



NTNU

Innovation and Creativity

Bergmekaniske prinsipper / undersøkelse- og målemetoder

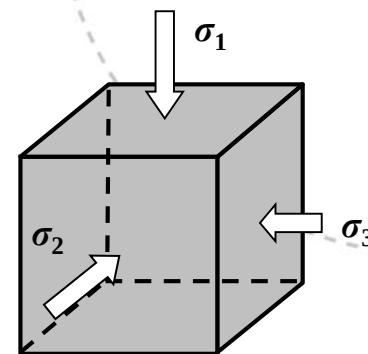
Charlie C. Li

Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU

Anvendt bergmekanikk?



Bergmasse (faktum)



**Insitu spenninger
(faktum)**



Styrker av berg og bergmasse

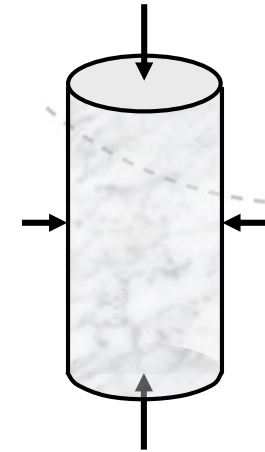
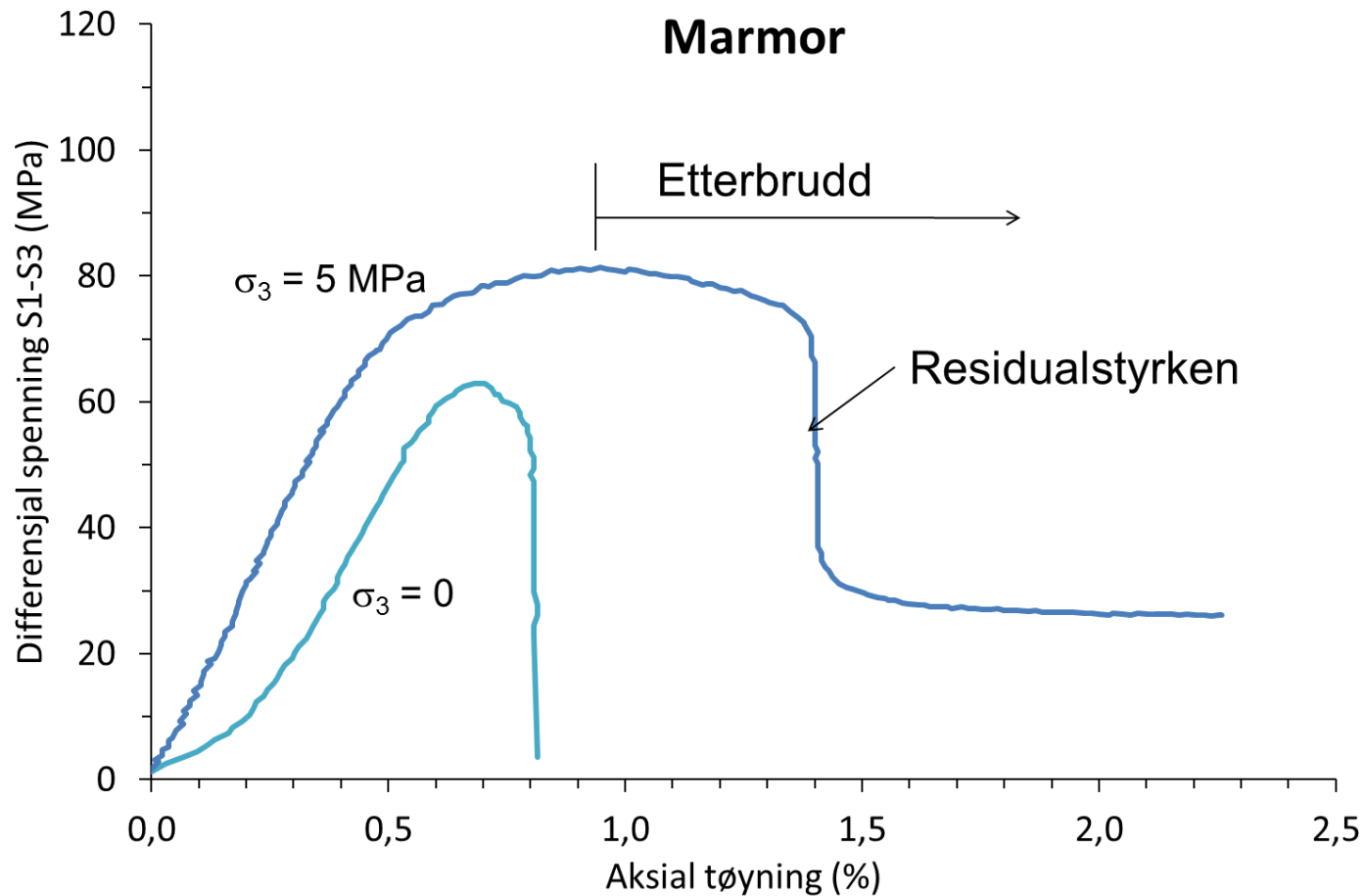
Bergartsstyrken:

- Trykkfasthet: σ_c
- Strekkefasthet: σ_t
- Forholdet: $\sigma_c = (10 \sim 20) \sigma_t$, 10 $\longleftrightarrow$ 20
svakt Hardt

Bergmassestycken:

- Vurdert igjennom bergmasseklassifisering: RMR, Q, GSI

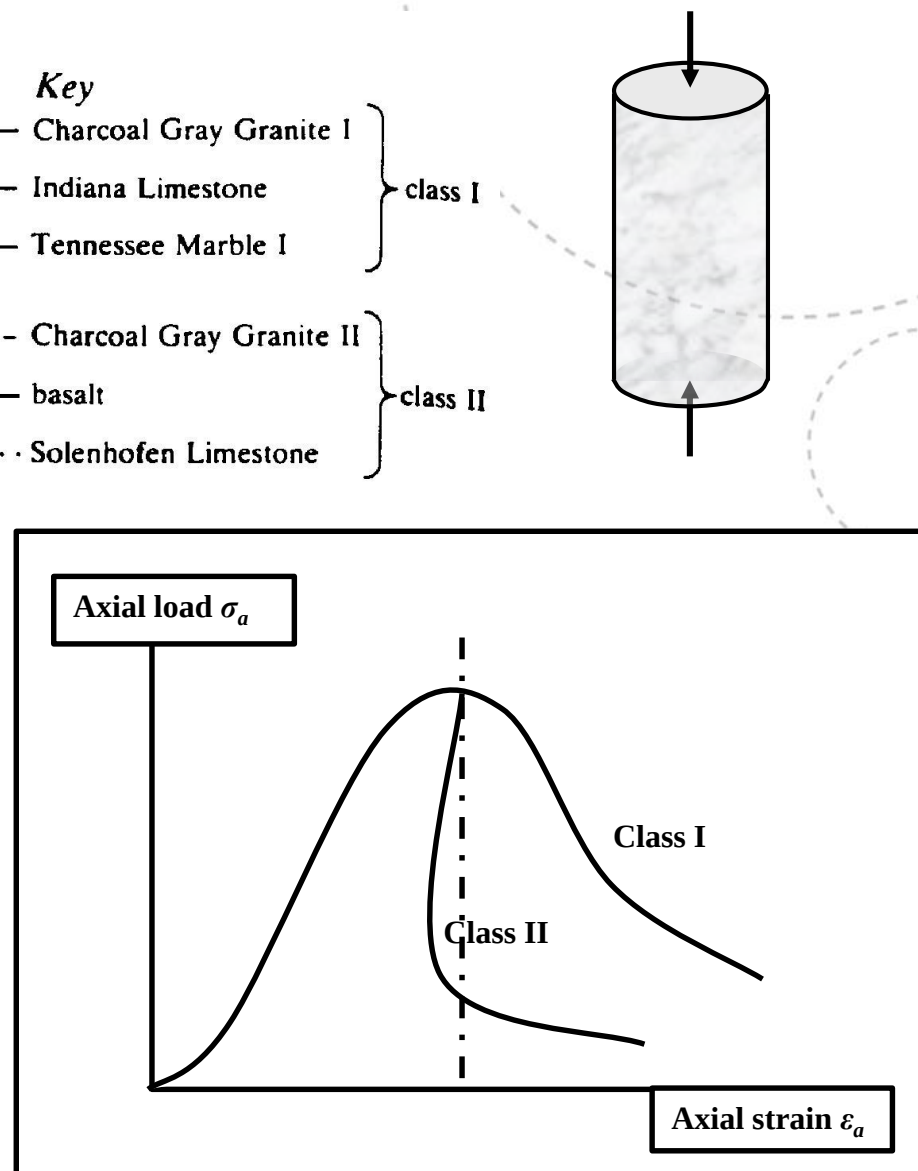
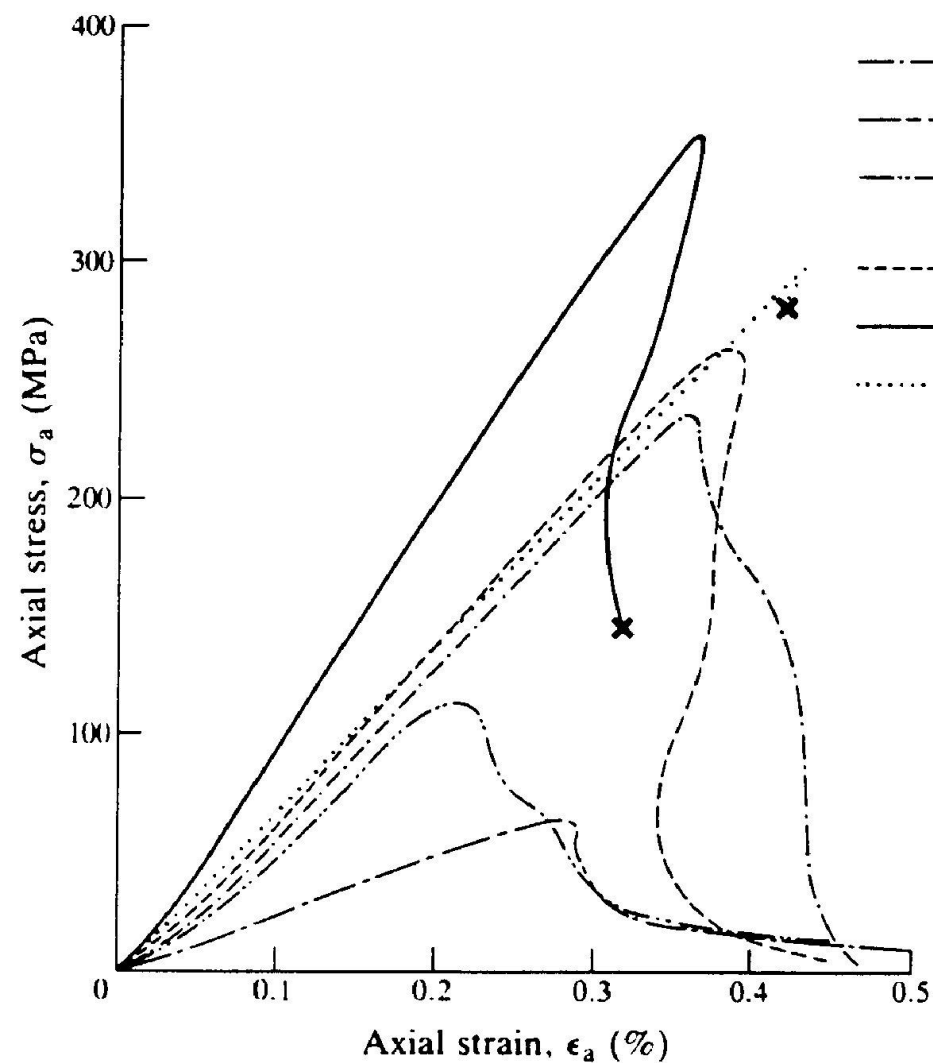
Spenning-tøyningskurven

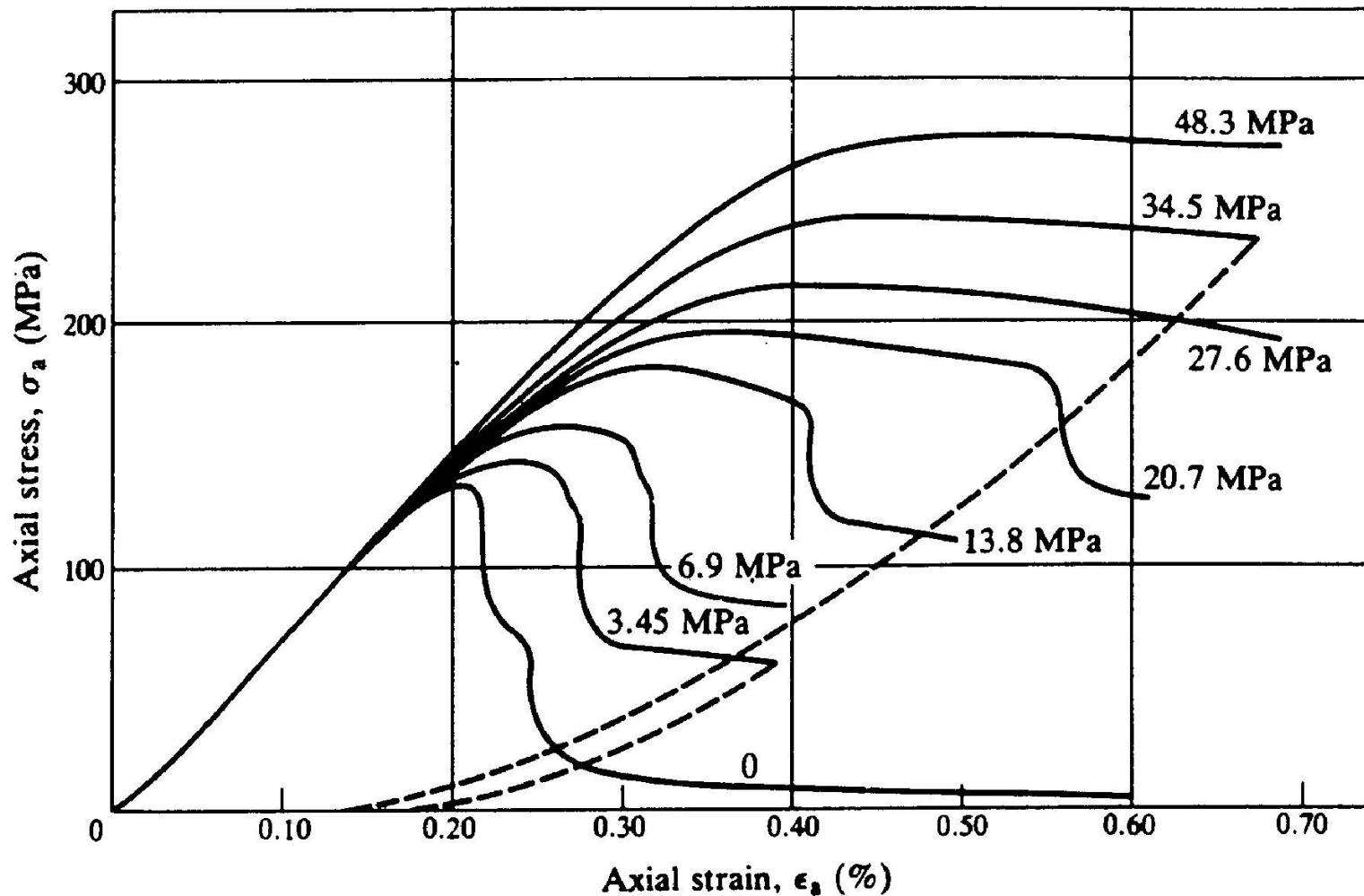


Prinsipp 1: Anvendelse av residualstyrken

- Berget kan bære noen last etter brudd.
- Anvendelsen:
 - Etterbruddspilar (Yield pillar), vanlig brukes i gruver
 - Bolte fast, i stedet å fjerne, oppsprukket berg

Ytelse av berg





- Berg blir sterkere og seigere med økning i omslutningstrykket.

Prinsipp 2: Klass I og Klass II

Bruddtyper av berg under høye spenninger:

- Klass I berg: skjærbrudd og stor deformasjon
- Klass II berg: spraking og bergslag



Deformasjon i Klass I berg



Spraking/bergslag i Klass II berg

Egenskaper av sprekker



- Skjærfasthet
- Skjær- og normalstivheter

Skjærfasthet:

$$\tau = \sigma_n \tan[\phi_b + i]$$

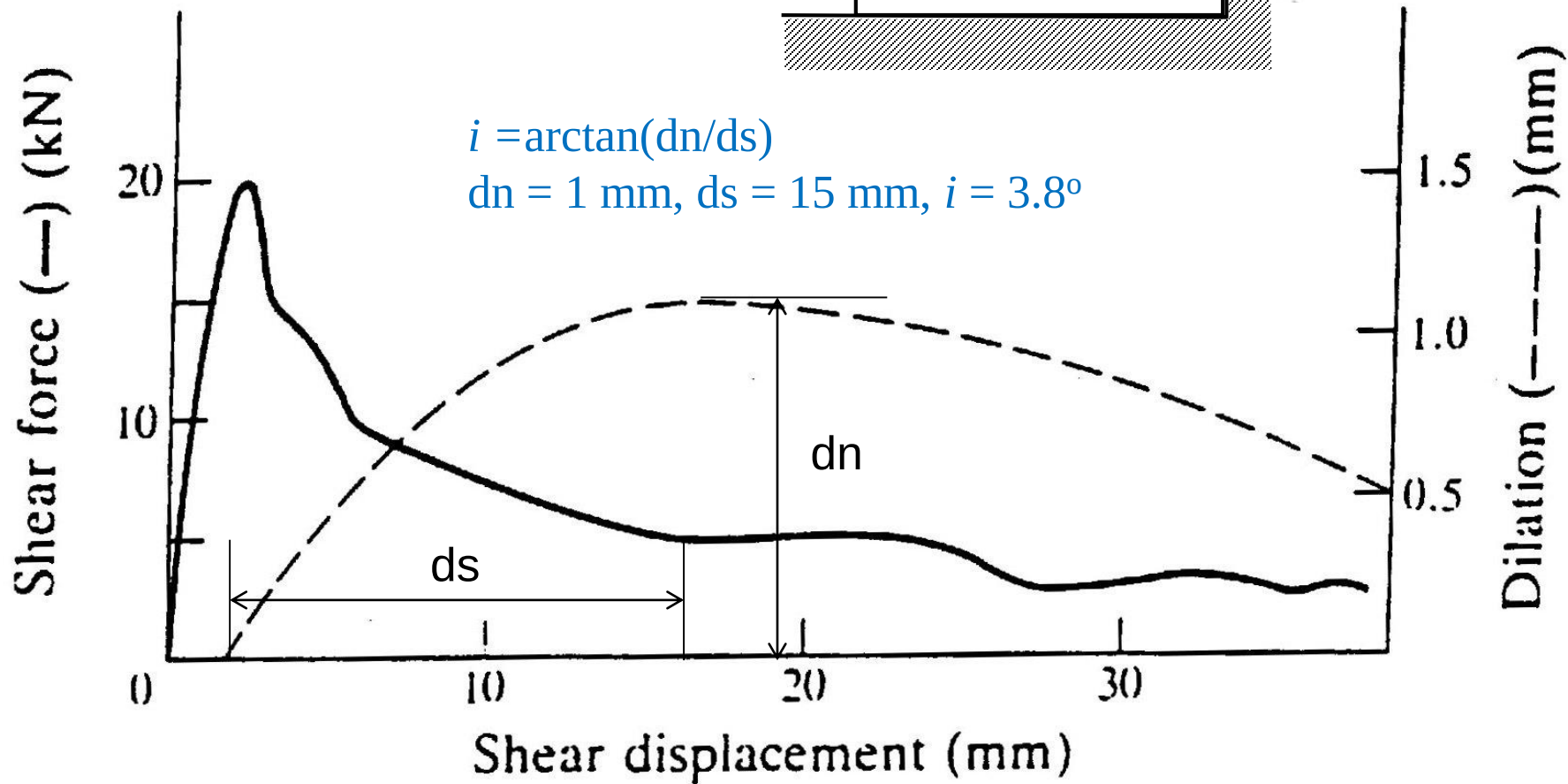
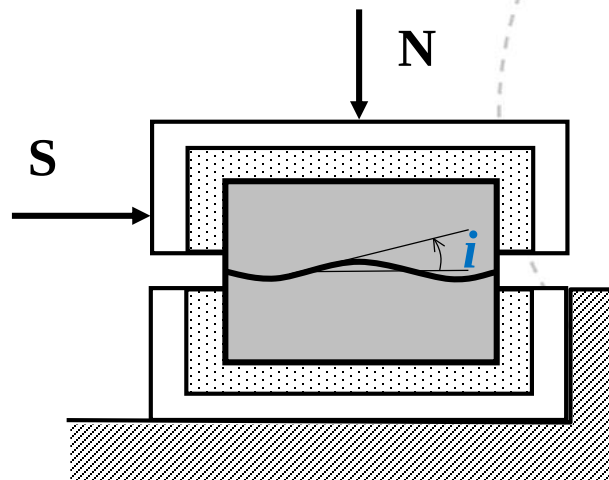
Grunnfriksjonsvinkel

Ruhetsvinkel

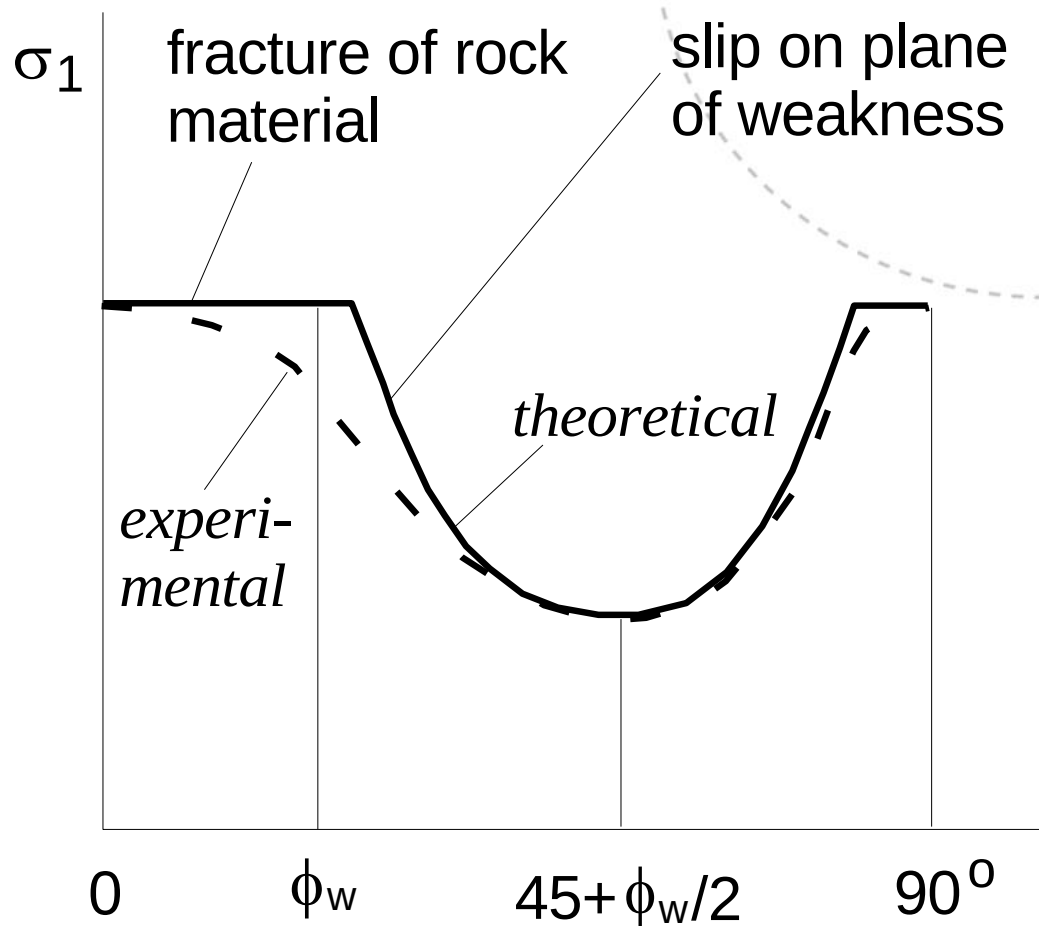
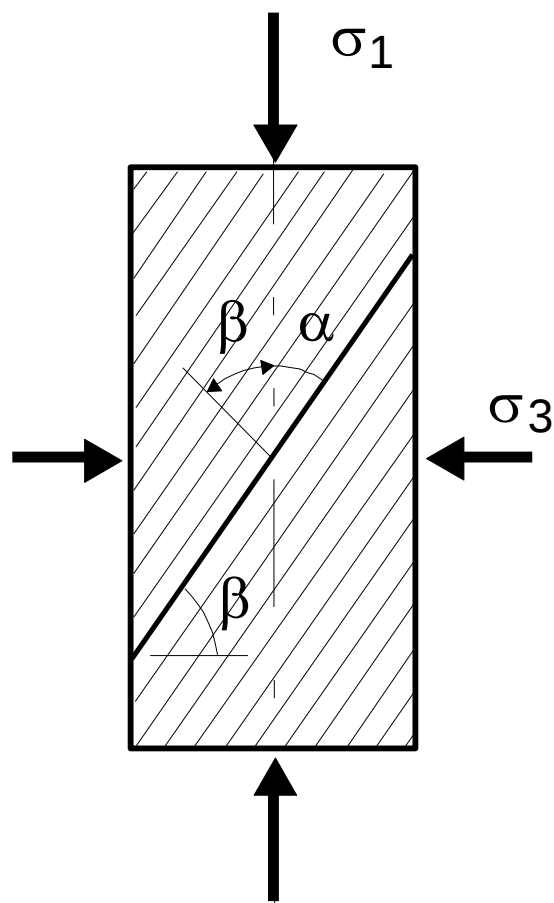
$$i = JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)$$

Initialruhetsvinkelen

Skjærprøving



Inflytelse av sprekker til fastheten



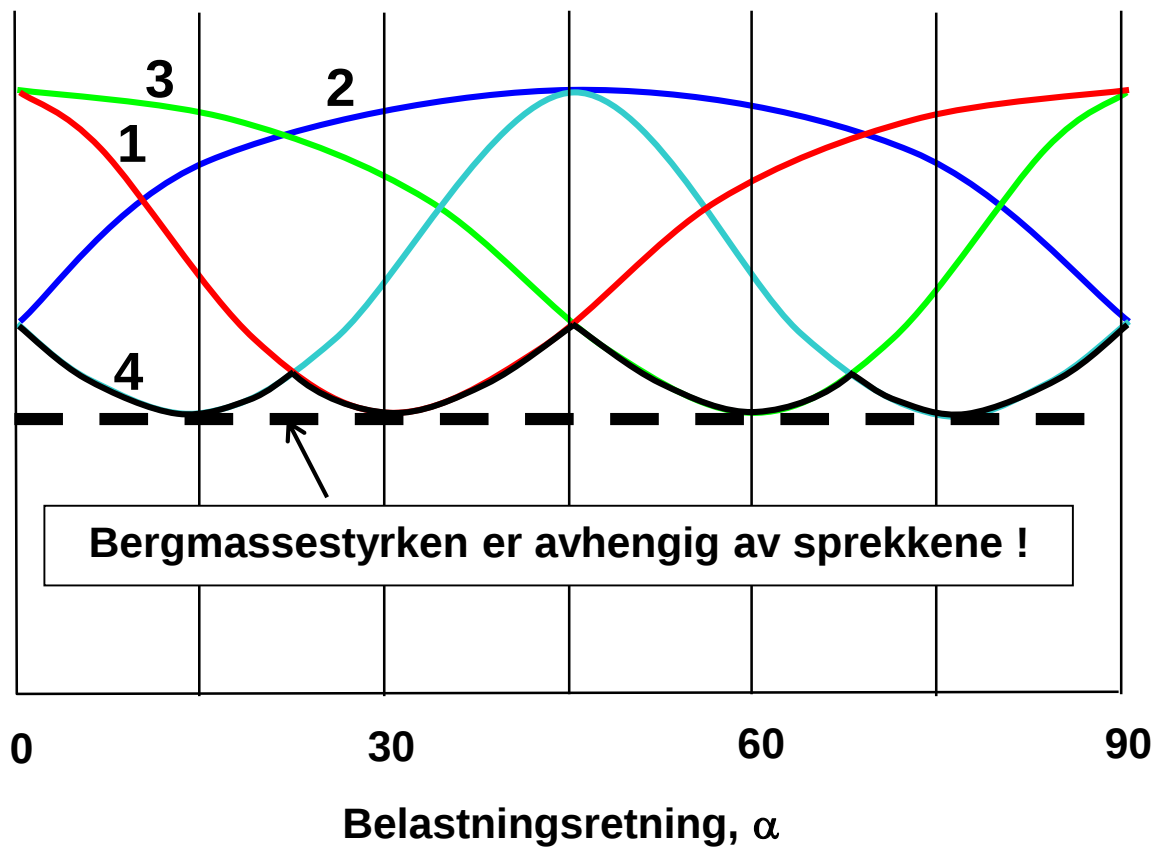
β



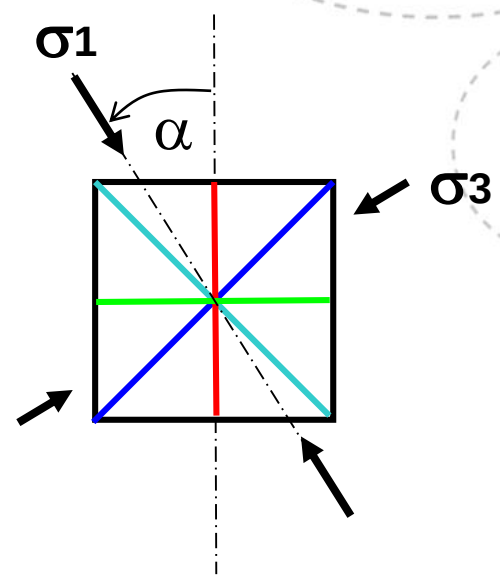
NTNU

Innovation and Creativity

Fasthet
($\sigma_1 - \sigma_3$)

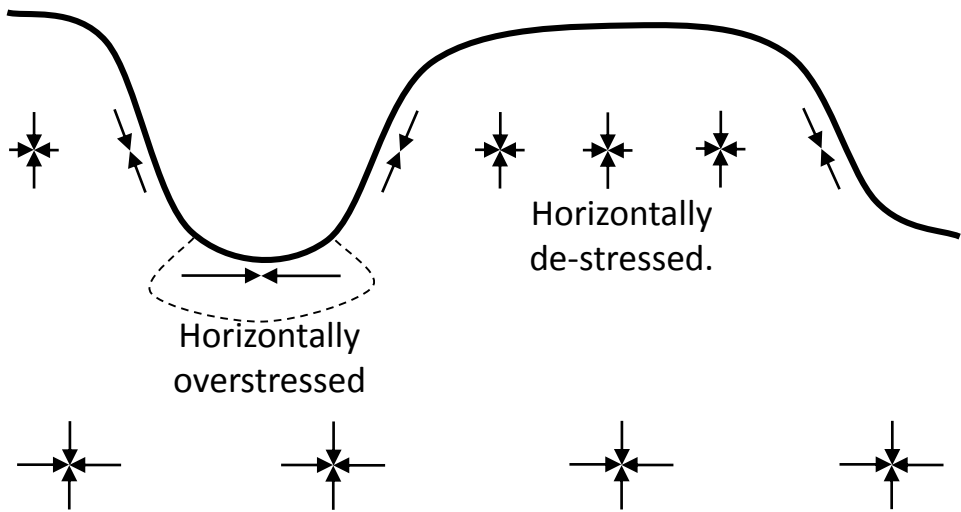


Bergmassestyrken er avhengig av sprekke !

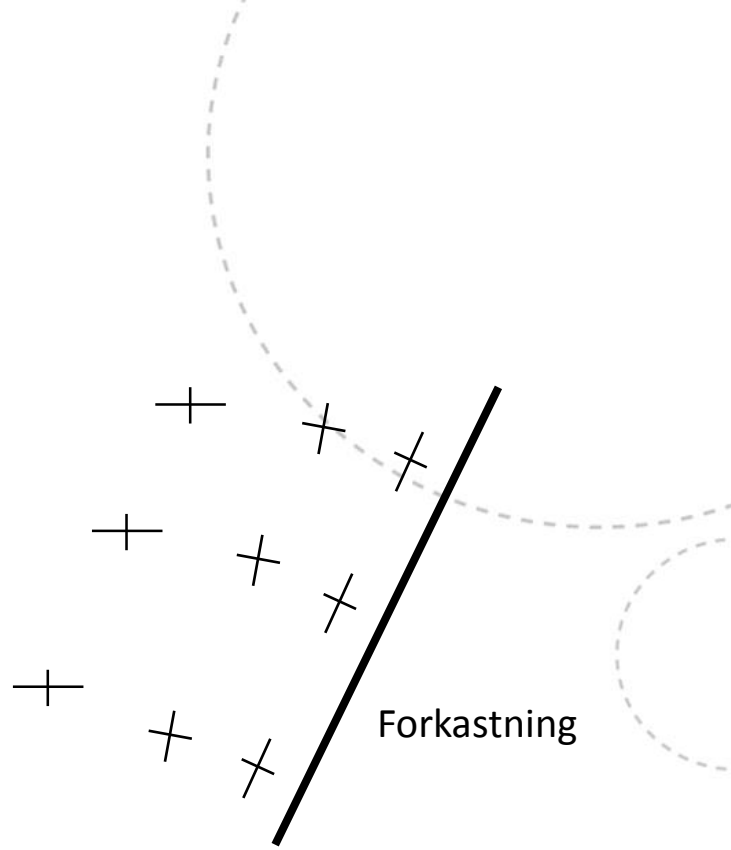


Bergspenninger

- Vertikalspenningen = Gravitasjonsspenning
- Horisontalspenninger > Vertikalspenningen
- Topografi har en stor innflytelse på horisontalspenningsstørrelsen.
- Geologiske strukturer, t. eks. forkastninger, har innflytelser på hovedspenningsretninger.

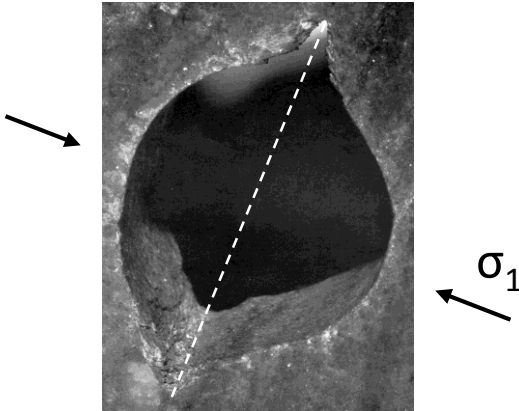


Innflytelse av topografi

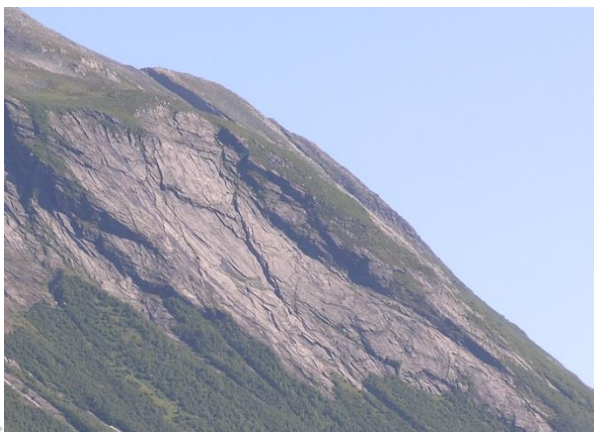


Innflytelse av forkastning

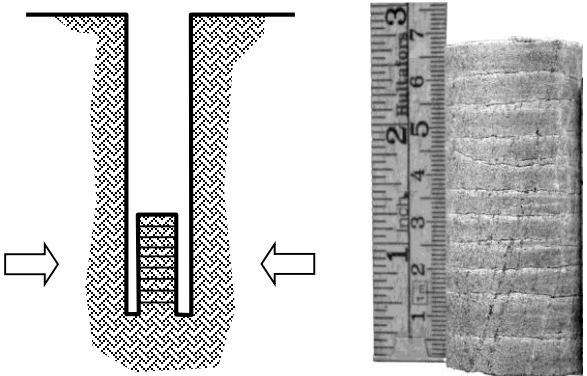
Høyspennings indikatorer



Hull "breakout"



Eksfoliasjon



Corediscing

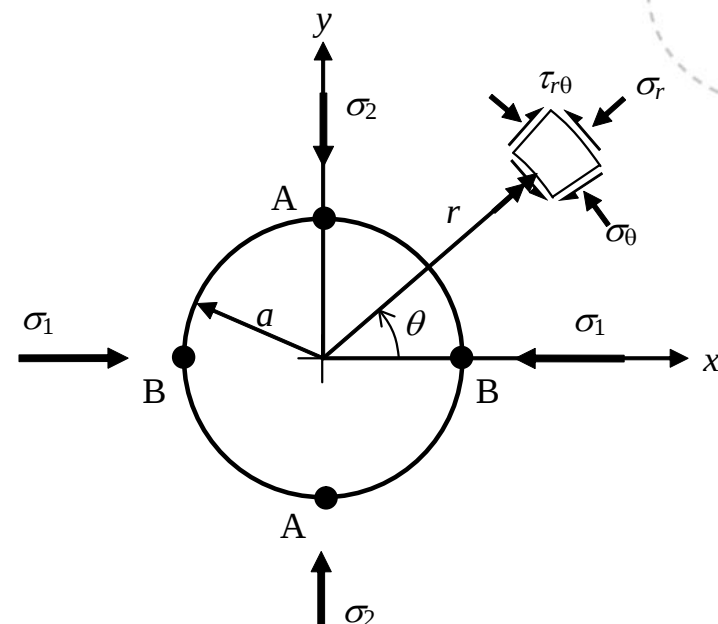
Spenningsanalyse

Kirsch ekvasjoner:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta$$

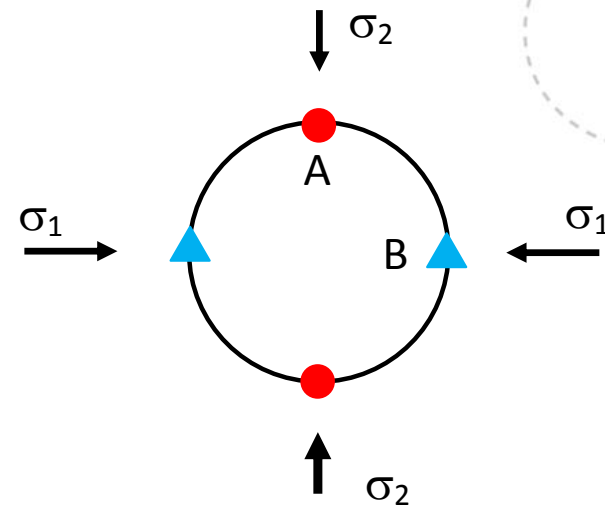


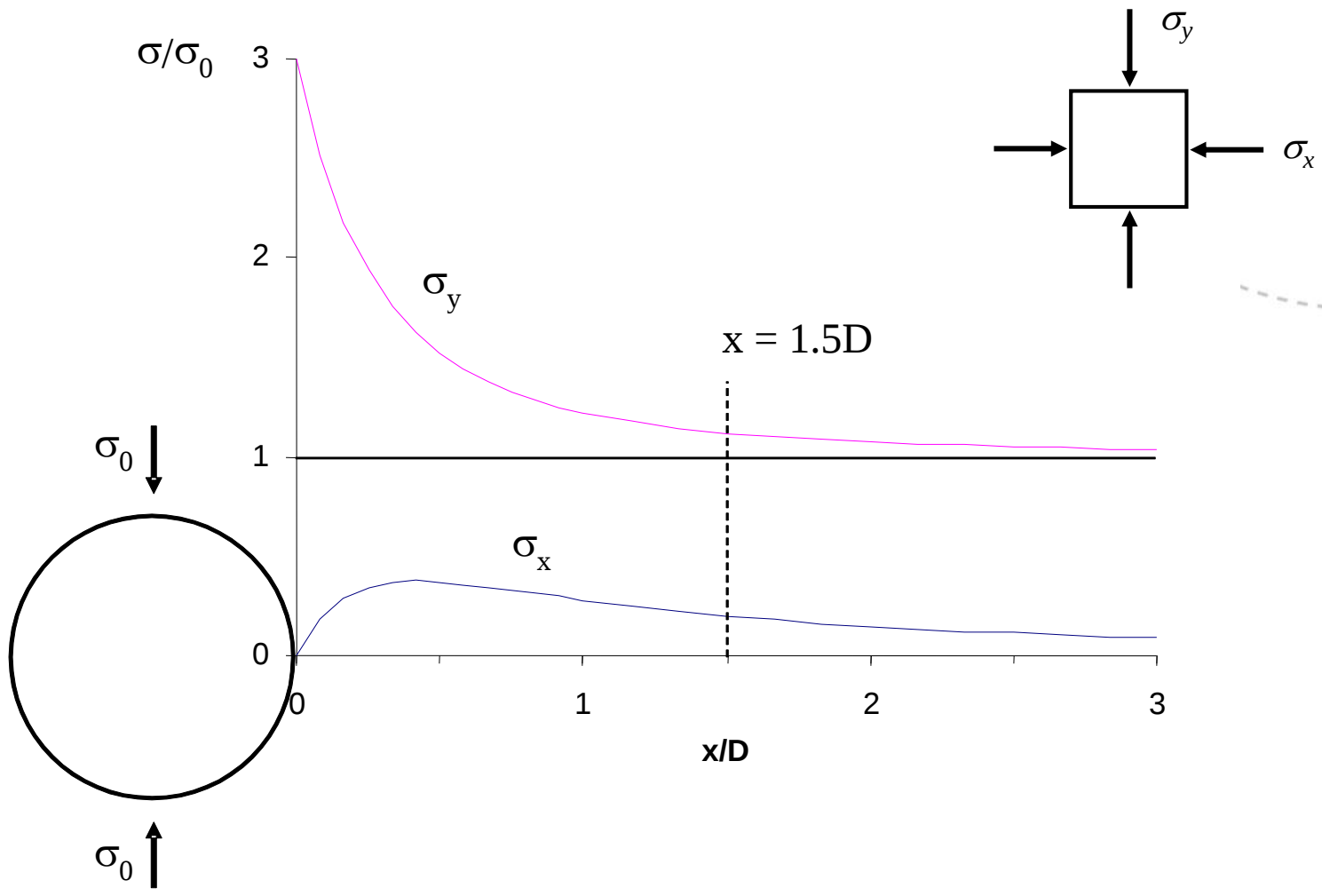
Den største tangentialspenningen:

$$\sigma_{\theta_{\max}} = \sigma_{\theta A} = 3\sigma_1 - \sigma_2$$

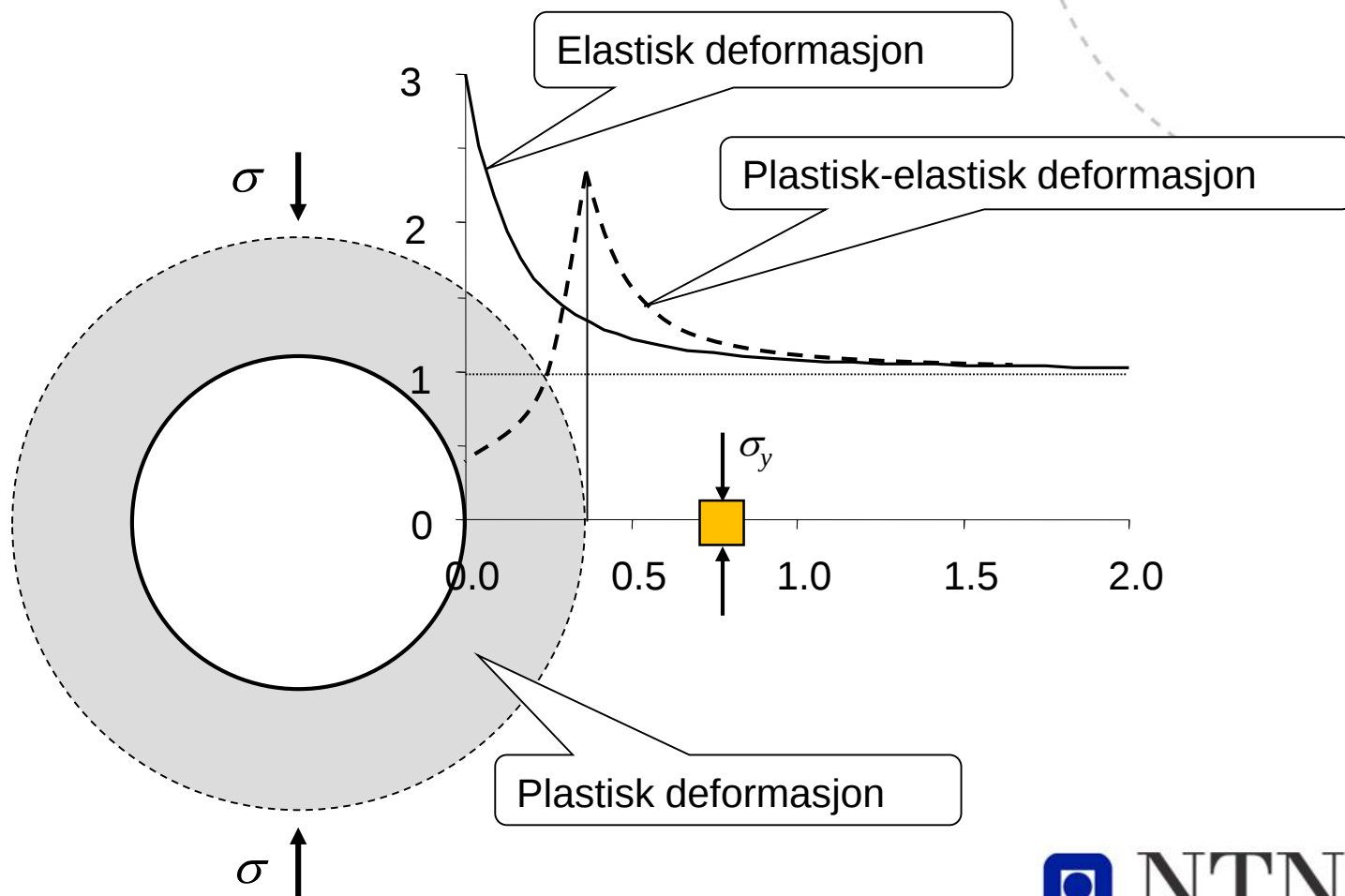
Den minste tangentialspenningen:

$$\sigma_{\theta_{\min}} = \sigma_{\theta B} = 3\sigma_2 - \sigma_1$$

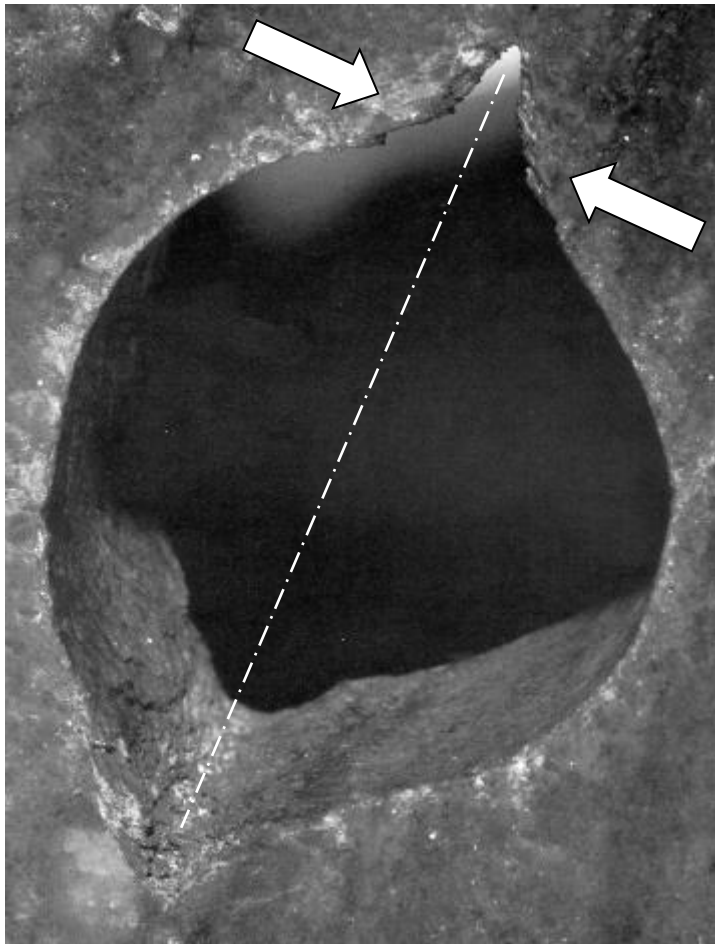




Vertikalspenningen langs horisontallinjen



Trykkbrudd



Vilkåret:

$$(3\sigma_1 - \sigma_2) > \text{trykkfasthet}$$

Strekkebrudd



Vilkåret:

$(3\sigma_2 - \sigma_1) < -\sigma_t$, for intakte berg

σ_t = Strekkefasthet

$(3\sigma_2 - \sigma_1) < 0$, for bergmasse

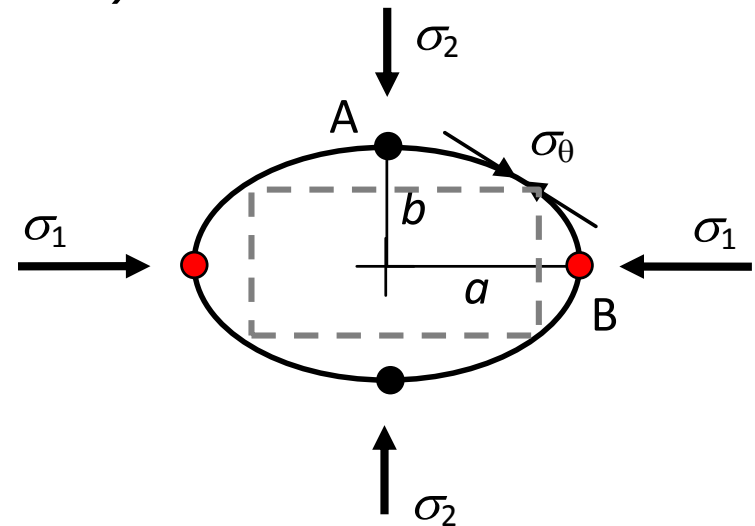
Spenningsfordeling rundt en elliptisk åpning

- Tangentialspenning i A (størst/ minst):

$$\sigma_{\theta A} = \left[k \left(1 + 2 \frac{b}{a} \right) - 1 \right] \sigma_2 \quad k = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$$

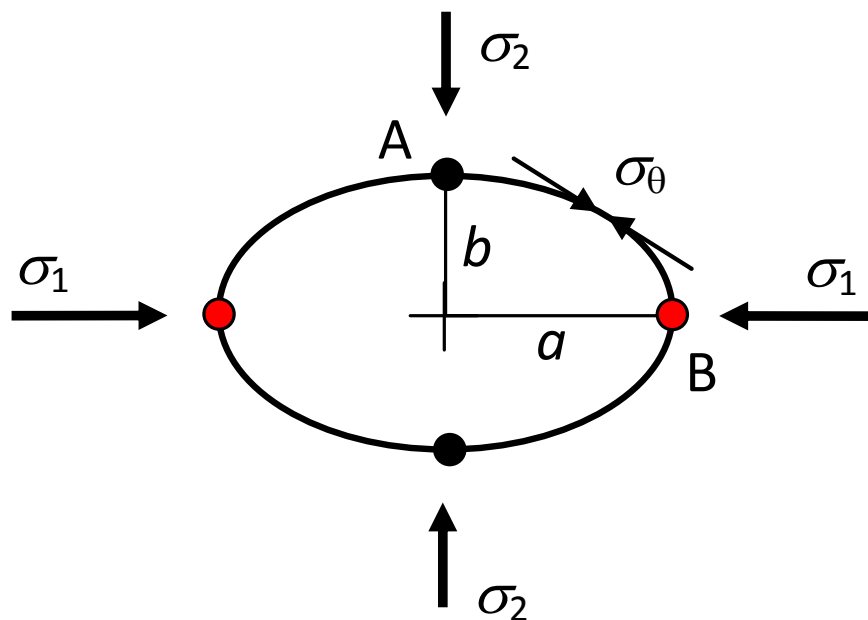
- Tangentialspenning i B (størst/ minst):

$$\sigma_{\theta B} = \left[\left(1 + 2 \frac{a}{b} \right) - k \right] \sigma_2$$



Hvis $k = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{a}{b}$, blir tangentialspenningen konstant langs omkretsen.

$$\sigma_\theta = \sigma_2(1+k)$$



Designprinsipper

Belastningsforhold:

- For lave og moderat høye in-situ bergspenninger
- For høye in-situ bergspenninger

Formål:

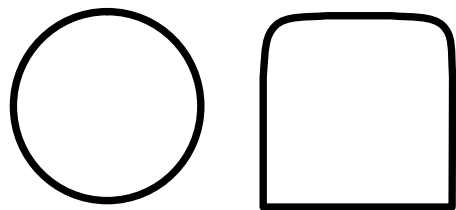
- Å unngå spenningskonsentrasjon
- Å unngå lave in-situ spenninger

Designprinsipper for lave og moderat in-situ spenningsforhold

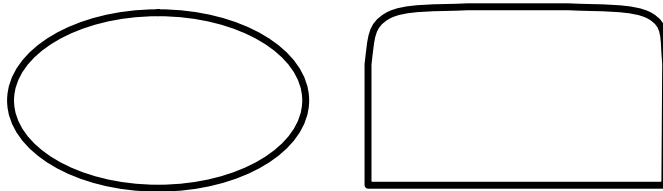
Formålet: å unngå spenningskonsentrasjon

Tiltak:

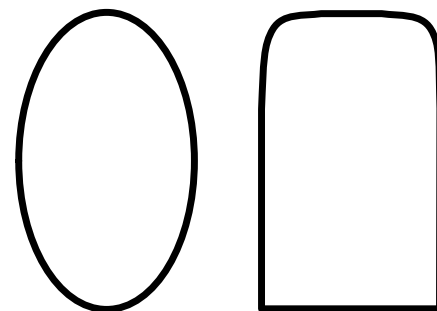
- Tunneltrasen i retning av σ_H , ($\sigma_H > \sigma_h$)
- Åpningsformen må være gunstig for en likenende spenningsfordeling rundt omkretsen.



$$\sigma_h = \sigma_v$$



$$\sigma_h > \sigma_v$$



$$\sigma_h < \sigma_v$$

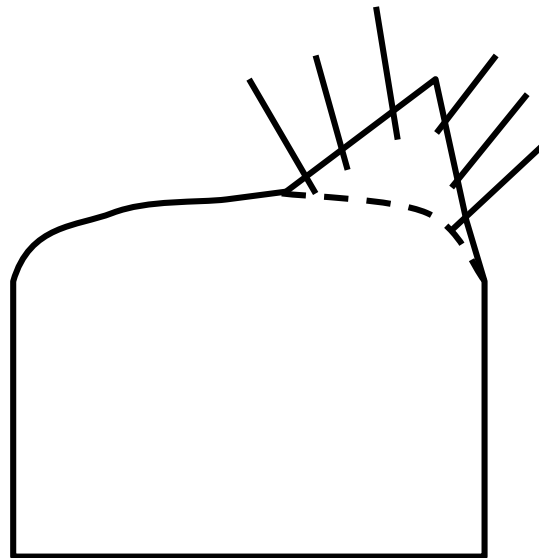
Fjellbrudd under høye in-situ spenninger



Prinsipp for høyspenningsforhold

Formålet: å unngå storskala ras

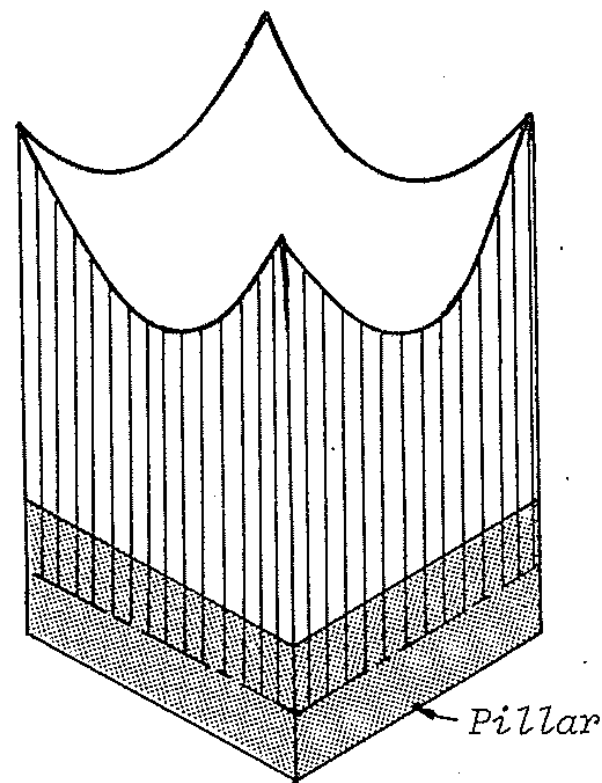
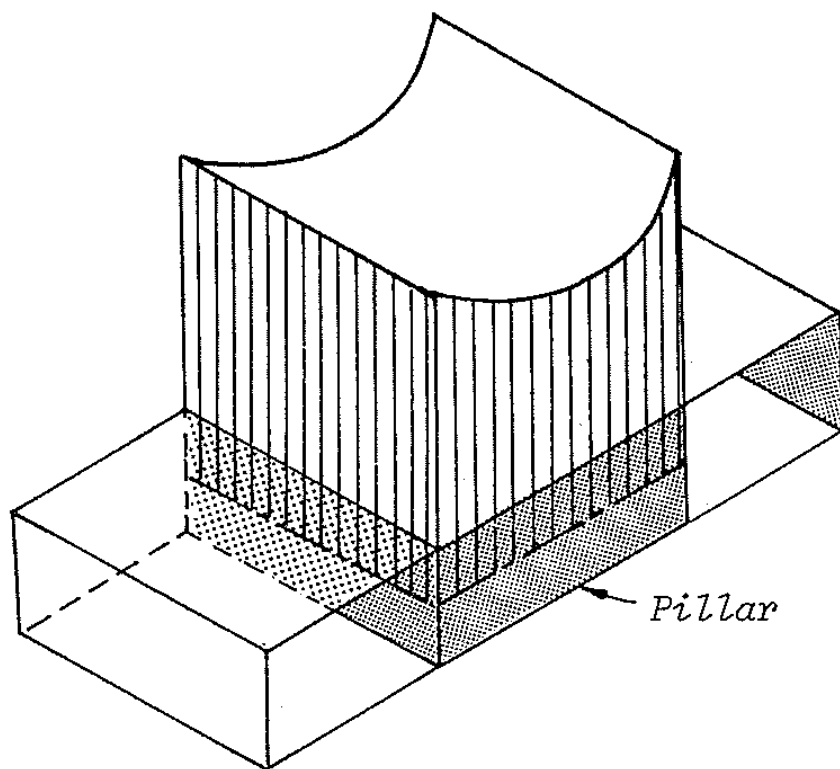
Tiltak: Å begrense bruddomfanget av bolting

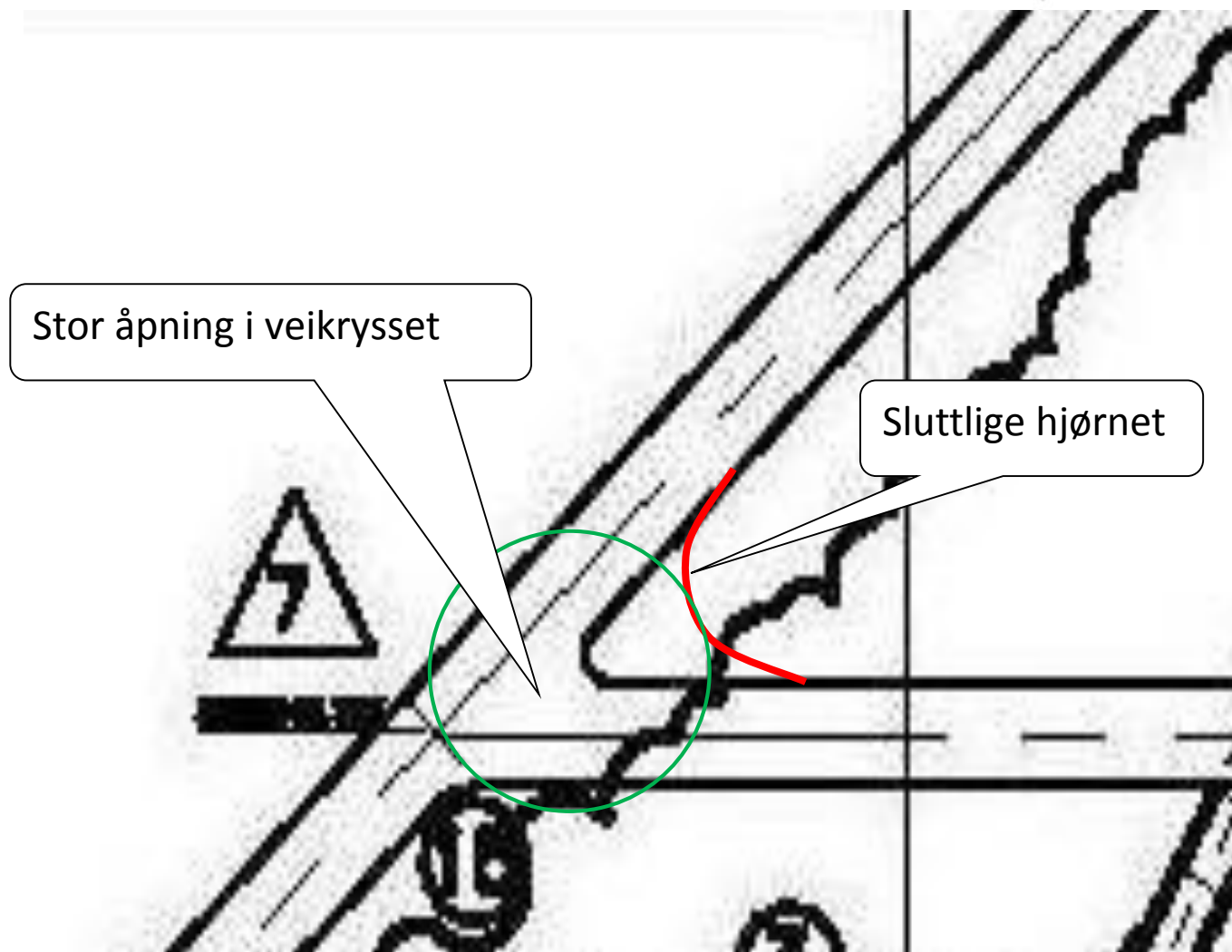


Å unngå svært lave in-situ spenninger



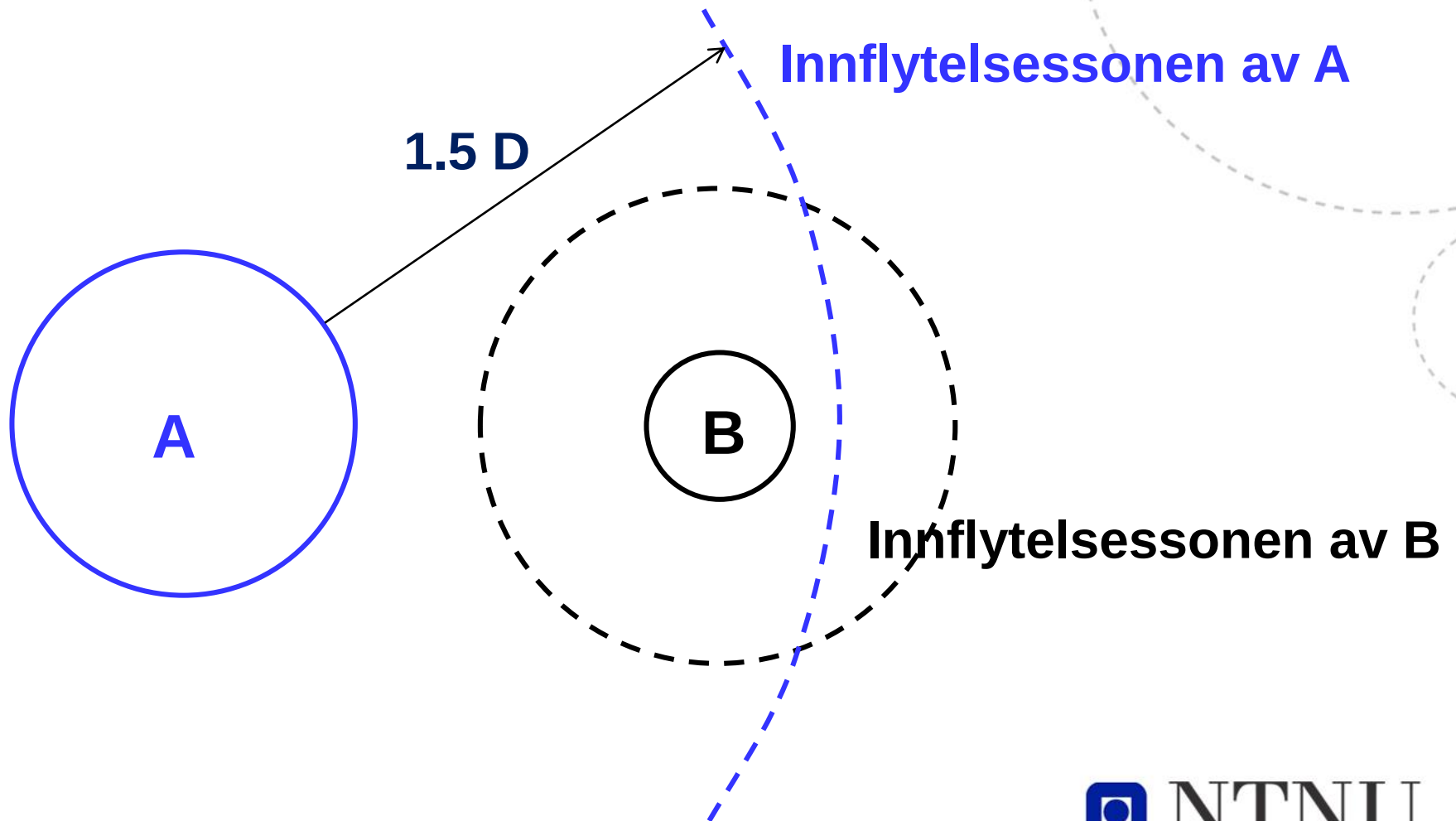
Spenningskonsentrasjon



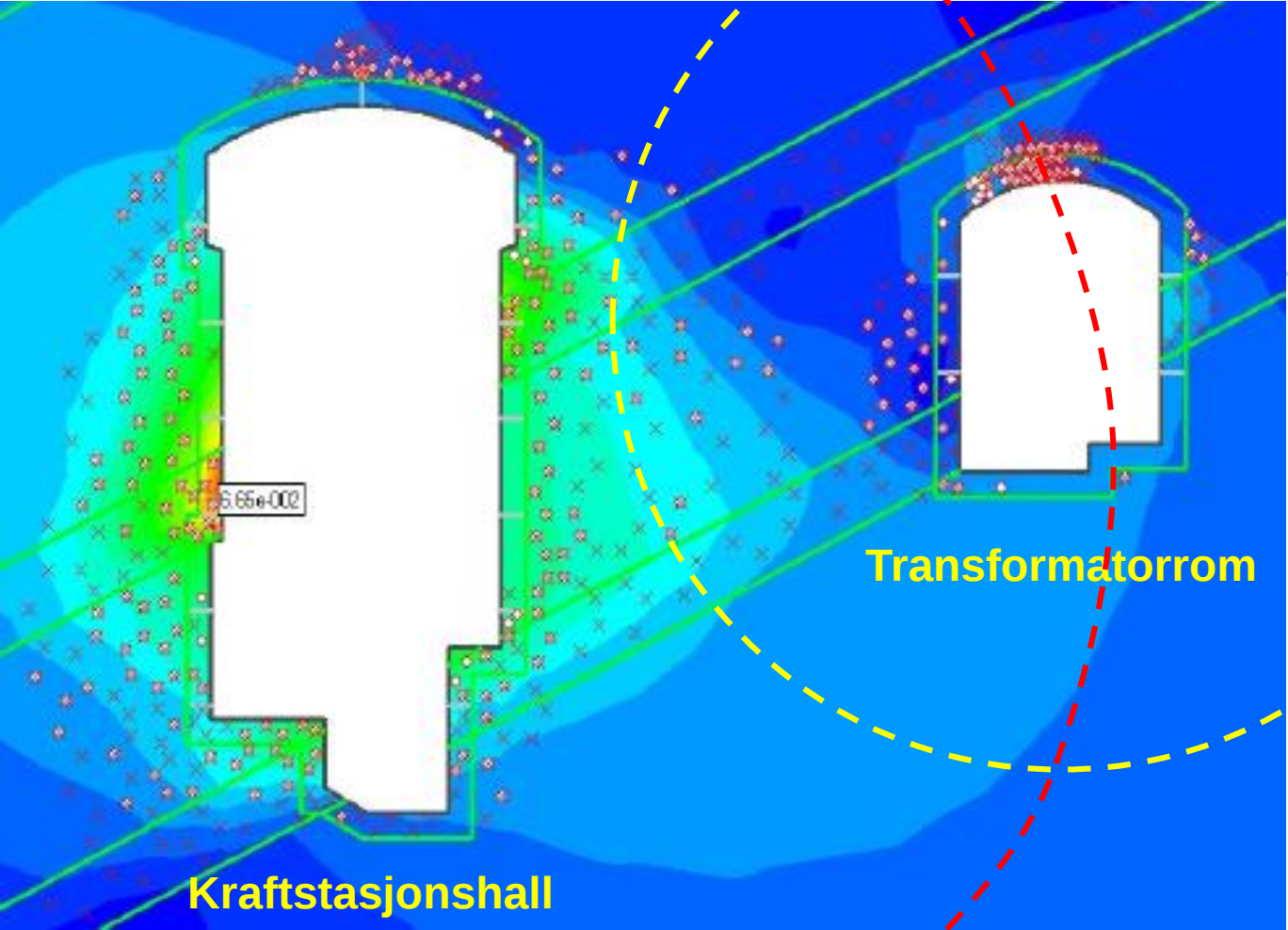


Å unngå skarp hjørne!

Innflytelsesone



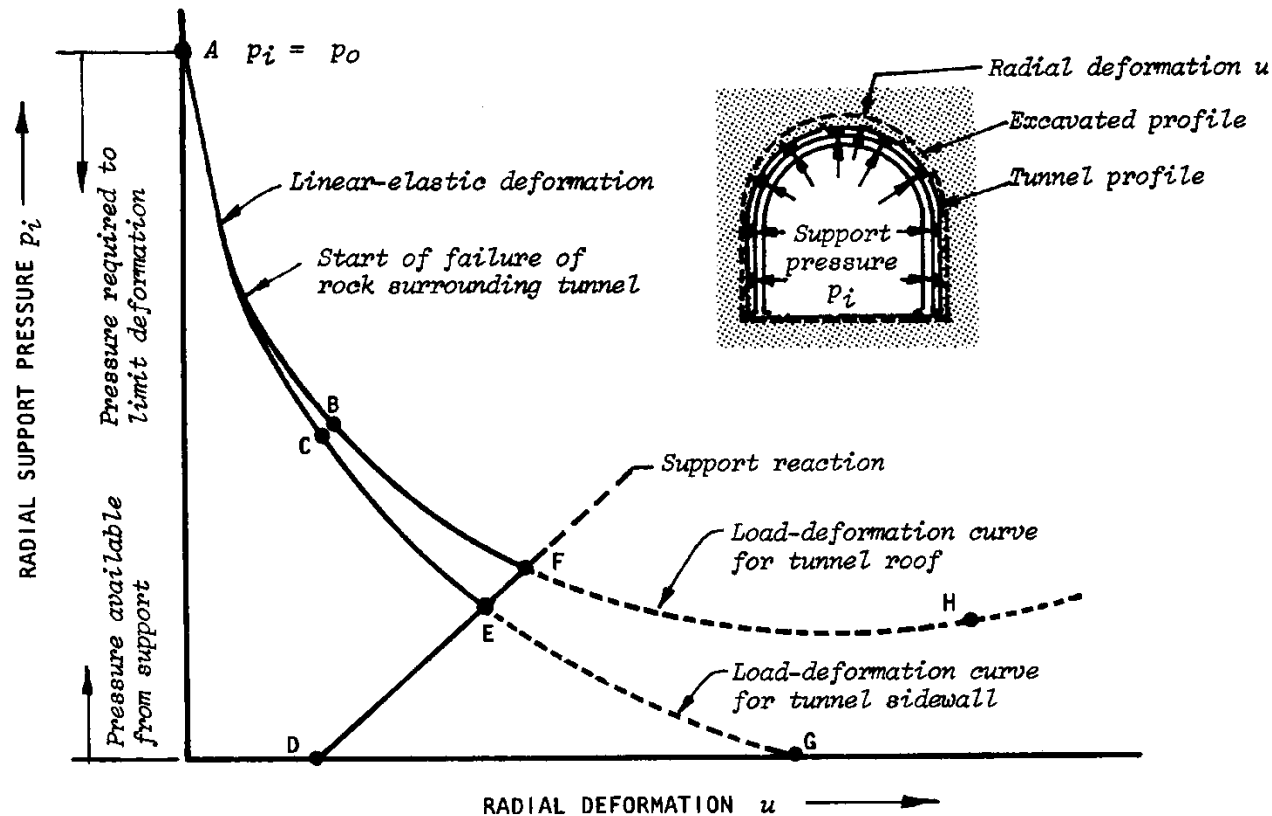
Et eksempel



Bergsikring

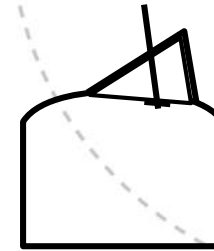
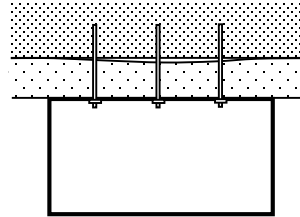


GRC – Bergmassens responskurven

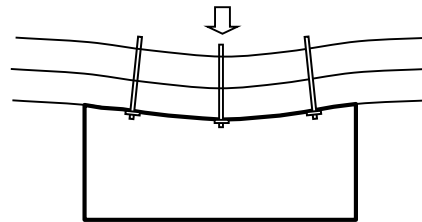


Boltingsprinsipper

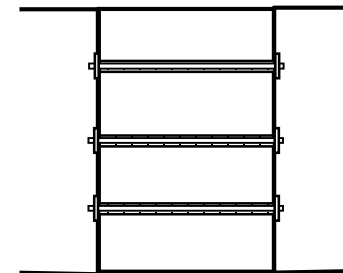
- Opphengbolting



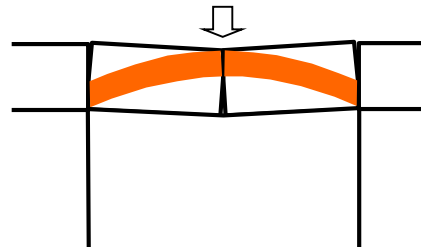
- Bjelkebygging



- Begrensningsbolting



- Hvelvbyggingsbolting





**Fysisk modell demonstrering en
lastbærende bru opprett av systematisk
bolting (Hoek, 2007)**

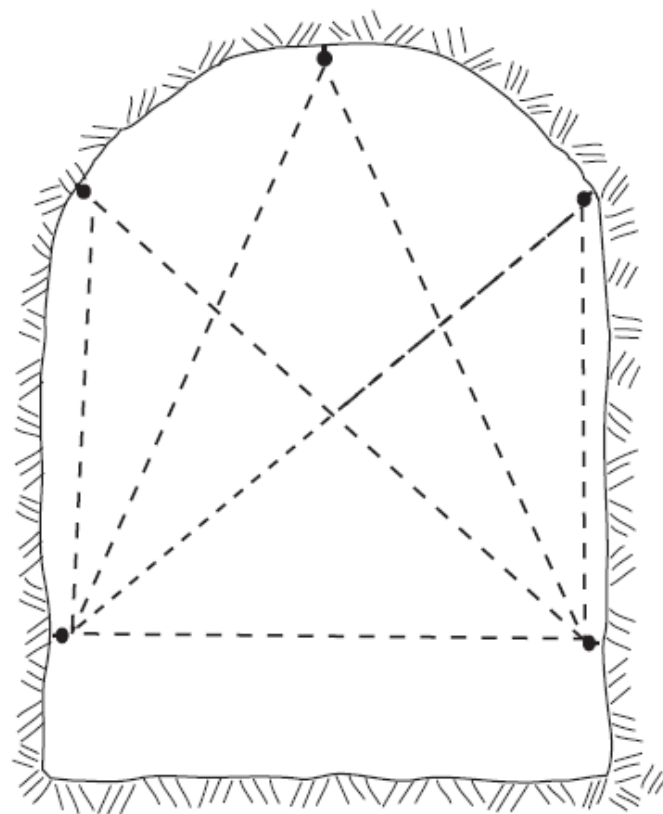


Undersøkelse og målemetoder

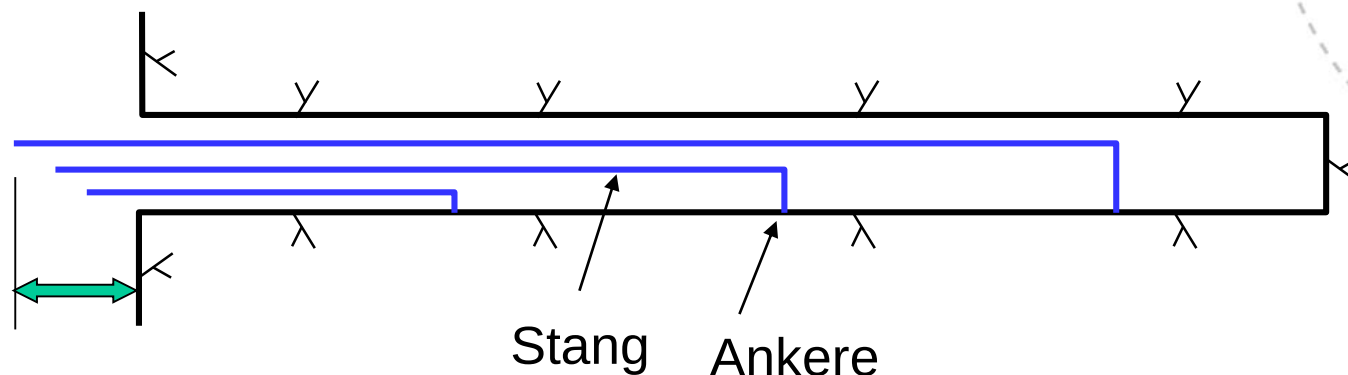
- Bergmassekvalitetsvurdering
- Sprekkekartlegging
- Spenningstilstand
- Deformasjonsmålinger
 - Konvergensmåling
 - Exsometermålinger
 - Nivellering - 3D deformasjonsmålinger
 - GPS forskyvningsovervåkning
 - 3D laserskanning
 - Fiber-optisk overvåking: forskyvning og temperatur

Konvergenzmåling

- Relative deformasjoner mellom punkter på åpningsveggen
- En god metode for stabilitetsovervåking

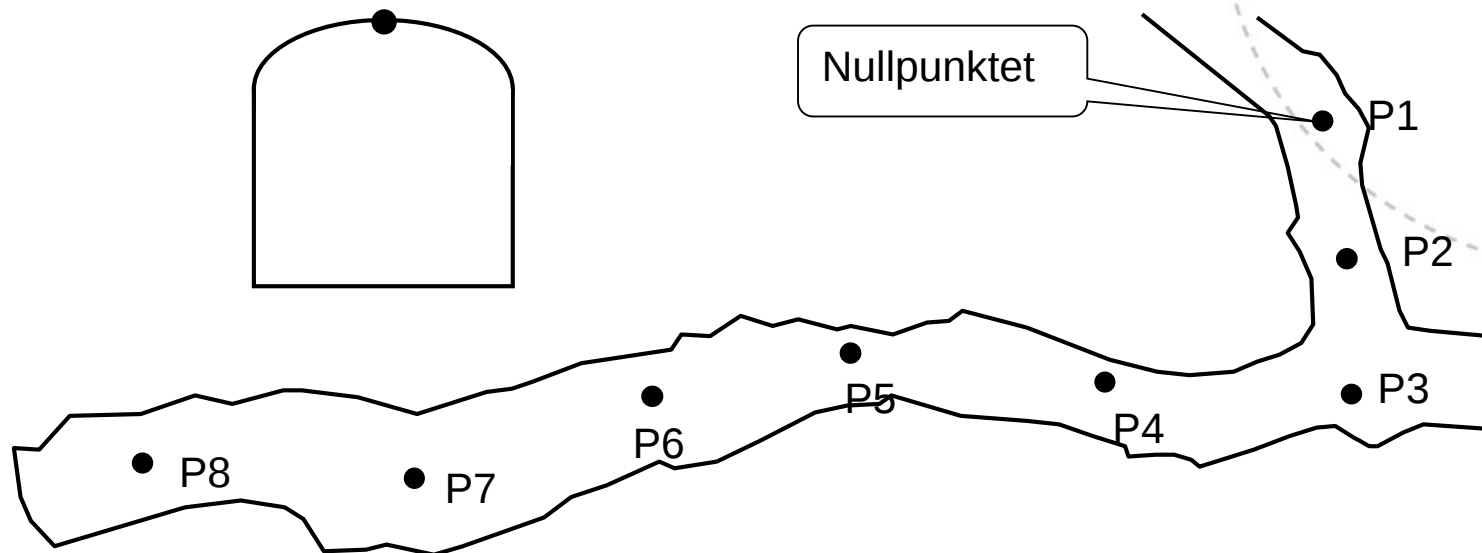


Extensometermåling



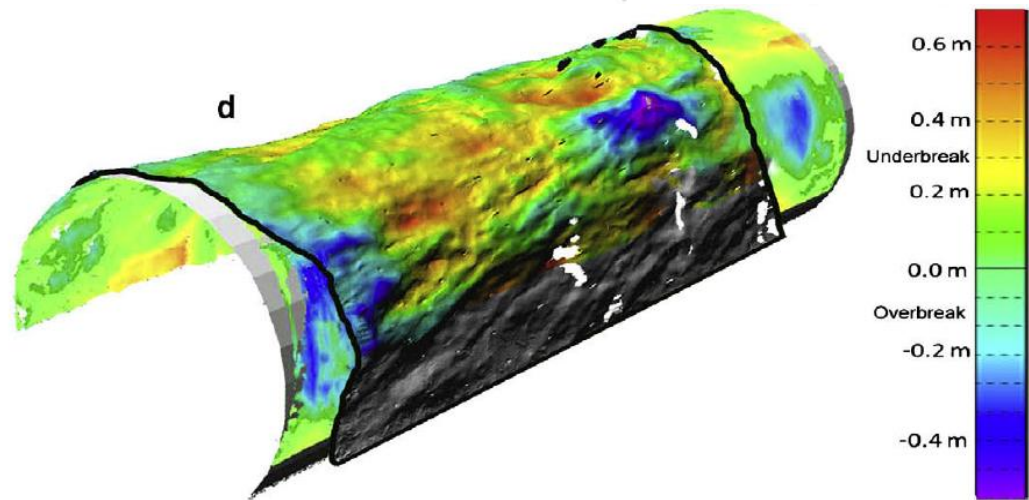
- Relative deformasjoner i punkter innom bergmassen
- En god metode for å overvåke fordelingen av sprekker i fjellet, som er nyttig for bestemmelsen av bruddsonesstørrelse og boltlengde.

Nivellering



- Deformasjoner (x, y, z) i forhold til nullpunktet.
- Vanlig for overvåking av deformasjoner i hengen.

3D Laserscanning



- 3D deformasjon på overflater – fremtidens teknologi
- 3D overvåking
- Nøyaktighet blir forbedret med tiden

Oppsummering

- Anvendelse av residualstyrken
- Bergsbruddform er avhengig av bergsytelser: Klass I (duktil) og Klass II (sprøtt).
- Bergmassestyrken er i hovedsak avhengig av sprekke i bergmassen.
- Bergspenninger er påvirket av topografi og geologiske strukturer.
- Høyspenningsindikatorer: Breakout, coredisc, spraking.
- Designprinsipper med hensyn til in-situ spenninger og formålet.
- Bergsikring: GRC
- Målemetoder: konvergens, extensometer, laser skanning, fiber-optisk måling.