.

I de tilfellene der svakhetssonene eller sprekkefyllingene er tykke nok til å forhindre kontakt mellom bergflatene under skjærdeformasjon, er J_r bestandig 1. Hvis bare et par sprekker i det aktuelle sprekkesettet er eksponert i bergrommet på et visst punkt, brukes $J_r + 1$.

Det er få tilfeller registrert fra svært mykt berg i sikringsdiagrammet til Q-systemet, og Q-verdiene fra slike bergmasser må behandles med forsiktighet og kombineres med numeriske simuleringer og konvergensmålinger.

4.6 Tall for sprekkefylling (J_a)

I tillegg til sprekkens ruhet er sprekkefyllingen avgjørende for friksjonen langs sprekkene. Når det gjelder sprekkefyllingen, er det to faktorer som er avgjørende; tykkelse og styrke. Disse faktorene avhenger av mineralsammensetningen. Når tall for sprekkefyllingen skal bestemmes er det tre kategorier som gjelder:

Kategori “a” - bergkontakt
Kategori “b” - bergkontakt før 10 cm skjærdeformasjon
Kategori “c” - ingen bergkontakt ved skjærdeformasjon

Disse kategoriene er illustrert i Figur 4, og det er gitt detaljerte beskrivelser i Tabell 4.

Tabell 4 J_a-verdier.

4 J_a = Tall for sprekkefylling		Φ_r	J_a
a) *Bergkontakt (ingen mineralfylling, bare belegg)*			
A	Sammenvokste sprekker med harde mineraler som kvarts eller epidot.		0,75
B	Uomvandlede sprekkeflater, bare overflateoksidasjon.	25-35°	1
C	Svakt omvandlede sprekkeflater. Uoppbløtelig mineralbelegg, sandpartikler, oppknust berg uten leir.	25-30°	2
D	Siltig eller sandig sprekkebelegg, litt leir (ikke svellende).	20-25°	3
E	Oppbløtelig leirbelegg med lav friksjon, f.eks. kaolinitt eller glimmer. Også kloritt, talk gips, grafitt osv. og små mengder svelleleire.	8-16°	4
b) *Bergkontakt før 10 cm skjærdeformasjon (tynn mineralfylling)*			
F	Sandige partikler, oppknust berg, ikke leir.	25-30°	4
G	Sterkt overkonsolidert, uoppbløtelig fylling av leirmineraler, (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse).	16-24°	6
H	Middels eller litt overkonsolidert fylling av oppbløtelig leirmateriale (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse).	12-16°	8
J	Fylling av svelleleire, dvs. montmorillonitt (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse). J_a-verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	8-12
c) *Ingen bergkontakt ved skjærdeformasjon (tykk mineralfylling)*			
K	Soner og bånd av desintegrert eller knust berg. Sterkt overkonsolidert, uoppbløtelig fylling.	16-24°	6
L	Soner og bånd av knust eller desintegrert berg og leir. Middels til litt overkonsolidert uoppbløtelig fylling.	12-16°	8
M	Soner og bånd av leir eller knust eller desintegrert berg. J_a-verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	8-12
N	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Sterkt overkonsolidert.	12-16°	10
O	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Middels-til-lav overkonsolidering	12-16°	13
P	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Svelleleire. J_a avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	13-20

Klassifiseringen av de forskjellige kategoriene a, b og c avhenger både av ruheten og tykkelsen av fyllingen. For glatte sprekker kan en millimeter med fylling være nok til å forhindre bergkontakt. Imidlertid kan det for grove og bølgete sprekker kreves flere millimeter og i noen tilfeller centimeter. I hver av de tre kategoriene blir J_a-verdiene evaluert basert på mineralfyllingens karakteristikk i henhold til Tabell 4.

Alle sprekkesett på en gitt lokasjon må evalueres. Når Q-verdien beregnes, må J_a-verdien for det sprekkesettet som antas å være mest ugunstig for stabiliteten brukes, dvs. der utglidning er mest sannsynlig.

4.6.1 J_a i forhold til mineraltypen i en sprekkefylling

Mineraltypen er avgjørende for J_a-verdien. Det vil være avgjørende om mineralfyllingen blir svakere ved tilgang på vann. Dette kan testes ved å plassere en prøve av mineralet i vann. Siden det trengs kun små mengder vann for å forårsake svelling i en del leirer, blir en høy J_a-verdi vanligvis gitt uavhengig av vannsituasjonen der det er svelleleire.

J_a-verdien avhenger av typen leiremineral i sprekkefyllingen. Svelleleire er ugunstig for stabiliteten. En analyse av leirfyllingen kan derfor være nødvendig. Analyser kan utføres ved å bruke ganske enkle laboratorietester eller mer avansert røntgendiffraksjon. Når svelleleire er identifisert, vil svelletrykktester gi verdifull informasjon. Svelletrykket som måles i laboratoriet kan ikke brukes direkte ved dimensjonering av bergsikringen, da bergmassens egen bæreevne vil ta opp en betydelig del av kreftene. I tillegg er svelleleire vanligvis blandet med andre mineraler og bergfragmenter. Erfaring fra laboratorietesting av leirprøver som er tatt i Norge har indikert et svelletrykk på opptil fem ganger svelletrykket i den uforstyrrede svakhetssonen.

4.7 Friksjonsforhold langs sprekker (J_r/J_a)

Funksjonen tan-1 (J_r/J_a) er en god tilnærming til den faktiske friksjonsvinkelen som en kan forvente for de forskjellige kombinasjoner av sprekkeruhet og sprekkematerialer (Barton et al. 1974). Det forventes at ru, bølgete og uforvitrede sprekker med bergkontakt (J_a-kategori "a"), vil gi kraftig motstand ved skjærdeformasjon, og at de derfor er spesielt gunstige for stabilitet. Når bergsprekker har tynt leirbelegg og -fylling (J_a-kategori "b"), blir skjærstyrken betydelig redusert. Fornyet bergkontakt etter en liten skjærforskyvning vil være en svært viktig faktor for å forhindre en total kollaps under driving. Hvis det ikke oppstår noen bergkontakt ved skjæring (J_a-kategori "c"), vil dette være svært ugunstig for stabiliteten.

Skjærstyrken er også avhengig av den effektive spenningen, som påvirkes av tilstedeværelse av vann og vanntrykk. Tallet for sprekkefylling, J_a, påvirkes imidlertid ikke av om det er vann til stede.

4.8 Sprekkevannstall (J_w)

Vann langs bergsprekker vil kunne bløte opp og vaske ut mineralfyllingen slik at friksjonen på sprekkeflatene reduseres. Vanntrykk kan redusere normalspenningen på sprekkeflatene slik at blokker lettere kan gli ut.

Sprekkevannstallet bestemmes på grunnlag av innlekkasjer og vanntrykk i bergrommet, se Tabell 5. De laveste J_w-verdiene ($J_w < 0.2$) vil representere store stabilitetsproblemer.

Tabell 5 J_w – verdier.

5	J_w = Sprekkevannstall	J_w
A	Tørre bergrom eller mindre innsig (fuktig eller noen få drypp)	1,0
B	Middels innsig, av og til utvasking av sprekkefyllinger (mange drypp/"regn")	0,66
C	Vannstråler eller høyt trykk i kompetent berg med ufylte sprekker	0,5
D	Stort tilsig eller høyt trykk, betydelig utvasking av sprekkefyllinger	0,33
E	Usedvanlig høy innstrømming eller vanntrykket avtar med tid. Forårsaker utvasking av materialer og kanskje utrasinger	0,2-0,1
F	Usedvanlig høy innstrømming eller vanntrykket fortsetter uten merkbar reduksjon. Forårsaker utvasking av materialer og kanskje utrasinger	0,1-0,05
Merk: i) Faktorene C til F er grove estimater. Øk J_w hvis berget dreneres eller det utføres injeksjon ii) Spesielle problemer forårsaket av isdannelse er ikke tatt med i betraktning		

4.8.1 J_w i forhold til varierende innlekkasjer

Innlekkasjer av vann observeres ofte i bergrom. Vann kan imidlertid også komme opp fra sålen, og kan være vanskelig å observere eller måle kvantitativt. Den omkringliggende bergmassen kan være drenert uten synlig innstrømming en tid etter drivingen. I bergrom nær overflaten, kan innlekkasjen variere med årstidene og mengden nedbør. Innlekkasjen kan øke i perioder med mye nedbør og minske i tørre årstider eller i perioder der vannet fryser. Disse forholdene må tas med i betraktningen ved fastsettingen av sprekkevannstallet. Tettetiltak, som for eksempel berginjeksjon, vil redusere innlekkasjen, og J_w-verdien bør da økes i forhold til reduksjonen av innlekkasje. I noen tilfeller kan bergrommet være tørt like etter driving, men innlekkasjen utvikler seg over tid. I andre tilfeller kan stor innlekkasje like etter driving avta over tid.

Når man skiller mellom J_w-verdiene 1 og 0,66, kan man bruke følgende:

- $J_w = 1$ for enkeltdråper med vann som drypper i et begrenset område.
- $J_w = 0.66$ for sildring eller små vannstråler i et konsentrert område, eller frekvent drypping i et vidt område.
- Hvis en konsentrert vannstråle kommer ut av et borehull er $J_w = 0,66$.

4.9 Spenningsfaktor (SRF, Stress Reduction Factor)

Generelt beskriver SRF forholdet mellom bergspenninger og bergartsstyrken omkring et bergrom. Effekten av spenningene kan vanligvis observeres i bergrommet som avskalling, bergslag, deformasjon, skvising, dilatans og blokkutfall. Imidlertid kan det gå litt tid før spenningsfenomen blir synlige.

Spenninger i bergmassen så vel som bergmassens styrke kan måles, og SRF kan beregnes fra forholdet mellom bergartens enaksiale trykkfasthet (σ_c) og største hovedspenning (σ_1) eller forholdet mellom maksimal tangentialspenning σ_θ og σ_c i massivt berg. Før anleggsarbeidet starter kan SRF stipuleres fra de overdekningen og topografiske egenskaper eller ved hjelp av generell erfaring fra den samme geologiske og geografiske regionen.

Kraftig avskalling og bergslag kan oppstå umiddelbart etter utsprengning i harde bergarter. Langsom deformasjonsutvikling med dannelsen av nye brudd eller plastisk deformasjon kan oppstå i svake bergarter. I slike tilfeller kan en SRF-verdi fastlagt fra kartlegging av bergrommet umiddelbart etter utsprengning være feilaktig.

For å estimere SRF-verdien må kategori med hensyn til spenningssituasjon fastslås før parameterverdien kan bestemmes fra beskrivelsen i Tabell 6.

Spenningssituasjonen er klassifisert i fire kategorier i samsvar med Tabell 6:

a) Svakhetssoner som krysser bergrommet som enten kan eller ikke kan overføre spenninger i omkringliggende bergmasser.

b) Kompetent berg med stabilitetsproblemer på grunn av høye spenninger eller mangel på spenninger.

c) Skviseberg med plastisk deformasjon av inkompetent berg under påvirkning av moderate eller høye bergspenninger.

d) Svellende berg; kjemisk svelleaktivitet som avhenger av tilgangen på vann.

Tabell 6 SRF-verdier.

6 SRF = Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)				SRF
a) *Svakhetssoner som krysser tunnelen eller bergrommet, som kan føre til at bergmasse løsner*				
A	Hyppig opptreden av svakhetssoner som inneholder leire eller kjemisk forvitret berg, avspent berg (uansett dybde), eller lange seksjoner med inkompetent (svakt) berg (uansett dybde). For skvising, se 6L og 6M			10
B	Flere skjærsoner innenfor en kort seksjon i kompetent avspent sideberg (uansett dybde)			7,5
C	Enkeltstående svakhetssoner med eller uten leire eller kjemisk forvitret berg (dybde ≤ 50 m)			5
D	Ukonsoliderte, åpne sprekker, mange sprekker eller "sukkerbit", osv. (uansett dybde)			5
E	Enkeltstående svakhetssoner med eller uten leire eller kjemisk forvitret berg (dybde > 50 m)			2,5
Merk: i) Reduser disse SRF-verdiene med 25-50 % hvis svakhetssonene bare påvirker men ikke krysser den underjordiske åpningen				
b) *Kompetent, hovedsakelig massivt berg, spenningsproblemer*		σ_c / σ_1	σ_θ / σ_c	**SRF**
F	Lave spenninger, nær overflaten, åpne sprekker	>200	<0,01	2.5
G	Middels spenninger, gunstige spenningsforhold	200-10	0,01-0,3	1
H	Høye spenninger, svært tett struktur. Vanligvis gunstig for stabiliteten. Kan også være ugunstig for stabiliteten, avhengig av retningen på spenningene sammenliknet med sprekkdannelse/svakhetsplan*	10-5	0,3-0,4	0,5-2 2-5*
J	Moderat avskalling etter > 1 time i massivt berg	5-3	0,5-0,65	5-50
K	Avskalling og bergslag etter noen minutter i massivt berg	3-2	0,65-1	50-200
L	Intens bergslag og umiddelbar dynamisk deformasjon i massivt berg	<2	>1	200-400
Merk: ii) For sterkt anisotropiske urørte spenningsfelt (om målt): når $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$, reduser σ_c til 0,75 σ_c. Når $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, reduser σ_c til 0.5 σ_c, der σ_c = fri trykkfasthet, σ_1 og σ_3 er de primære og sekundære spenningene, og σ_θ = maksimum tangential spenning (estimert fra elastisk teori) iii) Når dybden av henget under overflaten er mindre enn spennet; foreslås det at SRF økes fra 2,5 til 5 for slike tilfeller (se F)				
c) *Skviseberg: plastisk deformasjon i ikke kompetent berg under påvirkning av høyt trykk*			σ_θ / σ_c	**SRF**
M	Moderat skvisende bergtrykk		1-5	5-10
N	Intens skvisende bergtrykk		>5	10-20
Merk: iv) For bestemmelse av skvisende bergforhold henvises til relevant litteratur (dvs. Singh et al., 1992 og Bhasin og Grimstad, 1996)				
d) *Svellende berg: kjemisk svelleaktivitet ved tilgang på vann*				**SRF**
O	Moderat svelling			5-10
P	Intens svelling			10-15

4.9.1 SRF ved svakhetssoner som krysser bergrom (Tilfelle A til E i Tabell 6a)

En svakhetssone er en sone som er kraftig oppsprukket eller kjemisk forvitret og derfor er betydelig svakere enn omkringliggende berg. Bredden av en svakhetssone varierer fra en desimeter til hundrevis av meter i ekstreme tilfeller. De vanligste typene av svakhetssoner er:

- Skjærsoner, dvs. forkastningssoner der bergmassen er kraftig oppsprukket, foldet eller knust til små biter og kan også inneholde leire.

- Leirsoner med forvitret og omdannet berg eller svake minerallag uten skjærstyrke.

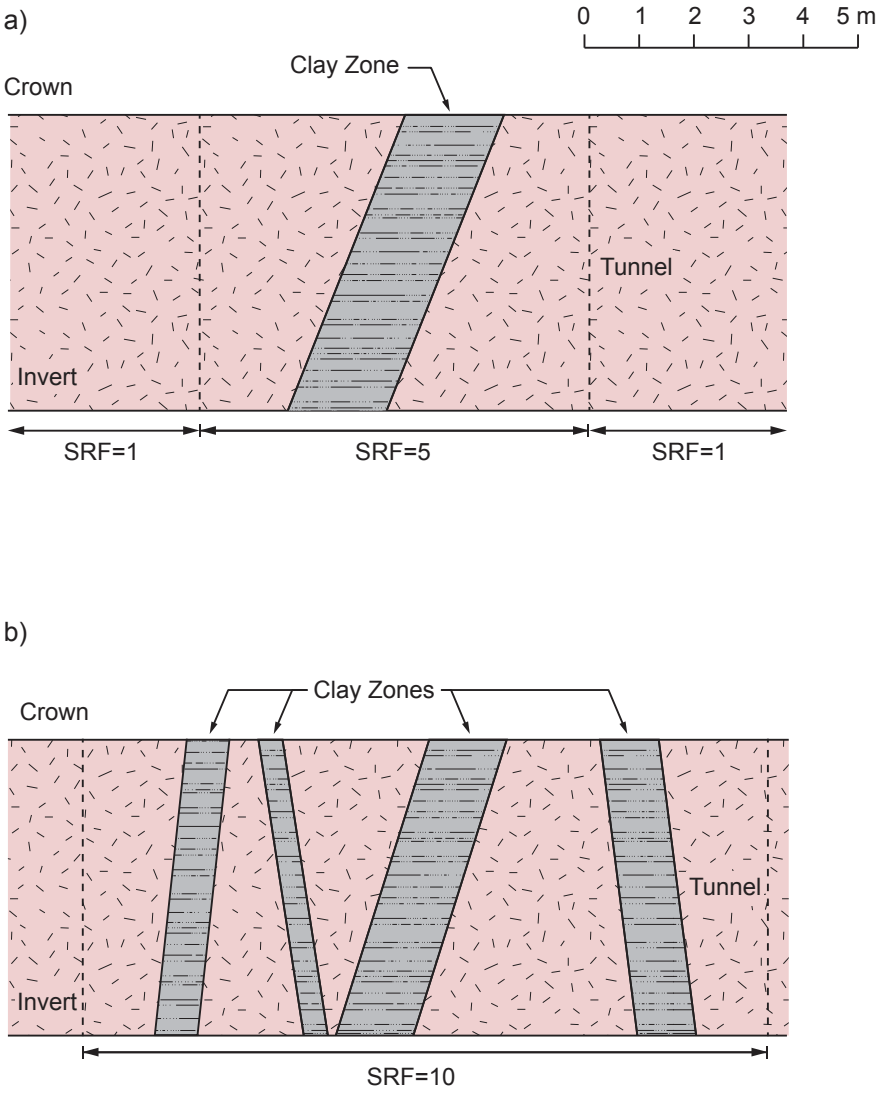
En smal svakhetssone kan defineres som en sone med en bredde fra en desimeter og opp til 2-3 m, bredden er generelt mye smalere enn spennet i tunnelen eller bergrommet. En bred svakhetssone er definert som bredere enn omkring 2-3 m. I en smal svakhetssone kan bergsikringen generelt forankres i sideberg av bedre kvalitet. For en bred sone må sikringen være selvbærende uten å ta hensyn til kvaliteten av sideberget.

Rundt en svakhetssone kan det lokalt oppstå en uvanlig spenningssituasjon, og en økt SRF-verdi kan da være nødvendig for å beskrive stabiliteten. Hvis svakhetssonen er så svak at spenningene ikke kan overføres gjennom den, kan en spenningskonsentrasjon oppstå på en side av sonen mens avspenning kan oppstå på den andre siden. I en situasjon med lav spenning vil en svakhetssone vanligvis forårsake spenningsanomalier bare i selve sonen og i et begrenset område rundt.

Hvis det er flere svakhetssoner med et mellomrom på noen få meter, kan en lengre del av en driveseksjon bli påvirket, og dermed gis en økt SRF-verdi. I tilfeller der en lang driveseksjon krysser flere svakhetssoner med knust eller forvitret berg, kan det vurderes om begrepet "svakhetssone" bør brukes for hele seksjonen. I slike tilfeller bør kategori A, B eller D i Tabell 6a brukes. Dersom det er skviseberg til stede, bruk M eller N i Tabell 6c. Ved svellende bergforhold, bruk O eller P i Tabell 6d.

For å oppdage om berget er avspent eller ikke kan man slå på berget med en hammer eller et renskespett. Hvis det kommer en hul (bom) lyd fra slaget og små blokker lett løsner, kan berget anses som dårlig innspent og en SRF-verdi større enn 1 kan fastslås. Merk at en hullyd kan framkomme også hvis man slår på en lokal enkeltblokk som er løs.

En visualisering av svakhetssonene er gitt i Figur 5. I Figur 5a krysser tunnelen en leirsone. I denne sonen og i nærheten av denne sonen er det vanligvis en unormal spenningssituasjon. En SRF-verdi på 5 må brukes for et område som omfatter sonen og dens nærmeste omgivelser. Bredden av området som skal ha en SRF-verdi på 5 avhenger av kvaliteten på bergmassen utenfor svakhetssonen. I Figur 5b krysser tunnelen flere leirsoner, og en SRF-verdi på 10 må brukes for denne seksjonen.



Figur 5 SRF-verdier relatert til enkeltstående og flere svakhetssoner.

4.9.2 SRF i hardt, kompetent berg, bergspenningsproblemer (Tilfelle F til L i Tabell 6b)

I kategori "b" vil generelt forholdet mellom bergartens styrke og størrelsen på opptredende spenninger bestemme SRF-verdien. Moderat spenninger vil generelt være mest gunstig for stabiliteten, og SRF vil da være 1. Relativt høye horisontale spenninger kan være gunstige for hengen i et bergrom, og en SRF-verdi på 0,5 kan brukes i noen tilfeller. Se referanse 5.6 på side 39.

Lave spenninger, som ofte er tilfelle ved liten bergoverdekning, kan føre til redusert stabilitet på grunn av liten innspenning. SRF vil i slike tilfeller være 2,5 eller til og med 5,0 når spennet i bergrommet er større enn mektigheten berget over. Dårlig stabilitet grunnet lav innspenning kan også forekomme nær andre bergrom.

Bergslag/avskalling kan forekomme ved svært høye spenninger og SRF-verdier opptil 400 kan brukes i noen ekstreme situasjoner. Intensiteten av spenningsproblemene og hvor raskt etter utsprengning stabilitetsproblemene begynner, vil være avgjørende for SRF-verdien. Tilfelle J i kategori "b" (kompetent, hovedsakelig massivt berg, spenningsproblemer) i Tabell 6 beskriver moderate spenningsproblemer mer enn en time etter utsprengning. Hvis problemene begynner omkring en time etter utsprengning, bør en SRF-verdi på 20–50 brukes avhengig av intensiteten på avskallingen. Hvis det tar mange timer eller noen dager før bergflak løsner, kan SRF-verdien være 5-10. Lignende tidsforhold gjelder for tilfelle K. Dersom problemer med intens avskalling oppstår umiddelbart etter utsprengning, vil SRF-verdien være rundt 200. Hvis det går noen minutter før avskalling oppstår eller den er mindre intens, vil SRF være 50-150. I ekstreme situasjoner som finnes i tilfelle L (SRF = 200–400) begynner problemene med intens avskalling umiddelbart etter utsprengning, og langsiktige deformasjoner kan forventes til tross for passende bergsikring. I tilfeller med SRF>50 kan det være nødvendig å sikre stuffen før en ny salvesyklus settes i gang.

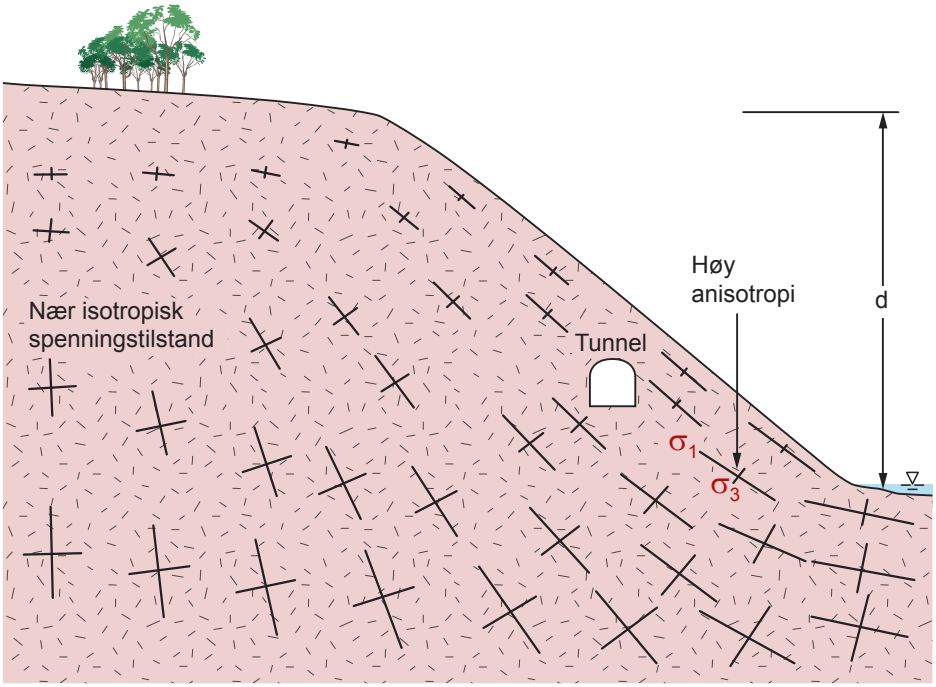
Høye spenninger som fører til umiddelbar avskalling og sprakeberg, fører også vanligvis til langsiktig deformasjon av bergmassen, utvikling av nye sprekker dypt inn i bergmassen i en tid inntil ny stabilitet er oppnådd. Omfanget av avskallingen avhenger av intensiteten og av spennet i bergrommet. En anisotropisk spenningssituasjon vil være ugunstig hvis spenningene er høye, og deler av bergrommets periferi vil være utsatt for spenningsinduserte stabilitetsproblemer. Dette genererer ofte et asymmetrisk tverrprofil, og stabilitetsproblemene øker med økende spenning.

I kompetent og relativt massivt berg kan SRF-verdien estimeres når forholdet σ_c/σ_1 eller σ_θ/σ_c er kjent. I følge observasjoner gjelder dette bare for $RQD/J_n >> 10$.

I mange tilfeller er spenningene i berget indusert av høye dalsider som gir høye hovedspenninger, høy tangentialspenning og anisotropiske spenninger, som vist i Figur 6. Fjellsidens høyde over drivenivå sammenlignet med bergets trykkfasthet kan være et godt verktøy for å estimere SRF.

Siden spenningene vanligvis ikke overføres gjennom en oppsprukket bergmasse når de utløses av tunneldriving, vil effekten av spenningene variere. Q-verdien vil i stor grad bli påvirket av RQD og J_n.

I tilfeller der høye spenninger kombineres med oppsprukket bergmasse, er bergmassens trykkfasthet viktigere enn trykkfastheten av intakt berg. I tilfeller der bergmassen er svært oppsprukket og påvirket av høye spenninger, er det mer sannsynlig at det oppstår en skviseeffekt enn avskalling, og Tabell 6c bør brukes i stedet for 6b.



Figur 6 Visualisering av en høy dalside med høye anisotropiske spenninger.

4.9.3 SRF i skviseberg (Tilfelle M og N i Tabell 6c)

"Skviseberg" betyr bergmasser der plastisk deformasjon finner sted under påvirkning av høye spenninger. Dette vil skje i mykt eller knust berg når spenningene overskrider bergmassens styrke.

I svært myke bergarter med få eller ingen sprekker, avhenger stabiliteten av forholdet mellom bergartens trykkfasthet og bergspenningene, og de andre Q-parameterne kan være vanskelige å fastslå. I slike tilfeller vil Q-systemet kanskje ikke gi noen tilfredsstillende beskrivelse av situasjonen, og andre metoder slik som deformasjonsmålinger og/eller numerisk simulering for dimensjonering av bergsikring bør brukes i tillegg.

4.9.4 SRF i svellende berg (Tilfelle O og P i Tabell 6d)

Svelling er en kjemisk prosess som starter når vann kommer inn i bergmasse som inneholder mineraler med svelleegenskaper. Mengden og type svellende mineraler vil være avgjørende for denne prosessen og for størrelsen av svelletrykket. Det vil være nødvendig å gjøre laboratorietester for å bestemme potensielt svelletrykk som en basis for SRF-verdien. Blant de vanligste svellende mineralene er anhydritt, som sveller ved overgang til gips. Et annet vanlig svellende mineral er montmorillonitt (det mest aktive mineralet av svellende leirer). Merk at noen bergarter som alunskifer og visse typer svartskifer også har svellepotensiale.
I mange bergrom kan svelling oppstå lang tid etter driving på grunn av absorpsjon av fuktighet fra luften.

4.10 Q-parametere relatert til forinjeksjon

Forholdet mellom forinjeksjon og forbedring av bergmassens egenskaper har blitt undersøkt av Barton. En hypotetisk modell av potensielle forbedringer i Q-parametere på grunn av forinjeksjon fører til en økning i effektiv RQD, en reduksjon i effektiv J_n, en økning i J_r, en reduksjon i J_a og en økning i J_w. Se Barton (2006) for flere detaljer.

5 Bruk av Q-systemet for å vurdere bergsikring

Q-verdien og de seks tilhørende parameterverdiene gir en beskrivelse av bergmassen. En bestemt Q-verdi tilsier et bestemt stabilitetsforhold som vil kreve et bestemt sikringsomfang. Basert på analyser fra eksisterende tunneler og bergrom er det dokumentert en sammenheng mellom Q-verdi og utført permanent sikring. Dette kan brukes som veiledning for dimensjonering av bergsikring i nye underjordsanlegg.

5.1 Spennvidder og sikkerhetskrav til berganlegg (ESR)

I tillegg til bergmassens kvalitet (Q-verdien), er to andre faktorer avgjørende for dimensjonering av sikring i tunneler og bergrom. Disse faktorene er sikkerhetskravene og dimensjonene, dvs. spennet eller høyden av bergrommet. Generelt vil sikringsbehovet øke med økende spennvidde og økende høyde på veggene. Sikkerhetskravene vil avhenge av anleggets formål. En vegtunnel eller en kraftstasjon i berg vil trenge et høyere sikkerhetsnivå enn en vanntunnel eller en midlertidig gruve. For å uttrykke sikkerhetskrav, brukes en faktor kalt ESR (Excavation Support Ratio).

En lav ESR-verdi tilsier behov for et høyt sikkerhetsnivå, mens høyere ESR-verdier indikerer at et det er akseptabelt med et lavere sikkerhetsnivå. Krav og byggetradisjoner i hvert enkelt land kan føre til andre ESR-verdier enn de som er gitt i Tabell 7.

Det anbefales å bruke ESR = 1,0 når Q $\leq$0,1 for anleggstypene B, C og D. Grunnen til dette er at stabilitetsproblemene kan være alvorlige ved så lave Q-verdier, kanskje med fare for kollaps.

Spennvidden (eller vegghøyden) koblet sammen med ESR gir den "ekvivalente dimensjonen" på følgende måte:

$$\frac{\text{Spennvidde/høyde i m}}{\text{ESR}} = \text{Ekvivalent dimensjon}$$

Tabell 7 ESR-verdier.

7	Type underjordsanlegg	ESR
A	Midlertidige gruveåpninger osv.	*ca.* 3-5
B	Vertikale sjakter*: i) sirkelformede seksjoner ii) rektangulær / firkantet seksjon * Avhenger av formålet. Kan være lavere enn angitte verdier.	*ca.* 2,5 *ca.* 2,0
C	Permanente gruveåpninger, vanntunneler for vannkraft (unntatt fallrør med høyt trykk), vannforsyningstunneler, pilottunneler, drivinger og innganger til store bergrom.	1,6
D	Mindre vei- og togtunneler, trykkammer, tilkomsttunneler, kloakktunneler, osv.	1,3
E	Kraftstasjoner, lagringsrom, vannbehandlingsanlegg, større vei- og togtunneler, sivilforsvarkammer, portaler, krysninger, osv.	1,0
F	Underjordiske atomkraftverk, togstasjoner, offentlige anlegg og sportsanlegg, fabrikker osv.	0,8
G	Svært viktige bergrom og tunneler med lang levetid, ≈ 100 år, eller uten tilgang for vedlikehold.	0,5

5.2 Bergsikringsdiagram

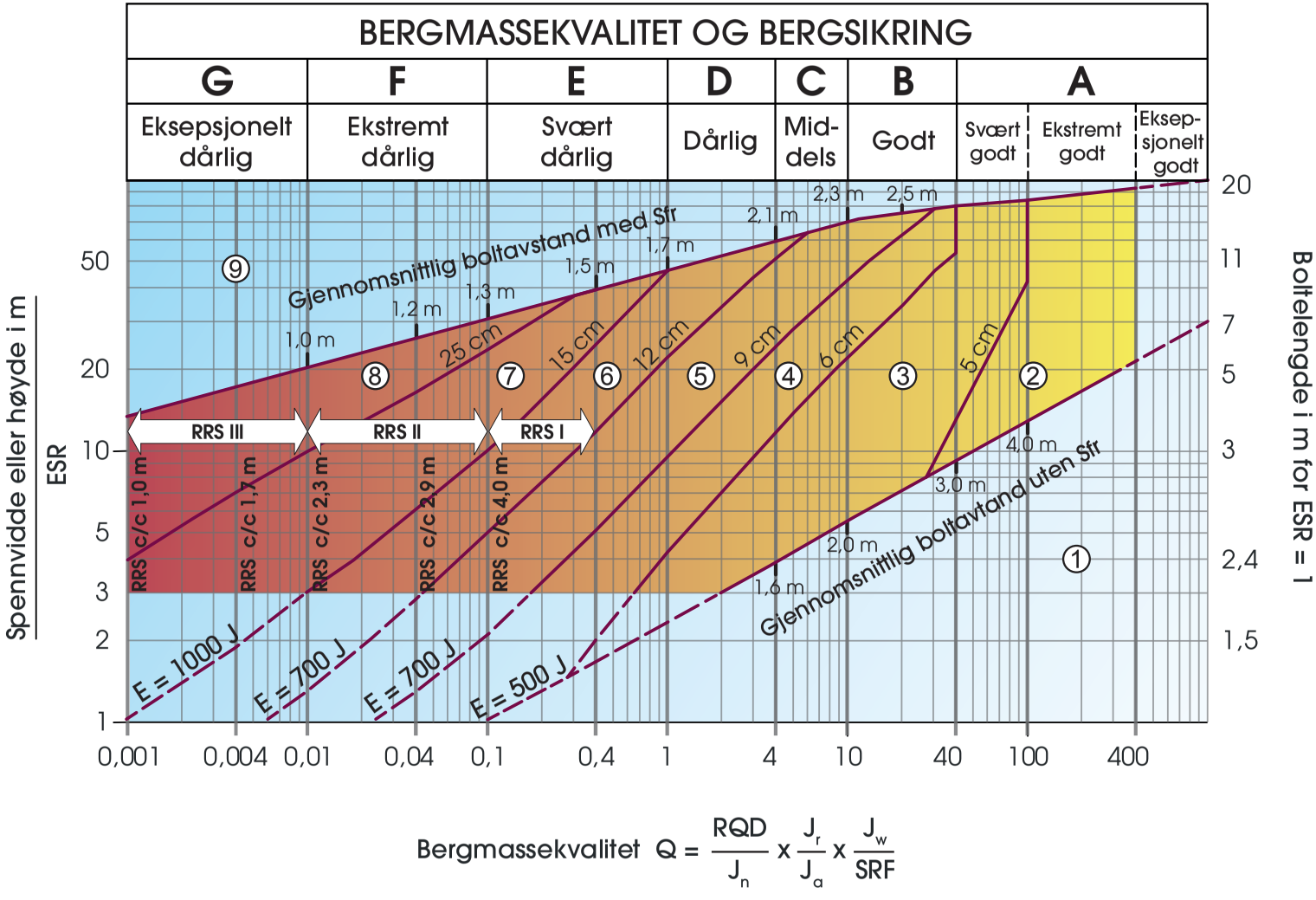
Q-verdien og ekvivalent dimensjon vil være avgjørende for dimensjonering av permanent sikring. I sikringsdiagrammet vist i Figur 7, er Q-verdiene tegnet inn langs den horisontale aksen og ekvivalent dimensjon langs den vertikale aksen på venstre side.

Sikringsdiagrammet er basert på en gjennomsnittsbetraktning av dataene fra de analyserte underjordsanleggene. Fra de fleste av de undersøkte anleggene er det konservativt utført bergsikringsnivå, mens i enkelte tilfeller har det skjedde kollapser, enten under driving eller etter at anlegget var i bruk.

Under utviklingen av sikringsdiagrammet har alle de studerte kombinasjon av Q-verdi og ekvivalent dimensjon blitt plottet i et tilsvarende diagram som vist i Figur 7. Dette har gitt grunnlaget for den inndeling diagrammet har med hensyn på sikringstype.

Merk at diagrammet ikke er delt i definerte sikringsklasser, men viser en kontinuerlig skala både for bolteavstand og sprøytebetongtykkelse. Siden sikringsdiagrammet er basert på empiriske data, gir det et godt grunnlag for å bestemme permanent sikring i nye underjordsanlegg.

Sikringsdiagrammet gir opplysninger om anbefalt bolteavstand, boltelengder og tykkelse på sprøytebetong. Diagrammet angir også energiabsorpsjonsklasse for fiberarmert sprøytebetong, og dimensjonering av armerte sprøytebetongbuer. Sikringsomfanget som framkommer av diagrammet må betraktes som veiledende. Spesielle problemstillinger vil kreve en egen vurdering for å bestemme hvilken bergsikring som er nødvendig.


BERGMASSEKVALITET OG BERGSIKRING
G
F
E
D
C
B
A
Eksepsjonelt dårlig
Ekstremt dårlig
Svært dårlig
Dårlig
Mid-dels
Godt
Svært godt
Ekstremt godt
Eksep-sjonelt godt
Gjennomsnittlig boltavstand med Sfr
1,0 m
1,2 m
1,3 m
1,5 m
1,7 m
2,1 m
2,3 m
2,5 m
25 cm
15 cm
12 cm
9 cm
6 cm
5 cm
RRS III
RRS II
RRS I
RRS c/c 1,0 m
RRS c/c 1,7 m
RRS c/c 2,3 m
RRS c/c 2,9 m
RRS c/c 4,0 m
Gjennomsnittlig boltavstand uten Sfr
4,0 m
3,0 m
2,0 m
1,6 m
E = 1000 J
E = 700 J
E = 700 J
E = 500 J
Spennvidde eller høyde i m
ESR
Boltelengde i m for ESR = 1
0,001
0,004
0,01
0,04
0,1
0,4
1
4
10
40
100
400
1
2
3
5
10
20
50
1,5
2,4
3
5
7
11
20
Bergmassekvalitet Q = RQD/J_n x J_r/J_a x J_w/SRF

Sikringskategorier

① Usikret eller spredt bolting
② Spredt bolting, **SB**
③ Systematisk bolting, fiberforsterket sprøytebetong, 5-6 cm, **B+Sfr**
④ Fiberforsterket sprøytebetong og bolting, 6-9 cm, **Sfr (E500)+B**
⑤ Fiberforsterket sprøytebetong og bolting, 9-12 cm, **Sfr (E700)+B**
⑥ Fiberforsterket sprøytebetong og bolting, 12-15 cm + forsterkede ribber med sprøytebetong og bolting, **Sfr (E700)+RRS I +B**
⑦ Fiberforsterket sprøytebetong >15 cm + forsterkede ribber med sprøytebetong og bolting, **Sfr (E1000)+RRS II+B**
⑧ Støpt betongforing, **CCA** eller **Sfr (E1000)+RRS III+B**
⑨ Spesiell vurdering

Boltavstand er hovedsaklig basert på Ø20 mm

E = Energiabsorbsjon i fiberforsterket sprøytebetong

ESR = Utgravingens sikringsgrad

Områder med prikkede linjer har ingen empiriske data

RRS - avstand relatert til Q-verdi

I — **Si30/6 Ø16 - Ø20 (spennvidde 10m)**
D40/6+2 Ø16-20 (spennvidde 20m)

II — Si35/6 Ø16-20 (spennvidde 5m)
D45/6+2 Ø16-20 (spennvidde 10m)
D55/6+4 Ø20 (spennvidde 20m)

III — D40/6+4 Ø16-20 (spennvidde 5 m)
D55/6+4 Ø20 (spennvidde 10 m)
Spesiell vurdering (spennvidde 20 m)

Si30/6 = Enkelt lag med 6 armeringsjern, 30 cm tykkelse med sprøytebetong
D = Dobbelt lag med armeringsjern
Ø16 = Armering diameter er 16 mm
c/c = RSS avstand, senter - senter

Figur 7 Anbefaling for permanent sikring basert på Q-verdier og spennvidde/ESR.

Kravet til sprøytebetongtykkelse øker med synkende Q-verdi og økende spennvidde, som det framgår av sikringsdiagrammet. For tilfeller som havner midt mellom linjene som angir sprøytebetongtykkelsen benyttes en lineær tilnærming for å bestemme nødvendig sprøytebetongtykkelse. I tilfeller med potensielt store deformasjon, for eksempel ved høye spenninger, bør fiberarmert sprøytebetong brukes i alle sikringskategorier.

Noen ganger angir diagrammet alternative sikringsmetoder. Ved høye Q-verdier i sikringsdiagrammet, kan sprøytebetong vurderes sløyfet. I slike tilfeller vil krav til boltavstand være avhengig av om sprøytebetong blir brukt eller ikke. På grunn av dette er sikringsdiagrammet delt i to områder. Området definert som "Bolteavstand ved fiberarmert sprøytebetong" viser til bolting i kombinasjon med sprøytebetong. Det andre området som er definert som "Bolteavstand i områder uten sprøytebetong" viser bolteavstand når sprøytebetong ikke er brukt. Anbefalt bolteavstand er mer et uttrykk for mengden bolter som er nødvendig heller enn en eksakt anbefaling av bolteavstander. Plasseringen og retningen av hver bolt bør tilpasses sprekkegeometrien. Dette er spesielt viktig i områder der bolteavstanden er stor. I områder der sprøytebetong ikke brukes, er ikke systematisk bolting relevant, og det må bestandig være en vurdering for plasseringen av hver enkelt bolt.

Lengden på boltene avhenger først og fremst av spennvidde eller høyden av veggen i bergrommet, men også i noen grad av bergmassens kvalitet. Anbefalte boltelengder er gitt på høyre side av diagrammet, men her bør det alltid følge en egen vurdering av hva som er nødvendig. Ved ugunstig sprekkegeometri vil det være nødvendig med lengre bolter enn anbefalt i diagrammet, og det er også et generelt behov for økende boltelengde ved minkende Q-verdi.

5.2.1 Sprøytebetong ved høye Q-verdier

Sprøytebetongbruken har økt betydelig de senere årene. Sikringskategorien i diagrammet som ikke inkluderer sprøytebetong har blitt innskrenket slik at sprøytebetong nå er inkludert for de fleste bergrom på grunn av krav til arbeidssikkerhet og minimumskravene til levetid.

5.2.2 Veggsikring

Sikringsdiagrammet gjelder hovedsakelig for hengen og vederlag i tunneler og bergrom. Sikringsnivået for veggene er vanligvis mindre for høye og moderate Q-verdier (Q>0,1). Når Q-systemet benyttes for veggsikring, brukes vegghøyden i stedet for spennvidde. Den faktiske Q-verdien er justert som vist i Tabell 8.

Tabell 8 Omregning av faktiske Q-verdier til Q-verdier for dimensjonering av veggsikring.

I bergmasser med god kvalitet	Q > 10	Multipliser Q-verdiene med en faktor på 5.
I bergmasser med middels kvalitet	0,1 < Q < 10	Multipliser Q-verdiene med en faktor på 2,5. I tilfeller med høye spenninger i berget, bruk den faktiske Q-verdien.
I bergmasser med dårlig kvalitet	Q < 0,1	Bruk faktisk Q-verdi.

Verdien som framkommer etter denne omregningen brukes direkte i diagrammet i Figur 7 for å fastslå nødvendig veggsikring.

5.3 Armerte sprøytebetongbuer

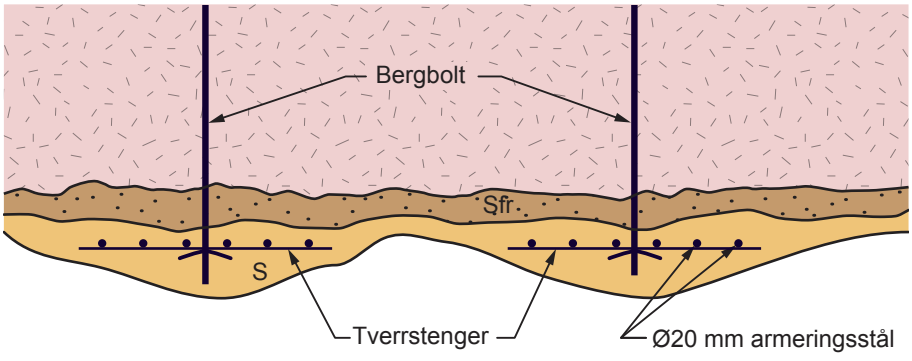
I områder med svært dårlig bergkvalitet (Q<1), er armerte sprøytebetongbuer ofte et foretrukket alternativ til full utstøpning. Buene konstrueres ved hjelp av kamstålstenger (Ø16 mm eller Ø20 mm), sprøytebetong og bergbolter, se Figur 8. Ved bruk av 20 mm kamstålstenger, må stengene forhåndsbøyes for å få et jevnt profil. Tykkelsen på buene, avstanden mellom dem samt antall og diameter på armeringsstengene må tilpasses dimensjonene på bergrommet og bergmassens kvalitet.

I Norge har man etter hvert bred erfaring i bruk av sprøytebetongbuer under vanskelige bergforhold. Ved hjelp av instrumentering og overvåkning i sprøytebetongbuer er det også samlet en del dokumentasjon på hvordan krefter tas opp i buene ved forskjellige bergforhold. Retningslinjer for bruk av armerte sprøytebetongbuer i forhold til Q-verdier og ekvivalente dimensjoner for bergrom er gitt i sikringsdiagrammet i Figur 7.

I beskrivelsen for sikringsdiagrammet er følgende forkortelser brukt:

- "Si" betyr enkelt lag med kamstålstenger
- "D" betyr dobbelt lag med kamstålstenger
- "45" betyr total buetykkelse på 45 cm
- "6" betyr 6 kamstålstenger
- "c/c = 2-3" betyr senter-til senter avstand på 2 til 3 meter mellom buene
- "16" eller "20" er diameteren på kamstålstengene det gjelder, i mm

I sikringsdiagrammet kan de samme dimensjonene for buer følges fra nedre venstre område til øvre høyre område i diagrammet. Innenfor hvert område vil det være et intervall der den foreslåtte avstanden mellom buene varierer. En ingeniørgeologisk vurdering må gjøres i hvert tilfelle for å fastslå avstanden mellom buene.

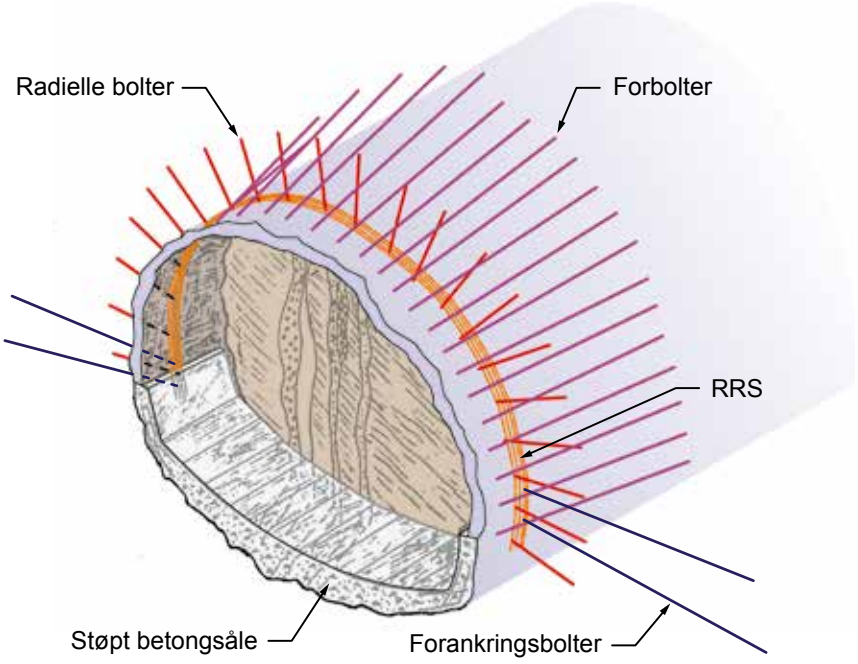


Figur 8 Konstruksjonsprinsipp for armerte sprøytebetongbuer.

I tilfeller der Q-verdien indikerer behov for armerte sprøytebetongbuer, må vanligvis et 12-15 cm tykt lag av fiberarmert sprøytebetong påfør før buene kan installeres. Dette laget fungerer som midlertidig sikring i tillegg til å jevne ut bergoverflaten. Tykkelsen på dette laget er inkludert i den totale tykkelsen av den forsterkede buen.

5.4 Forbolting

I dårlig bergmassekvalitet kan det være nødvendig å bruke forbolter, dvs. installere bolter foran stuff for å holde tunnelprofilet og unngå utrasing (Figur 9). Forbolting er ikke direkte inkludert i sikringsdiagrammet. Imidlertid er den foreslåtte bergsikringen i bergmasser med lave Q-verdier basert på bruk av forbolting under driving. Behovet for forbolter avhenger av spennet på bergrommet og kvaliteten på bergmassen. Vanligvis brukes forbolter i forbindelse med redusert salvelengde og /eller delte salver der bare en del av tverrsnittet sprenges i hver salve. Generelt anbefales det å bruke forbolter i bergmasser med Q-verdier lavere enn 0,1-0,6, avhengig av tverrsnittet. Avstanden mellom forboltene er vanligvis rundt 0,3 m (0,2 - 0,6 m). Bakre ende av boltene må forankres i overliggende berg ved installasjon av radielle bergbolter kombinert med bergbånd eller armeringsjern og sprøytebetong for å unngå kollaps under drivingen.



Figur 9 Sikring av dårlige bergmasser med forbolter.

5.5 Energiabsorpsjon i sprøytebetong

Basert på forventede deformasjoner ved ulike bergkvaliteter, har energiabsorpsjonsklassene blitt inkludert i sikringsdiagrammet. Disse energiabsorpsjonsklassene samsvarer med klassene definert av EFNARC og er gitt i retningslinjene fra Norsk Betongforenings publikasjon 7–2011, se Tabell 9.

Sikringsdiagrammet viser at variasjonen i bergmassekvalitet Q, og spennvidden eller høyden i bergrommet har nesten lik påvirkning på bergsikringen og energiabsorpsjonsklassene som følger bergsikringskategoriene.

I enkelte land har makro plastfibre erstattet stålfibre i sprøytebetong til underjordsanlegg. I Norge gjelder dette først og fremst i undersjøiske tunneler. Makro plastfibre gir sprøytebetongen omtrent tilsvarende egenskaper som med stålfibre, men plastfibrene er litt mer elastiske enn stålfibre. Deres store fordel er at de ikke ruster, og dette er en fordel i korrosive miljøer.

Table 9 Energiabsorpsjonsklasser basert på panelforsøk som beskrevet i Norsk Betongforenings publikasjon nr. 7 (NB, 2011).

Energiabsorpsjonsklasse	Min. energiabsorpsjon i Joule
E500	500
E700	700
E1000	1000

5.6 Sikring av smale svakhetssoner

To faktorer utenom bergmassekvaliteten er avgjørende for sikring av svakhetssoner; sonens bredde og dens retning i forhold til tunnelen. En svakhetssone kan defineres som en sone som krever sikring utover det som ellers er vanlig i bergrommet. Soner som er bredere enn 2-3 m vil som regel sikres med en egen sikringskonstruksjon, mens sikring for smale soner, dvs. soner med bredde 0,5-3 m, vil kunne forankres i sideberget. Kvaliteten på sideberget vil være bestemmende for nødvendig bergsikring.

For smale svakhetssoner er det vanligvis ikke praktisk å vurdere sikringsbehovet kun basert på Q-verdien i selve sonen. I slike tilfeller vil sikringskonstruksjonen vanligvis inkludere omkring 1 m på hver side av sonen. For en svakhetssone som er 1 m bred, vil sikringskonstruksjonen berøre et felt på omkring 3 meter bredde.

I et slikt tilfelle vil det være den midlere Q-verdien for området på 3 m som avgjør sikringen. Ved å bruke middelverdiene for de enkelte Q-parameterne i dette området kan man regne ut en middel Q-verdi. For å gi en nøyaktig beskrivelse av forholdene, vil det være nødvendig å bestemme Q-verdien både for svakhetssonen og for sideberget. Siden Q-verdien følger en logaritmisk skala, må beregningen gjøres logaritmisk. Følgende formel kan brukes (Løset, 1997):

$$LogQ_m = \frac{b \cdot logQ_{zone} + logQ_{sr}}{b + 1}$$

der: Q_m = Gjennomsnittlig Q-verdi for svakhetssone / sideberg
Q_{zone} = Svakhetssonens Q-verdi
Q_{sr} = Sidebergets Q-verdi
b = Bredden av svakhetssonen målt langs bergrommets aksen

Merk at i tilfeller der sideberget har en svært høy Q-verdi kan formelen gi en for høy Q_m-verdi. Det er avgjørende om berget på sidene kan brukes til forankring av sikringskonstruksjonen eller ikke. En lavere grense for sideberget kan godt være innenfor sikringskategori 3 eller bedre.

Bredden på en svakhetssone måles vanligvis vinkelrett på sonens strøkretning, men man må i denne forbindelse ta hensyn til sonens retning i forhold til bergrommets retning. Desto spissere vinkelen mellom sonen og bergrommets akse er, desto lengre strekning vil sonen påvirke bergrommet. Bredden på sonen (målt som lengden langs bergrommets akse som påvirkes av sonen) bør derfor brukes i formelen for Q_m. Legg dessuten merke til at ved en ganske smal sone (dvs. $b \approx 0{,}5$ m) parallell med tunnelaksen, vil formelen gi $Q_m \approx Q_{zone}$, noe som kan føre til en gjennomsnittlig Q-verdi (Q_m), som er for lav.

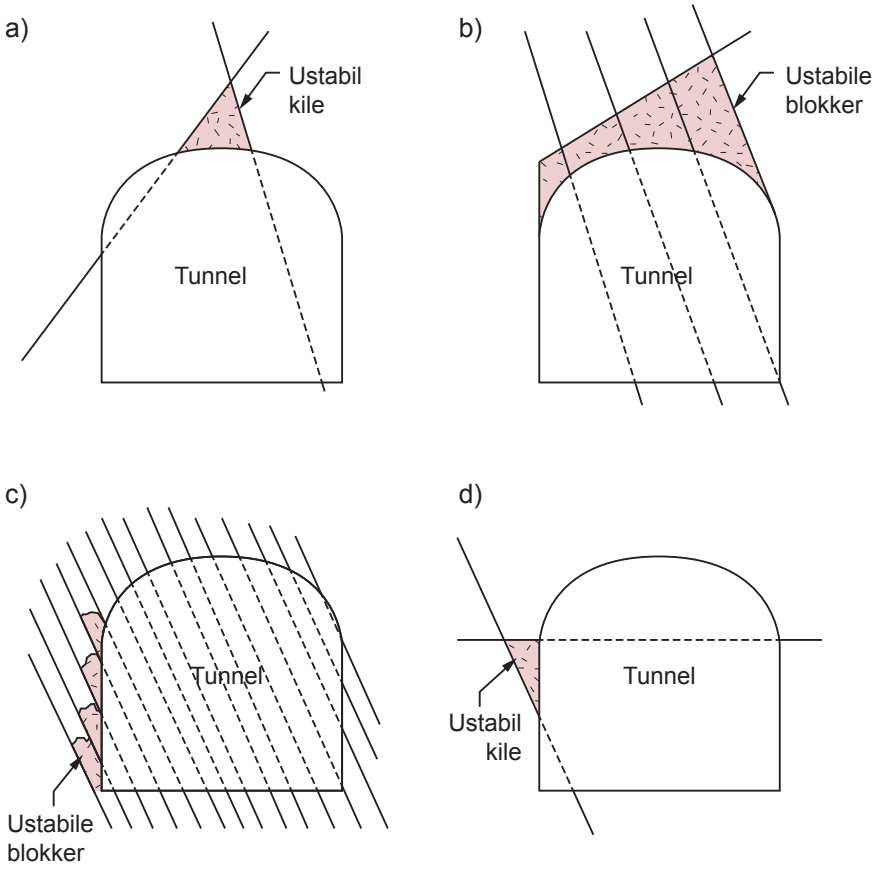
5.7 Ytterligere kommentarer om stabilitet og bergsikring

En Q-verdi gir en beskrivelse og klassifisering av en bergmasse, og ved å bruke sikringsdiagrammet i Figur 7 kan en bestemme generelle sikringsmetoder og sikringsmengder som trengs for en spesiell Q-verdi. Q-verdien og sikringsdiagrammet fanger imidlertid ikke opp alle detaljer eller alle spesifikke tilfeller. Stabiliteten av enkeltblokker er mer eller mindre uavhengig av Q-verdien. Den spesifikke bergsikringen, dvs. lokasjonen av enkeltbolter tas ikke i betraktning av Q-systemet. Feilaktig dimensjonering av bergsikring kan føre til ustabile enkeltblokker selv om bergsikringen er i henhold til Q-systemet. Når bergsikringen dimensjoneres er det derfor nødvendig å vurdere sprekkegeometrien spesifikt. Dersom bolting utføres før påføring av sprøytebetong er det mulig å lokalisere hver enkelt blokk.

Noen eksempler på ugunstig sprekkegeometri som krever spesiell oppmerksomhet i forhold til bolting er vist i Figur 10. I hengen kan sprekker som har strøk nær parallell til bergrommets akse, men med variabel fallretning skape ustabile kiler (Figur 10a). En kombinasjon av nær horisontale og nær vertikale sprekker kan kreve spesiell oppmerksomhet fordi en nær horisontal sprekk kan krysse bergmassen like over hengen og ikke bli sett før den forårsaker nedfall (Figur 10b). I slike situasjonen kan lengre bolter enn de som anbefales av Q-systemet være løsningen. Det anbefales også å justere retningen på boltene i slike tilfeller.

Sprekkeplan som skjærer veggene i et bergrom kan fungere som glideplan for ustabile blokker. I slike tilfeller kan stabiliteten av motstående vegger være svært forskjellig avhengig av retningen på sprekkene (Figur 10c). Hvis to kryssende sprekker danner en kile som vist i Figur 10d, kan en lignende situasjon oppstå.

I noen spesifikke tilfeller med $J_r = 3$, $J_a = 1$ og $RQD/J_n < 2$ i sterkt oppsprukket berg (nesten sukkerbitberg), kan Q-verdien alene gi feil grunnlag for bergsikring fordi de små blokkene uten sammenbinding kan gi redusert stabilitet til tross for en relativt høy Q-verdi. Dette kan kompenseres ved å øke SRF-verdien (som for en svakhetssone) og bruke $J_r = 1$ (på grunn av manglende bergkontakt i sprekken).



Figur 10 Stabilitetsproblemer forårsaket av sprekker med ugunstig orientering.

6 Kartlegging i bergrom

6.1 Generelt

Bestemmelse av nødvendig sikringsomfang baseres vanligvis på ingeniørgeologisk kartlegging på stuff. Q-verdien gir en god indikasjon på nødvendig permanent sikring. Imidlertid kan ikke Q-systemet brukes for å bestemme stabiliteten av enkeltblokker eller -kiler. Stabiliteten av en enkeltblokk kan ofte være mer eller mindre uavhengig av parameterne i Q-formelen, og ustabile enkeltblokker kan opptre til tross for en høy Q-verdi.

Den geologiske kartleggingen må utføres før påføring av sprøytebetong. Ved de fleste større underjordsanlegg er det ingeniørgeologer til stede for kartlegging av salver under hele anleggsperioden. På anlegg der ingeniørgeolog kun blir tilkalt ved spesielle problemstillinger, er det viktig at entreprenøren har tilstrekkelig bergkompetanse på anlegget slik at sikkerheten blir ivaretatt.

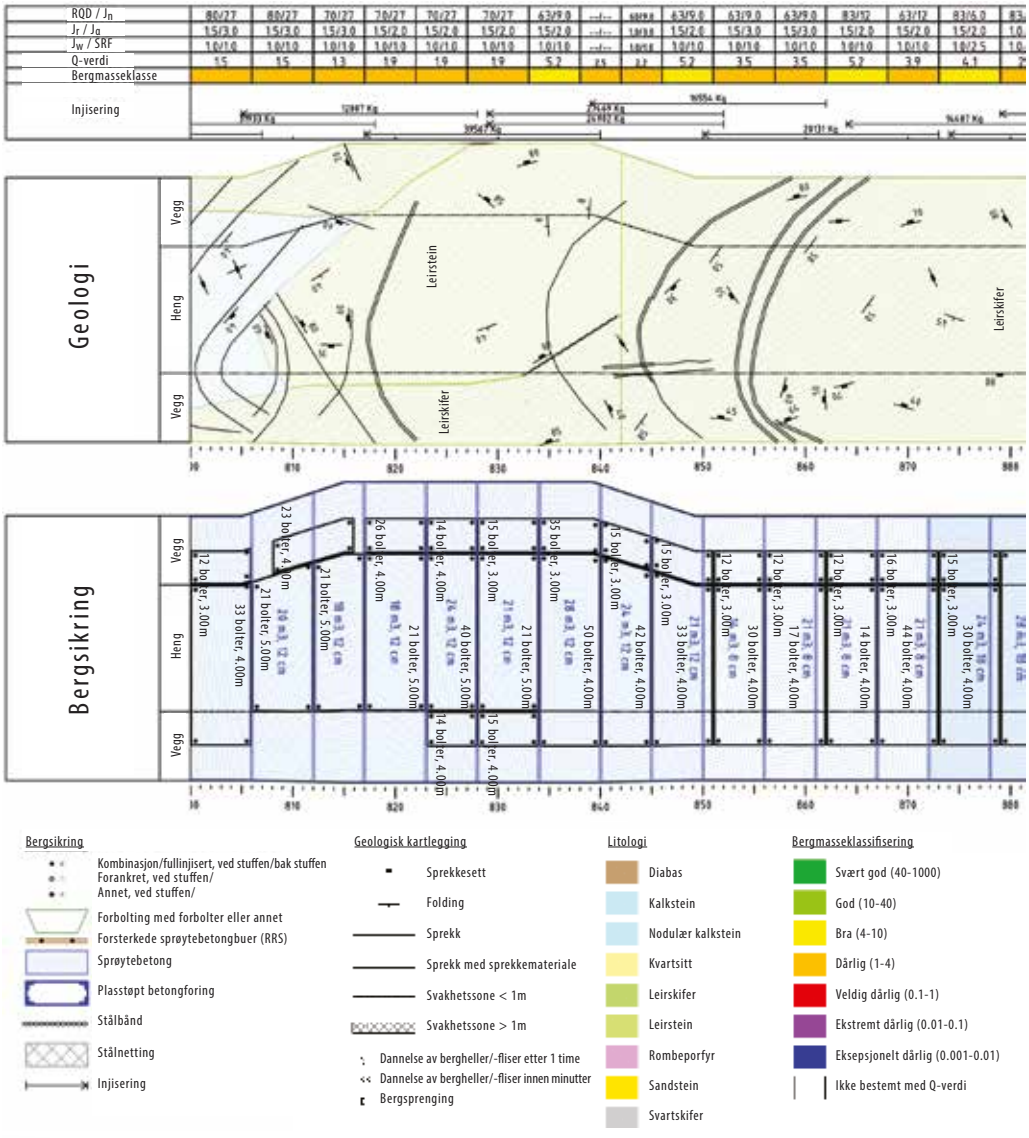
6.2 Ingeniørgeologisk kartlegging

Observasjoner av bergartsgrenser, sprekkestrukturer og svakhetssoner fra den ingeniørgeologiske kartleggingen bør tegnes inn på et ingeniørgeologisk kart langs tunnelen som et supplement til Q-klassifiseringen. Under denne kartleggingen bør også de forskjellige bergartstypene, strukturer og sprekkegeometri beskrives. Dessuten må alle svakhetssoner registreres og beskrives med hensyn til orientering, bredde og sprekkefylling.

Et eksempel fra slik registrering i en tunnelseksjon er vist i Figur 11. Helt øverst i diagrammet er det en tabell for registrerte Q-parametere. Injeksjonsmengde er også dokumentert i samme tabell. Under tabellen er kartlegging av geologi og bergsikring visualisert gjennom skisser der veggene er foldet ut og tunnelhengen er i midten. Den øverste skissen brukes for geologiske beskrivelser og den nederste skissen for dokumentasjon av bergsikring.

6.2.1 Kartlegging av seksjoner

Når Q-verdien beregnes er det nødvendig å dele hele bergrommet inn i seksjoner slik at Q-verdiene i en seksjon er forholdsvis ensartet. Generelt bør variasjonen i Q-verdi for hver seksjon ikke være større enn en bergklasse i henhold til sikringsdiagrammet i Figur 7. Det er en grense for hvor liten en seksjon bør være når bergkvaliteten varierer innenfor et lite område. Det har vanligvis liten hensikt å lage en separat seksjon når seksjonen er smalere enn 2-3 meter.



Figur 11 Digitalt tunnelkart med registrering av bergmassens kvalitet, geologi og bergsikring med antall bergbolter og sprøytebetong separert ved bruk av Autocad. Figur fra Nova Point Tunnel.

Når hver salve kartlegges, kan området vanligvis anses som en seksjon. Hvis det er betydelige variasjoner i Q-verdien kan imidlertid en inndeling i mindre seksjoner være nødvendig. For lengre seksjoner kan det være praktisk å gjøre en generell geologisk kartlegging først, for så å dele seksjonen inn i underseksjoner, og deretter bestemme Q-verdien for hver underseksjon. Når Q-parameterverdiene bestemmes er det vanligvis nødvendig å ha parametertabellene enkelt tilgjengelig. Denne håndboken inkluderer en laminert folder med Q-parameterne og

sikringsdiagrammet som kan brukes under feltkartlegging. En beskrivelse og en skisse av de viktigste geologiske strukturene er også verdifulle. Som nevnt tidligere kan de forekommende verdiene for J_w og SRF endre seg over tid. Det er derfor viktig å gjøre notater om tidsrommet som har gått siden bergrommet ble sprengt ut. Hvis det er sprekker med leirefylling, kan det være nødvendig med prøvetaking og laboratorietester for å identifisere leiremineralene og bestemme J_a-verdien.

6.3 Kartlegging av tunneler drevet med TBM

Kartlegging i en TBM-tunnel kan være en utfordring. Sammenlignet med tunneler drevet ved hjelp av boring og sprenging, spesielt ved middels Q-verdier, er færre sprekker synlige etter TBM-driving. Når bergmassens kvalitet er middels til god (Q >1), vil veggene i en TBM-tunnel være ganske glatte og det vil være vanskelig å identifisere sprekker og studere sprekkeflater. En hammer kan være en hjelp for å skille virkelige brudd fra årer, folding osv. for å estimere RQD-verdien. Estimater av J_r og J_a kan være unøyaktige hvis ingen eller få sprekkeflater kan studeres. Det er ofte nyttig å prøve å stikke en kniv inn i sprekken for å evaluere sprekkefyllingen. Leirfylling kan også oppdages på denne måten. I dårlig berg kan observasjon av Q-parameterne være enklere fordi det her som regel vil være noe utfall, og på slike steder vil det være mulig å studere blottlagte sprekkeflater.

Ved kartlegging i en TBM-tunnel må man være ekstra nøye, spesielt når leirfylte sprekker observeres. Løse kiler avløst av sprekker med ugunstig orientering kan bli hengende igjen etter drivingen. Disse blokkene kan brått falle ned uten forvarsel. Sprekkeegenskapene (J_r/J_a) gir en indikasjon på friksjonsvinkelen langs sprekkene, men kan være vanskelig å observere. Det er svært viktig at man gjør seg kjent med de generelle geologiske forhold slik som sprekkeretninger og sprekkekarakter.

7 Q-systemet ved forundersøkelser

7.1 Generelt

Q-systemet kan også brukes under forundersøkelser for underjordsanlegg. Under planlegging av tunneler og bergrom er det viktig å gjøre detaljerte beskrivelser av bergmassene for å få optimalisere utformingen og for å få en pålitelig prognose for bergsikring og kostnader. Vær nøye når Q-systemet brukes under feltkartlegging. Noen av disse aspektene er belyst i følgende tekst:

Det er viktig å tenke på at når Q-verdien beregnes fra data som ikke kommer fra et bergrom, så mangler Q-verdien noen av grunnparameterne som J_w og SRF og bør ikke brukes direkte som grunnlag for å bestemme bergsikring uten nærmere vurderinger.

7.2 Bruk av Q-systemet under feltkartlegging

Feltkartlegging er ofte en viktig del av forundersøkelsene for tunneler og bergrom. Påliteligheten av resultatene fra feltkartleggingen vil avhenge av tilgjengelige bergblotninger. Er det gode blotninger, vil det være mulig å utføre en relativt sikker bestemmelse av Q-verdien. Histogram kan brukes for å visualisere variasjonen i de forskjellige parameterne (se Figur 1).

Bergmassen nær overflaten vil ofte være mer oppsprukket og uforvitret enn bergmasse på større dyp. Dette kan spesielt være tilfelle i skifrige bergarter som ofte har en tendens til å smuldre opp nær overflaten. Hvis det er sparsomt med blotninger er det ofte bare bergmassene av best kvalitet som stikker opp, mens mer oppsprukkede soner erodert ned og dekket av løsmasser.

Ved overflaten vil sprekkefyllinger ofte være vasket bort, og J_a-verdien kan derfor være vanskelig å bestemme. Mange naturlige blotninger er ofte slipt ned av is og vann i nordiske land, noe som gjør det vanskelig å observere alle eksisterende sprekker. I land der forvitring er mer vanlig kan sprekkene også være skjult på overflaten.

Sprekkefylling finnes ofte fremdeles i vegskjæringer eller andre utsprengte flater. Sprekkeoverflatene er vanligvis eksponert etter sprenging, noe som gir et mer pålitelig grunnlag for å estimere J_n og J_r i tillegg til J_a. Q-verdien er ofte tilegnet en lavere verdi i sprengte bergskjæringer og skråninger sammenlignet med naturlige bergoverflater. I steinbrudd, med skjæringer i forskjellige retninger, vil Q-verdien være nær opptil verdien som observeres i et bergrom. Vannforholdene i et bergrom, J_w, vil være vanskelig å forutsi kun

fra feltkartlegging. Lugeon-tester i borehull og/eller empiriske data fra prosjekter i lignede bergmasser er nødvendig for å gjøre gode antakelser med hensyn til vannforhold.

En antakelse av SRF-verdien kan gjøres basert på de topografiske forholdene og tilgjengelig informasjon vedrørende spenningssituasjonen i området. Når et estimat av SRF-verdien gjøres på planleggingsstadiet av et underjordsanlegg, kan generell erfaring fra den geologiske regionen være verdifull. Informasjon fra nærliggende anlegg og topografiske trekk kan være til hjelp. I områder med høye, bratte fjellsider er det ofte et anisotropt spenningsfelt. Geologiske strukturer, slik som overflateparallelle sprekker og eksfoliasjonssprekker er indikasjoner på høye anisotropiske spenninger. Grensen for avskalling/eksfoliasjon i høye fjellsider eller bergslag i et bergrom er avhengig av forholdet mellom indusert spenning (høyden på skråningen over bergrommet) og bergets trykkfasthet. I tabell 6b er forholdet $\sigma_c / \sigma_1 < 4\text{-}5$ (avhengig av anisotropien) vanligvis en grense for avskalling i et bergrom. I hardt berg kommer denne grensen vanligvis med mellom 400 og 1100 meter bergoverdekning i dalsiden over bergrommet, avhengig av trykkfastheten på det intakte berget og hellingen på fjellsiden (se Figur 6). Det kan også vanlig å gjennomføre spenningsmålinger før driving av underjordsanlegg hvor det forventes spenningsproblemer.

7.3 Bruk av Q-systemet under kjernelogging

Forundersøkelser for underjordsanlegg inkluderer ofte logging av borkjerner. Ganske ofte mangler kjerner fra partier med dårlig bergkvalitet, og her må man generelt anta at Q-verdien er lav. Der det finnes kjerner kan de fleste Q-parameterne bestemmes med en ganske stor nøyaktighet. Pass imidlertid spesielt på følgende:

- Bare en liten seksjon av hver sprekkeflate vil være tilgjengelig, spesielt for sprekker som krysser borehullet med stor vinkel. Bestemmelse av ruhetstallet, J_r, kan derfor være vanskelig. Spesielt kan stor og medium skala bølgethet være vanskelige å estimere.

- Siden det brukes vann under boringen, kan mineralfylling som leiremineraler være vasket ut slik at J_a blir vanskelig å vurdere i noen tilfeller.

- Retningen på borehullet påvirker antall sprekker som krysses av borehullet. Sprekker som er nær parallelle med borehullet vil være underrepresentert i kjernene, og dette vil gi for høye RQD-verdier og for lave J_n-verdier.

- Mens RQD ofte beregnes for hver meter, må J_n vanligvis estimeres for seksjoner på flere meter.

- I massivt berg er det umulig å bestemme SRF fra borkjerner. I berg som krysses av svakhetssoner kan det være mulig å gi noen antydninger om SRF. Et estimat av SRF i massivt berg kan gjøres basert på overdekningen, høyden på en fjellside, dersom det blir utført spenningsmålinger i borehullet, eller ved hjelp av erfaringer fra nærliggende anlegg.

Generelt sett skal en kjernelogg bare inneholde data som er hentet fra kjernene eller målinger som er gjort i selve borehullet. Det betyr at Q-verdiene ikke skal inkluderes i en slik logg. Ved å bruke loggdataene kombinert med estimater av J_w og SRF vil det imidlertid være mulig å gi et grovt inntrykk av Q-verdiene for kjernene, og disse kan være til hjelp under planleggingen av et underjordsanlegg. Vanntapstester blir ofte utført under kjerneboring. Resultatene gis vanligvis i Lugeon (Lugeon = vanntap i liter per minutt og per meter borehull ved et overtrykk på 1 MPa), og danner grunnlaget for bestemmelse av J_w-verdien. En må også ta i betraktning om bergmassen vil bli forinjisert eller ikke for å bestemme Q-verdien som et grunnlag for bergsikring etter driving.

Det er bestandig viktig å vurdere hvor representative kjernene er. Hull blir ofte boret bare for å undersøke spesifikke svakhetssoner. Det er da svært viktig å vurdere hvor stor del av bergmassen disse sonene utgjør. Hvis et borehull er orientert langs en svakhetssone, vil det være parameterverdiene for denne sonen som bestemmes.

Referanser

Barton, N. (2006): Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy. Taylor & Francis Group, London, UK. ISBN 978-0-415-39441-3.

Barton, N., R. Lien og J. Lunde (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics and Rock Engineering 6(4): 189-236. Også publisert i: Norges Geotekniske Institutt, Publikasjon 106.

Bhasin, R. og Grimstad, E. (1996): The use of stress – strength relationships in the assessment of tunnel stability. Tunnelling and Underground Space Technology, 11(1): 93-9 8.

Deere, D.U. (1963): Technical description of rock cores for engineering purposes. Felsmechanic und Ingenieurgeologie 1: 16-22.

Grimstad, E., Kankes, K., Bhasin, R., Magnussen, A. og Kaynia, A. (2002): Rock mass quality Q used in designing reinforced ribs of sprayed concrete and energy absorption. I proceedings: International Symposium on Sprayed Concrete. Davos 2002, pp. 134-142.

Grimstad, E. og Barton, N. (1993): Updating of the q-system for NMT. I proceedings: International Symposium on Sprayed Concrete. Fagernes 1993, pp. 46-66.

ISRM (1978): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomech. Abstr. 16(3): 319-368.

Løset, F. (1997): Engineering Geology - Practical use of the Q-method. NGI-rapport 592046-4.

NB (2011): Sprayed Concrete for Rock Support. Publication no. 7, Norwegian Concrete Association.

Palmström, A. (2005): Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). Tunnelling and Underground Space Technology, 20(4): 362-377.

Singh, B., Jethwa, J.L., Dube, A.K. og Singh, B. (1992): Correlation between observed support pressure and rock mass quality. Tunnelling and Underground Space Technology 7(1): 59-74.

Tabell 1 RQD-verdier og antall sprekker per m^3.

1 RQD = Oppsprekkingsfaktor (Rock Quality Designation)			RQD
A	Svært dårlig	(> 27 sprekker per m^3)	0-25
B	Dårlig	(20-27 sprekker per m^3)	25-50
C	Middels	(13-19 sprekker per m^3)	50-75
D	God	(8-12 sprekker per m^3)	75-90
E	Utmerket	(0-7 sprekker per m^3)	90-100
Merk: i) Der RQD er rapportert eller målt til ≤ 10 (inklusive 0), brukes verdien 10 for å bestemme Q-verdien ii) RQD-intervaller på 5, dvs. 100, 95, 90, osv., er tilstrekkelig nøyaktige			

Tabell 2 J_n-verdier.

2 J_n = Tall for sprekkesett		J_n
A	Massivt, ingen eller få sprekker	0,5-1,0
B	Ett sprekkesett	2
C	Ett sprekkesett pluss tilfeldige sprekker	3
D	To sprekkesett	4
E	To sprekkesett pluss tilfeldige sprekker	6
F	Tre sprekkesett	9
G	Tre sprekkesett pluss tilfeldige sprekker	12
H	Fire eller flere sprekkesett, tilfeldig og sterkt oppsprukket "sukkerbitberg", osv.	15
J	Knust berg, jordaktig	20
Merk: i) For tunnelkryss, bruk 3 x J_n ii) For påhug, bruk 2 x J_n		

Tabell 3 J_r – verdier.

3 J_r = Sprekkeruhetstall		J_r
a) *Bergveggkontakt, og* ***b)*** *Bergveggkontakt før skjærbevegelsen har gått 10 cm*		
A	Diskontinuerlige sprekker	4
B	Ru eller ujevn, bølgete	3
C	Glatt, bølgete	2
D	Glidespeil, bølgete	1,5
E	Ru, ujevn, plan	1,5
F	Glatt, plan	1
G	Glidespeil, plan	0,5
Merk: i) Beskrivelse henviser til småskalaegenskaper og mellomskalaegenskaper, i den rekkefølgen		
c) *Ingen bergkontakt ved skjærbevegelse*		
H	Sone som inneholder leirfylling tykk nok til å forhindre bergkontakt ved skjærdeformasjon	1
Merk: ii) Legg til 1 hvis gjennomsnittlig avstand i det relevante sprekkesettet er mer enn 3 m (avhenger av størrelsen på tunnelåpningen) iii) J_r = 0,5 kan brukes for plane glidespeil med lineasjon, forutsatt at lineasjonen er orientert i sannsynlig bevegelsesretning		

Tabell 4 J_a-verdier.

4 J_a = Tall for sprekkefylling		Φ_r	J_a
a) *Bergkontakt (ingen mineralfylling, bare belegg)*			
A	Sammenvokste sprekker med harde mineraler som kvarts eller epidot.		0,75
B	Uomvandlede sprekkeflater, bare overflateoksidasjon.	25-35°	1
C	Svakt omvandlede sprekkeflater. Uoppbløtelig mineralbelegg, sandpartikler, oppknust berg uten leir.	25-30°	2
D	Siltig eller sandig sprekkebelegg, litt leir (ikke svellende).	20-25°	3
E	Oppbløtelig leirbelegg med lav friksjon, f.eks. kaolinitt eller glimmer. Også kloritt, talk gips, grafitt osv. og små mengder svelleleire.	8-16°	4
b) *Bergkontakt før 10 cm skjærdeformasjon (tynn mineralfylling)*			
F	Sandige partikler, oppknust berg, ikke leir.	25-30°	4
G	Sterkt overkonsolidert, uoppbløtelig fylling av leirmineraler, (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse).	16-24°	6
H	Middels eller litt overkonsolidert fylling av oppbløtelig leirmateriale (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse).	12-16°	8
J	Fylling av svelleleire, dvs. montmorillonitt (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse). J_a-verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	8-12
c) *Ingen bergkontakt ved skjærdeformasjon (tykk mineralfylling)*			
K	Soner og bånd av desintegrert eller knust berg. Sterkt overkonsolidert, uoppbløtelig fylling.	16-24°	6
L	Soner og bånd av knust eller desintegrert berg og leir. Middels til litt overkonsolidert uoppbløtelig fylling.	12-16°	8
M	Soner og bånd av leir eller knust eller desintegrert berg. J_a-verdien avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	8-12
N	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Sterkt overkonsolidert.	12-16°	10
O	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Middels-til-lav overkonsolidering	12-16°	13
P	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Svelleleire. J_a avhenger av prosentvis innhold av svelleleire.	6-12°	13-20

Tabell 5 J_w – verdier.

5	J_w = Sprekkevannstall	J_w
A	Tørre bergrom eller mindre innsig (fuktig eller noen få drypp)	1,0
B	Middels innsig, av og til utvasking av sprekkefyllinger (mange drypp/"regn")	0,66
C	Vannstråler eller høyt trykk i kompetent berg med ufylte sprekker	0,5
D	Stort tilsig eller høyt trykk, betydelig utvasking av sprekkefyllinger	0,33
E	Usedvanlig høy innstrømming eller vanntrykket avtar med tid. Forårsaker utvasking av materialer og kanskje utrasinger	0,2-0,1
F	Usedvanlig høy innstrømming eller vanntrykket fortsetter uten merkbar reduksjon. Forårsaker utvasking av materialer og kanskje utrasinger	0,1-0,05
Merk: i) Faktorene C til F er grove estimater. Øk J_w hvis berget dreneres eller det utføres injeksjon ii) Spesielle problemer forårsaket av isdannelse er ikke tatt med i betraktning		

Tabell 6 SRF-verdier.

6 SRF = Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)				SRF
a) *Svakhetssoner som krysser tunnelen eller bergrommet, som kan føre til at bergmasse løsner*				
A	Hyppig opptreden av svakhetssoner som inneholder leire eller kjemisk forvitret berg, avspent berg (uansett dybde), eller lange seksjoner med inkompetent (svakt) berg (uansett dybde). For skvising, se 6L og 6M			10
B	Flere skjærsoner innenfor en kort seksjon i kompetent avspent sideberg (uansett dybde)			7,5
C	Enkeltstående svakhetssoner med eller uten leire eller kjemisk forvitret berg (dybde ≤ 50 m)			5
D	Ukonsoliderte, åpne sprekker, mange sprekker eller "sukkerbit", osv. (uansett dybde)			5
E	Enkeltstående svakhetssoner med eller uten leire eller kjemisk forvitret berg (dybde > 50 m)			2,5
Merk: i) Reduser disse SRF-verdiene med 25-50 % hvis svakhetssonene bare påvirker men ikke krysser den underjordiske åpningen				
b) *Kompetent, hovedsakelig massivt berg, spenningsproblemer*		σ_c / σ_1	σ_θ / σ_c	**SRF**
F	Lave spenninger, nær overflaten, åpne sprekker	>200	<0,01	2.5
G	Middels spenninger, gunstige spenningsforhold	200-10	0,01-0,3	1
H	Høye spenninger, svært tett struktur. Vanligvis gunstig for stabiliteten. Kan også være ugunstig for stabiliteten, avhengig av retningen på spenningene sammenliknet med sprekkdannelse/svakhetsplan*	10-5	0,3-0,4	0,5-2 2-5*
J	Moderat avskalling etter > 1 time i massivt berg	5-3	0,5-0,65	5-50
K	Avskalling og bergslag etter noen minutter i massivt berg	3-2	0,65-1	50-200
L	Intens bergslag og umiddelbar dynamisk deformasjon i massivt berg	<2	>1	200-400
Merk: ii) For sterkt anisotropiske urørte spenningsfelt (om målt): når $5 \le \sigma_1 / \sigma_3 \le 10$, reduser σ_c til 0,75 σ_c. Når $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, reduser σ_c til 0.5 σ_c, der σ_c = fri trykkfasthet, σ_1 og σ_3 er de primære og sekundære spenningene, og σ_θ = maksimum tangential spenning (estimert fra elastisk teori) iii) Når dybden av henget under overflaten er mindre enn spennet; foreslås det at SRF økes fra 2,5 til 5 for slike tilfeller (se F)				
c) *Skviseberg: plastisk deformasjon i ikke kompetent berg under påvirkning av høyt trykk*			σ_θ / σ_c	**SRF**
M	Moderat skvisende bergtrykk		1-5	5-10
N	Intens skvisende bergtrykk		>5	10-20
Merk: iv) For bestemmelse av skvisende bergforhold henvises til relevant litteratur (dvs. Singh et al., 1992 og Bhasin og Grimstad, 1996)				
d) *Svellende berg: kjemisk svelleaktivitet ved tilgang på vann*				**SRF**
O	Moderat svelling			5-10
P	Intens svelling			10-15

Tabell 7 ESR-verdier.

7	Type underjordsanlegg	ESR
A	Midlertidige gruveåpninger osv.	*ca.* 3-5
B	Vertikale sjakter*: i) sirkelformede seksjoner ii) rektangulær / firkantet seksjon * Avhenger av formålet. Kan være lavere enn angitte verdier.	*ca.* 2,5 *ca.* 2,0
C	Permanente gruveåpninger, vanntunneler for vannkraft (unntatt fallrør med høyt trykk), vannforsyningstunneler, pilottunneler, drivinger og innganger til store bergrom.	1,6
D	Mindre vei- og togtunneler, trykkammer, tilkomsttunneler, kloakktunneler, osv.	1,3
E	Kraftstasjoner, lagringsrom, vannbehandlingsanlegg, større vei- og togtunneler, sivilforsvarkammer, portaler, krysninger, osv.	1,0
F	Underjordiske atomkraftverk, togstasjoner, offentlige anlegg og sportsanlegg, fabrikker osv.	0,8
G	Svært viktige bergrom og tunneler med lang levetid, ≈ 100 år, eller uten tilgang for vedlikehold.	0,5

Tabell 8 Omregning av faktiske Q-verdier til Q-verdier for dimensjonering av veggsikring.

I bergmasser med god kvalitet	$Q > 10$	Multipliser Q-verdiene med en faktor på 5.
I bergmasser med middels kvalitet	$0,1 < Q < 10$	Multipliser Q-verdiene med en faktor på 2,5. I tilfeller med høye spenninger i berget, bruk den faktiske Q-verdien.
I bergmasser med dårlig kvalitet	$Q < 0,1$	Bruk faktisk Q-verdi.



www.ngi.no