

NGI

HÅNDBOK

Bruk av Q-systemet

Bergmasseklassifisering og bergforsterkning



Oslo, april 2025

For mer informasjon om denne håndboken, ta kontakt med:

NGI

Postboks 3930

Ullevål Stadion 0806 Oslo

Norge

www.ngi.no

Forsidebilde fra Mossetunnelen, Erlend Skretting

NGI er utgiver av Q-håndboken, en veileder til bruk av Q-systemet. Brukere av håndboken må være oppmerksomme på at bergfaget innebærer betydelige usikkerheter, og at vurderinger må baseres på spesifikke forhold og profesjonelt skjønn. NGI tar intet ansvar for eventuelle feil eller mangler i håndboken, eller for følgeskader som måtte oppstå ved bruk av informasjonen som står i den.

Forord

Håndbok "Bruk av Q-systemet, bergmasseklassifisering og bergforsterkning" er en veiledning for bruk av Q-systemet. NGIs arbeid med utviklingen av Q-systemet for klassifisering av bergmasser begynte tidlig i 70-årene, og ble første gang publisert i 1974 (Barton, Lien og Lunde, 1974).

NGI har kontinuerlig forbedret og oppdatert systemet, og utga i 2013 den første versjonen av håndboka "Bruk av Q-systemet" til bergmasseklassifisering og bergforsterkning. Basert på økende mengde spørsmål og tilbakemeldinger fra brukere med ulik bakgrunn og erfaring, er det i denne revisjonen av håndboka foretatt en del presiseringer med utfyllende forklaringer. Ny revisjon av Q-håndboka er først og fremst en oppdatering av veiledningene til hvordan Q-systemet skal brukes. Viktige endringer i den reviderte Q-håndboka:

- Flere presiseringer og mer utfyllende forklaringer om Q-systemets bruk og begrensninger.
- Nye underkapitler som omhandler forutsetninger for bruk av Q-systemet og veiledning hvor det innenfor kartlagt område betydelige variasjoner i Q-parametere.
- Justeringer i sikringsanbefalinger grunnet endret bransjepraksis og teknologi- og materialutvikling.

For detaljer, se egen [endringslogg](#).

Innhold

1	Introduksjon	4
1.1	Historie	4
1.2	Anvendelsesområder	4
1.3	Forutsetninger for bruk av Q-systemet	5
1.4	Begrensninger	5
2	Q-systemet og klassifisering av bergmasser	7
2.1	Oppsprekkingsgrad (RQD/J_n)	8
2.2	Friksjonsforhold langs sprekker (J_r/J_a)	8
2.3	Spenningsforhold (J_w/SRF)	8
2.4	Q' (Q_{basis})	9
3	Beregning av Q-verdien	10
3.1	Generelt	10
3.2	Oppsprekkingstall (RQD)	10
3.2.1	RQD i utsprenge tunneler og bergrom	11
3.2.2	RQD i skifrige bergarter	12
3.2.3	RQD i svake bergarter og svakhetssoner	12
3.2.4	RQD i forhold til sementerte sprekker og mineralfylling	12
3.3	Tall for sprekkesett (J_n)	13
3.3.1	J_n i forhold til sprekkelengde	14
3.3.2	J_n i svakhetssoner	14
3.4	Sprekkeruhetstall (J_r)	14
3.4.1	J_r i forhold til sprekkefylling	15
3.4.2	J_r i forhold til sprekkeorientering	16
3.4.3	J_r i bergmasser uten sprekker	17
3.4.4	J_r i svakhetssoner	17
3.5	Tall for sprekkefylling (J_a)	17
3.5.1	Bestemmelse av J_a ut ifra sprekkefyllingens mineraltype	20
3.5.2	Sammenheng mellom friksjonsvinkel og J_a	20
3.5.3	J_a i svakhetssoner	21
3.6	Sprekkevannstall (J_w)	21
3.6.1	J_w i forhold til varierende innlekkasjer	21
3.7	Spenningsfaktor (SRF , Stress Reduction Factor)	22
3.7.1	SRF ved svakhetssoner som krysser bergrom	23
3.7.2	SRF i hardt, kompetent berg med lave eller gunstige spenningsforhold	25
3.7.3	SRF i hardt, kompetent berg, bergspenningsproblemer	25
3.7.4	SRF i skviseberg	27
3.7.5	SRF i svellende berg	27

4	Bruk av Q-systemet for å vurdere bergsikring	29
4.1	Spennvidder og sikkerhetskrav til berganlegg (ESR)	29
4.1.1	Levetidsbetraktninger i Q-systemet	30
4.2	Bergsikringsdiagram	31
4.2.1	Sprøytebetong ved høye Q-verdier	34
4.2.2	Veggsikring	34
4.3	Armerte sprøytebetongbuer (RRS)	35
4.3.1	Sammenligning av armerte sprøytebetongbuer og gitterdragere	36
4.3.2	Kvalitetskontroll og utbedring av sikringsbuer	37
4.4	Forbolting	37
4.5	Energiabsorpsjon i sprøytebetong	38
4.6	Kommentarer om stabilitet og bergsikring	39
4.7	Anbefalinger ved krevende bergmasseforhold	41
5	Kartlegging i bergrom	43
5.1	Generelt	43
5.2	Ingeniørgeologisk kartlegging	43
5.2.1	Bruk av digitale verktøy ved tunnelkartlegging	44
5.2.2	Kartlegging av seksjoner	45
5.2.3	Kartlegging av svakhetssoner	46
5.2.4	HMS under kartlegging	47
5.3	Kartlegging av tunneler drevet med TBM	47
6	Q-systemet ved forundersøkelser	49
6.1	Generelt	49
6.2	Bruk av Q-systemet ved feltkartlegging	49
6.3	Bruk av Q-systemet ved kjernelogging	50
7	Referanser	52
	Vedlegg tabeller 1 til 9	53

1 Introduksjon

1.1 Historie

Q-systemet ble utviklet av NGI mellom 1971 og 1974 (Barton, Lien og Lunde, 1974). Siden introduksjonen av Q-systemet 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. Tykkere sprøytebetonglag er også blitt vanlig i tunnel- og underjordsdrift med hensyn til levetidsbetraktninger til bergrommet. Sprøytebetongbuer har i stor grad erstattet betongutstøpning.

Q-systemets sikringsdiagram er revidert flere ganger og publisert ved ulike konferanser. I 1993 ble det gjort en omfattende oppdatering av sikringsdiagrammet, med utgangspunkt i kartleggingsdata fra 1050 forskjellige registreringer, hovedsakelig fra norske tunneler og bergrom (Grimstad & Barton, 1993). I 2002 ble det foretatt en ny oppdatering basert på 900 nye registreringer fra tunneler og bergrom i Norge, Sveits og India (Grimstad et al., 2002). Anbefalinger av sprøytebetongbuer (RRS) er i hovedsak basert på erfaringer, i tillegg til deformasjonsmålinger, dokumentasjon av last og numeriske beregninger.

I denne utgaven av håndboken er det foretatt mindre justeringer i bergsikringsdiagrammet, og en del presiseringer for anbefalt bruk av Q-systemet.

1.2 Anvendelsesområder

Q-systemet er et *klassifiseringssystem* for bergmasser med hensyn til stabilitet av tunneler og bergrom. Med *bergmasseklassifisering* menes å kvantifisere en bergmasses kvalitet basert på definerte kriterier og kategorisere bergmassen i definerte grupper.

Q-verdien for en bergmasse er basert på seks parametere, som gir bergmassen en tallverdi og en tilhørende bergmasseklasse. Q-verdien brukes i hovedsak for klassifisering av bergmassen rundt bergrom og tunneler, men kan også brukes for kjernelogging og ingeniørgeologisk kartlegging i dagen. Kartlagt Q-verdi kan relateres til anbefalt permanent sikring gjennom et skjematisk bergsikringsdiagram. Sikringsdiagrammet er utviklet ved å registrere sammenheng mellom kartlagt Q-verdi og utført sikringsmengde. Ved å beregne Q-verdien får man type og mengde sikring som tidligere er brukt i bergmasser med lignende kvaliteter. Q-systemets sikringsangivelse hensyntar også bergrommets/tunnelens dimensjon og sikkerhetskrav i forhold til bruksområde. Q-systemet gir derfor en relevant veiledning for å bestemme nødvendig bergsikring og til dokumentasjon av bergmassens kvalitet.

Bergmassekarakterisering omfatter ingeniørmessig tilnærming for å definere og beskrive særtrekk ved den evaluerte bergmassen. En slik karakterisering bør benyttes ved krevende bergmasseforhold, hvor ren bergmasseklassifisering kan gi et ufullstendig beslutnings- eller dimensjoneringsgrunnlag for endelig bergsikring. Mer om dette, se kapittel 4.7 og 5.2.

Q-systemet har følgende ingeniørgeologiske bruksområder:

- Kartlegging i tunneler og bergrom (se kapittel 5)
- Feltkartlegging i dagen (se kapittel 6.2)
- Kjernelogging (se kapittel 6.3)

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 som utgangspunkt for forundersøkelser for underjordsanlegg vil derfor ofte være beheftet med større usikkerhet. Mer om dette, se kapittel 6.2 og 6.3.

1.3 Forutsetninger for bruk av Q-systemet

Det forutsettes at brukere av Q-systemet har grunnleggende kunnskap innen ingeniørgeologi og/eller geologi, er kjent med geologiske begreper gjennom yrkeserfaring eller studier. Bruk av Q-systemet for bestemmelse av bergsikring under oppfølging på anlegg betinger en opplæringsperiode for uerfarent personell.

Bergmasseklassifisering bygger på subjektive vurderinger, noe som gjør det naturlig med en viss spredning i bestemmelse av Q-verdier fra person til person. I større prosjekter, hvor det er flere ingeniørgeologer som bruker Q-systemet for bestemmelse av bergsikring, anbefales det derfor at det tidlig og underveis i prosjektet utføres en felles kartlegging for å kalibrere hverandres vurderinger. Dette vil sikre en mest mulig lik og omforent betraktning for hver Q-parameter ut fra gjeldende bergmasseforhold.

1.4 Begrensninger

Ved bruk av Q-systemet er det viktig å være bevisst på at systemets sikringsanbefalinger er veiledende, og at det alltid må gjøres ingeniørgeologiske vurderinger hvorvidt anbefalingene er gyldige for den evaluerte bergmassen. Dersom man velger å avvike fra sikringsanbefalingene bør dette dokumenteres og beskrives.

Q-systemet er empirisk med hensyn til permanentsikring av ulike typer bergmasser. Q-systemets parametere hensyntar mange ulike bergforhold. Det er likevel viktig å være klar over at hoveddelen av referansetilfellene som sikringsdiagrammet er basert på kommer fra ulike kombinasjoner med hardt og oppsprukket berg. Q-systemet kan ha begrensninger i å anbefale riktig sikringsbehov for følgende forhold:

- Svake bergarter / mykt berg med få eller ingen brudd

- Ekstremt oppsprukket bergmasseforhold (ekstremt dårlig bergmasse) og oppsprukket bergmasse med lav innspenning.
- Svært ugunstige geometriske forhold i oppsprekking
- Bergmasse med anisotropiske egenskaper (oppsprekking, bergspennings-situasjon)
- Tidsavhengige deformasjoner og opptreden av svellende berg.

Ved vurdering av sikringsbehov i nevnte bergmasseforhold hvor Q-systemet har få referansetilfeller eller begrensninger 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 dårlig berg ($Q < 1$). Mer detaljer om bruk av Q-systemet i svært krevende bergmasseforhold finnes i kapittel 4.7.

Det påpekes at Q-systemets sikringsanbefalinger er konservative, ettersom det i all hovedsak er basert på registreringer som ikke har sviktet/gått til brudd. Utviklingen innen sprøytebetongteknologi i perioden etter at mye av referanseregistreringene ble innhentet har også ført til at dagens sprøytebetong har høyere trykkfasthet og bedre energiabsorpsjon enn tidligere. Hensyn til arbeidssikring og levetid har også medført økt bruk av sprøytebetong i bergmasser med god kvalitet. Sikringsdiagrammet i Q-systemet hensyntar ikke levetidsbetraktninger med hensyn til sprøytebetongtykkelse. Det vil i flere tilfeller derfor sikres mer enn det Q-systemets sikringsanbefalinger angir ut fra kartlagt bergmassekvalitet.

2 Q-systemet og klassifisering av bergmasser

Q-systemet er et klassifiseringssystem som har til hensikt å klassifisere den vurderte bergmassens kvalitet og anbefale sikring for tunneler og bergrom. Høye Q-verdier indikerer god stabilitet, mens lave Q-verdier indikerer dårligere stabilitet. Q-verdien beregnes ut fra seks parametere ved hjelp av følgende ligning:

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

De seks parameterne er:

RQD = Oppsprekkingsfaktor (Rock Quality Designation)

J_n = Tall for sprekkeseett

J_r = Sprekkeruhetstall

J_a = Tall for sprekkefylling

J_w = Sprekkevannstall

SRF = Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)

De enkelte Q-parameterne bestemmes gjennom geologisk kartlegging med tabeller som gir numeriske verdier som blir bestemt ut fra en beskrevet situasjon. Detaljert veiledning for bestemmelse av hver Q-parameter er gitt i kapittel 3.

Bergmassens stabilitet påvirkes av flere parametere, men i hovedsak følgende tre faktorer: *oppsprekkingsgrad (blokkstørrelse)*, *friksjonsforhold langs sprekker* og *spenningsforhold*. Hvert ledd i formelen uttrykker de tre hovedfaktorene som beskriver stabiliteten i tunneler og bergrom:

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

$$\frac{J_r}{J_a} = \text{Friksjonsforhold langs sprekker}$$

$$\frac{J_w}{SRF} = \text{Spenningsforhold}$$

2.1 Oppsprekkingsgrad (RQD/J_n)

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 sprekketretninger systematisk i bergmassen, og de fleste av sprekkeene 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 avgrensede soner. 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.

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.

2.2 Friksjonsforhold langs sprekker (J_r/J_a)

I harde bergarter vil deformasjon oppstå som forskyvninger langs sprekkeflater. Friksjonsforholdene langs sprekkeene vil derfor være avgjørende for bergmassens stabilitet. Friksjonen og sprekkes skjærstyrke avhenger av planhet og ruhet på sprekkeflaten (J_r), og tykkelse og egenskaper til eventuell sprekkefylling (J_a). Svært ru og bølgete sprekker, sprekker uten fylling eller sprekker med bare en tynn, hard mineralfylling vil være gunstig for stabiliteten. På den annen side vil glatte og plane 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 sprekkeene av mindre betydning.

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.

2.3 Spenningsforhold (J_w/SRF)

Spennningene i en bergmasse avhenger vanligvis av dybde under overflaten, tektoniske forhold og anisotropiske forhold på grunn av topografi. Stabiliteten av et bergrom vil vanligvis avhenge av opptredende spenninger i forhold til bergmassens 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 spenningsene 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 (Grimstad & Barton, 1993).

Hvis tangentialspenningen overskrider bergartens trykkfasthet, kan det oppstå skvising. Anisotropien av bergmassen er ofte avgjørende når bergsikringen skal dimensjoneres.

Vannforhold i bergmassen vil også kunne påvirke den opptredende spenning. Vanntrykk kan redusere normalspenningen på sprekkeflatene slik at blokker lettere kan gli ut.

Vann vil også kunne påvirke friksjonsforhold langs bergsprekker ved å bløte opp og vaske ut mineralfyllingen slik at friksjonen på sprekkeflatene reduseres. Ved driving i bergarter som inneholder mineraler som lett løses opp eller utsettes for kjemisk forvitring i kontakt med vann, må det hensyntas ved stabilitetsvurderingen.

2.4 Q' (Q_{basis})

For å beskrive bergmassekvaliteten ved ingeniørgeologisk kartlegging i dagen eller ved kjernelogging, uten påvirkning av vanntrykk eller spenningsforhold, kan Q' eller Q_{basis} benyttes. J_w og SRF utelates i utregningen, slik at formelen blir:

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

Det påpekes at Q' ikke kan brukes for å dimensjonere bergsikring for et bergrom. For dette må den komplette Q -verdien benyttes, hvor J_w og SRF bestemmes.

3 Beregning av Q-verdien

3.1 Generelt

Q-verdien bestemmes ved ingeniørgeologisk kartlegging i bergrom under driving, fra kartlegging i dagen eller ved kjernelogging. Hver av de seks parameterne bestemmes ut fra definerte beskrivelser i tilhørende tabeller.

Med hensyn til dokumentasjon og kontroll av valgte parameterverdier anbefales det at man bruker verdiene som er fastsatt i tabellene for hver Q-parameter gitt i Tabell 3-1 til Tabell 3-6. Merk at noen Q-parametere har like verdier. Det bør derfor henvises til bokstavene som tilhører de valgte verdiene. På grunn av lokale variasjoner i bergmassen kan det for noen av Q-parametere ofte være krevende å sette én bestemt verdi for den kartlagte bergmassen. Ved slike tilfeller anbefales det derfor å gi Q-parametere et intervall, f.eks. $RQD = 50-70$. Ved bruk av intervall for Q-parametere vil man få en Q_{min} og Q_{max} . Dersom Q_{min} og Q_{max} gir forskjellig sikringsanbefaling (ulik sikringsklasse) må det tas en ingeniørgeologisk vurdering for hvilken Q-verdi som best representerer sikringsbehovet for den aktuelle bergmassen. Det er også mulig å differensiere sikringsmengden for ulike deler av tunnelprofilen dersom det fremstår som hensiktsmessig.

Under kartlegging vil det også være tilfeller hvor det er hensiktsmessig å dele inn kartleggingsområdet i flere delområder slik at Q-verdien innenfor hvert delområde blir forholdsvis ensartet (samme bergklasse i sikringsdiagrammet). Dette gjelder eksempelvis for kartlegging av tunnelsalver med store tverrsnitt. Det delpartiet med lavest Q-verdi vil normalt være bestemmende for hvilken sikringsklasse som skal benyttes. I tilfeller hvor svakhetssone(r) påvirker bergmassen som vurderes, må svakhetssonens karakter, utbredelse og geometri legges til grunn for bestemmelse av Q-verdi/bergsikring. Se kapittel 5.2 for mer om kartlegging av seksjoner og svakhetssoner.

3.2 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 3-1. RQD ble opprinnelig bestemt ut fra borekjerner, og er definert 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 3-1 RQD-verdier og antall sprekker per m³

1 RQD = Oppsprekkingsfaktor (Rock Quality Designation)			RQD
A	Svært dårlig	(> 27 sprekker per m ³)	10 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			

Antall sprekker per m³ med tilhørende RQD-klasse er også vist i Tabell 3-1. 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. Følgende formel kan da brukes for å anslå RQD-verdien (Palmström, 2005):

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

der J_v er antallet sprekker per m³.

På stoff bestemmes RQD ved å betrakte overflater med forskjellig orientering, heng, vegg og stufflate. Et vektet gjennomsnitt som gjenspeiler variasjonen i RQD brukes videre i beregningen av Q-verdien.

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.

3.2.1 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.

Man kan også få en indikasjon på RQD ved å undersøke blokkstørrelser i den utsprengte massen fra ei salve (røysa).

3.2.2 RQD i skifrige bergarter

I sterkt folierte eller skifrige bergarter kan det i noen tilfeller være tvil om hva som egentlig er sprekker. Et skifrichetsplan kan representere 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. I berg med lagdeling eller forskifring vil størrelsen på utsprengte blokker i røysa gi en god indikasjon på RQD-verdi. Skifrig berg gir i mange tilfeller betydelig større blokker enn skifricheten skulle tilsi. Dermed kan skiferaktige og lagdelte bergarter (eksempelvis fylitt, skifer, glimmerskifer) ha høye RQD-verdier, og det kan ofte være høyere RQD-verdier ved kartlegging i tunneler og bergrom enn ved feltkartlegging i dagen.

Borekjerner av eksempelvis leirholdige bergmasser 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.

3.2.3 RQD i svake bergarter og svakhetssoner

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 sprekke-ene, 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 ($RQD = 10$ i Q-systemet), selv om det ikke er sprekker til stede.

For vurdering av RQD i svakhetssoner henvises det til kapittel 5.2.3 «Kartlegging i svakhetssoner».

3.2.4 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 sprekkfyllingen som er avgjørende for om den er å betrakte som sprekk eller ikke. Eksempelvis kloritt, glimmer og leire vil vanligvis gi svak sammenbinding mellom sprekkflatene, og vil derfor kunne redusere RQD-verdien. Epidot, feltspat, kvarts og kalkspatfylling kan derimot binde sammen sprekker/svakheter i bergmassen og følgelig øke RQD-verdien. En enkel test for å vurdere RQD i slike tilfeller er å slå på berget med en hammer og se hvor sprekke-ene oppstår.

3.3 Tall for sprekkeseett (J_n)

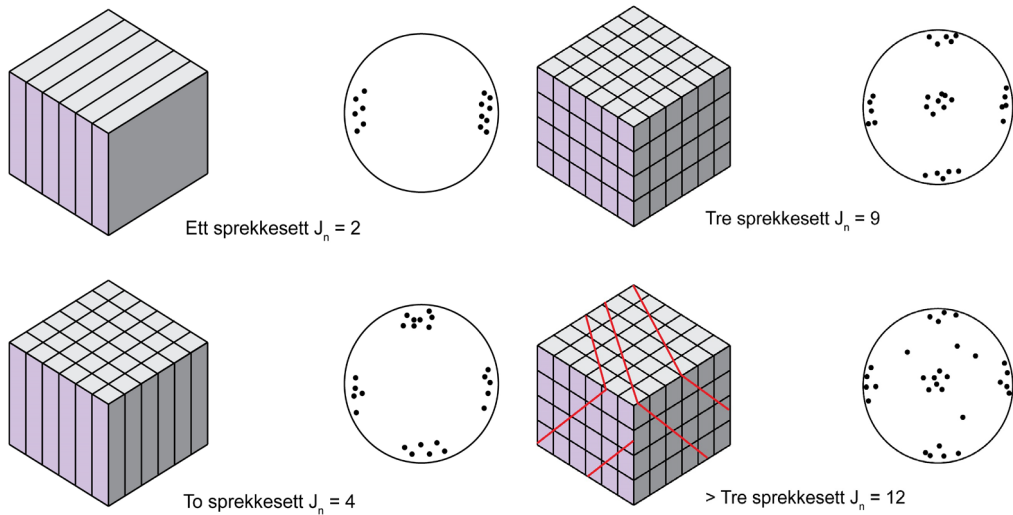
Størrelsen og formen på blokkene i en bergmasse avhenger av sprekkageometrien. Et sprekkeseett defineres som tilnærmet parallelle sprekker som opptrer systematisk med en karakteristisk sprekkeseettavstand. Sprekker som ikke framtrer systematisk eller som har en avstand på flere meter kalles tilfeldige sprekker. For å få en oversikt over sprekkemønsteret, kan man måle retningen for et visst antall sprekker og plote observasjonene i et stereonett, se Figur 3-1. De forskjellige sprekkeseettene vil da framstå som konsentrasjoner i stereonetet.

Når J_n -verdien bestemmes skal man kun inkludere sprekkeene som finnes på samme lokasjon og danner definerte blokker. I situasjoner der J_n -verdien bestemmes fra sprekkobservasjoner over lengre seksjoner (f.eks flere salver) i en tunnel, vil en oppsummering av alle sprekkeseettene føre til en J_n -verdi som er for høy. Dersom sprekkeseettavstanden til et sprekkeseett er større enn spennvidden eller høyden på tunnelen eller bergrommet, anses sprekkeene som tilfeldige. Man bør uansett alltid vurdere i hvor stor grad sprekkeene påvirker stabiliteten ved bestemmelse av J_n .

Tabell 3-2 gir parameterverdiene for J_n i henhold til antall sprekkeseett og tilfeldige sprekker. Merk at ved tunnelkryss og påhugg skal J_n multipliseres med hhv. 3 og 2. Hvor langt en forhøyet J_n som følge av tunnelkryss eller påhugg skal benyttes bør vurderes ut fra bergrommets dimensjon og bergmassekvalitet. En tommelfingerregel er 0,5-1 tunnel-diameter i godt berg.

Tabell 3-2 J_n -verdier

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



Figur 3-1 Fremstilling av forskjellige sprekkemønster med tilhørende stereonett.

3.3.1 J_n i forhold til sprekkelengde

Lengden på sprekkene inngår ikke direkte i Q-systemet, men har betydning for stabilitetsforholdene. Lange sprekker vil vanligvis ha større betydning for stabilitetsforholdene enn kortere sprekker dersom de er gjennomsettende i hele tverrsnittet i en tunnel/bergrom. Svært korte sprekker, ofte kalt stikk, kan ha betydning for lokalstabilitet som utfall 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 som kan påvirke stabilitetsforholdene, må de anses som et sprekkesett i den spesifikke lokasjonen der de opptrer.

I enkelte tilfeller er det nødvendig å også vurdere formen på blokkene som dannes og muligheten for at en blokk kan gli ut, og ikke bare se på antall sprekkeretninger/sprekkesett i bergmassen. Dersom bergmassen har flere sprekkesett som ikke krysser hverandre og danner blokker, kan J_n reduseres.

3.3.2 J_n i svakhetssoner

For vurdering av J_n i svakhetssoner henvises det til kapittel 5.2.3 «Kartlegging i svakhetssoner».

3.4 Sprekkeruhetstall (J_r)

Friksjonsforholdene langs en sprekk avhenger av to faktorer, *storskalaundulering* og *småskalaruhet*. I Q-systemet beskriver sprekkeruhetstallet, J_r , disse forholdene. Verdier

for J_r bestemmes ut fra Tabell 3-3 og/eller Figur 3-2. Storskalaundulering og småskalaruhet kan bestemmes ved følgende vurderinger:

Storskalaundulering: Sprekkeflatens karakter i skala på centimeter til desimeter, om den er plan, bølget eller hakkete. Det kan vurderes ved å legge en 1 m lang linjal på sprekkeflaten eller bruke en profilmal for å bestemme amplituden og bølgelengde. Se Figur 3-2 for eksempler på planhet for sprekkeflater. Storskalaundulering må vurderes i relasjon til avstanden mellom sprekkesett som kan gi avløsende blokker (blokkstørrelse) og sannsynlig glideretning. Om overflatene har bølger med bølgelengde langt større enn avstanden mellom avløsende sprekker vil ikke en bølgete storskalaundulering ha noen stabiliserende innvirkning ved skjærdeformasjon, og sprekken vil opptre som plane for blokkene i bergmassen.

Småskalaruhet: Angir teksturen/grovheten på en overflate i en skala på millimeter - centimeter, om den er ru, glatt eller glidespeil. Dette kan vurderes ved å føre en finger langs sprekkeflaten - friksjonen og kraften som skal til for å bevege fingeren langs sprekkeflaten kan da føles.

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/glidning er mest sannsynlig.

3.4.1 J_r i forhold til sprekkifylling

Når sprekkens ruhetstall bestemmes, må man også ta sprekkifyllingen i betraktningen. Hvis sprekken har en tykk fylling av et svakt mineral/leirfylling eller knust bergmateriale som forhindrer bergflatene å få kontakt ved skjærdeformasjon (kategori "c" i Tabell 3-3), har småskalaruheten 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 3-3), brukes samme sprekkeruhetstall som for sprekker uten fylling (kategori "a" i Tabell 3-3).

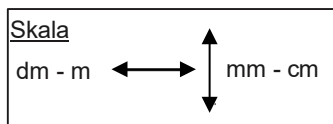
Tykkelsen som sprekkifyllingen må ha for å forhindre bergkontakt ved skjærdeformasjon er avhengig av både storskalaundulering og småskalaruhet. For bølgete, ru sprekker vil det kreves en tykkere fylling enn for plane, glatte sprekker for å unngå bergkontakt ved skjærdeformasjon. Se Figur 3-3 for illustrasjon.

Tabell 3-3 J_r – verdier. Beskrivelse henviser til småskalaruhet og storskalaundulering, i den rekkefølgen.

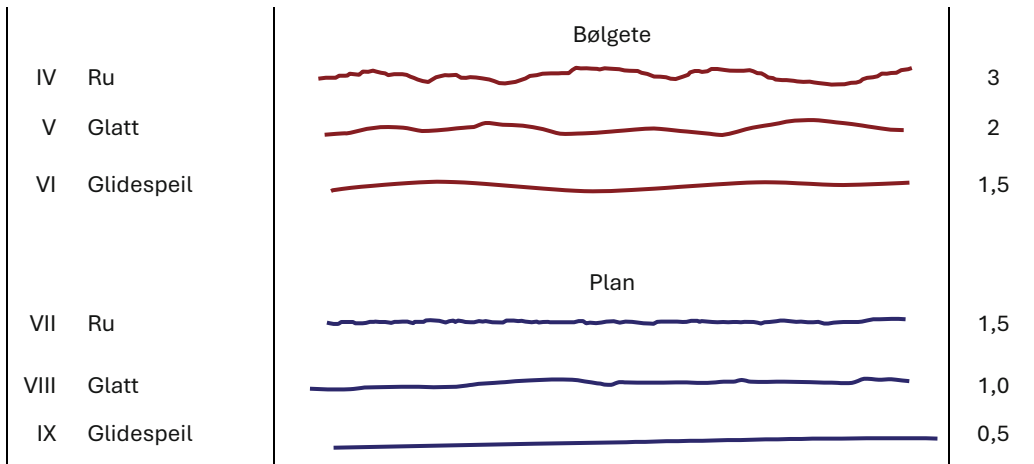
3 J_r = Sprekkeruhetstall		J_r
a) Direkte bergveggkontakt		
b) Bergveggkontakt før skjærbevegelsen har gått 10 cm		
A	Diskontinuerlige sprekker / ru, hakkete	4
B	Ru eller ujevn, bølgete / glatt, hakkete	3
C	Glatt, bølgete / glidespeil, hakkete	2
D	Glidespeil, bølgete	1,5
E	Ru, ujevn, plan	1,5
F	Glatt, plan	1
G	Glidespeil, plan	0,5
Merk: i) Legg til 1 hvis gjennomsnittlig avstand i det relevante sprekesettet er mer enn 3 m (avhenger av bergrommets tverrsnitt) ii) $J_r = 0,5$ kan brukes for plane glidespeil med lineasjon, forutsatt at lineasjonen er orientert i sannsynlig bevegelsesretning		
c) Ingen bergkontakt ved skjærbevegelse (tykk sprekefylling)		
H	Sone som inneholder leirfylling tykk nok til å forhindre bergkontakt ved skjærdeformasjon	1

3.4.2 J_r i forhold til sprekeorientering

Bølge- og ruhetsstrukturen på en sprekeflate har ofte en bestemt orientering slik at en sprekeflate 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.



		J_r
Hakkete		
I Ru		4
II Glatt		3
III Glidespeil		2



Figur 3-2 Eksempler på sprekkeflater med forskjellige J_r -verdier. Lengden på hvert profil er ca. 1 m. (Modifisert fra ISRM, 1978)

3.4.3 J_r i bergmasser uten sprekker

Når deformasjonen i bergmassen avhenger av sprekkenene, bør J_r gis verdier i henhold til Tabell 3-3. 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 kan avhenge av forholdet mellom styrke og spenning ($J_r = 1$, kategori H i Tabell 3-3). Faktoren SRF er den mest relevante Q-parametere for å beskrive denne situasjonen (SRF-kategori M-N), se Tabell 3-6).

I de tilfellene der svakhetssonene eller sprekkefyllingene er så tykke at kontakt mellom bergflatene forhindres under skjærdeformasjon, settes J_r lik 1.

Hvis bare et par sprekker i det aktuelle sprekkesettet er eksponert i bergrommet på et visst punkt, brukes $J_r + 1$. Merk at J_r -verdien da vil kunne få en annen verdi enn de som er oppgitt i Tabell 3-3 (f.eks. $J_r = 1,5 + 1 = 2,5$).

3.4.4 J_r i svakhetssoner

For vurdering av J_r i svakhetssoner henvises det til kapittel 5.2.3 «Kartlegging i svakhetssoner».

3.5 Tall for sprekkefylling (J_a)

I tillegg til sprekkenes ruhetsforhold, er sprekkefyllingen avgjørende for friksjonen langs sprekkenene. For sprekkefyllingen er det to faktorer som er avgjørende; tykkelse og styrke.

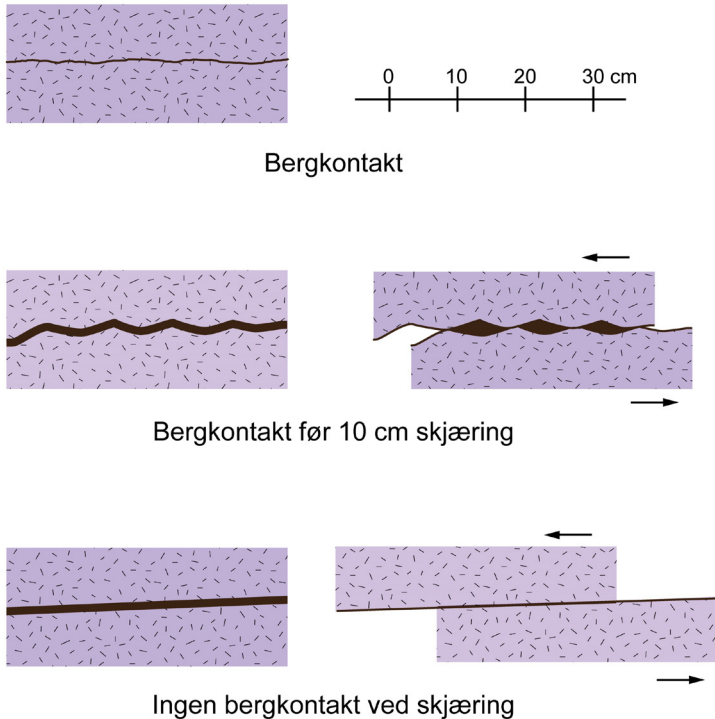
Styrken avhenger av mineralsammensetningen. Tall for sprekkefylling er inndelt i følgende tre kategorier:

Kategori “a” - bergkontakt

Kategori “b” - bergkontakt før 10 cm skjærdeformasjon

Kategori “c” - ingen bergkontakt ved skjærdeformasjon

Disse kategoriene er illustrert i Figur 3-3, og det er gitt detaljerte beskrivelser i Tabell 3-4.



Figur 3-3 Sprekker med og uten bergkontakt

Tabell 3-4 J_a -verdier, med erfaringsbasert sammenheng med residual friksjonsvinkel ϕ_r .

4	J_a = Tall for sprekkefylling	Φ_r	J_a
a) Bergkontakt (ingen mineralfylling, bare beleg)			
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

4	J_a = Tall for sprekkefylling	Φ_r	J_a
D	Siltig eller sandig sprekkebelegg, litt leir (ikke svellende).	20-25°	3
E	Oppbløtelig leirbelegg med lav friksjon, f.eks. kaolinit 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 prosentvist 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 prosentvist innhold av svelleleire.	6-12°	13-20

Klassifiseringen av de forskjellige kategoriene a, b og c avhenger både av sprekkeflatenes ruhet 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 3-4.

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.

3.5.1 Bestemmelse av J_a ut ifra sprekkefylles mineraltype

Mineraltypen er avgjørende for J_a -verdien. Det vil være avgjørende om mineralfyllesingen blir svakere ved tilgang på vann. Dette kan testes ved å plassere en prøve av mineralet i vann for å se om det går i oppløsning.

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 sprekkefyllesingen. Svelleleire er mest ugunstig for stabiliteten. En analyse av leirfyllesingen kan derfor være nødvendig. Analyser kan utføres ved å bruke ganske enkle laboratorietester eller mer avansert røntgen-diffraksjon. 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 opptrer svelleleire vanligvis blandet med andre mineraler og bergfragmenter.

3.5.2 Sammenheng mellom friksjonsvinkel og J_a

Ru, bølgete og uforvitrede sprekkeflater med bergkontakt (J_a -kategori "a"), vil normalt gi betydelig motstand ved skjærdeformasjon, noe som er gunstig for stabiliteten. Når bergsprekker har tynt leirbelegg og -fylling (J_a -kategori "b"), blir skjærstyrken vesentlig redusert. Dersom bergkontakt oppnås etter litt skjærforskyvning, kan det være tilstrekkelig for å motvirke blokkutfall eller kollaps under driving. Hvis det ikke oppstår noen bergkontakt ved skjæring (J_a -kategori "c"), vil dette være ugunstig for stabiliteten.

Likningen $\tan^{-1}(J_r/J_a)$ gir et grovt estimat til den effektive friksjonsvinkelen, φ' , som en kan forvente for de forskjellige kombinasjoner av sprekkeruhet og sprekkematerialer (Barton et al. 1974). Merk at effektiv friksjonsvinkel $\varphi' = \varphi_b + i$, hvor φ_b er basis friksjonsvinkel (målt på en plan sprekkeoverflate, ofte ved tilt-forsøk), og i er dilatansvinkel/ruhetensvinkel (avhengig av storskalaundulering og småskalaruhet til sprekkeoverflate). Likningen $\tan^{-1}(J_r/J_a)$ bør kun brukes når det er bergkontakt mellom sprekkeflatene ($J_a \leq 4$).

I Tabell 3-4 er det oppgitt en erfaringsbasert sammenheng mellom J_a -verdier og residual friksjonsvinkel, φ_r . Merk at residual friksjonsvinkel alltid er lavere eller lik den effektive friksjonsvinkel, og at verdier for residual friksjonsvinkel gitt i Tabell 3-4 og verdier for effektiv friksjonsvinkel fra $\tan^{-1}(J_r/J_a)$ ikke kan sammenlignes direkte.

For mer nøyaktig fastsettelse av basis friksjonsvinkel anbefales det å gjøre tilt-forsøk eller direkte skjærforsøk i laboratorium, iht. standard metoden gitt av ISRM (Alejano et al., 2018, Muralha et al., 2014). Mer nøyaktig beregning av residual friksjonsvinkel kan gjøres ved bruk av likning for residual friksjonsvinkel gitt i Barton og Choubey (1977).

3.5.3 J_a i svakhetssoner

For vurdering av J_a i svakhetssoner henvises det til kapittel 5.2.3 «Kartlegging i svakhetssoner».

3.6 Sprekkevannstall (J_w)

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

Sprekkevannstallet bestemmes på grunnlag av innlekkasjer og vanntrykk i bergmassen, se Tabell 3-5. De laveste J_w -verdiene ($J_w < 0.2$) vil representere store stabilitetsproblemer.

Tabell 3-5 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 sprekefyllinger (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 sprekefyllinger	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		

3.6.1 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 sprekevannstallet. 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.

3.7 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. Det kan ofte gå litt tid før spenningsfenomen blir synlige.

Mens intensiv avskalling og bergslag kan oppstå umiddelbart etter berguttak, kan langsommere deformasjoner som utvikling av nye sprekker eller plastisk deformasjon av svake bergmasser dannes etter flere dager, uker eller måneder etter sprenging. I slike tilfeller kan en SRF-verdi fastlagt fra kartlegging av bergrommet umiddelbart etter utsprenning være feilaktig.

Før SRF-verdien kan fastsettes må kategori med hensyn til spenningssituasjon fra beskrivelsen i Tabell 3-6 bestemmes. Spenningssituasjonen er klassifisert i fem kategorier, i samsvar med Tabell 3-6. Detaljert informasjon for hver av SRF-kategoriene er gitt i påfølgende underkapitler:

- Svakhetssoner som krysser bergrommet som enten kan eller ikke kan overføre spenninger i omkringliggende bergmasser.
- Kompetent berg med lave eller gunstige spenningsforhold.
- Massivt berg med stabilitetsproblemer på grunn av høye spenninger.
- Skviseberg med plastisk deformasjon av inkompetent berg under påvirkning av moderate eller høye bergspenninger.
- Svellende berg; kjemisk svelleaktivitet som avhenger av tilgangen på vann.

SRF kan estimeres ut 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 overdekningen og topografiske egenskaper eller ved hjelp av generell erfaring fra den samme geologiske og geografiske regionen. Mer detaljer om sammenheng mellom spenning-styrke-forhold og SRF i massivt berg er gitt i kapittel 3.7.3.

Tabell 3-6 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 kategori M og N.	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

6 SRF = Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)		SRF
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 berg med lave eller gunstige spenningsforhold, hovedsakelig massivt berg.		SRF
F	Lave spenninger, nær overflaten, åpne sprekker	2.5
G	Middels spenninger, gunstige spenningsforhold	1
Merk: ii) Når dybden av hengen under overflaten er mindre enn spennet; forestås det at SRF økes fra 2,5 til 5 for slike tilfeller (se F)		
c) Kompetent, hovedsakelig massivt berg, spenningsproblemer		SRF
H	Høye spenninger, svært tett struktur. Vanligvis gunstig for stabiliteten, men kan også være ugunstig for stabiliteten, avhengig av retningen på spenningene i forhold til sprekkdannelse/svakhetsplan	0,5-2 2-5*
J	Moderat avskalling etter > 1 time i massivt berg	5-50
K	Avskalling og bergslag etter noen minutter i massivt berg	50-200
L	Intens bergslag og umiddelbar dynamisk deformasjon i massivt berg	200-400
Merk: iii) Se kapittel 3.7.3 og Grimstad & Barton (1993) for detaljer om SRF og spenning-styrke forhold.		
d) Skvisenberg: plastisk deformasjon i ikke kompetent berg under påvirkning av høyt trykk		SRF
M	Moderat skvisende bergtrykk	5-10
N	Intenst skvisende bergtrykk	10-20
Merk: iv) For bestemmelse av skvisende bergforhold henvises til relevant litteratur (dvs. Singh et al., 1992 og Bhasin og Grimstad, 1996)		
e) Svellende berg: kjemisk svelleaktivitet ved tilgang på vann		SRF
O	Moderat svelling	5-10
P	Intens svelling	10-15

3.7.1 SRF ved svakhetssoner som krysser bergrom

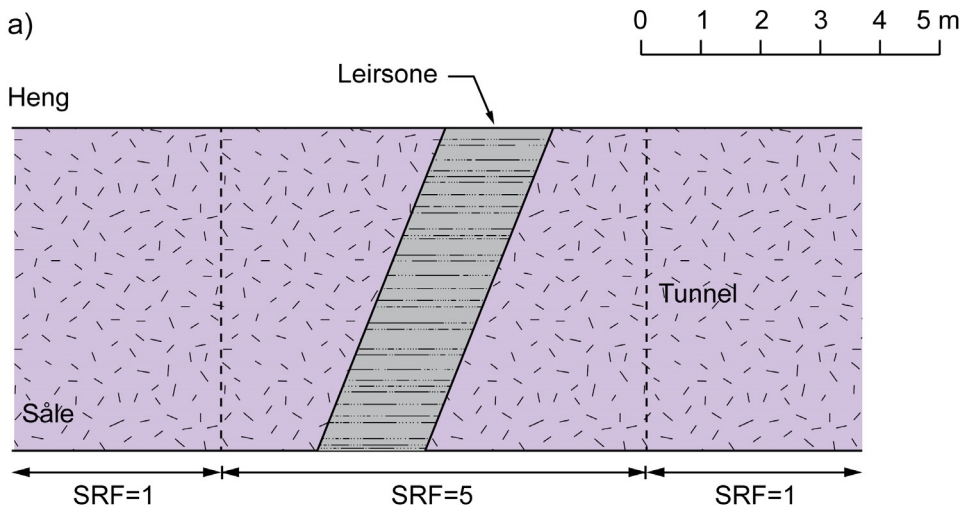
Rundt en svakhetsone kan det lokalt oppstå en omfordeling av bergspenningene. I Q-systemet skal en økt SRF-verdi redusere Q-verdien slik at stabiliteten ivaretas ved bestemmelse av bergsikring. Hvis svakhetssonen er av en slik karakter at spenningene ikke kan overføres, kan en spenningskonsentrasjon oppstå på en side av sonen mens avspenning kan oppstå på den andre siden. I en situasjon med lav spenning vil en svakhetsone 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 “svakhetszone” bør brukes for hele seksjonen. I slike tilfeller bør kategori A, B eller D i Tabell 3-6 a) brukes. Dersom det er skviseberg til stede, bruk M eller N i Tabell 6 c). Ved svellende bergforhold, bruk O eller P i Tabell 3-6 d).

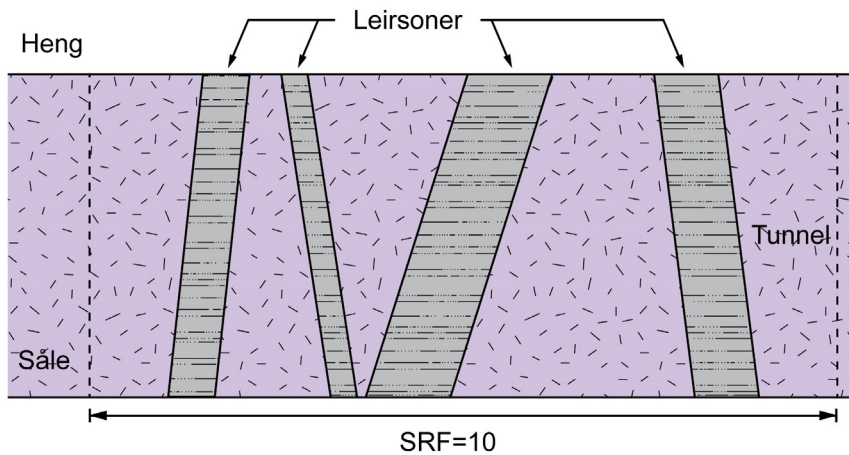
For å oppdage om berget er avspent eller ikke kan man slå på berget med en hammer eller et renskespett. Hvis det kommer en hul (bom) lyd fra slaget og små blokker lett løsner, kan berget anses som dårlig innspent og en SRF-verdi større enn 1 kan fastslås. Merk at en hul lyd kan framkomme også hvis man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

En visualisering av svakhetssonene er gitt i Figur 3-4. I Figur 3-4 a) krysser tunnelen én leirsoner. I denne sonen og i nærheten av denne sonen er normalt spenningssituasjonen endret. En SRF-verdi på 5 må brukes for et område som påvirkes av sonen. I Figur 3-4 b) krysser tunnelen flere leirsoner, og en SRF-verdi på 10 må brukes for denne seksjonen. Utstrekningen av området som skal ha en forhøyet SRF-verdi ved krysning av svakhets-soner(r) avhenger av kvaliteten på bergmassen utenfor svakhetssonen, bergrommets geometri og sonens mektighet og orientering. Normalt kan forhøyet SRF utenfor svakhetssonen brukes i en utstrekning på ca. 0,5-1,0 x tunnelens spennvidde.

For generelle vurderinger knyttet til kartlegging av svakhetssoner, se kapittel 5.2.3.



b)



Figur 3-4 SRF-verdier relatert til enkeltstående og flere svakhetssoner

3.7.2 SRF i hardt, kompetent berg med lave eller gunstige spenningsforhold

Moderate bergspenninger vil generelt være mest gunstig for stabiliteten, og SRF vil da være lik 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.

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 5,0 når spennet i bergrommet er større enn mektigheten av berget over. Dårlig stabilitet grunnet lav innspenning kan også forekomme dersom et bergrom drives i nærheten av et eksisterende bergrom.

3.7.3 SRF i hardt, kompetent berg, bergspenningsproblemer

I kompetent og relativt massivt berg kan SRF-verdien estimeres når forholdet σ_0/σ_1 eller σ_0/σ_c er kjent. Sammenhengen spenning-styrke forhold er vist i Tabell 3-7. Merk at denne sammenhengen ikke må brukes ukritisk. Datagrunnlaget kommer i hovedsak fra massive bergmasser med lite oppsprekking ($RQD/J_n > 20$), under høye spenningsforhold (Grimstad & Barton, 1993).

Bergslag/avskalling kan forekomme ved svært høye spenninger. Intensiteten av spenningsproblemer og hvor raskt etter utsprenngning stabilitetsproblemer begynner, vil være avgjørende for SRF-verdien. Kategori J i Tabell 3-7 beskriver moderate spenningsproblemer mer enn en time etter utsprenngning. Hvis problemene begynner omkring en time etter utsprenngning, 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.

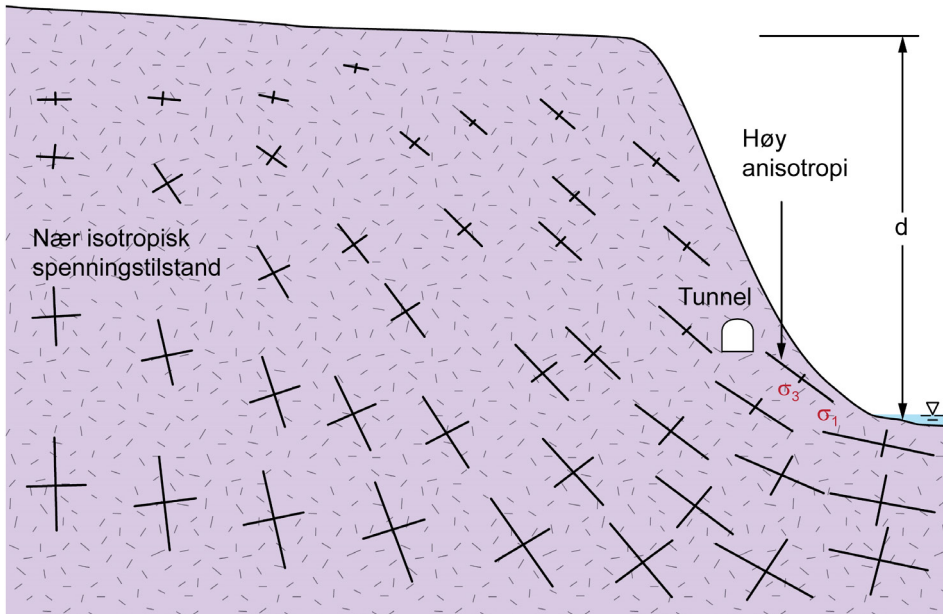
Dersom problemer med intens avskalling oppstår umiddelbart etter utsprenkning, vil SRF-verdien være rundt 200. Hvis det går noen minutter før avskalling oppstår eller den er mindre intens, vil SRF være 50-150. I ekstreme situasjoner som finnes i tilfelle L (SRF = 200–400) begynner problemene med intens avskalling umiddelbart etter utsprenkning, og langsiktige deformasjoner kan forventes til tross for passende bergsikring. I tilfeller med $SRF > 50$ kan det være nødvendig å sikre stoffen før en ny salvesyklus settes i gang.

Tabell 3-7 SRF-verdier og spenning-styrke forhold for kategori c)

7 SRF = Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)				SRF
c) Kompetent, hovedsakelig massivt berg, spenningsproblemer		σ_c / σ_t	σ_θ / σ_c	SRF
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: * For sterkt anisotropiske urørte spenningsfelt (om målt): når $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$, reduser σ_c til $0,75 \sigma_c$. Når $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, reduser σ_c til $0,5 \sigma_c$, 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)				

Høye spenninger som fører til umiddelbar avskalling og sprakeberg fører også vanligvis til langsiktig deformasjon av bergmassen gjennom utvikling av nye sprekker innover i bergmassen, inntil ny stabilitet er oppnådd. Omfanget av avskallingen avhenger av intensiteten og av spennet i bergrommet. En anisotropisk spenningssituasjon er spesielt ugunstig når spenningene er høye og kun deler av bergrommets periferi er utsatt for spenningsinduserte stabilitetsproblemer. Dette frembringer ofte et asymmetrisk tverrprofil, og stabilitetsproblemene øker med økende spenning.

Spenninger i berget kan være indusert av høye dalsider som gir høye største hovedspenninger, høye tangentialspenninger og anisotropiske spenninger, som vist i Figur 3-5. Fjellsidens høyde over drivenivå sammenlignet med bergets trykkfasthet kan være en god korrelasjon for å estimere SRF.



Figur 3-5 Visualisering av en høy dalside med høye anisotriske spenninger

3.7.4 SRF i skviseberg

I tilfeller med høye spenninger kombinert med oppsprukket eller myk/duktile bergmasse, er bergmassens trykkfasthet mer avgjørende enn trykkfastheten av intakt berg. I slike tilfeller er det mer sannsynlig at det oppstår en skvisseffekt enn avskalling, kategori d i Tabell 3-6. “Skviseberg” betyr bergmasser der plastisk deformasjon finner sted under påvirkning av høye spenninger i mykt eller knust berg når spenningene overskrider bergmassens styrke. Under slike forhold er tidsavhengigheten til deformasjonene og lastpåkjenningen til bergsikringen med tilhørende riktig tidspunkt for installasjon av sikringen svært viktig. Midlertidige og permanente funksjoner av bergsikringen må analyseres.

I myke bergarter med få sprekker (eksempelvis kleberstein), avhenger stabiliteten av forholdet mellom bergartens trykkfasthet og bergspenningene. I slike situasjoner anbefales Q-systemet supplert av andre metoder som deformasjonsmålinger og/eller numerisk simulering for fastsetting av nødvendig bergsikring.

3.7.5 SRF i svellende berg

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 over-

gang 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.

I tilfeller med svelling er det også viktig å undersøke årsaken til svellingen. I for eksempel alunskifer betinger svelling eksponering av oksygen og vann. I slike tilfeller kan det være hensiktsmessig å forsegle bergoverflaten slik at man unngår svellingen, istedenfor å dimensjonere bergsikringen mot svelling.

Merk at SRF-kategoriene O og P kun skal brukes i tilfeller med svellende berg, og ikke ved tilfelle av svellende sprekkefyll. Ved tilfeller av svellende leirmineraler i sprekkefyll skal J_a brukes, se Tabell 3-4.

4 Bruk av Q-systemet for å vurdere bergsikring

Q-verdien og de seks tilhørende parameterverdiene gir en klassifisering av bergmassen. En bestemt Q-verdi tilsier et bestemt stabilitetsforhold som vil kreve et bestemt sikringsomfang ved en bestemt dimensjon av et bergrom. Basert på analyser fra eksisterende tunneler og bergrom er det dokumentert en sammenheng mellom Q-verdi og utført permanent sikring (se Barton et al. 1974 og Grimstad & Barton, 1993). Dette kan brukes som veiledning for dimensjonering av bergsikring i bergrom.

4.1 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; sikkerhetskravene til bergrommet og dimensjonene, dvs. spennet eller høyden av bergrommet.

Sikringsbehovet vil generelt øke med økende spennvidde og økende høyde på veggene. For dimensjonering av sikring med bruk av Q-systemet skal spennvidde brukes for bestemmelse av sikring i heng og vederlag, mens for bestemmelse vegg sikring skal vegg høyden benyttes (se kapittel 4.2.2) I tilfeller hvor vegg høyden er større enn, spennvidden bør vegg høyden brukes for dimensjonering av sikring i heng og vederlag. I tilfeller hvor man driver en tunnel eller berghall med delt tverrsnitt, så skal endelig vegg høyde eller tverrsnitt være dimensjonerende for prosjektering av bergsikring. Ved store dimensjoner (stort tverrsnitt eller høye vegger) vil numerisk modellering være et viktig supplement for endelig prosjektering av bergsikring.

Sikkerhetskravene vil avhenge av anleggets formål. En vegttunnel eller en kraftstasjon i berg har behov for et høyere sikkerhetsnivå enn en vanntunnel eller en midlertidig stoll i en gruve. I Q-systemet brukes faktoren ESR (Excavation Support Ratio) for å uttrykke bergrommets sikkerhetskrav, se Tabell 4-1. En lav ESR-verdi tilsier behov for et høyt sikkerhetsnivå, mens høyere ESR-verdier indikerer at 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 4-1.

Det anbefales å bruke $ESR = 1,0$ når $Q \leq 0,1$ for anleggstypene B, C og D, Tabell 4-1. Grunnen til dette er at bergmassens egenskaper gir såpass redusert stabilitet ved så lave Q-verdier at sikring bør dimensjoneres uavhengig av bergrommets sikkerhetskrav.

Spennvidden (eller vegg høyden) koblet sammen med ESR gir den “ekvivalente dimensjonen”, D_e , på følgende måte:

$$\frac{\text{Spennvidde eller høyde (m)}}{ESR} = \text{Ekvivalent dimensjon (D}_e\text{)}$$

Tabell 4-1 ESR-verdier. I de fleste tilfeller er det kategori E (ESR = 1, uthevet) som benyttes

8	Type underjordsanlegg	ESR
A	Midlertidige gruveåpninger osv.	3-5
B	Vertikale sjakter*: i) sirkelformede seksjoner ii) rektangulær / firkantet seksjon * Avhenger av formålet. Kan være lavere enn angitte verdier.	2,5 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 veg- og togstunnel, trykkammer, tilkomsttunneler, kloakktunneler, osv.	1,3
E	Kraftstasjoner, lagringsrom, vannbehandlingsanlegg, større veg- og togstunnel, sivilforsvarkammer, portaler, kryssinger, osv.	1,0
F	Underjordiske atomkraftverk, togstasjoner, offentlige anlegg og sportsanlegg, fabrikker osv.	0,8
G	Svært viktige bergrom og tunneler uten tilgang for inspeksjon og vedlikehold.	0,5

4.1.1 Levetidsbetraktninger i Q-systemet

Q-systemet tar ikke primært hensyn til levetidsbetraktninger. Ulike tidsavhengige effekter som kan forringe bergsikringens ytelse bør alltid analyseres separat. Noen bergtekniske forhold er tidsavhengige, spesielt egenskaper ved bergmassen som kan gi økt belastning eller påkjenning som svellende berg, svellende mineraler i sleppematerialer, høye bergspenninger som gir sprakeberg, bergslag eller skvising. Q-systemet hensyntar slike forhold til en viss grad for prosjektering av den permanente sikringen gjennom parameterstudien av J_a og SRF.

Levetidsbetraktninger som følger av geokjemisk eksponering må foretas separat og uavhengig av Q-systemets anbefalinger.

Tunneler utsatt for ulike typer fysisk og kjemisk eksponering kan medføre spesielle krav til materialvalg og sikringsløsninger med hensyn til levetid. For flere typer samferdstunneler og samfunnskritisk infrastruktur forlanges det som grunnregel fullt innstøpte bergbolter og en minimumstykkelse av sprøytebetong på 80 mm og i saltvannssonen 100 mm minimumstykkelse med maksimalt vann/bindemiddelforhold på 0,40. Dette vil ha en konsekvens for bergsikringens materialeegenskaper og funksjon. Q-systemet hensyntar ikke effektene på anbefalt sikringsnivået av slike betraktninger om levetid og eksponeringsklasser. Slike effekter må betraktes separat i prosjektering av bergsikring.

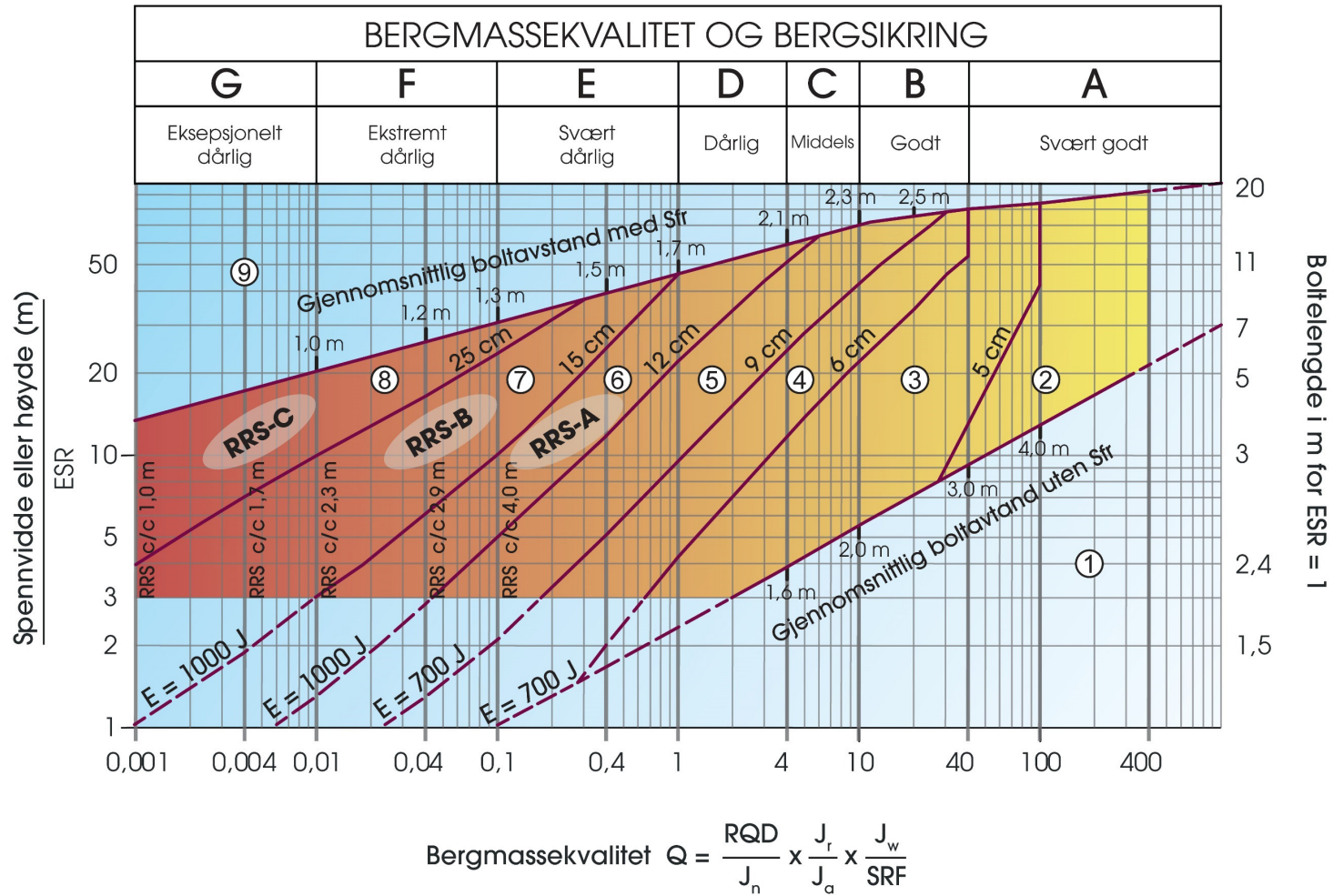
4.2 Bergsikringsdiagram

Q-verdien og ekvivalent dimensjon (D_e) er bestemmende for dimensjonering av permanent sikring. I sikringsdiagrammet vist i Figur 4-1, er Q-verdiene angitt langs den horisontale akse og ekvivalent dimensjon, D_e , langs den vertikale akse på venstre side.

Under utviklingen av sikringsdiagrammet har alle de studerte sikringskombinasjoner av Q-verdi og D_e i ferdig sikrede tunneler blitt plottet i et tilsvarende diagram som vist i Figur 4-1. Dette har gitt grunnlaget for den inndeling diagrammet har med hensyn på sikringstype. Sikringsdiagrammet er basert på en gjennomsnittsbetraktning av dataene fra de analyserte underjordsanleggene. Fra de fleste av de undersøkte anleggene er det konservativt utført bergsikringsnivå, men i enkelte tilfeller har det skjedd kollapser, enten under driving eller etter at anlegget er tatt i bruk. De undersøkte tilfellene av kollapser refererer seg til situasjoner der svakhetssoner har vært oversett eller ikke grundig nok kartlagt, slik at det nødvendige grunnlaget for vurdering av bergsikring ikke har foreligget.

Merk at diagrammet ikke er delt i definerte sikringsklasser, men viser en kontinuerlig skala både for bolteavstand og sprøytebetongtykkelse. Sikringsdiagrammet gir 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. Ved spesielle problemstillinger og krevende bergmasseforhold anbefales en egen/supplerende vurdering for å bestemme hvilken bergsikring som er nødvendig. Dette er beskrevet ytterligere i kapittel 4.7



Sikringskategorier

- ① Usikret eller spredt bolting
- ② Spredt bolting
- ③ Systematisk bolting (B), fiberarmert sprøytebetong (Sfr), 5-6 cm, **B + Sfr**
- ④ Fiberarmert sprøytebetong og bolting, 6-9 cm, **Sfr (E700) + B**
- ⑤ Fiberarmert sprøytebetong og bolting, 9-12 cm, **Sfr (E700) + B**
- ⑥ Fiberarmert sprøytebetong, 12-15 cm + bolting + sprøytebetongbue, **Sfr (E1000) + B + RRS-A**
- * ⑦ Fiberarmert sprøytebetong > 15 cm + bolting + sprøytebetongbue, **Sfr (E1000) + B + RRS-B**
- * ⑧ Fiberarmert sprøytebetong > 25 cm + bolting + sprøytebetongbue, **Sfr (E1000) + B + RRS-C**
- * ⑨ Spesiell vurdering

Boltavstand er hovedsaklig basert på Ø20 mm

B = bolting

Sfr = fiberarmert sprøytebetong

E = Energiabsorpsjon i fiberarmert sprøytebetong

RRS = Sprøytebetongbue

ESR = Bergrommets sikkerhetskrav

Områder med prikkede linjer mangler empiriske data

* For sikringskategori 7-9: Forslag til omfang av bergsikring må betraktes som veiledende.
Det bør gjøres ingeniørgeologiske og bergmekaniske vurderinger i tillegg (se kapittel 4.7).

RRS - avstand relatert til Q-verdi

RRS-A	Si30/6 Ø16 - Ø20 (spennvidde 10m)
	D40/6+4 Ø16-20 (spennvidde 20m)
RRS-B	Si35/6 Ø16-20 (spennvidde 5m)
	D45/6+4 Ø16-20 (spennvidde 10m)
RRS-C	D55/6+4 Ø20 (spennvidde 20m)
	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 = RRS avstand, senter - senter

Figur 4-1 Anbefaling for permanent sikring basert på Q-verdier og spennvidde/ESR

Kravet til sprøytebetongtykkelse øker med avtakende 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 deformasjoner, for eksempel ved høye spenninger, bør fiberarmert sprøytebetong (Sfr) 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 bolt-avstand 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. Det påpekes at 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 kreves en ingeniørgeologisk 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 (gitt $ESR = 1$), men her bør det alltid følge en egen vurdering av hva som er nødvendig. Ved spesielt ugunstig sprekkegeometri vil det være nødvendig med lengre bolter enn anbefalt i diagrammet.

4.2.1 Sprøytebetong ved høye Q-verdier

Etter dagens praksis er sprøytebetongbruken betydelig høyere enn referansetilfellene som ligger til grunn for sikringsdiagrammet. Dette gjelder spesielt i bergklasser som tidligere ikke medførte bruk av sprøytebetong. Ulike byggherrer har ulike krav og ulik praksis angående akseptabel minimumssikring, også i de gode bergmasseklassene. Q-systemets anbefalinger i bergmasseklassene A og B refererer seg til bergsikringsbehov ut fra bergmassestabilitet og detaljstabilitet av bergoverflaten i et bergrom. Der det anbefales bergbolter til bergsikring uten bruk av sprøytebetong i Q-systemets sikringsdiagram, er rensk av bergoverflaten også å betrakte som sikringsmetode.

4.2.2 Veggsikring

Sikringsdiagrammet gjelder hovedsakelig for hengen og vederlag i tunneler og bergrom. Sikringsnivået for veggene er vanligvis mindre for Q-verdier > 1 . Når Q-systemet benyttes for veggsikring, brukes vegg høyden i stedet for spennvidde i utregning av D_e (slik at boltelengden reduseres). Den faktiske Q-verdien er justert som vist i Tabell 4-2 (slik at sprøytebetongtykkelse reduseres). Verdien som framkommer etter denne omregningen brukes direkte i diagrammet i Figur 4-1 for å fastslå nødvendig veggsikring. Plasseringen

og retning av hver bolt bør uansett tilpasses sprekkegeometrien. Merk at når veggghøyde > spennvidde, så brukes samme Q-verdi for sikring av hele profilet.

Tabell 4-2 Omregning av faktiske Q-verdier til Q-verdier for dimensjonering av veggsikring

9 Dimensjonering av veggsikring		
I bergmasser med god kvalitet	$Q > 10$	Multipliser Q-verdiene med en faktor på 5.
I bergmasser med dårlig-middels kvalitet	$1 < Q < 10$	Multipliser Q-verdiene med en faktor på 2,5. I tilfeller med høye spenninger i berget, bruk den faktiske Q-verdien.
I bergmasser med svært-eksepsjonelt dårlig kvalitet	$Q < 1$	Bruk faktisk Q-verdi.
Veggghøyde > spennvidde	Gjelder for alle Q-verdier	Bruk faktisk Q-verdi.

4.3 Armerte sprøytebetongbuer (RRS)

I områder med bergklasser E, F og G (sikringskategori 6-8), har armerte sprøytebetongbuer (RRS, Reinforced Ribs of Sprayed concrete) i de aller fleste tilfeller erstattet full utstøpning. Buene konstrueres ved hjelp av kamstålstenger (Ø16 mm eller Ø20 mm), sprøytebetong og bergbolter, se Figur 4-2. Ved bruk av 20 mm kamstålstenger må stengene forhåndsbøyes for å tilpasses tunnelprofilet. Tykkelsen på buene, avstanden mellom dem samt antall og diameter på armeringsstengene tilpasses dimensjonene på bergrommet og bergmassens kvalitet i henhold til sikringsdiagrammet.

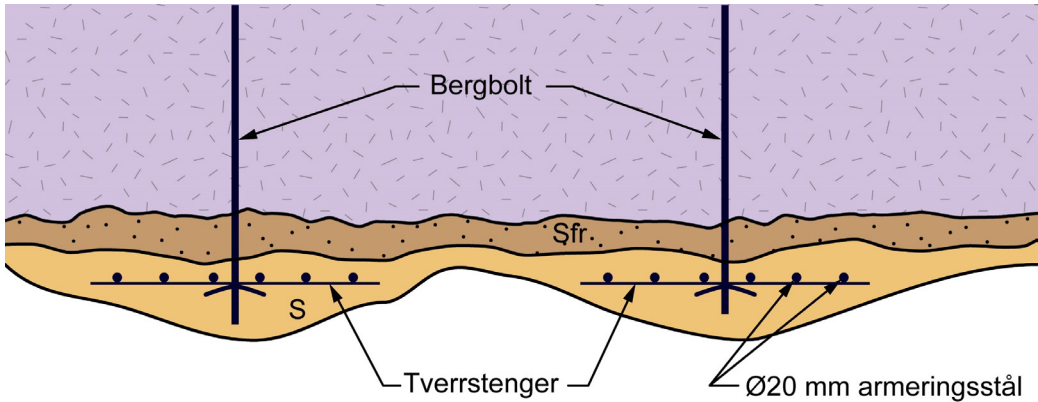
I Norge har man bred erfaring i bruk av sprøytebetongbuer under vanskelige bergforhold. I sikringsdiagrammet er det oppgitt tre RRS-kategorier: RRS-A, RRS-B og RRS-C. Retningslinjer for bruk av armerte sprøytebetongbuer i forhold til Q-verdier og ekvivalente dimensjoner (D_e) og spennvidde for bergrom er gitt i sikringsdiagrammet i Figur 4-1 og tilhørende forklaringstekst.

I beskrivelsen for sikringsdiagrammet er følgende forkortelser brukt:

- Sfr betyr fiberarmert sprøytebetong (Fibre-reinforced sprayed concrete)
- “Si” betyr enkelt lag med kamstålstenger (single)
- “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

Merk at i sikringsdiagrammet følger anbefalinger for armerte sprøytebetongbuer sikringsklassene, dvs. at de samme dimensjonene for buer følges diagonalt i diagrammet. Innenfor hvert område vil det være et intervall der den foreslåtte avstanden mellom buene

varierer. Det må foretas en ingeniørgeologisk vurdering i hvert tilfelle for å fastslå avstanden mellom buene.



Figur 4-2 Konstruksjonsprinsipp for armerte sprøytebetongbuer. Merk at utjevningsslag nærmest bergoverflaten er fiberarmert sprøytebetong (Sfr), mens ytterste sprøytebetonglag er uten fiber (S).

I tilfeller der Q-verdien indikerer behov for armerte sprøytebetongbuer, må vanligvis et 12-15 cm tykt lag av fiberarmert sprøytebetong påføres før buene kan installeres. Dette laget fungerer som midlertidig sikring i tillegg til å utjevne bergoverflaten slik at man oppnår best mulig bueformet anleggsflate for armeringsjernene. Minimumstykkelsen på dette laget inngår i den totale tykkelsen av den forsterkede buen. Sprøytebetongen til innsprøyting av armeringsbuer bør fortrinnsvis være uten fiber (se Figur 4-2).

Som vist i forklaring til sikringsdiagrammet i Figur 4-1, anbefales det for sikringskategori 6-9 å foreta ytterligere vurderinger for en mer fullstendig bergmassekaraktistikk før endelig bergsikring bestemmes. Dette gjelder særlig for bergmasseforhold som i mindre grad er inkludert i referansetilfellene som sikringsdiagrammet er basert på. Se kapittel 4.7 for mer detaljer.

I sikringskategori 7-9 der deformasjoner kan forventes, må ekstra forankring av buer nede ved sålen eller behov for sålestøp vurderes.

4.3.1 Sammenligning av armerte sprøytebetongbuer og gitterdragere

Gitterdragere/gitterbuer består av ferdigvalsedde kamståldragere som prefabrikkeres til teoretiske mål. Geometrien på en gitterdrager er normalt tilpasset bergrommets teoretiske sprengningsprofil. Når gitterdragere er montert sammen, får man en kontinuerlig bue av kamstålgitter med teoretisk prosjektert buform som sprøytes inn.

Innsprøytede gitterdragere og sprøytebetongbuer av stangarmering (RRS) er i utgangspunktet prinsipielt ulike sikringsmetoder. Gitterdragere har i prinsipp lastbæring som en trykkbue hvor kreftene føres ned til et sålefundament i hver ende. Fundamentering er derfor en viktig forutsetning for gitterdrageres virkning.

Lastbæringsprinsippet for RRS muliggjør et umiddelbart og helhetlig samvirke med bergmassen ved at bergsikringsboltene er kontinuerlig forankret langs hele sprøytebetongbuen, slik at bergmassen aktiveres som en del av konstruksjonen allerede ved installasjon. Gitterdragere kan også utføres med samvirkende bergbolter, men det krever spesiell tilrettelegging under montasjen for å få dette til.

Under følger eksempler på når det kan vurderes å benytte gitterdragere til fordel for sprøytebetongbuer:

- Der det på forhånd er kjent at et lengre parti av berganlegget skal drives gjennom bergmasse som krever sprøytebetongbuer, kan det være tidsbesparende å bruke prefabrikerte gitterbuer.
- Dersom bergmassen i berghaller med store spenn krever sprøytebetongbuer som stabilitetssikring har gitterbuer en beregningsmessig dokumentert lastkapasitet.

4.3.2 Kvalitetskontroll og utbedring av sikringsbuer

Bruk av armerte sprøytebetongbuer og gitterdragere til permanent bergsikring med krav til lang levetid stiller ekstra strenge krav til utførelse. Montering av armeringsjern og påfølgende innsprøyting må utføres slik at det blir minst mulig hulrom («skygger») bak armeringsjernene.

Ved mistanke om hulrom i en sprøytebetongbue er det viktig å bore kontrollhull med liten diameter (10-12 mm), foreta inspeksjon med egnet videokamera. Hulrom kan utbedres ved injeksjon med et egnet langtidsholdbart injeksjonsmiddel.

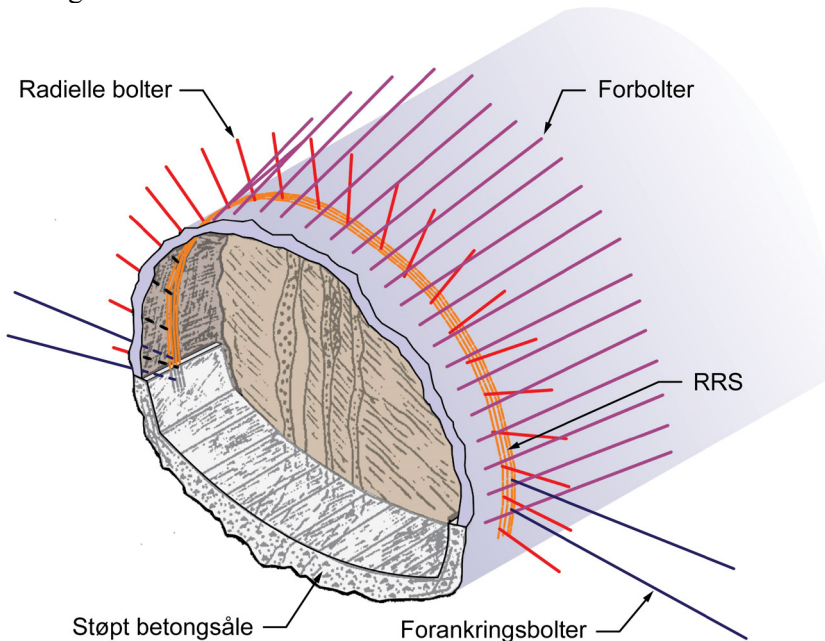
4.4 Forbolting

I de dårligste kategoriene for bergmassekvalitet kan det være nødvendig å bruke forbolter, dvs. installere bolter i lengderetning foran stuff i ytterkant av tunnelprofilen (Figur 4-3). Hensikten med forbolter er å unngå nedfall/ras slik at konturen opprettholdes og sikringsanbefalingen i henhold til Q-systemet kan anvendes. Forbolter inngår ikke som en del av den permanente sikringskonstruksjonen i Q-systemet.

Behovet for forbolter avhenger av geometri av bergrommet (påhugg og tunnelkryss), spennet på bergrommet, sprekkekonfigurasjon, og kvaliteten på bergmassen. Det bør alltid gjøres en kvalitativ ingeniørgeologisk betraktning for å vurdere behov for forbolter. For å kunne vurdere behovet for forbolter er det viktig med gode ingeniørgeologiske

forundersøkelser og bruk av data fra sonderboring foran stuff. Der bergmassen er av en slik karakter at det er betydelig fare for «geologisk betinget utfall» anbefales bruk av forbolter.

Vanligvis brukes forbolter i kombinasjon med redusert salvelengde og /eller delte salver der bare en del av tverrsnittet sprenges i hver salve. Senteravstanden mellom forboltene er vanligvis rundt 0,3 m (0,2 - 0,6 m). Bakre ende av boltene må alltid forankres med bergbånd i kombinasjon med radielle bergbolter eller forankres i en armert sprøytebetongbue.



Figur 4-3 Sikring av dårlige bergmasser med forbolter (etter Holmøy og Aagaard, 2002)

4.5 Energiabsorpsjon i sprøytebetong

To ulike energiabsorpsjonsklasser, E700 og E1000 er inkludert i sikringsdiagrammet. Bestemmelse av klasse må baseres på opptredende last- og deformasjonssituasjon. Energiabsorpsjonsklassene samsvarer med klassene definert av EFNARC og er definert i Norsk Betongforenings publikasjon 7–2022, «Sprøytebetong til bergsikring», se Tabell 4-3.

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 rustner, som er en fordel i korrosive miljøer.

Tabell 4-3 Energiabsorpsjonsklasser basert på panelforsøk som beskrevet i Norsk Betongforenings publikasjon nr. 7 (NB, 2022)

Energiabsorpsjonsklasse	Min. energiabsorpsjon i Joule
E700	700
E1000	1000

4.6 Kommentarer om stabilitet og bergsikring

Q-verdi er en numerisk verdi som beskriver kvaliteten på bergmassen i forhold til stabilitet. Sikringsdiagrammet i Figur 4-1 viser en veiledende sikringsanbefaling for ulike Q-verdier. anbefalingen er basert på empiriske data fra bergsikring i berganlegg med tilsvarende bergmassekvalitet. Sikringsdiagrammet fanger imidlertid ikke opp alle tilfeller, og det kan derfor være kombinasjoner som krever at det avvikes fra Q-systemets sikringsanbefalinger.

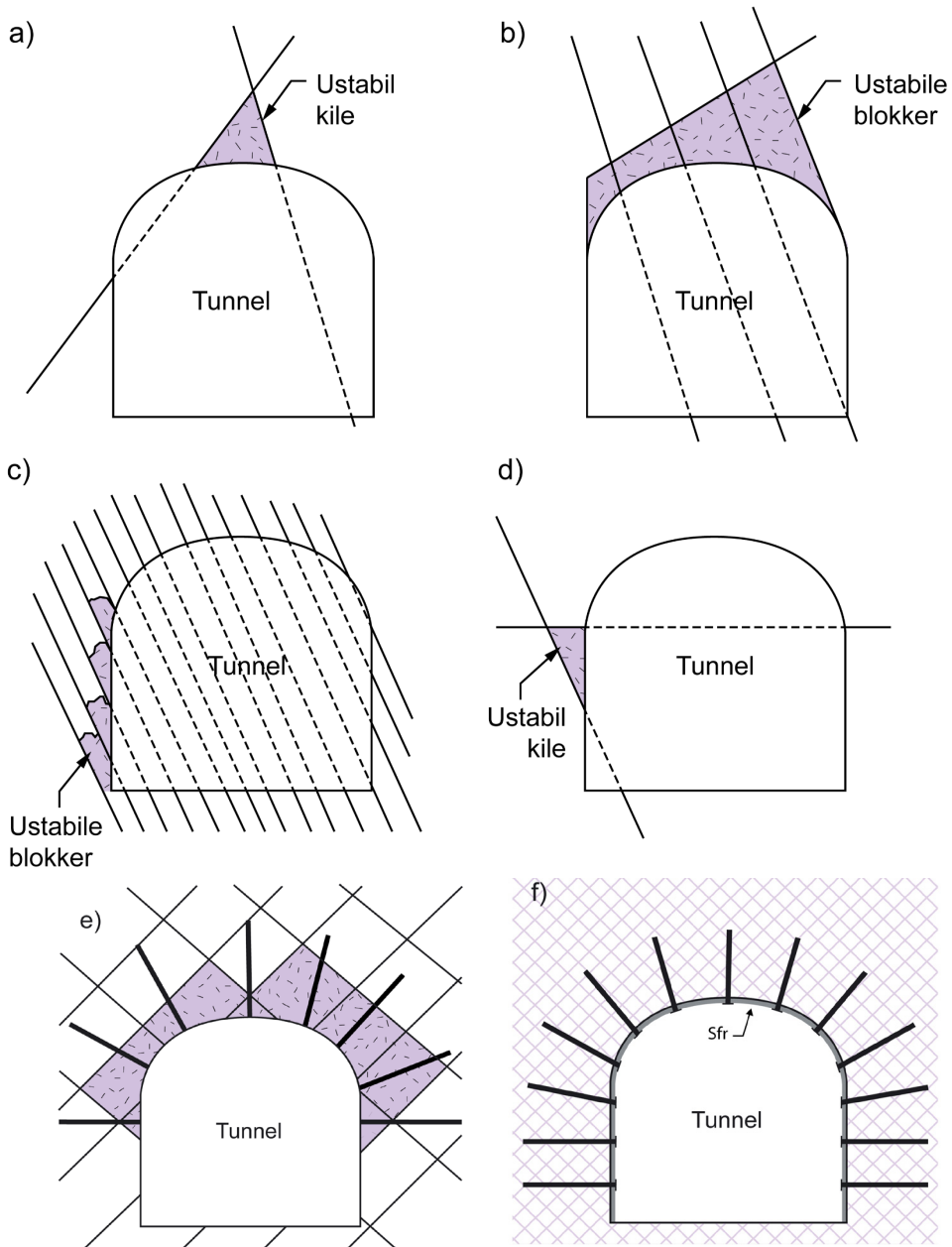
Q-systemet er ikke egnet for å bestemme sikring av enkeltblokker eller -kiler. Slik bergsikring bør baseres på analytiske vurderinger av geometriske forhold og drivende/-stabiliserende krefter.

Ved grovblokkig bergmasse anbefales bolting utført før påføring av sprøytebetong (se Figur 4-4 e). For mer oppsprukket bergmasse, anbefales det å påføre sprøytebetong før bolting slik at blokkene mellom boltene holdes på plass gjennom samvirke mellom sprøytebetong (Sfr) og bergbolter (se Figur 4-4 f).

Andre eksempler på ugunstig sprekkegeometri hvor det må tas spesielle hensyn ved bolting er vist i Figur 4-4 a-d. I hengen kan sprekker som har strøk nær parallell til bergrommets akse, men med variabel fallretning, skape ustabile kiler (Figur 4-4 a). En kombinasjon av subhorisontale og tilnærmet vertikale sprekker kan forårsake potensielt ustabil bergmassen like over hengen og ikke bli sett før den forårsaker nedfall (Figur 4-4 b). I slike situasjoner kan lengre bolter enn Q-systemets anbefaling være nødvendig. Det anbefales også å tilpasse 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 sprekken (Figur 4-4 c). Hvis to kryssende sprekker danner en kile som vist i Figur 4-4 d, 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, kan Q-verdiens tilhørende bergsikringsanbefaling bli feil fordi de små blokkene uten sammenbinding kan være ustabile til tross for en relativt høy Q-verdi. Ved slike tilfeller økes SRF-verdien (som for en svakhetssone) og J_r settes lik 1 (på grunn av manglende bergkontakt i sprekken).



Figur 4-4 Stabilitetsproblemer forårsaket av sprekker med ugunstig orientering. Sfr=sprøytebetong.

4.7 Anbefalinger ved krevende bergmasseforhold

Q-systemets anbefalinger om bergsikring må alltid betraktes som veiledende. En klassifisering av bergmassen etter Q-systemet, vil i noen tilfeller måtte suppleres med en fullstendig bergmassekarakterisering for å få et tilstrekkelig beslutnings- eller dimensjoneringsgrunnlag for bestemmelse av bergsikring. Derfor anbefales det å foreta ingeniørgeologiske og bergmekaniske vurderinger som supplement til anbefalingene gitt i sikringskategoriene (Figur 4-1). Dette gjelder prinsipielt for alle klasser av bergmassekvalitet, men vil være spesielt viktig ved de dårligste bergforholdene (sikringskategori 6-9). Under nevnes noen eksempler hvor supplerende vurderinger for å oppnå en mer fullstendig bergmassekarakterisering anbefales.

Bergmasser hvor av ett eller noen få enkeltforhold er bestemmende for stabiliteten, krever at det foretas ingeniørgeologiske sikringsvurderinger utover Q-systemets sikringsanbefalinger. Beslutning om bergsikring basert på en kalkulert Q-verdi kan under slike forhold medføre at detaljer i bergmassens egenskaper ikke fanges opp. Derfor er det viktig at spesielt tilpassede løsninger basert på en fullstendig bergmassekarakterisering benyttes. Bruken av slike bergsikringsløsninger må beskrives og dokumenteres.

Hoveddelen av referansetilfellene som Q-systemets sikringsdiagram er basert på, kommer fra hardt og oppsprukket berg med ulike kombinasjoner av svakhetssoner og bergspenningstilfeller. Bestemmelse av bergsikring med bruk av Q-systemet har derfor best forankring ved slike bergmasseforhold. Eksempler på bergmasseforhold som i mindre grad er inkludert i referansetilfellene er:

- Bergarter med lav mekanisk styrke
- Bergspenningsanisotropi
- Tidsavhengige stabilitetsforhold og spenningsinduserte deformasjoner
- Spesielt ugunstig geometrisk konfigurasjon av svakhetssoner og bergets oppsprekking

For slike forhold anbefales det å supplere bergmassevurderingene for fastsettelse av bergsikring med bruk av ulike analytiske metoder og/eller numerisk modellering. For eksempel:

Analytiske metoder

- Etablere geologisk modell med fokus på mulige bruddtilfeller.
- Analytisk beregning av bruddtilfeller, eksempelvis kinematiske analyser og kileberegning.
- Kvalitativ brudd- og stabilitetsanalyse, med spesielt fokus på ugunstige geometriske konfigurasjoner av svakheter i bergmassen

Numerisk modellering

- Kontinuerlig numerisk analyse. Eksempel på programvare er RS2 og RS3 (Rocscience), Plaxis 2D og 3D (Plaxis BV), Flac2D og 3D (Itasca).
- Diskontinuerlig numerisk analyse. Eksempel på programvare er UDEC og 3DEC (Itasca).

Det er også mulig med en fullstendig bergmassekarakterisering gjennom en hybrid tilnærming, ved bruk av både analytisk og numerisk analyse. En slik tilnærming er beskrevet av Terron-Almenara (2024).

5 Kartlegging i bergrom

5.1 Generelt

Bestemmelse av nødvendig sikringsomfang baseres vanligvis på ingeniørgeologisk kartlegging på stoff. Q-verdien gir en god indikasjon på nødvendig permanent bergsikring.

Denne håndboken inkluderer tabeller for hver av de seks Q-parameterne og sikringsdiagrammet bakerst i boka, som kan brukes under feltkartlegging. I dag er det vanlig å utføre feltkartlegging med bruk av digitale kartleggingsverktøy, hvor Q-tabellene er integrert i kartleggingsapplikasjonen. En kort beskrivelse og en skisse av de viktigste geologiske strukturene er verdifull dokumentasjon for kartleggingen. Q-systemets sikringsanbefalinger må anses som veiledende, og det må alltid gjøres ingeniørgeologiske vurderinger for å verifisere anbefalingen. Dersom man velger å avvike fra sikringsanbefalingene bør dette dokumenteres og beskrives.

Ved driving av tunneler og bergrom er det viktig å registrere og dokumentere bergoverflaten best mulig i hele tunnelens omkrets før berget dekkes med sprøytebetong. I tillegg til visuell observasjon, vil kontroll 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 stoffen og hengen ved hjelp av egnet løfteutstyr.

Ved de fleste større underjordsanlegg er det krav til ingeniørgeologisk dokumentasjon gjennom kartlegging med bruk av Q-systemet.

5.2 Ingeniørgeologisk kartlegging

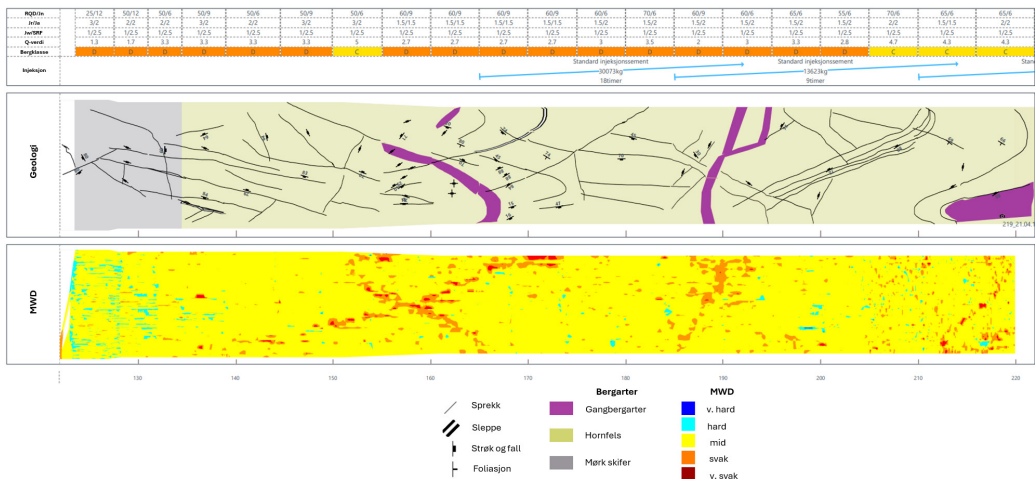
Observasjoner av bergartsgrenser, sprekkestrukturer, svakhetssoner og vann fra den ingeniørgeologiske kartleggingen bør tegnes inn og beskrives på et ingeniørgeologisk kart langs tunnelen som et supplement til Q-klassifiseringen. Kartleggingen skal supplere foto/scan av stoff, heng og vegger. Påtrufne bergartstyper som representerer en mekanisk forandring bør beskrives grundig. Svakhetssoner registreres og beskrives med hensyn til orientering, bredde og sprekkefylling. For sprekkesettene bør sprekkeavstand og utholdenhet (dvs. hvor «lang» er en sprekke) av sprekken angis som i form av variasjonsområde og typisk verdi.

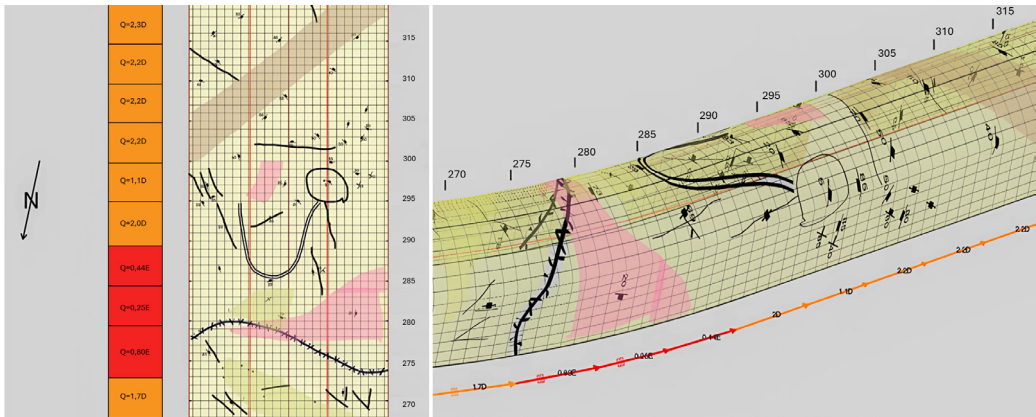
Det er viktig å notere tidspunkt for utført kartleggingen. For eksempel kan verdiene for J_w og SRF endre seg over tid. Hvis det er sprekker med leirefylling, kan det være nødvendig med prøvetaking og laboratorietester for å identifisere leiremineralene og bestemme J_a -verdien.

5.2.1 Bruk av digitale verktøy ved tunnelkartlegging

Bruk av digitale verktøy og løsninger i en ingeniørgeologisk kartlegging og bergmasseklassifisering har flere fordeler som forenkler både dataflyt og bruken av Q-systemet. Samlet vil bruk av digitale løsninger være mer effektivt og gi et mer fullstendig beslutningsgrunnlag for fastsettelse av bergsikring. Eksempler på digitale verktøy kan være:

- Bruk av digital kartleggingsplattform (nettbrett og software), se Figur 5-1.
- Kartlegging på digitalt bilde eller 3D-modell fra skann/fotogrammetri.
- Semiautomatisk/automatisk digital sprekkejenkjenning for å redusere geologens subjektivitet/persepsjon ved identifisering av bergkiler, sprekke-avløste blokker og sprekkeoverflater med tilnærmet lik orientering for fullstendig angivelse av sprekkesett.
- Informasjonsoverføring av georeferert og spesialtilpasset bergsikring av f.eks. enkeltblokker og knusningssoner.
- Prediksjon av bergart med maskinlæring fra MWD-data. MWD-data indikerer endringer i bergmasseforhold (bergartsgrense, svakhetssone, slepper, etc.), se eksempelvis øvre figur i Figur 5-1. En visuell betraktning av MWD-data kan ofte være tilstrekkelig for å avdekke kommende svakhetssoner eller bergartsforandringer.





Figur 5-1 Første figur: Digitalt tunnelkart med registrering av bergmassens kvalitet, geologi og MWD. Siste figur: Registrering av geologi i 2D og 3D. Merk at øvre og nedre figur ikke viser samme tunnel. Figuren er fra Bever Mapping.

5.2.2 Kartlegging av seksjoner

Når hver salve kartlegges kan en salve anses som en seksjon. Hvis det er betydelige lokale variasjoner i Q-parametere, kan imidlertid en inndeling i mindre seksjoner være hensiktsmessig. Dette er mest aktuelt i tunneler og berganlegg med store tverrsnitt. Hensikten er å kunne differensiere bergsikringen i de ulike seksjonene (bolteavstand- og lengde, og sprøytebetongtykkelse/-type). Sprøytebetongbuer krever normalt sikring i hele profilet (vegg-heng-vegg) for å sikre funksjonen (buevirkningen) til buen.

I kapittel 3.1 er det beskrevet tilfeller der det kan være hensiktsmessig å gi Q-parametere et intervall istedenfor én bestemt verdi. Ved inndeling av kartleggingsseksjoner på grunn av større lokale variasjoner i bergmassen må parameterverdiene som brukes til å regne ut endelig Q-verdi opptre i samme seksjon.

Ved å legge inn minimums- og maksimumsverdier for hver parameter vil det kunne beregnes en $Q_{\min}$ og $Q_{\max}$, fremfor å måtte avgjøre endelig parameter underveis i kartleggingen. Dersom $Q_{\min}$ og $Q_{\max}$ gir ulik sikringskategori, må det gjøres en vurdering av de ulike parameterens betydning for stabiliteten av bergrommet. Det er viktig å vekte de ulike Q-parametere/Q-verdiene i de ulike seksjonene ut fra betydningen de har for totalstabiliteten til bergmassen. For eksempel:

- Vekting av sprekkens ruhet/planhet i forhold til glideretning for potensielle bergblokker.
- Sprekkens orientering i forhold til blokkdannelse og hvor i profilet de vil kunne gi ustabile bergblokker har betydning for vektingen av parameterne.
- Svakhetssonens / sleppens eksponering i forhold til bergrommet bør også vurderes med hensyn til betydningen for stabiliteten til bergrommet.

Registrering av variasjonen i Q-parametere og $Q_{\min}$ og $Q_{\max}$ vil gi god dokumentasjon av bergmassens variasjon, i tillegg til supplerende tekst som beskriver bergmassens variasjon.

5.2.3 Kartlegging av svakhetssoner

Svakhetszone kan defineres som en sone eller et lag i berggrunnen med dårligere mekaniske egenskaper enn den omkringliggende bergmassen. Bredden av en svakhetszone varierer fra en desimeter til flere hundre 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 som kan inneholde leire.
- Forvitrede soner med omdannet berg, svake minerallag med liten skjærstyrke og/eller leire.

Svakhetssonens mektighet/bredde, sonens orientering i forhold til tunnelen, sonens bergmassekvalitet og sidebergets bergmassekvalitet er faktorer som må vurderes ifm. Kartlegging og sikring av svakhetssoner. Bredden på en svakhetszone måles vinkelrett på sonens strøkretning, men man må også ta hensyn til sonens orientering i forhold til bergrommets orientering. Desto spissere vinkelen mellom sonen og bergrommets akse er, desto lengre strekning vil sonen påvirke bergrommet.

Smal svakhetszone: Kan defineres som en sone med en bredde fra en desimeter og opp til 2-3 m, hvor bredden generelt er mye smalere enn spennvidden til bergrommet. I en smal svakhetszone kan bergsikringen generelt forankres i sideberg av bedre kvalitet, og sikringskonstruksjonen vil vanligvis inkludere omkring 1 m på hver side av sonen. For smale svakhetssoner er det vanligvis ikke praktisk å vurdere sikringsbehovet kun basert på Q-verdien i selve sonen, ettersom en slik tilnærming vil kunne gi en unødvendig konservativ Q-verdi. Det anbefales derfor å bestemme en midlere Q-verdi for svakhetssonen og sideberget ved bruk av følgende formel (Løset, 1997):

$$\log Q_m = \frac{b \times \log Q_{\text{sone}} + \log Q_{\text{sr}}}{b + 1}$$

der:

- Q_m = Gjennomsnittlig Q-verdi for svakhetszone / sideberg
- Q_{sone} = Svakhetssonens Q-verdi
- Q_{sr} = Sidebergets Q-verdi
- b = Bredden av svakhetssonen målt som lengden langs bergrommets akse som påvirkes av sonen

Vær oppmerksom på følgende ved bruk av likningen:

- Siden Q-verdien følger en logaritmisk skala, må beregningen gjøres logaritmisk.

- I tilfeller der sideberget har en svært høy Q-verdi kan formelen gi en for høy Q_m -verdi.
- Ved en ganske smal sone (dvs. $b \approx 0,5$ m) parallell med tunnelaksen, vil formelen gi $Q_m \approx Q_{\text{sone}}$, noe som kan føre til en gjennomsnittlig Q-verdi (Q_m), som er for lav.

Bred svakhetsone: Kan defineres som soner med bredde over 2-3 m, eller flere etterfølgende smale svakhetssoner. I slike tilfeller vil sideberget kunne være av så lav kvalitet at bergsikringen må være selvbærende. Dersom sonen(e) representerer en så stor del at den/de ikke kan forankres i godt sideberg, anbefales det følgende bruk av Q-systemet

- RQD og J_n for sonen angis. Endelig bestemmelse av RQD og J_n må tas basert på vektet stabilitetsvurdering av hele bergmassen som vurderes.
- J_r og J_a bestemmes ut fra egenskapene til svakhetssonen. Ved tykk sprekkefylling gjelder kategori c) for både J_r (Tabell 3-3) og J_a (Tabell 3-4).
- SRF bestemmes ut fra kategori a) i Tabell 3-6, se kapittel 3.7.1.

Ved tilfeller av brede svakhetssoner er det også viktig å identifisere hvilke ingeniør-geologiske og bergtekniske forhold som er bestemmende for stabiliteten og sikringsbehovet for bergrommet. Kartlegging i brede svakhetssoner bør derfor alltid inneholde en bergmassekarakterisering (se kapittel 4.7).

5.2.4 HMS under kartlegging

Ved kartlegging er det viktig å forsikre seg om at bergflatene man skal oppholde seg under er tilstrekkelig rensket eller sikret. Dette gjelder både ved kartlegging fra korg eller fra sålen. Ved store bergromsprofiler er det hensiktsmessig å foreta kartlegging fra korg for å registrere korrekt bergmassekvalitet. Dette gjelder særlig angivelse av J_r og J_a , som er vanskelig å angi fra avstand. Kartlegging fra korg skal kun gjøres dersom det vurderes som forsvarlig med hensyn til stabilitet og sikkerhet.

5.3 Kartlegging av tunneler drevet med TBM

Kartlegging av bergmassekvalitet i en TBM-tunnel er mer krevende enn tunneler drevet ved boring og sprenging. Når bergmassens kvalitet er $Q > 1$, vil veggene i en TBM-tunnel kunne være ganske glatte og det vil være vanskelig å identifisere sprekker og studere sprekkeflater. En geologhammer kan være en hjelp for å skille virkelige brudd fra årer, folding osv. for å estimere RQD-verdien. Estimer av J_r og J_a kan være unøyaktige hvis ingen eller få sprekkeflater er eksponert. Ved å stikke en kniv inn i sprekken kan sprekkefyllingen evalueres, og eventuell leirfylling oppdages. 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 holdt

oppe 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.

6 Q-systemet ved forundersøkelser

6.1 Generelt

Q-systemet kan også brukes under forundersøkelser for underjordsanlegg. Under forundersøkelser og planlegging av tunneler og bergrom kan Q-systemet brukes for detaljert beskrivelse av bergmassen som grunnlag for prognose for bergsikring og kostnader. Q-verdier basert på bergblotninger og kjerneboringer ved forundersøkelser er beskrevet i påfølgende underkapitler.

6.2 Bruk av Q-systemet ved 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 eller nærliggende bergskjæringer, er det mulig å utføre en relativt sikker fastsettelse av Q-verdien.

Bergmassen nær overflaten vil ofte være mer oppsprukket og forvitret 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 er 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 sprekkenes 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 får ofte en lavere verdi i sprengte bergskjæringer og skråninger sammenlignet med naturlige bergoverflater. I steinbrudd, med skjæringer i forskjellige retninger, vil Q-verdien være tilnærmet verdien som observeres i et bergrom. Vannforholdene i et bergrom, J_w , vil være vanskelig å forutsi kun fra feltkartlegging. Vanntapsmålinger/Lugeon-tester i borehull og/eller empiriske data fra prosjekter i lignende 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 SRF-verdien

estimeres på planleggingsstadiet av et underjordsanlegg, er generell erfaring fra den geologiske regionen 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. Opptreden av 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 3-7 er forholdet $\sigma_3 / \sigma_1 < 4-5$ (avhengig av anisotropien) vanligvis en indikasjon på at det kan oppstå avskalling i et bergrom. I hardt berg opptrer dette normalt med mellom 400 og 1100 meter bergoverdekning i dalsiden over bergrommet, avhengig av trykkfastheten på det intakte berget og hellingen på fjellsiden (se Figur 3-5). Det kan også gjennomføres spenningsmålinger før driving av underjordsanlegg hvor det forventes spenningsproblemer.

Med bakgrunn i ovennevnte aspekter anbefales det at Q-verdi fra feltkartlegging ikke brukes direkte som grunnlag for å *bestemme* bergsikring, uten at det eventuelt gjøres nærmere vurderinger.

6.3 Bruk av Q-systemet ved kjernelogging

Forundersøkelser for underjordsanlegg inkluderer ofte logging av borekjerner. Ofte mangler kjernestykker fra partier med dårlig bergkvalitet (kjernetap), 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. Vær spesielt oppmerksom på følgende:

- Bare en liten seksjon av hver sprekkeflate vil være tilgjengelig, spesielt for sprekker som krysser borehullet med stor vinkel. Bestemmelse av sprekke-ruhetstallet, J_r , kan derfor være upresist. Spesielt er storskalaundulering vanskelig å estimere (se kapittel 3.4).
- Siden det brukes vann under boringen, kan mineralfylling som leiremineraler være vasket ut slik at J_a blir vanskelig å vurdere.
- 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.
- Merk at RQD kan beregnes til 0 ved kjernelogging. Da skal RQD settes lik 10 i Q-systemet.
- Mens RQD ofte beregnes for hver meter, må J_n vanligvis estimeres for seksjoner på flere meter.

Normalt 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 inkluderes i en slik logg. Ved å bruke loggedataene kombinert med estimerer av J_w og SRF vil det imidlertid være mulig å gi et grovt anslag av Q-verdiene for kjernene for prognoser til planlegging av 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 alltid 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 svakhetsone, vil Q-parameterverdiene som settes fra kjerneloggingen være gjeldende for den aktuelle sonen.

7 Referanser

- Alejano, L.R., Muralha, J., Ulusay, R. et al. (2018): ISRM Suggested Method for Determining the Basic Friction Angle of Planar Rock Surfaces by Means of Tilt Tests.
- 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.
- Barton, N. & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches*. 10. 1-54.
- 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): 93-98.
- Deere, D.U. (1963): Technical description of rock cores for engineering purposes. *Felsmechanik 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.
- Holmøy, K.H., Aagaard, B. (2002): Spiling bolts and reinforced ribs of sprayed concrete replace concrete lining. *Tunnelling and Underground Space Technology* 17(4): 403-413.
- 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.
- Muralha, J., Grasselli, G., Tatone, B., Blumel, M., Chrysanthakis, P., Jiang, Y. (2014). ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 47. 291-302.
- NB (2022): 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.
- Terron-Almenara, J., Skretting, E., Holter, K., Høien, A. (2024). Design of Rock Support in Hard and Layered Rock Masses Using a Hybrid Method: A Study Based on the Construction of the New Skarvberg Tunnel, *Rock Mech Rock Eng* 57:10491–10532.

Vedlegg tabeller 1 til 9

1	RQD = Oppsprekingsfaktor (Rock Quality Designation)		RQD
A	Svært dårlig	(> 27 sprekker per m ³)	10 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			

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

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

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
Merk: Erfaringsbasert sammenheng med residual friksjonsvinkel ϕ_r .			

5	$J_w = \text{Sprekkevannstall}$	J_w
A	Tørre bergrom eller mindre innsig (fuktig eller noen få drypp)	1,0
B	Middels innsig, av og til utvasking av sprekefyllinger (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 sprekefyllinger	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 estimer. Øk J_w hvis berget dreneres eller det utføres injeksjon ii) Spesielle problemer forårsaket av isdannelse er ikke tatt med i betraktning		

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, avspenst berg (uansett dybde), eller lange seksjoner med inkompetent (svakt) berg (uansett dybde). For skvisning, se kategori M og N.	10
B	Flere skjærsoner innenfor en kort seksjon i kompetent avspenst 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 berg med lave eller gunstige spenningsforhold, hovedsakelig massivt berg.		SRF
F	Lave spenninger, nær overflaten, åpne sprekker	2.5
G	Middels spenninger, gunstige spenningsforhold	1
Merk: ii) Når dybden av hengen under overflaten er mindre enn spennet; foreslås det at SRF økes fra 2,5 til 5 for slike tilfeller (se F)		
c) Kompetent, hovedsakelig massivt berg, spenningsproblemer		SRF
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	0,5-2 2-5*
J	Moderat avskalling etter > 1 time i massivt berg	5-50
K	Avskalling og bergslag etter noen minutter i massivt berg	50-200
L	Intens bergslag og umiddelbar dynamisk deformasjon i massivt berg	200-400
Merk: iii) Se kapittel 3.7.3 og Grimstad & Barton (1993) for detaljer om SRF og spenning-styrke forhold.		
d) Skviserberg: plastisk deformasjon i ikke kompetent berg under påvirkning av høyt trykk		SRF
M	Moderat skvisende bergtrykk	5-10
N	Intenst skvisende bergtrykk	10-20
Merk: iv) For bestemmelse av skvisende bergforhold henvises til relevant litteratur (dvs. Singh et al., 1992 og Bhasin og Grimstad, 1996)		
e) Svellende berg: kjemisk svelleaktivitet ved tilgang på vann		SRF
O	Moderat svelling	5-10
P	Intens svelling	10-15

8	Type underjordsanlegg	ESR
A	Midlertidige gruveåpninger osv.	3-5
B	Vertikale sjakter*: i) sirkelformede seksjoner ii) rektangulær / firkantet seksjon * Avhenger av formålet. Kan være lavere enn angitte verdier.	2,5 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 veg- og togstunneler, trykkammer, tilkomsttunneler, kloakktunneler, osv.	1,3
E	Kraftstasjoner, lagringsrom, vannbehandlingsanlegg, større veg- og togstunneler, sivilforsvarkammer, portaler, kryssninger, osv.	1,0
F	Underjordiske atomkraftverk, togstasjoner, offentlige anlegg og sportsanlegg, fabrikker osv.	0,8
G	Svært viktige bergrom og tunneler uten tilgang for inspeksjon og vedlikehold.	0,5

9	Dimensjonering av veggsikring	
I bergmasser med god kvalitet	$Q > 10$	Multipliser Q-verdiene med en faktor på 5.
I bergmasser med dårlig-middels kvalitet	$1 < Q < 10$	Multipliser Q-verdiene med en faktor på 2,5. I tilfeller med høye spenninger i berget, bruk den faktiske Q-verdien.
I bergmasser med svært-eksepsjonelt dårlig kvalitet	$Q < 1$	Bruk faktisk Q-verdi.
Vegghøyde > spennvidde	Gjelder for alle Q-verdier	Bruk faktisk Q-verdi.



NGI

www.ngi.no