

Anvendt bergmekanikk

9-10 januar 2018

SIKRINGSMETODER

Sikring i tunneler og bergrom under ulike geologiske og bergmekaniske forhold.
Sikringstyper og dimensjonering.

Eystein Grimstad

Geolog Eystein Grimstad

FORUTSETNING FOR DIMENSJONERING

- For å kunne dimensjonere sikring riktig må en kjenne lastene fra bergmassen både under driving og over lengre tid
- Avhengig av bruksområde og brukstid
- Gjelder alle typer sikring
- Ønsker vi optimal sikring etter forholdene eller en jevn ekstrem oversikring som holder i **nesten** alle tilfeller?
- Planlagt dimensjonering forutsetter at bergmassen er under kontroll, dvs.
 - ✓ Unngå ras
 - ✓ Beholde profil
 - ✓ Kontrollere deformasjon
 - ✓ Akseptere deformasjon i arbeidssikring ved høye bergrykk og skvisning
 - ✓ Gå inn med stivere sikring når kontrollert deformasjon har avtatt
 - ✓ Permanent sikring som holder i **hele** brukstiden

Grunnlaget for valg av sikring

- Ulike erfaringsbaser (tommelfingerregler, sedvane etc.)
- Systematisk bergmasseklassifisering
- Numerisk analyse
- Forskjellige geologiske forhold og geometri
- Varierende stabilitet
- Kulturer for ulike sikringstyper
- Ulike bruksområder
 - Vann, avløp, vannkraft, gruver
 - Veg, jernbane, lagerhaller, kraftstasjoner, sportshaller etc.
- Krav til sikkerhet og varighet/levetid
- Andre motiver som økonomi på kort og lang sikt etc.

Bergmassens stabilitet kan inndeles i problemområder:

- Grovblokkig ((u)gunstig sprekkeretning)
- Tett oppsprukket
- Skifrig eller lagdelt
- Store vannlekkasjer
- Knusning og leirsone (svelleleir)
- Svake (løse) bergarter og løsmasser
- Bergtrykksproblemer
- Tytefjell (kombinasjon av de tre forrige)
- Liten fjelloverdekning (manglende innspenning)
- Sprengningsskadet bergmasse
- Store utfall

Sikringstyper i underjordsanlegg

- Bolter (mange typer)
- Forbolting
- Forinjeksjon
- Bånd og nett (til dels utdatert i underjordsanlegg)
- Sprøytebetong (fiberarmert og nettarmert))
- Sprøytede, armerte buer
- Stålbuer
- Utstøping med og uten armering
- Membran ved utstøping
- Frittstående vann og frostsikring

To hovedprinsipper ved sikring: **Forsterkning** eller **Understøttelse**

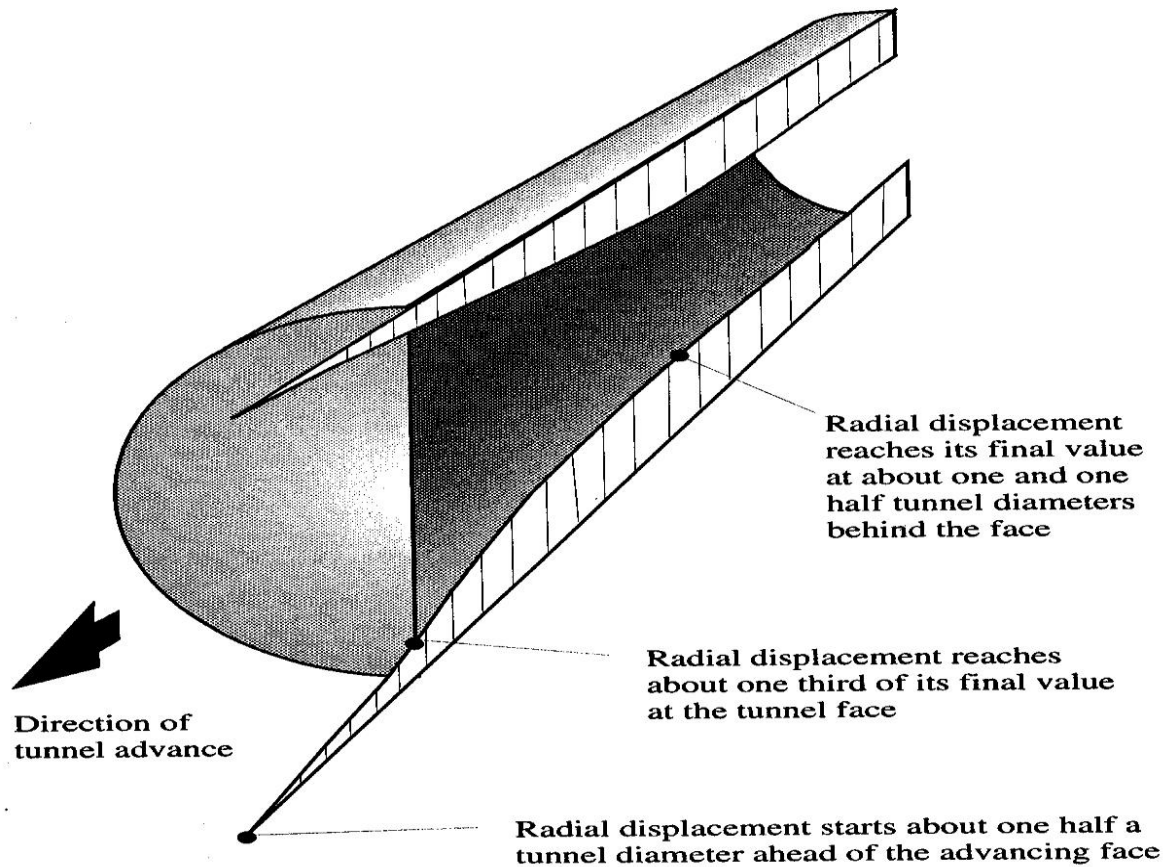
- I grovblokkig eller moderat oppsprukket bergmasse bidrar sikring til **forsterkning** av bergmassens evne til å bære seg selv
- I sterkt oppknust, forvitret bergmasse, leirsoner og løsmasser må sikringen til dels **understøtte** bergmassen, som ikke kan bære seg selv alene
 - ✓ Selv i meget dårlig bergmasse som sikres med buer eller støp, vil lange bolter bidra til å fordele krefter utover i bergmassen

Tett oppsprukket og svak bergmasse

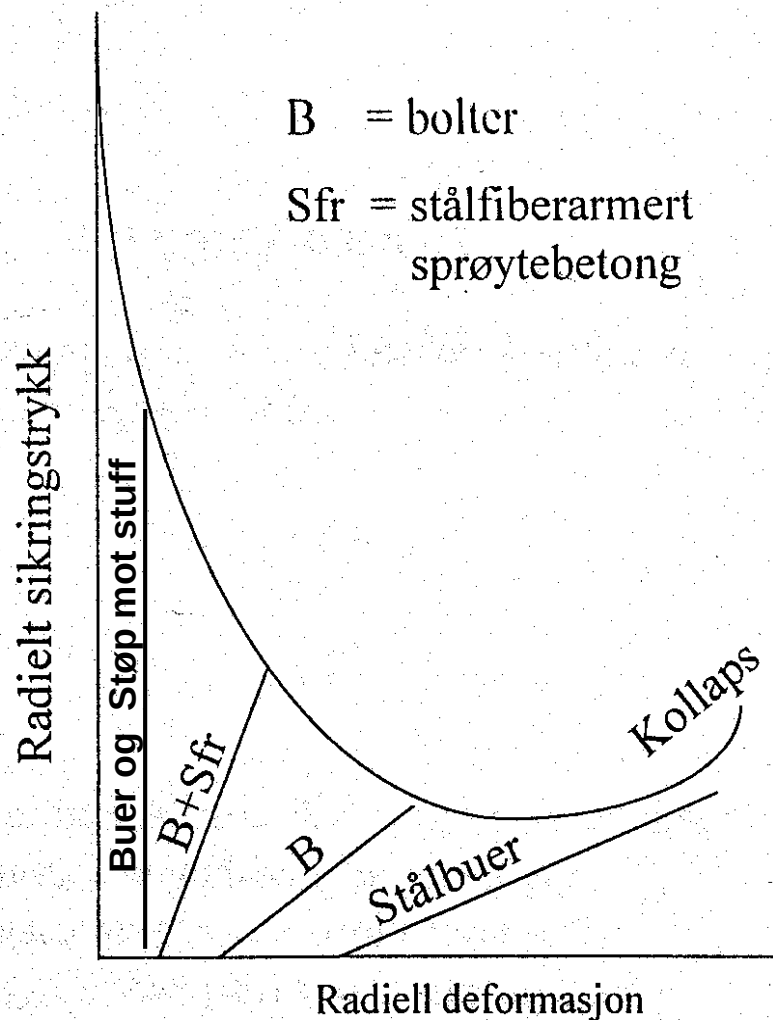
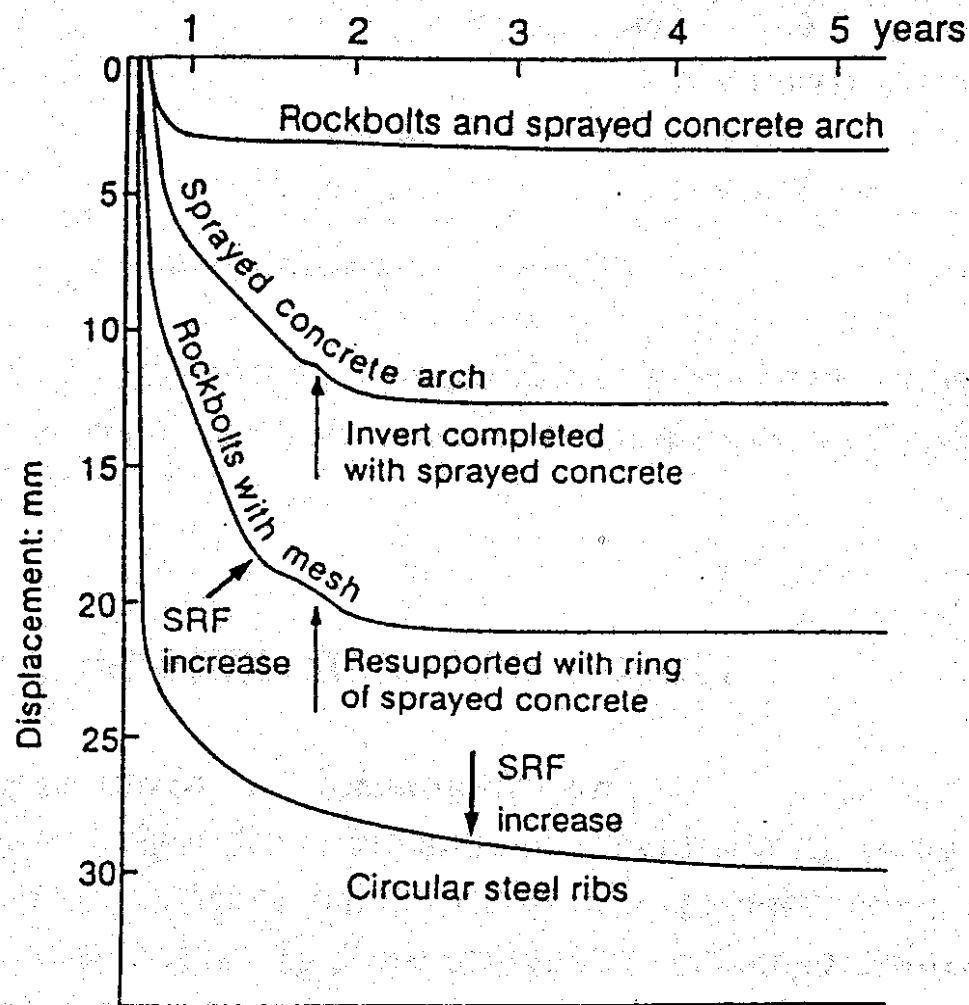
Hvordan kontrollere bergmassen før sprengning?

- Variere salvelenge med bergmassekvalitet
- Eventuelt ta delsnitt-salver, som sikres trinnvis
- Bruk av forbolting (c/c 20-50 cm) med **støtte i bakkant** med radielle bolter
- Forinjeksjon
- Sprøyting og bolting av selve stoffen
 - ✓ Ved for eksempel skvisning, sterk svelling, total knusning, løsmaser og kraftig bergslag

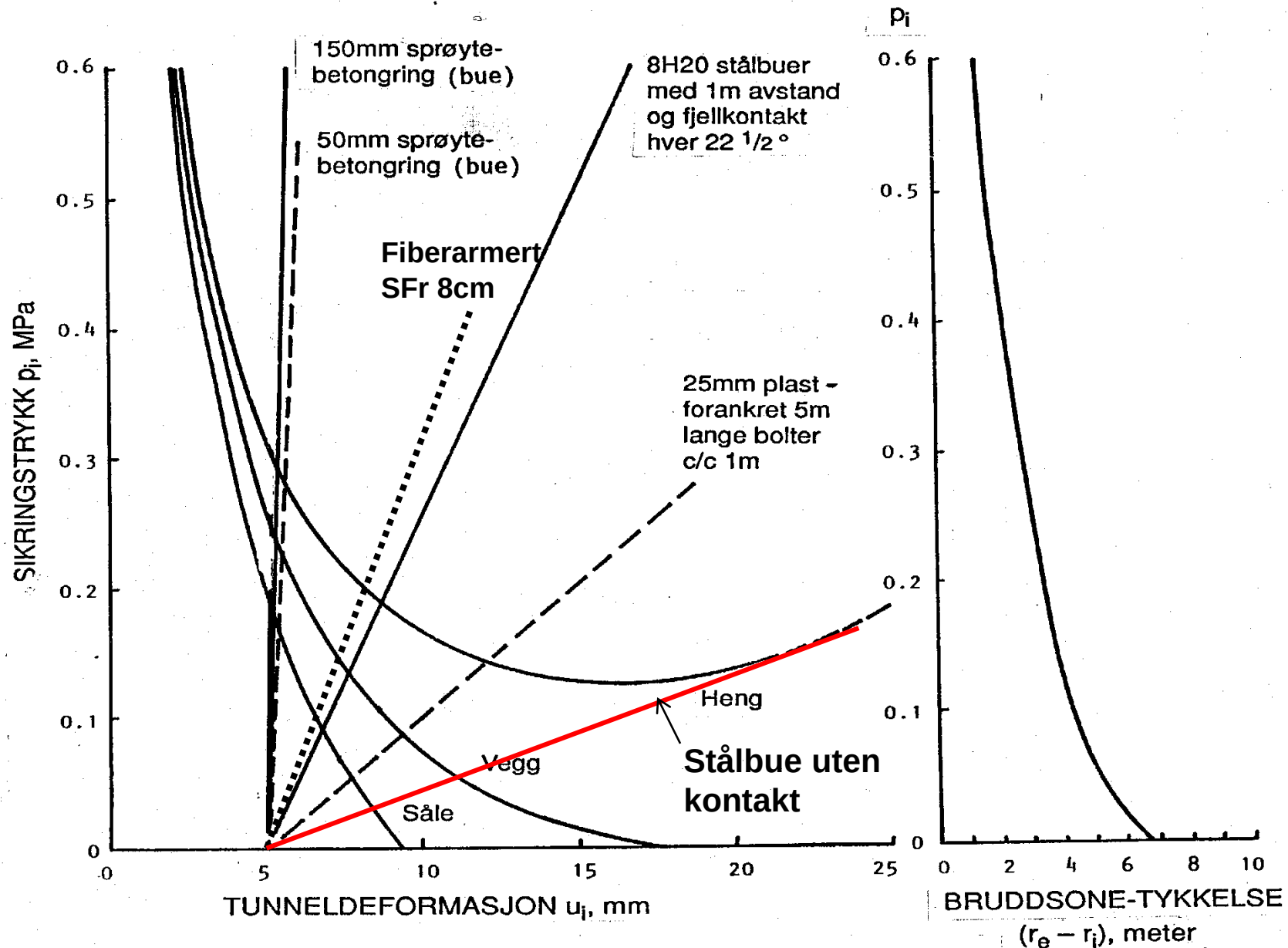
Radiær deformasjon starter ca. $\frac{1}{2}$ diameter foran stuff
Ca. $\frac{1}{3}$ av radiær deformasjon har skjedd i stuffen.
Mesteparten av deformasjonen har skjedd $1 \frac{1}{2}$ diameter bak stuffen
Ved høye bergtrykk og skvising kan deformasjon skje over flere km bak stuff. (Og etter flere år)



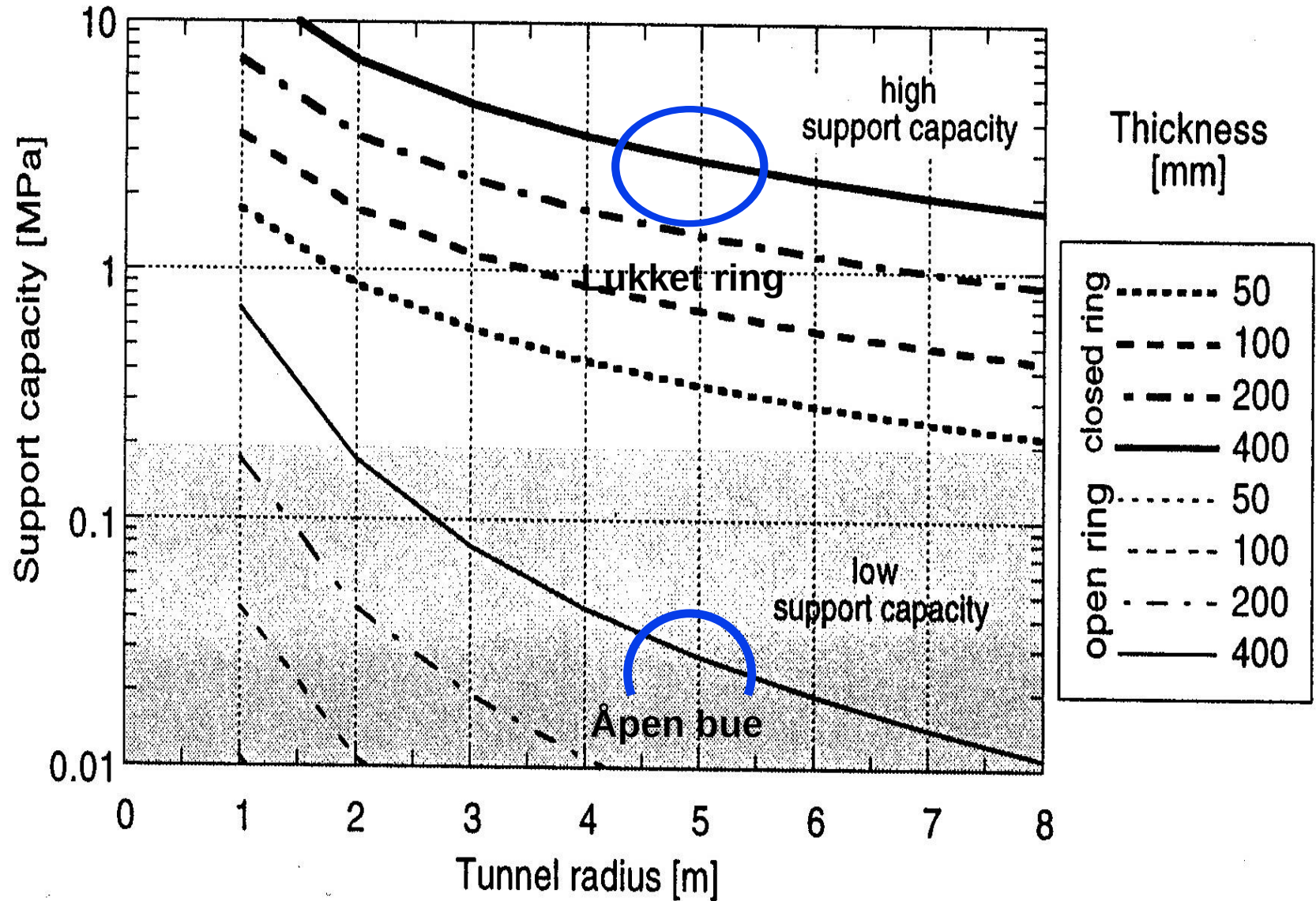
Deformasjon i lukket og åpen ring med ulike sikringsmetoder



Last/deformasjonskurver for ulike sikringsmidler



Bæreevne for åpen og lukket ring



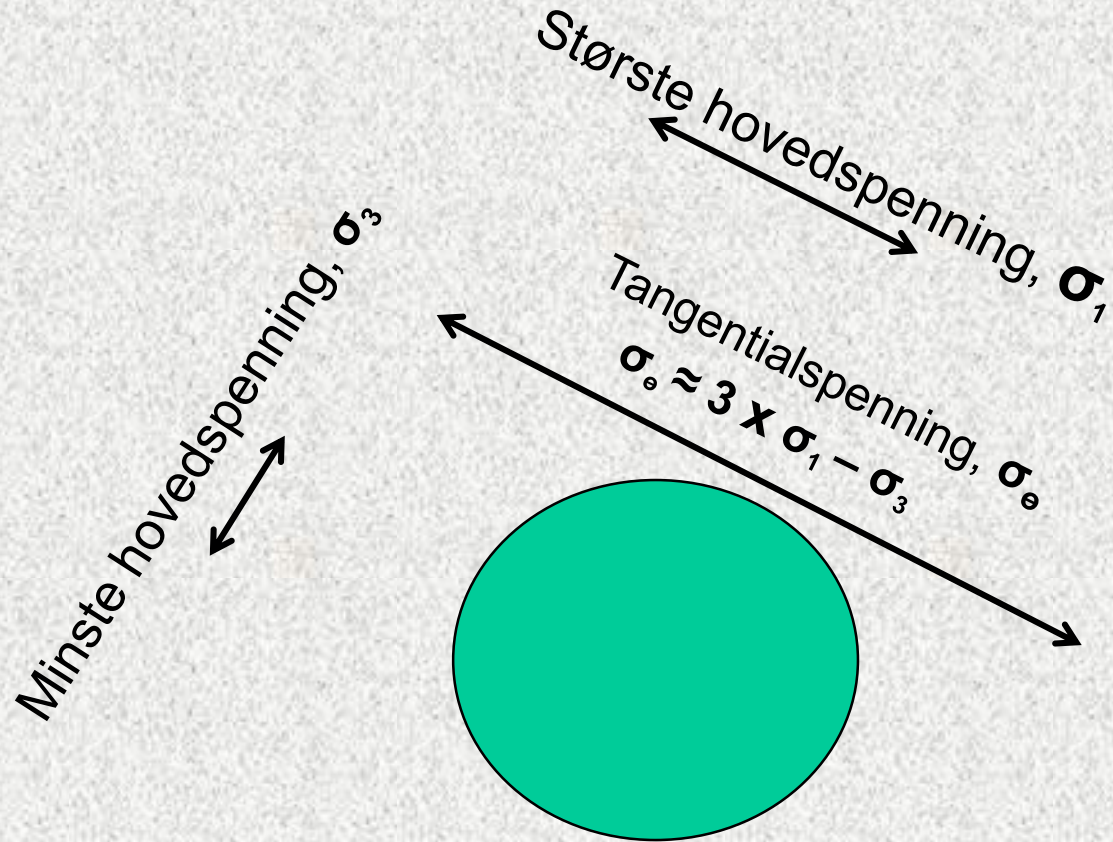
Eksempel på understøttelse

Pilottunnel i sand under 4 felts motorvei, St. Gotthard Sør



Høye spenninger

Definisjon av ulike spenningsbetegnelser

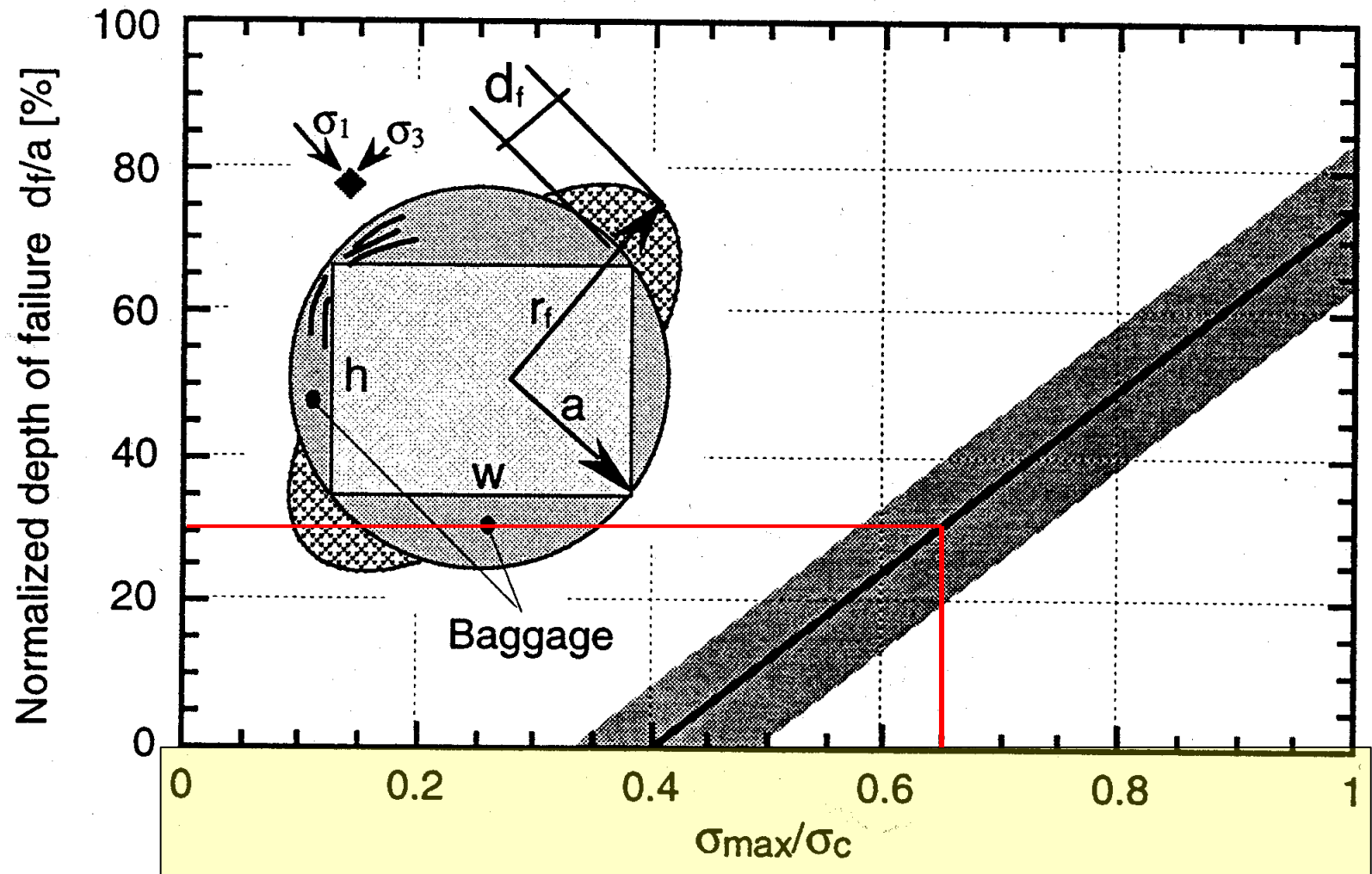


Relasjon mellom spenninger og bergartens trykkfasthet, samt beskrivelse av hvilke problemer en kan vente seg under de ulike relasjonene i intakte bergmasser

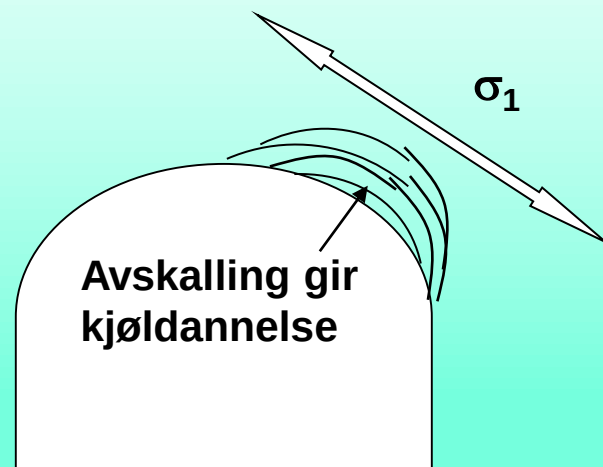
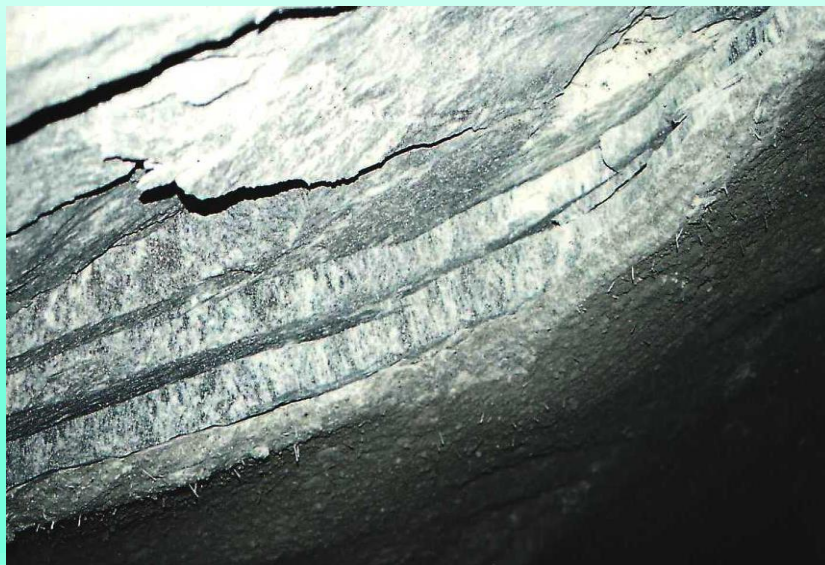
Harde, kompetente bergarter, bergtrykksproblemer		σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	SRF
H	Lave spenninger, åpne sprekker. Utfall av blokker pga. lav spenning. Vanligvis nær overflaten.	>200	<0,01	2,5
J	Middels til høye spenninger, gunstige spenningsforhold.	200-10	0,01-0,3	1
K	Høye spenninger. Vanligvis gunstige spenningsforhold, men kan være ugunstig for veggene.	10-5	0,3-0,4	0,5-2
L	Moderat avskalling etter > 1 time i massivt berg.	5-3	0,5-0,65	5-50
M	Avskalling og bergslag etter få minutter i massivt berg.	3-2	0,65-1	50-200
N	Intenst bergslag og umiddelbart deformasjonsbrudd i massivt berg.	<2	>1	200-400

Relativt avskallingsdyp D_f /radius i % som funksjon av spenning/styrke

Eksempel: Radius, $a = 5$ m gir $d_f = 1,5$ m ved $\sigma_{\max}/\sigma_c = 0,65$ (SRF ≈ 50)



- Jevnt profil i tunnel er meget viktig
- Alle utstikkende neser // σ_1 splittes av
- Boring i avskallede masser gir dobbel borsynk
- Sonderboring til massivt, ikke spenningsavløst fjell burde være obligatorisk
- Boltelengden må være minst 1 m lengre enn inn til avskallingsdypet, når likevekt er oppnådd (etter en tid), for å holde på massene



Skvising (tyteberg) i Lærdalstunnelen

Bergoverdekningen 1100 m

**Bergmassekvaliteten, $Q = 0,005 - 0,05$ i
forkastningssone**

Trykkfasthet i bergmassen,

$$\sigma_{\text{cmass}} \approx 7 \times \gamma \times Q^{1/3} = 4 \text{ MPa (400 t/m}^2\text{)}$$

Tangentialspenning, $\sigma_{\theta} \approx 55 \text{ MPa (5500 t/m}^2\text{)}$

$$\sigma_{\theta} / \sigma_{\text{cmass}} \approx 55/4 = 14$$

Kriteriet for sterk skvising:

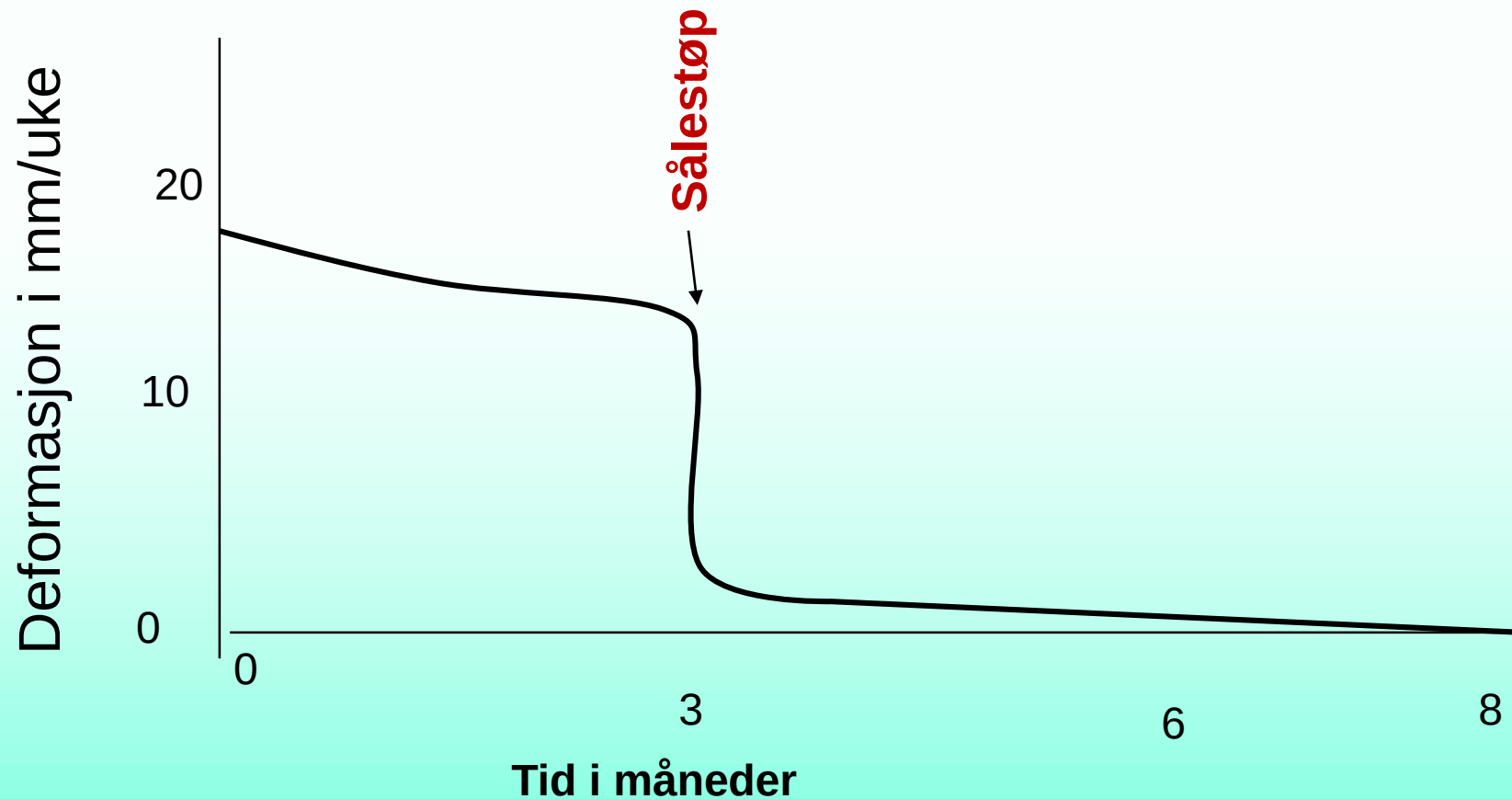
$$\sigma_{\theta} / \sigma_{\text{cmass}} > 6$$

Skjærbrudd i Sfr + armert bue, til sammen 95 cm tykk + bolter c/c <1 m, 5 m lange. Skvising i Lærdalstunnelen før sålestøp.



Ved høye spenninger og stor deformasjon må boltene/stagene være fleksible og ha mulighet for forlengelse. Endeforankring med fri lengde er nødvendig.

Deformasjon per uke over 8 måneder i tytefjell i Lærdalstunnelen.



Sålestøp ga lukket ring

Konklusjon ved høye bergtrykk

- Utnytte sprøytebetongens mange unike egenskaper fullt ut i ulike situasjoner (bergmassekvalitet, geometri, bruksområde, miljø etc.)
- Variere energiabsorpsjonen etter behov?
 - Ikke grunn til E700 eller E1000 på god bergmasse
 - Evt. E1200 eller E1500 ved stor deformasjon?
- Kombinere med bolter, og armeringsjern i buer
- RRS eller stålbuer med deformasjonsslisser ved store laster i svake bergarter som gir stor deformasjon
- Ved stor deformasjon: sikre i to trinn
 - Sette inn fleksibel sikring og tillat kontrollert deformasjon
 - Permanent sikring med stor kapasitet og stivere konstruksjon når deformasjonen er flatet ut
 - **Tidlig støp ved høye bergtrykk gir alltid brudd**

Betong med $\sigma_c \approx 35\text{-}50 \text{ MPa}$ kan ikke erstatte bergart med $\sigma_c \approx 100\text{-}150 \text{ MPa}$ i langt større tverrsnitt rundt profilet

Avskalling i 30 cm tykk nettarmert sprøytebetong lagt på ved stuff under høyt bergtrykk. Alto Maipo, Chile 2015

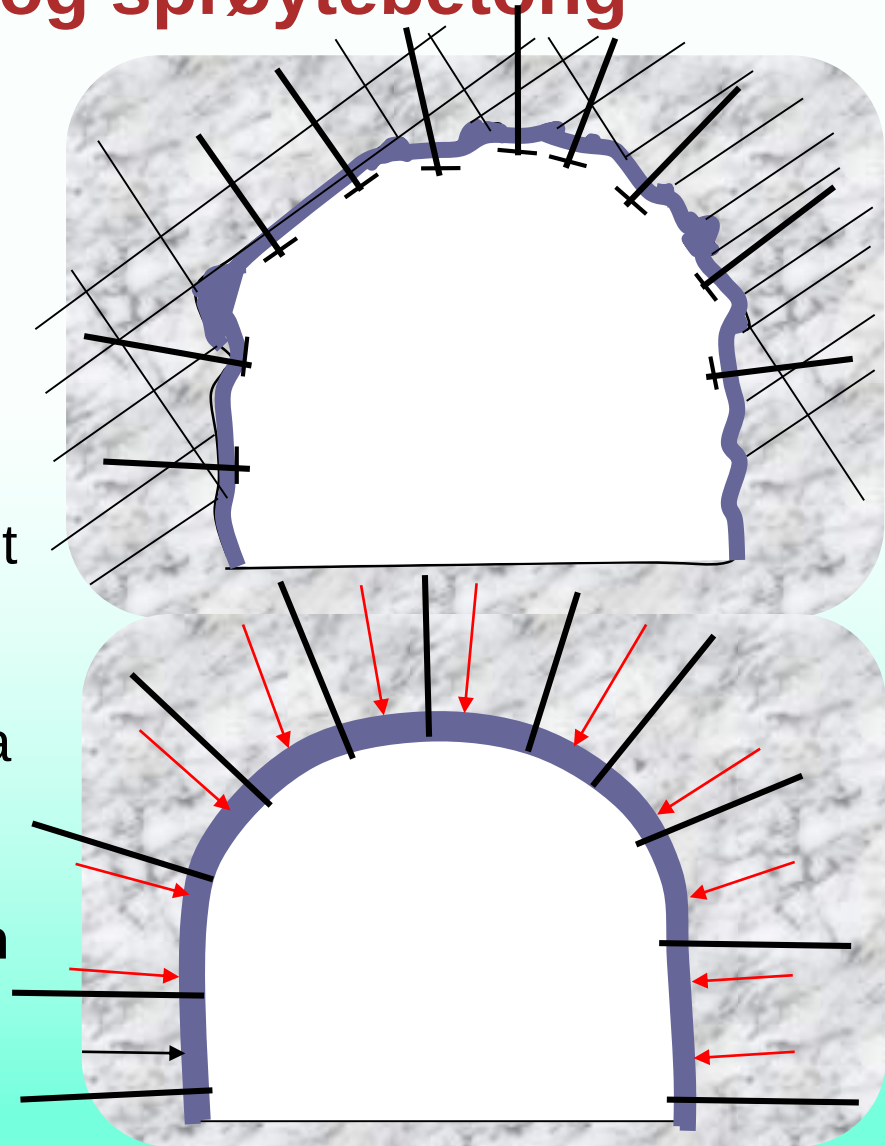


Nettsikring mot nedfall av sprøytebetong 30-100 m bak stoff i Alto Maipo, Chile 2015.



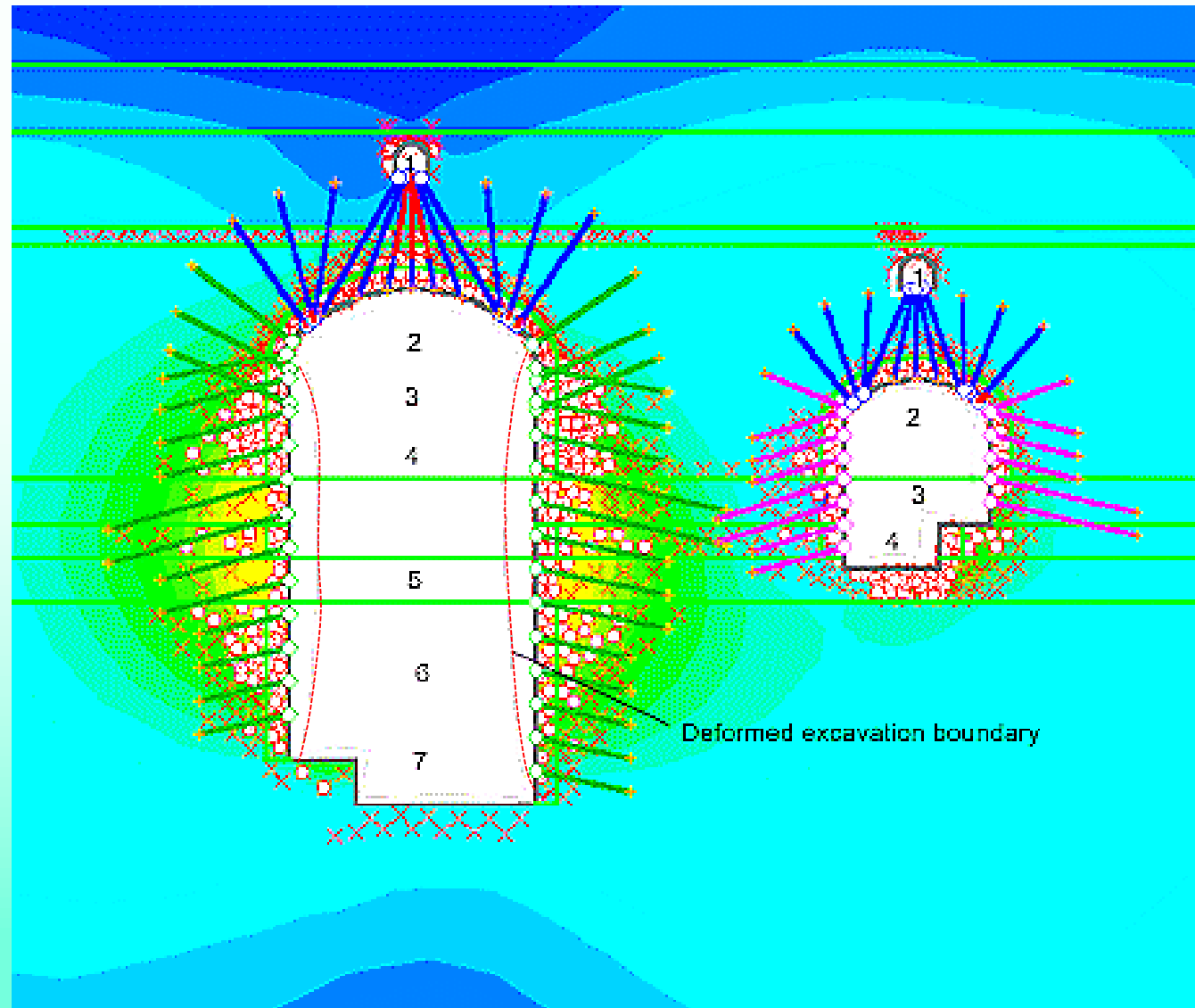
Samvirke mellom bolter og sprøytebetong

- Tynne lag av sprøytebetong er en hud som holder på små stykker av bergmassen i tunnelperiferien
- Bolter holder på store kiler og blokker
- Tykke sprøytebetonglag trenger også bolter, særlig når tunnelprofilen er ujevnt
- Bare en jevn bue kan bære lasten fra dårlig bergmasse uten bidrag fra bolter
- **Bolter fordeler alltid krefter innover i bergmassen, slik at den blir en del av konstruksjonen**



Samvirke mellom forspente bolter/stag og sprøytet bue /støp for å kontrollere skjærdeformasjon

Fra kraftstasjon og trafokammer i 14 de Julho, Rio Grande do Sul, Brasil



**Kraftstasjon i 14 de Julho, Rio Grande do Sul, Brazil.
Lange forspente ankere under høyt bergtrykk hindrer
deformasjoner og åpning av sprekker i veggene.**



Tradisjonell nettsikring med stein i poser (Chile 2010)
Nettet tar i mot avløst stein uten å danne mottrykk. Ble senere sprøytet inn. Lite kontroll med bergmassen over.



Stålbuer og nett dekket av sprøytebetong gir ofte store hulrom inn mot bergoverflaten. Særlig ved store utfall. Fra Chuquicamata, Chile 2014.

1. 5 cm Sfr
2. Nett + B
3. Stålbuer
4. Sfr

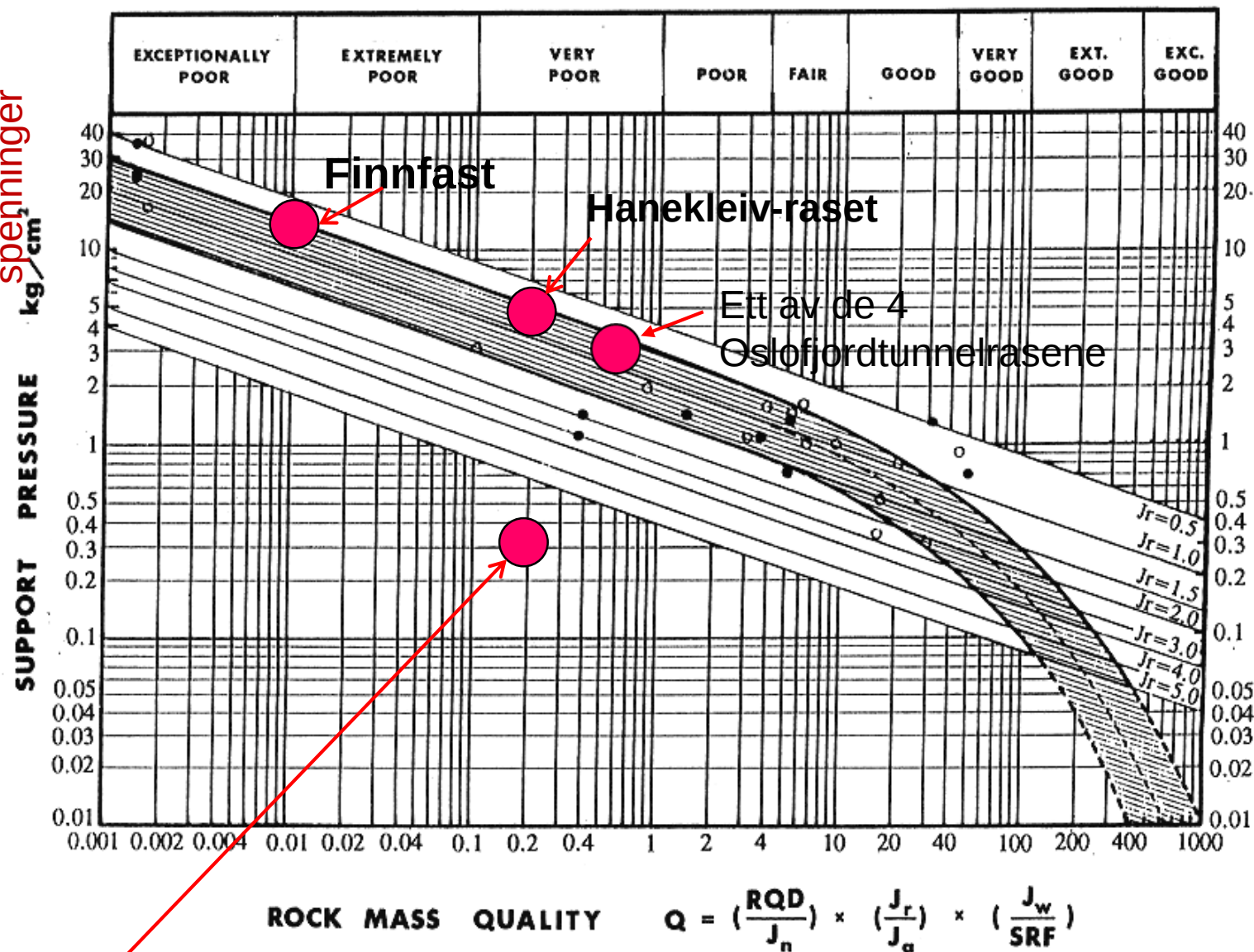


Hvilke laster kan bergmassen gi mot sikringen?

- Det er en empirisk sammenheng mellom målt sikringstrykk og bergmassekvalitet i oppsprukket bergmasse
- Ved høye **spenninger** i harde bergarter (sprakefjell) og i svake bergarter (skvising) finnes **ingen** sikring som kan stoppe bevegelsene.
- Laster på 20-100 MPa ikke uvanlig. Tidlig utstøping eller bue blir knust
- **Høyeste målte svelletrykk fra svelleire** i lab (2 MPa) er **nesten** på samme nivå som høyest tenkelige sikringstrykk i ekstremt dårlig bergmasse uten påførte spenninger, dvs. ca. 2-4 MPa
- Svelletrykk i lab er ca. 5 ganger svelletrykk i tunnel, dvs. maksimalt in situ svelletrykk er ca. 0,4 MPa

Sikringstrykk fra bergmassen basert på Q og J_r

Max 2-4 MPa
uten eksterne
spenninger



In situ svelletrykk i Hankleiv $\approx 1/5$ svelletrykk målt i lab
(0,18/5 = 0,036 MPa)

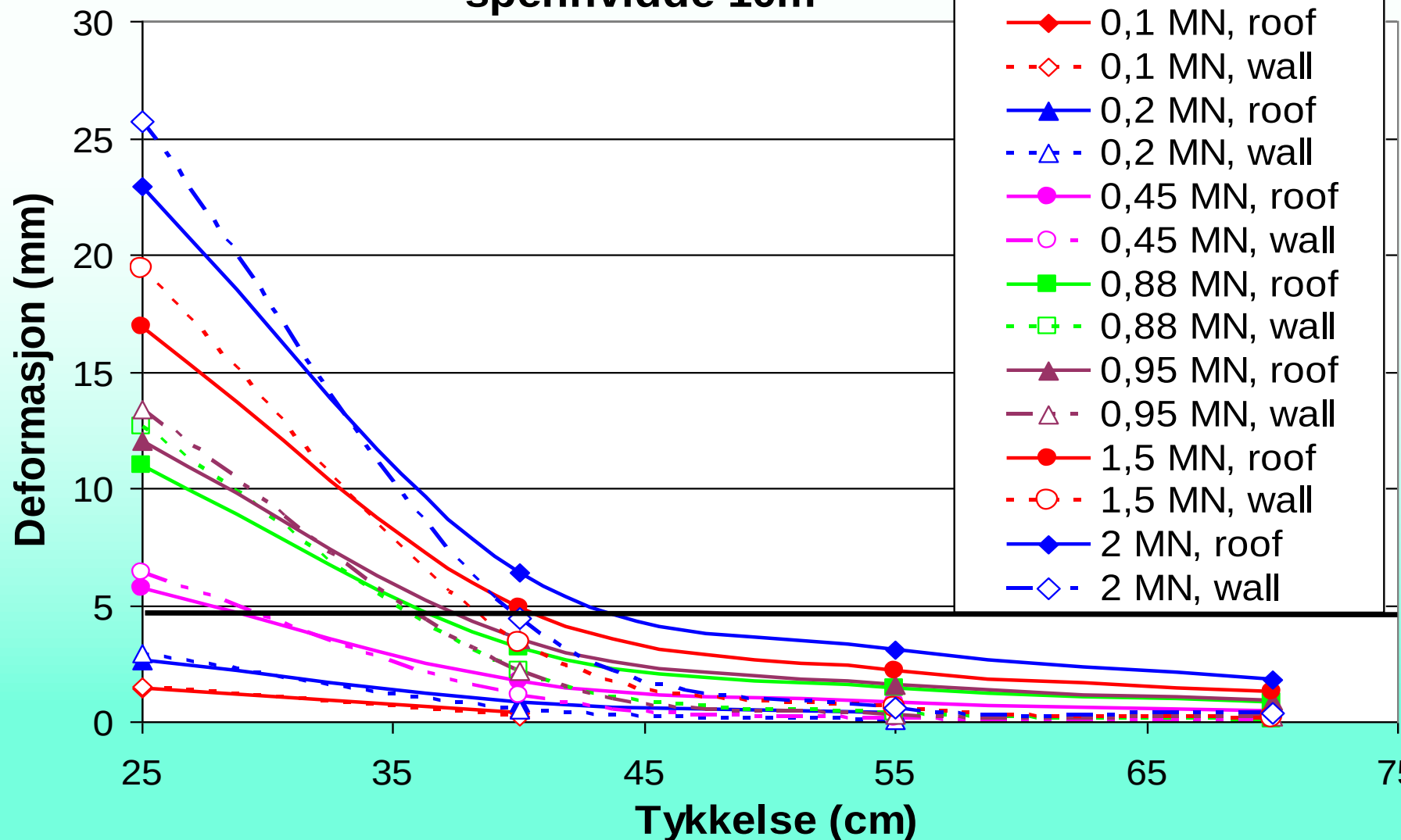
Last per bolt - Teori og praksis

- Ved $Q = 0,01$ og erfaringsmessig sikringstrykk på $1,0 \text{ MPa} \approx 100 \text{ t/m}^2$ vil vi teoretisk trenge ca. 8 stk. $\varnothing 20 \text{ mm}$ bolter/ m^2 eller ca. 3 stk. $\varnothing 32 \text{ mm}$ bolter/ m^2 når boltene belastes til flytegrensen, og kun bolter bærer sikringstrykket.
- Ved tradisjonell boltesikring c/c 1 m i ekstremt til eksepsjonelt dårlig bergmasse ($Q \approx 0,01$ kan boltene ($\varnothing 20 \text{ mm}$) ta et sikringstrykk på $12 \text{ t/m}^2 \approx 0,12 \text{ MPa}$, som tilsier en bergmassekvalitet $Q \approx 1-7$, avhengig av ruhetsindeksen Jr.
- **Omlagring og overføring av krefter til bergmassen, som danner en trykkbue, tar mesteparten av lasten.** Dette vises ved numerisk simulering.
- Sprøytebetong har vanligvis en heftfasthet på $0,5-1,5 \text{ MPa}$.
- Heftfasthet + bueeffekt gir i **jevne** profiler et større bidrag til sikring fra sprøytebetongen enn fra boltene.

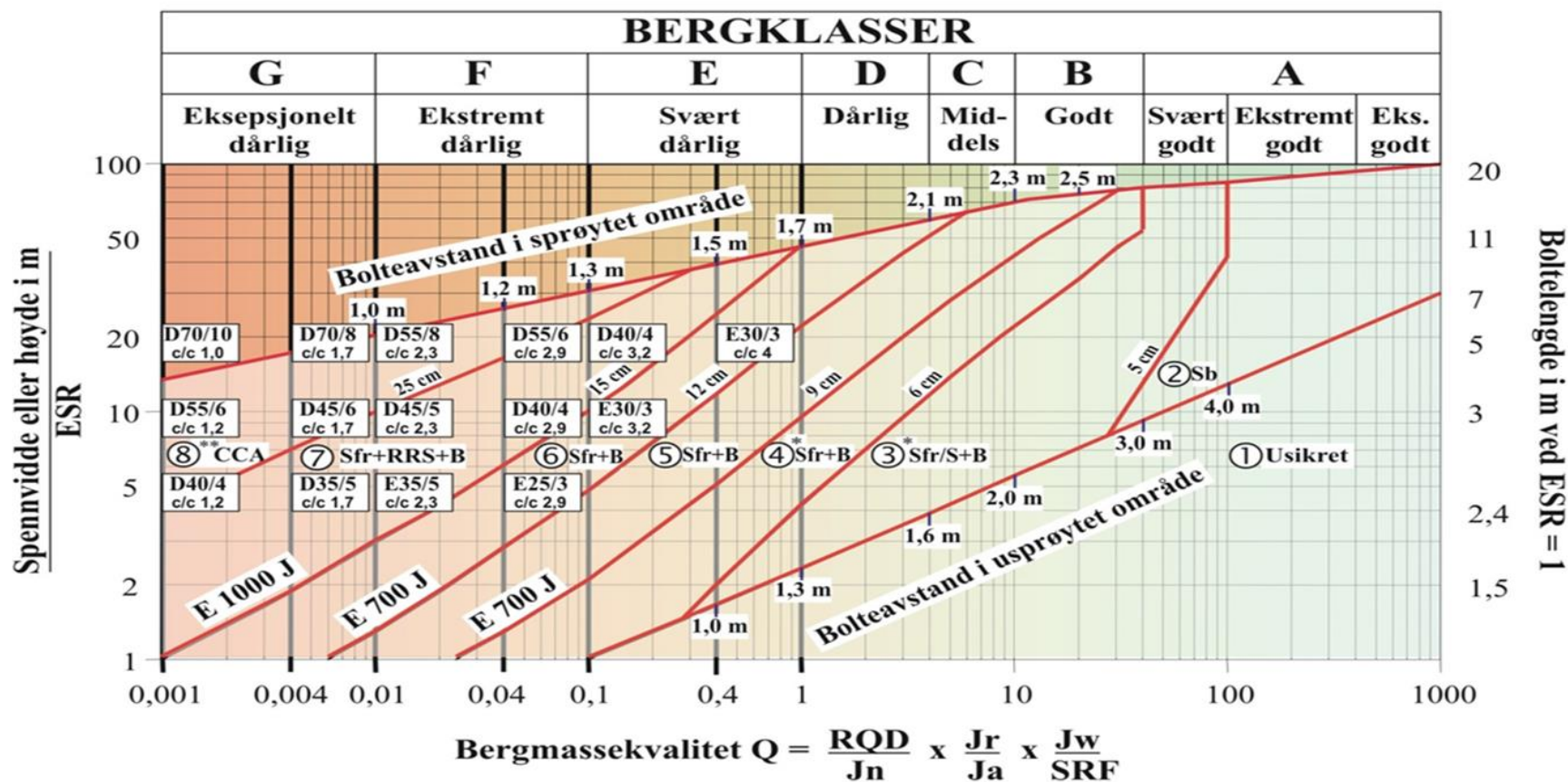
Dimensjonering av sprøytede, armert buer beregnet ved statikkprogrammet Stad

Deformasjon i heng og vegger ved ulike laster og tykkelser for spennvidde 10m

Laster per element ($\approx 1 \text{ m}^2$)



Sikring etter Q-verdi og dimensjon



SIKRINGSKATEGORIER

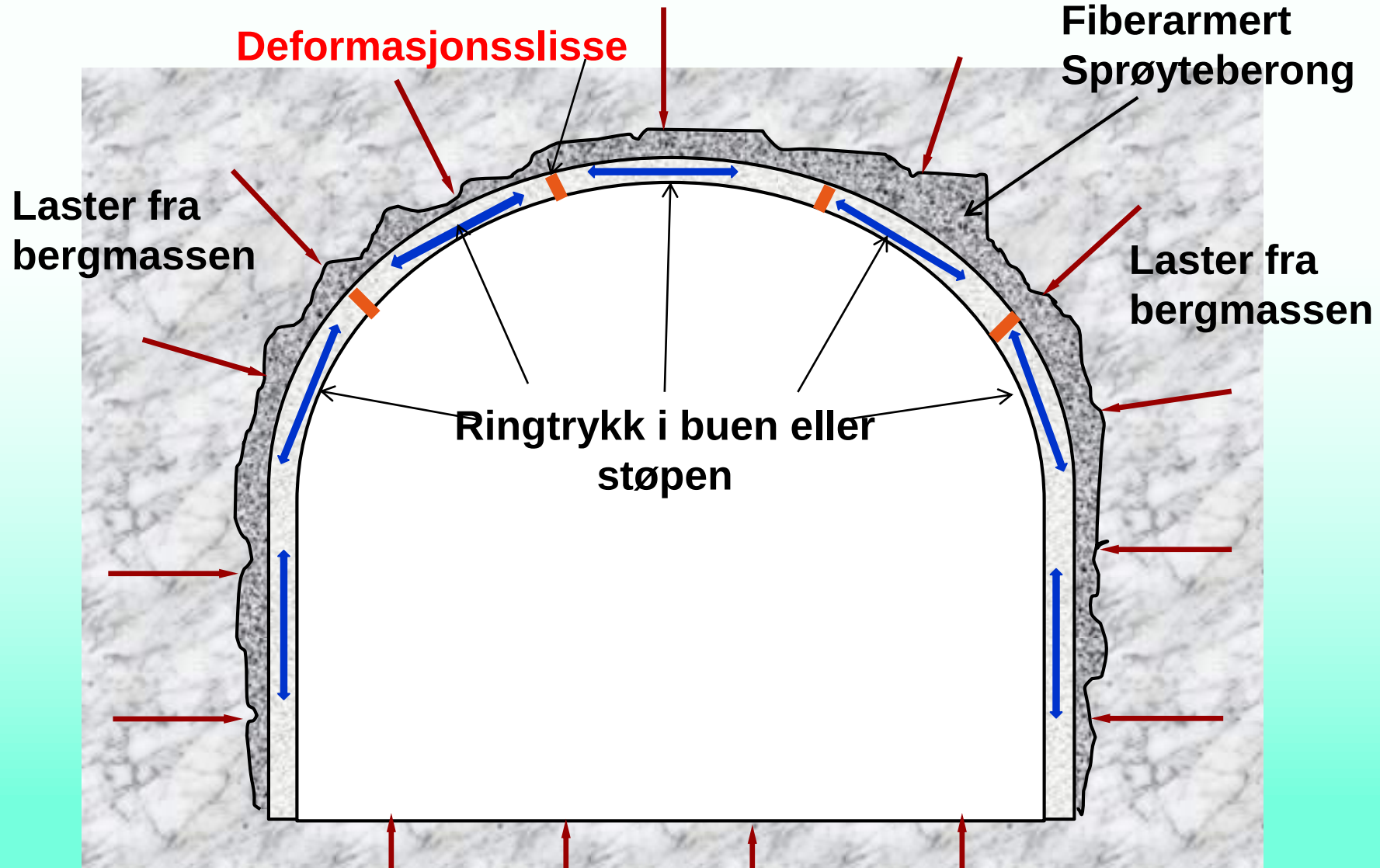
- 1) Usikret
- 2) Spredt bolting, **sb**
- 3) Systematisk bolting og uarmert eller fiberarmert sprøytebetong, 5-6 cm, **Sfr/B+S**
- 4) Fiberarmert sprøytebetong og bolting, 6-9 cm, **Sfr+B**
- 5) Fiberarmert sprøytebetong og bolting, 9-12 cm, **Sfr (E700) +B**
- 6) Fiberarmert sprøytebetong og bolting, 12-15 cm, **Sfr (E700) +B**
- 7) Fiberarmert sprøytebetong > 15 cm + armerte ribber av sprøytebetong og bolting, **Sfr (E1000) +RRS+B**
- 8) Betongutstøpning, **CCA** eller **Sfr (E1000) +RRS+B**

Boltene er 20 eller 25 mm i diameter

E) Energiabsorpsjon i fiberarmert sprøytebetong ved 25 mm nedbøyning i platetest

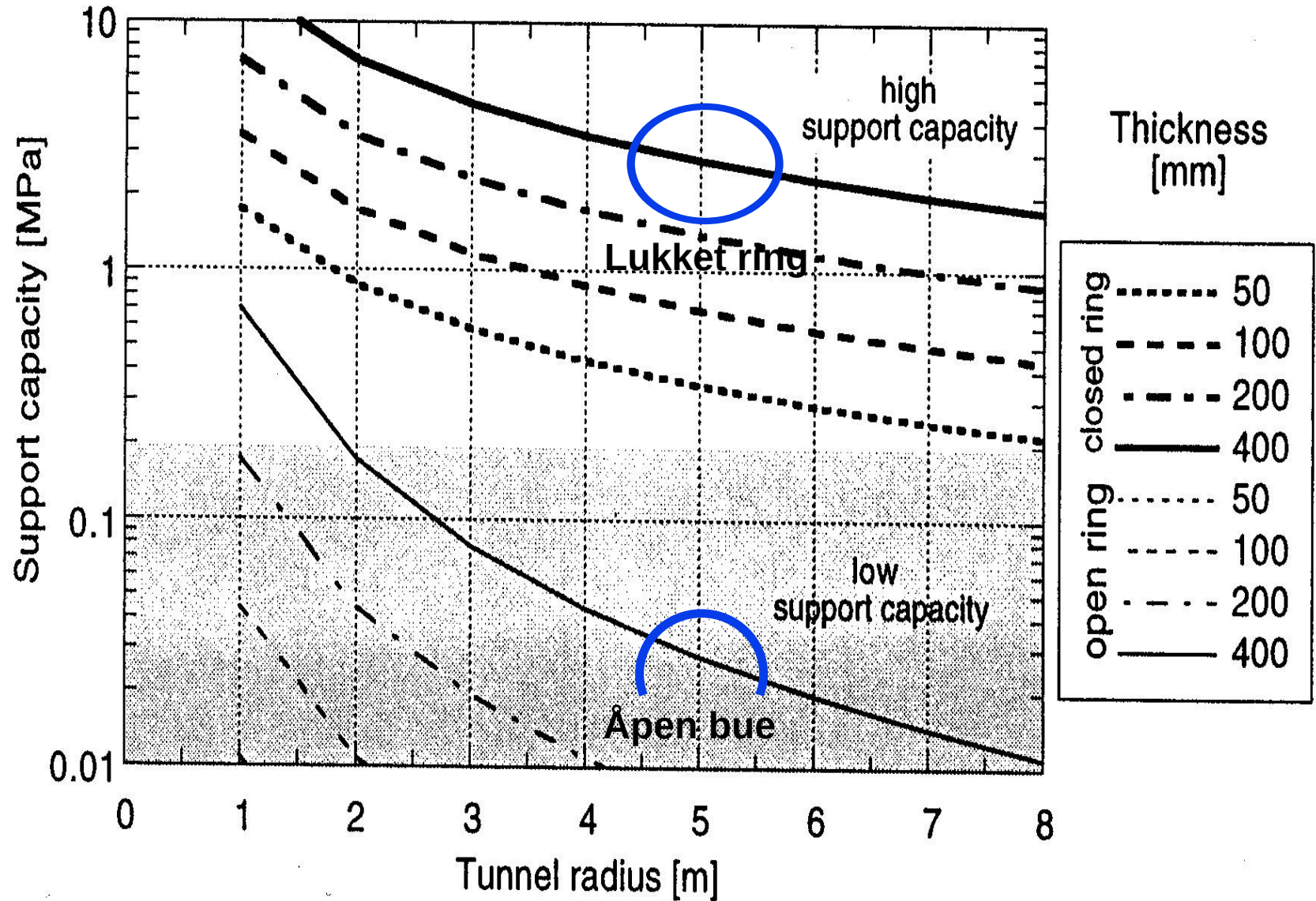
D45/6 = RRS (sprøytete buer) med totalt 6 armeringsjern i dobbelt lag, i 45 cm tykke buer med senter/senter-avstand 1,7 m. Hvert rektangel er relatert til Q-verdien i venstre sidekant av rektangelet

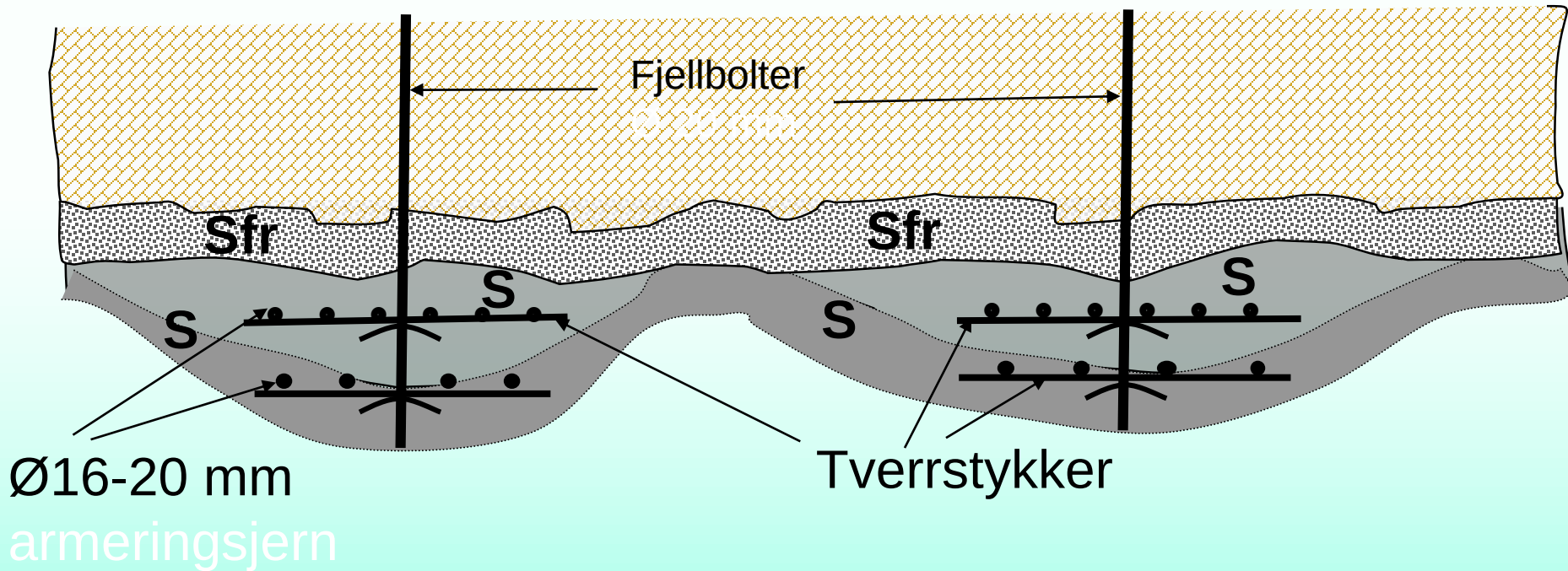
Tolkning av tøyningsbildet i snitt vinkelrett på tunnelaksen



Dette er **ikke** en sluttet ring, og tar kun små laster fra siden (Ca. 1/100 av sluttet ring)

Bæreevne for åpen og lukket ring





**Armerte sprøytetongbuer med ett eller to lag armering
dimensjonert etter bergmassekvalitet**

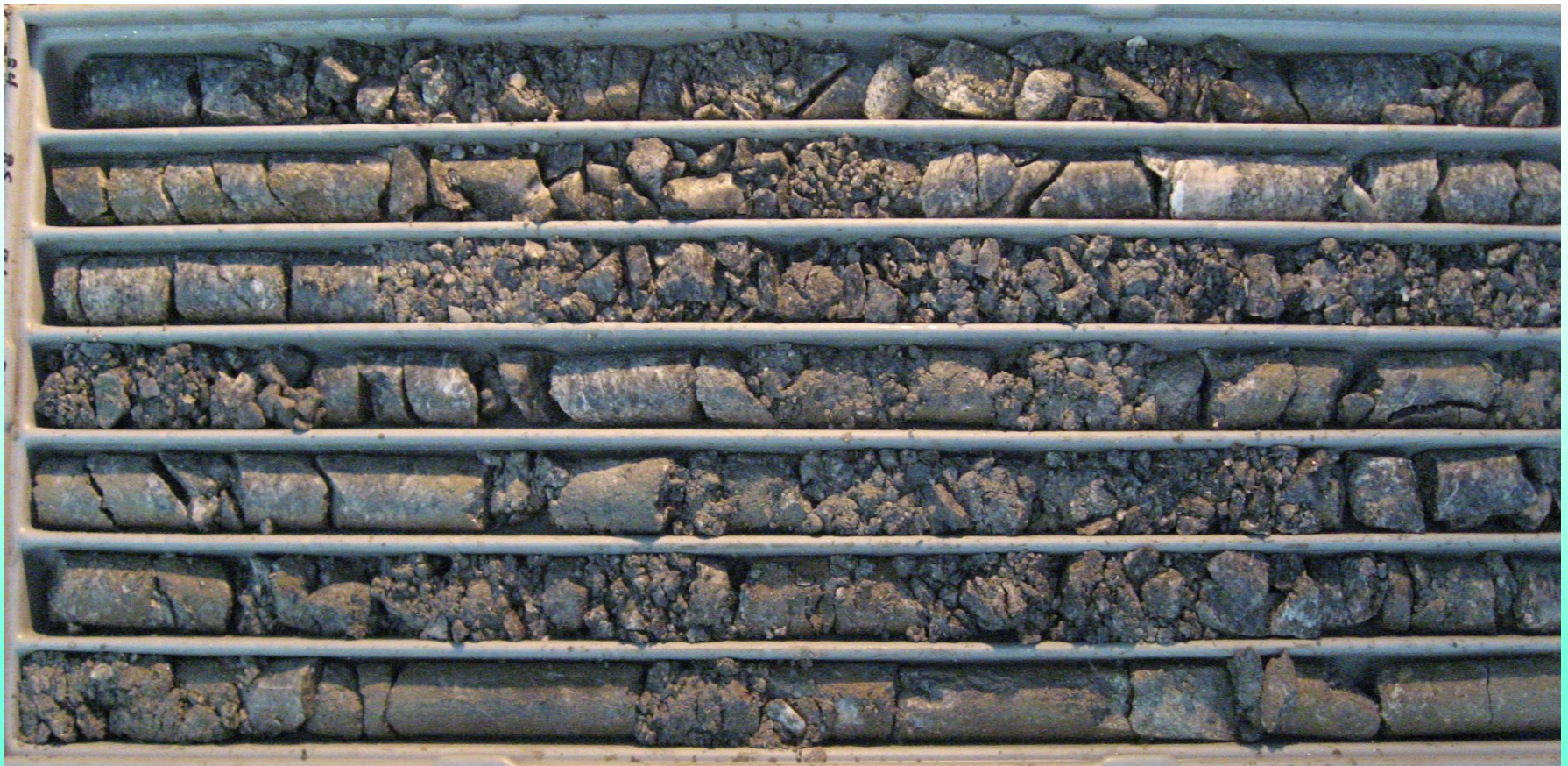
**Ferdig sprøytet dobbelt armert bue i påhugget i
Fatlatunnelen i Sogn. Skrått påhugg med 19 m spennvidde.
Spennvidde i buen er ca. 10,5 m. Skjev belastning fra
fjellsiden.
12 + 10 stk. Ø 16 mm jern.**



Borkjerner fra den instrumenterte svakhetssona i Finnfast

Bergmassekvalitet, $Q = (10/20) \times (1/10) \times (1/5-10) = 0,005- 0,01$

Eksepsjonelt til Ekstremt Dårlig. Inneholder svelleleir.



Ved ESR = 1

Hanekleiv-raset

Bærumstunnelen

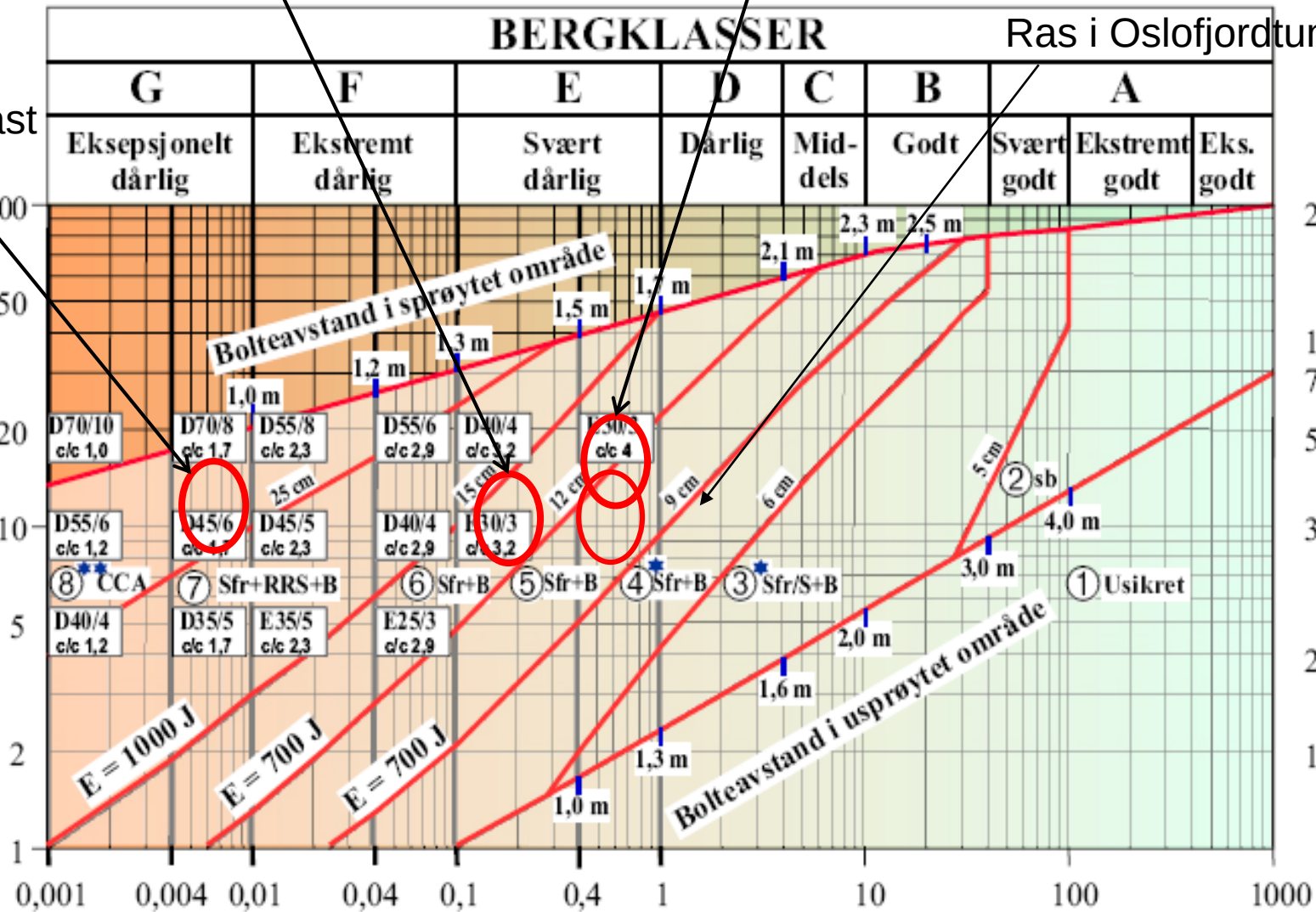
Ras i Oslofjordtunnelen

Finnfast

Spennvidde eller høyde i m

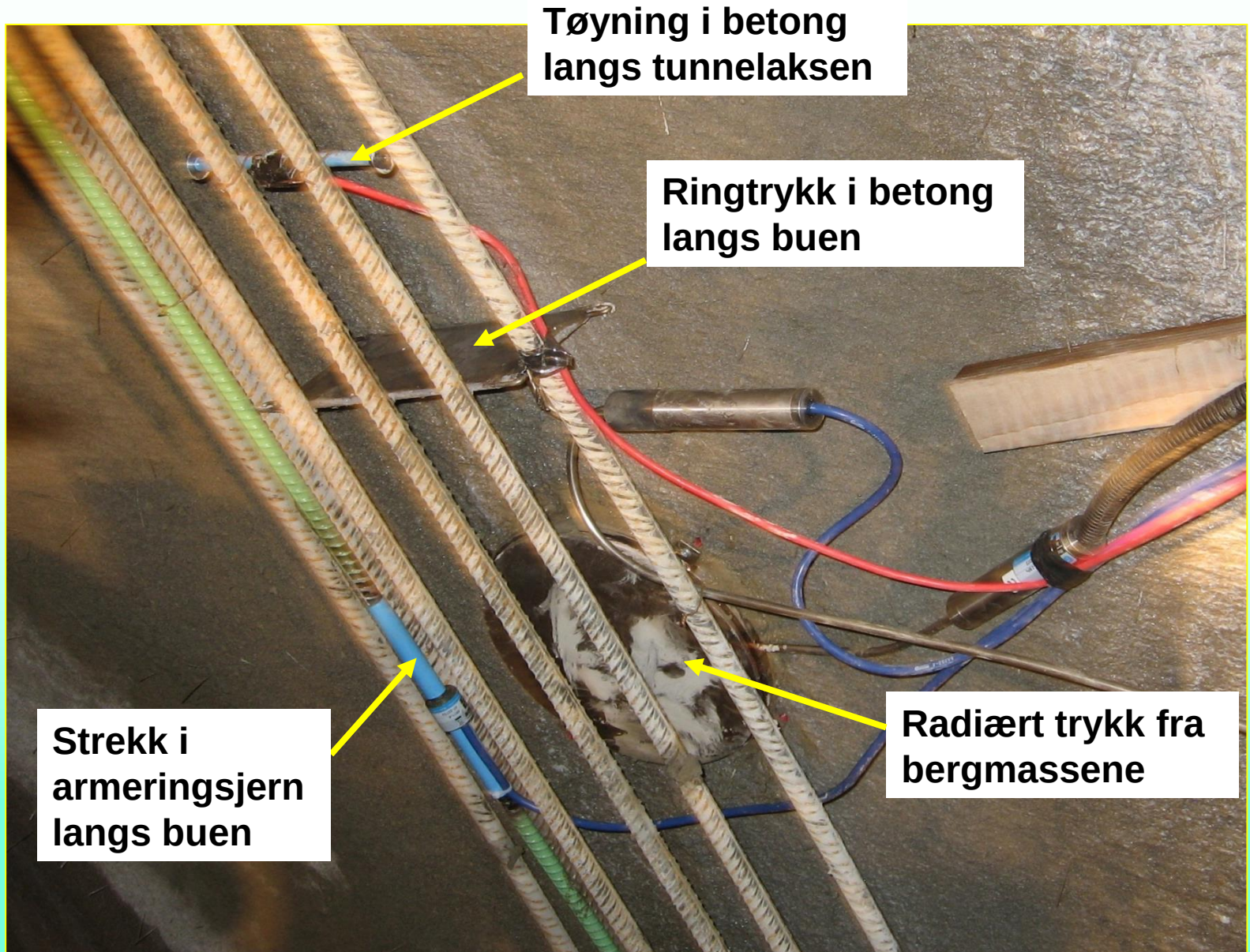
ESR

Boltelengde i m ved ESR = 1

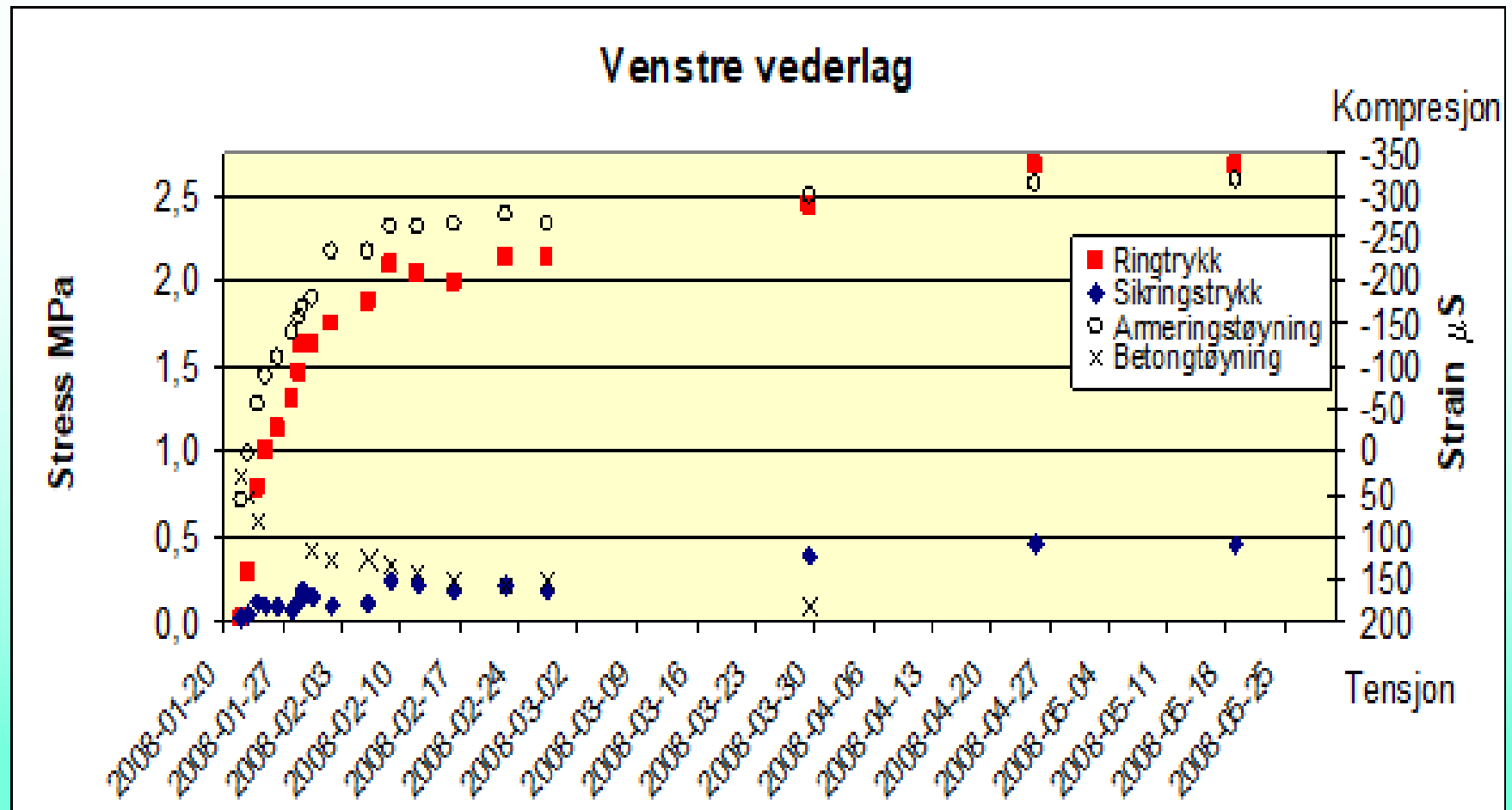


$$\text{Bergmassekvalitet } Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Installerte instrumenter før sprøyting av bue



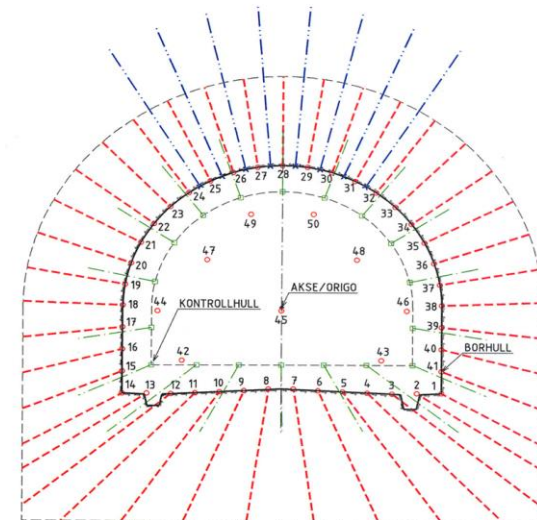
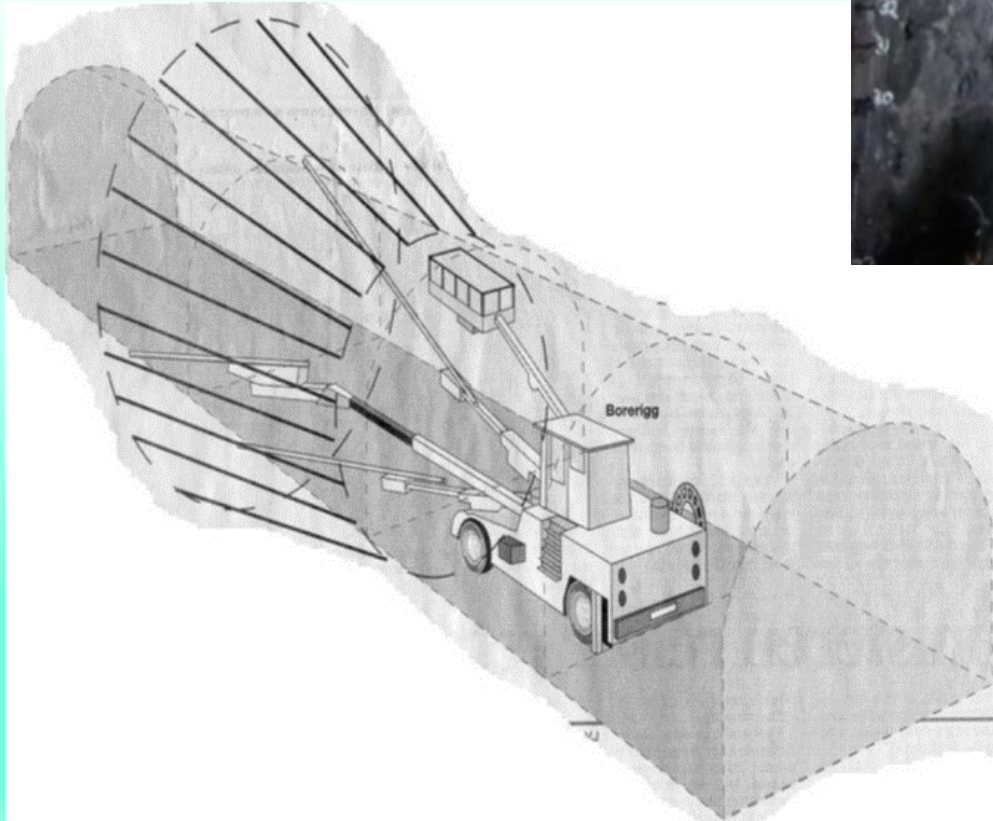
Målte laster i knusningssone i Finnfast



Ringtrykket i buer er høyere enn radiær last

- I jordaktig svakhetssone er det sprøytet buer i undersjøisk tunnel på Finnfastanlegget øst for Stavanger
- En av disse buene er instrumentert
- Ringtrykket er målt opptil 2 MPa = 200 tonn/ m² i det ene vederlaget
- Tilsvarende ringtrykk i bue under 4 m fjelloverdekning + 5 m jord i Bærumstunnelen vest for Oslo er maks. 30 tonn/m²
- De radiære lastene er små i forhold til ringtrykkene
- Maks (radiær) last mot hengen i Finnfast etter lang tids omlagring økte til 0,5 MPa = 50 tonn/m²
- Maks last mot hengen i Bærumstunnelen etter lang tids omlagring var 0,0 MPa = 0 tonn/m². Arbeidssikringen med Sfr + B tok hele lasten fra overlagingstrykket

Forinjeksjon kan øke stabiliteten og dermed Q-verdien betydelig



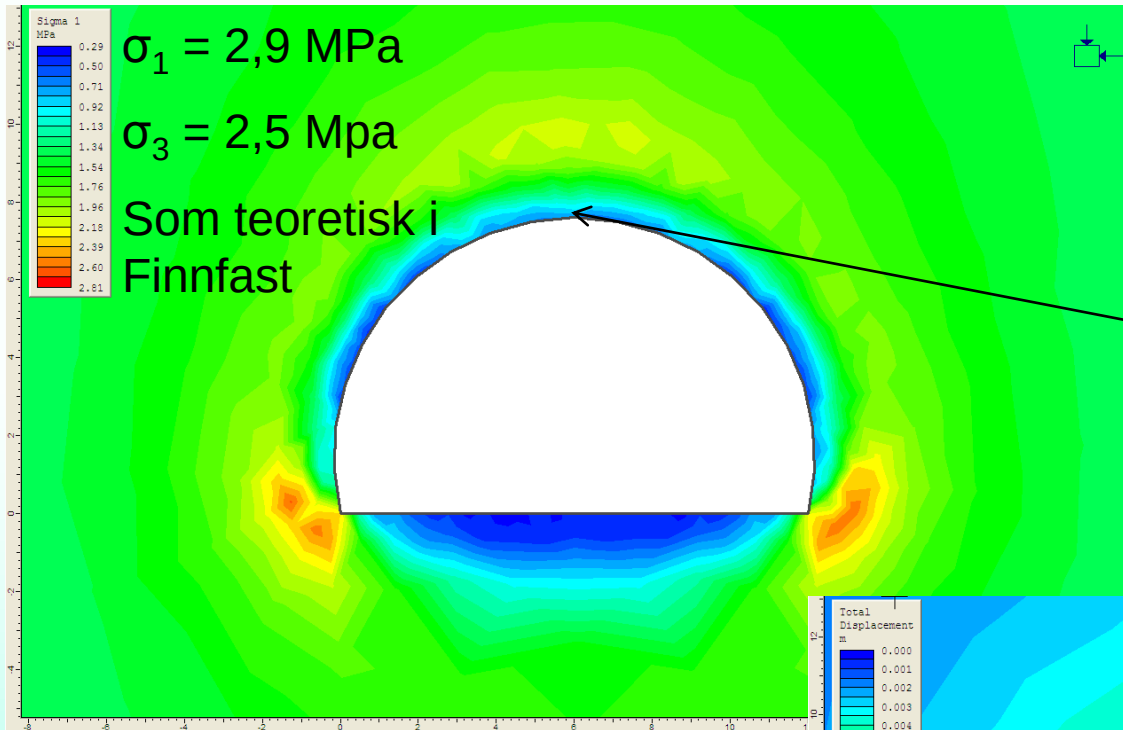
Forinjeksjon i løsmasser etter sonderboring i Rødølstunnelen (E16, Vang i Valdres). 0,5 til 11 m inn til spylerenne fylt av løsmasser. Forbolting med Ischebeckstag støttet med armert bue i bakkant.



Sand, grus og rullestein i spylerenne 10 m under Kongevegen ble stabilisert ved forinjeksjon og forbolting. Rødølstunnelen 2017. Q-verdi øket fra ca. 0,007 til ca. 0,08

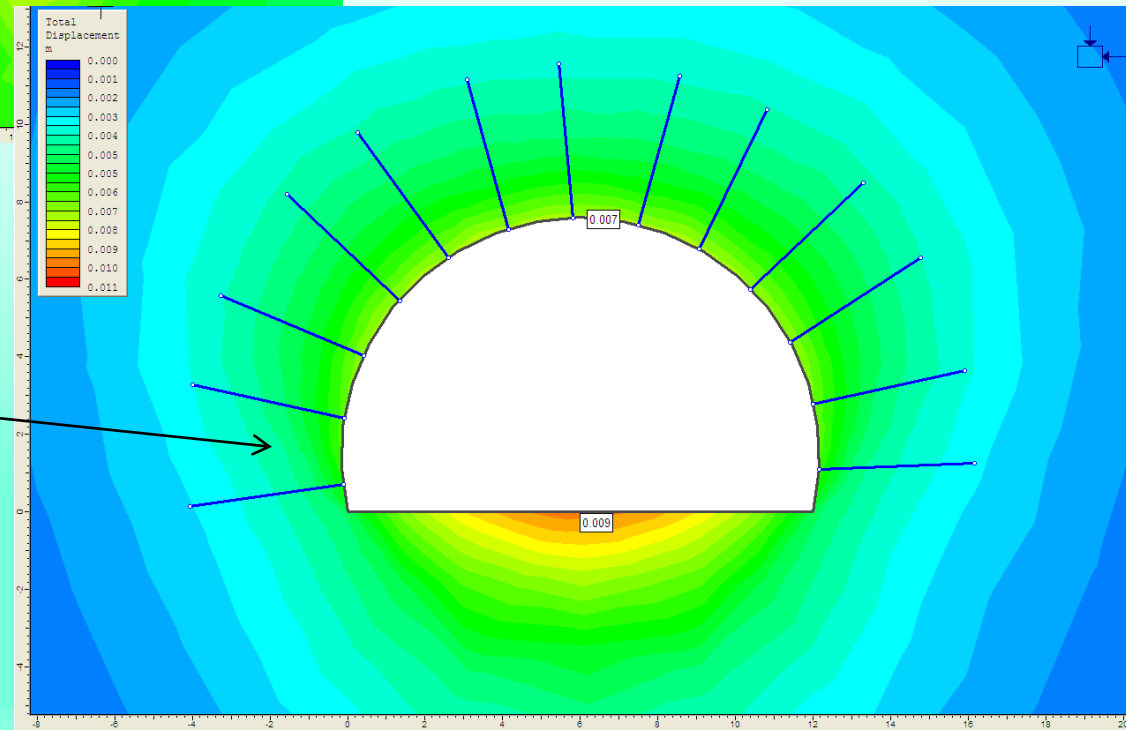


Numerisk simulering av en 9 m bred tunnel med Phase 2.



Lave spenninger nær tunnelprofilen og høyere spenninger i en sone 3-4 m over hengen i et 9 m bred tunnel

Maksimum total deformasjon er 7 mm i hengen og 9 mm i sålen. 80 % av deformasjonen har skjedd før sikring kom på plass, dvs. ca. 5-6 mm i hengen



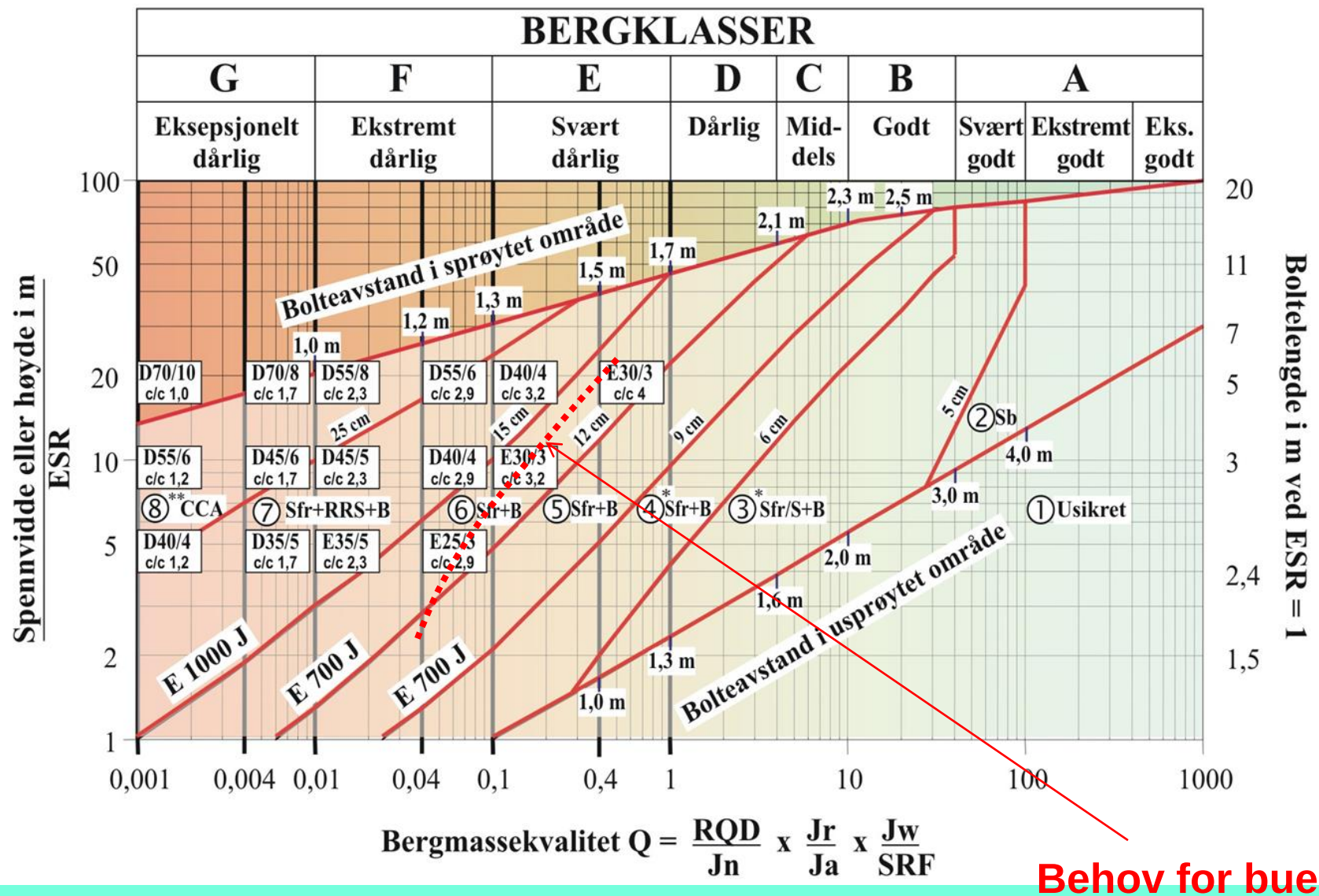
Hvordan kontrollere bergmassen etter sikring?

■ Målinger

- ✓ Konvergensmålinger
- ✓ Ekstensiometermålinger
- ✓ Lasermålinger (Lidar)

■ Tiltak dersom fortsatt konvergens etter lang tid

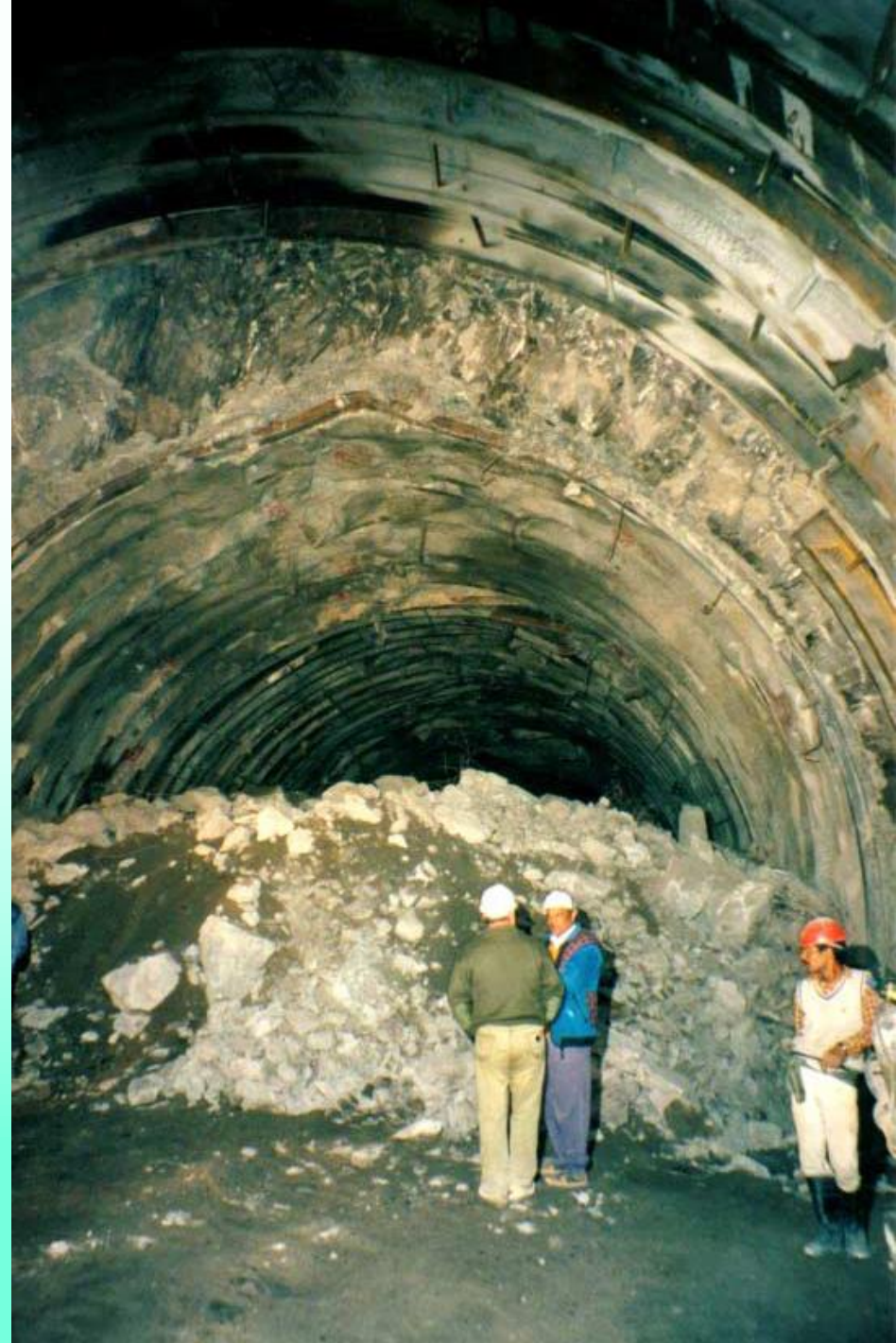
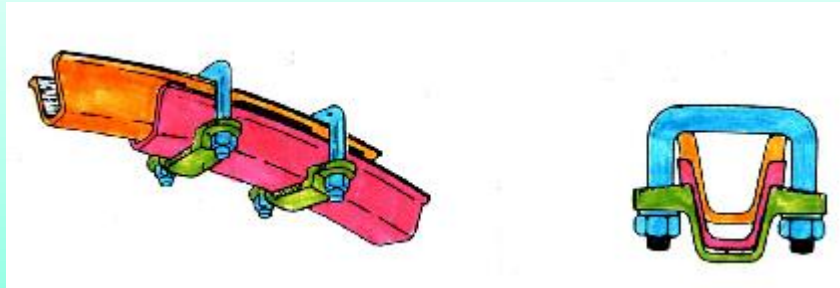
- ✓ Sålestøp
- ✓ Legge inn deformasjonsslisser dersom det er høye spenninger
- ✓ Sprøyting av flere buer (reduisert avstand)
- ✓ Forsterke eksisterende buer
- ✓ Sette lange, forspente bolter gjennom støp
- ✓ Rive støp/bue og armere ny støp med deformasjonsslisser



Sikringsmengdene i S.v.v. Håndbok nr. 21 tilsier ESR = 0,5-1

Bukling i stålbuer + Sfr og ras på grunn av skvising i overføringstunnel ved Nathpa Jhakri i India. Dårlig kontakt mellom buene og bergoverflaten.

Bruk av bolter og deformasjonsslisser kunne ha hindret dette



Unngå å se spøkelser i tunneler med svelleleir
Spøkelser kan man se på Norsk Fjellspreningsmuseum
Sikre etter dokumentert behov og ønsket levetid



Takk for oppmerksomheten