



BERGSPENNINGSMÅLINGER

Simon Alexander Hagen

Senior bergtekniker

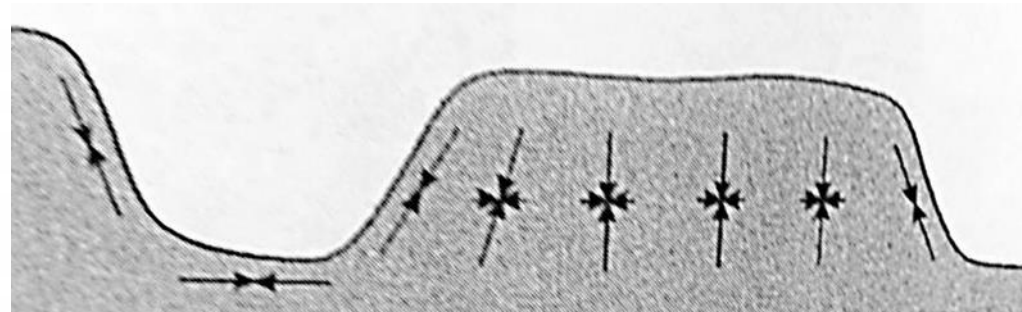
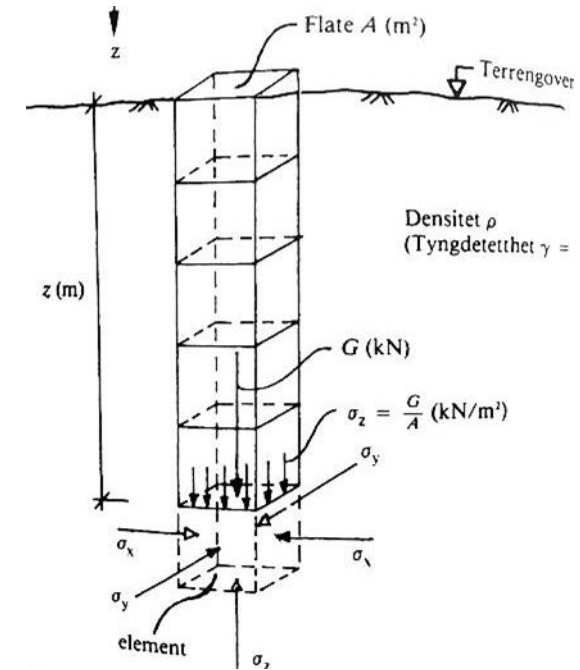
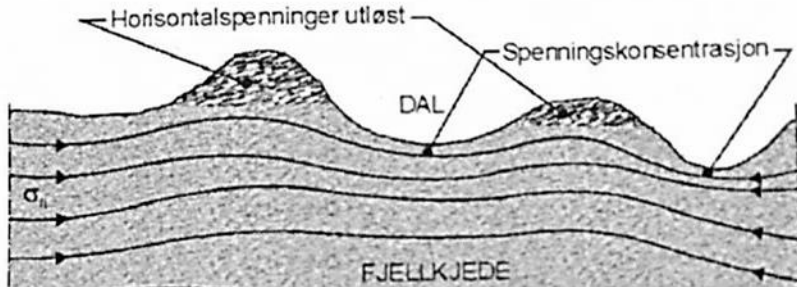
"Anvendt bergmekanikk", 9.-10. januar 2018, Trondheim

Innhold

- Bergspenningers opprinnelse
- Indikatorer på høye bergspenninger
- **Metoder for bestemmelse av bergspenninger**
- Prosjekteksempel på bruk av bergspenninger
- Oppsummering

Bergspenningers opprinnelse

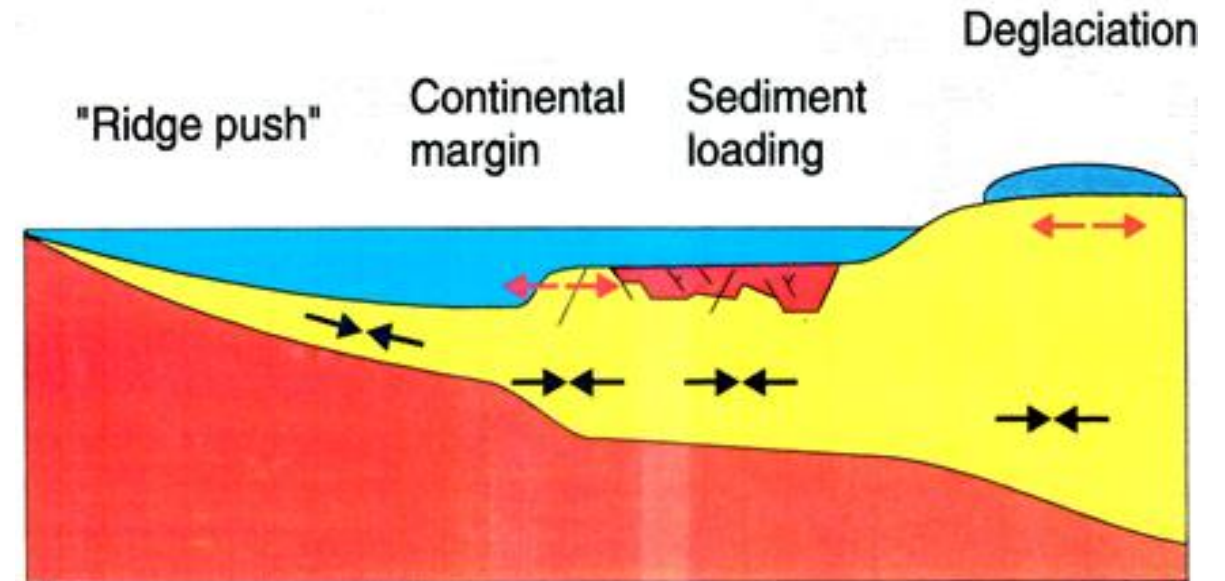
- **Gravitative spenninger**
 - Vertikalspenning: $\sigma_v = \rho \cdot g \cdot h$
 - Horisontalspenning: $\sigma_h = \nu / (1 - \nu) \cdot \sigma_v$
 - Topografiske betingede spenninger (dalsider)



Bergspenningers opprinnelse

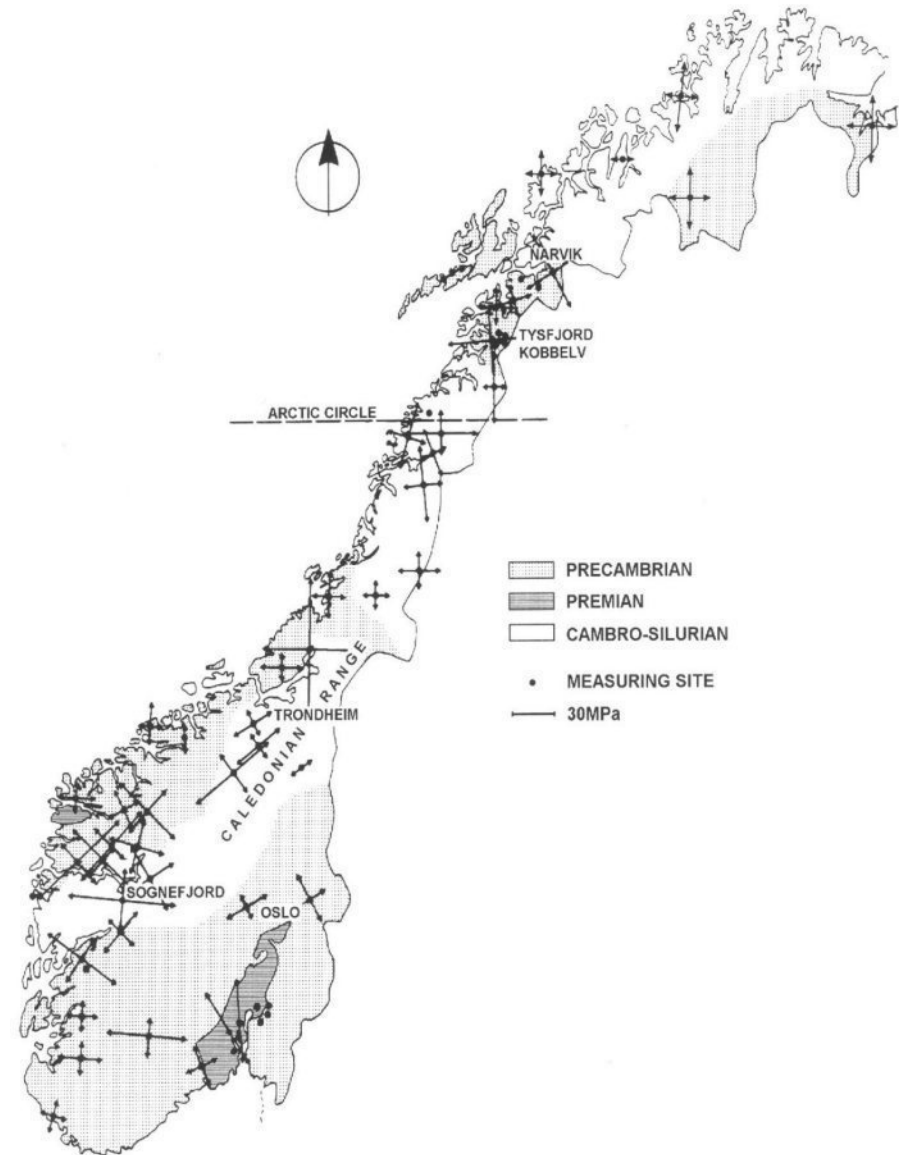
- **Geologiske betingede bergspenninger**
 - Tektoniske spenninger
 - Spenninger som skyldes platetektonikk (horisontalspenninger)
 - Residualspenninger/restspenninger
 - Spenninger låst fast i et materiale fra tidligere
 - Brå avkjøling
 - Smelting av iskapen (Skandinavia)

Mechanisms generating tectonic stress

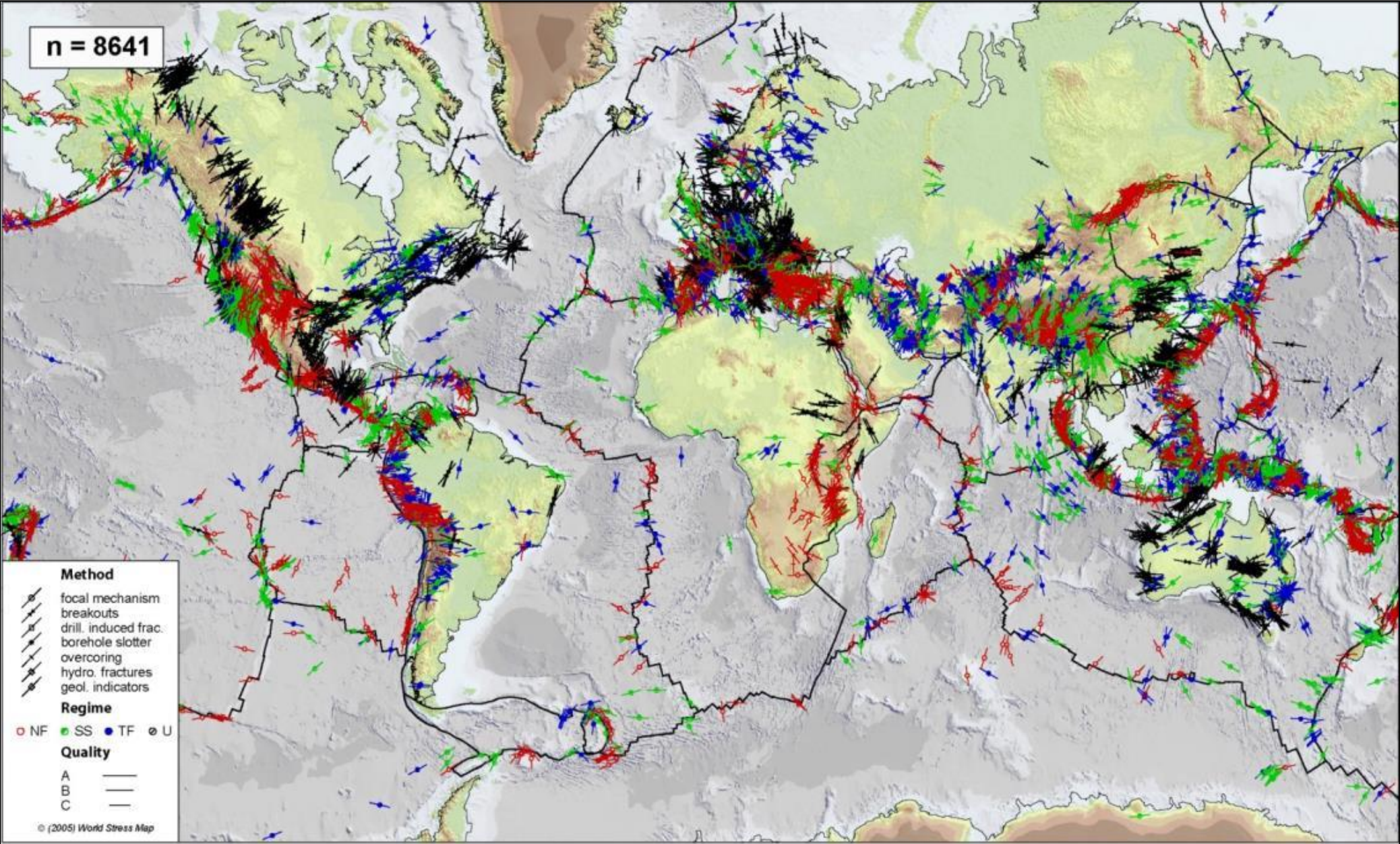


Bergspenninger i Norge

- **Områder med spesielt høye horisontale spenninger**
 - Prekambriske grunnfjellsområder (Vestlandet, Trøndelag, Nord-Norge)
 - Permiske intrusiver i Oslo-feltet (drammensgranitt og larvikitt)
- **Generelle retninger:**
 - Orientert normalt/parallelt med den kaledonske fjellkjede
 - Dannet av:
 - Fjellkjedefolding
 - Smelting av iskapen



World stressmap



Indikatorer på høye bergspenninger

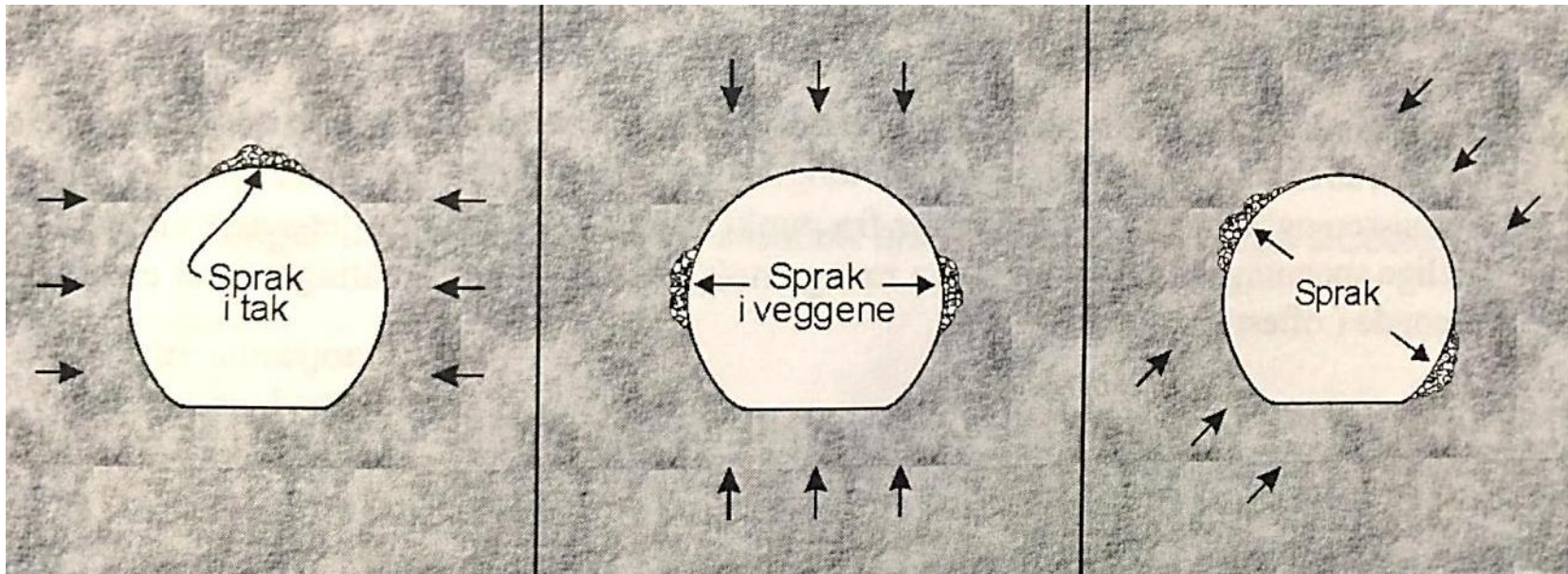
Overflateindikatorer på høye bergspenninger

- Eksfoliasjon (overflateparallele sprekker)
- Overflateavskalling (avlastning)



Indikatorer på høye bergspenninger i tunneler

- Spraking og bergslag i tunneler



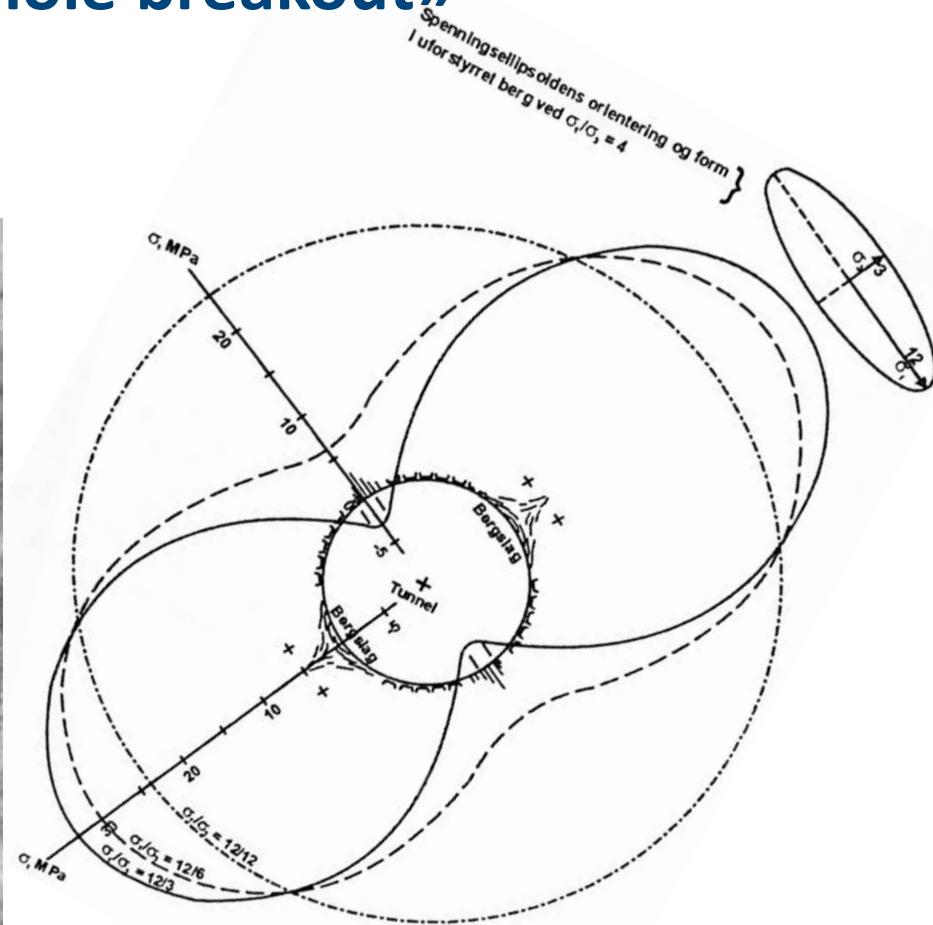
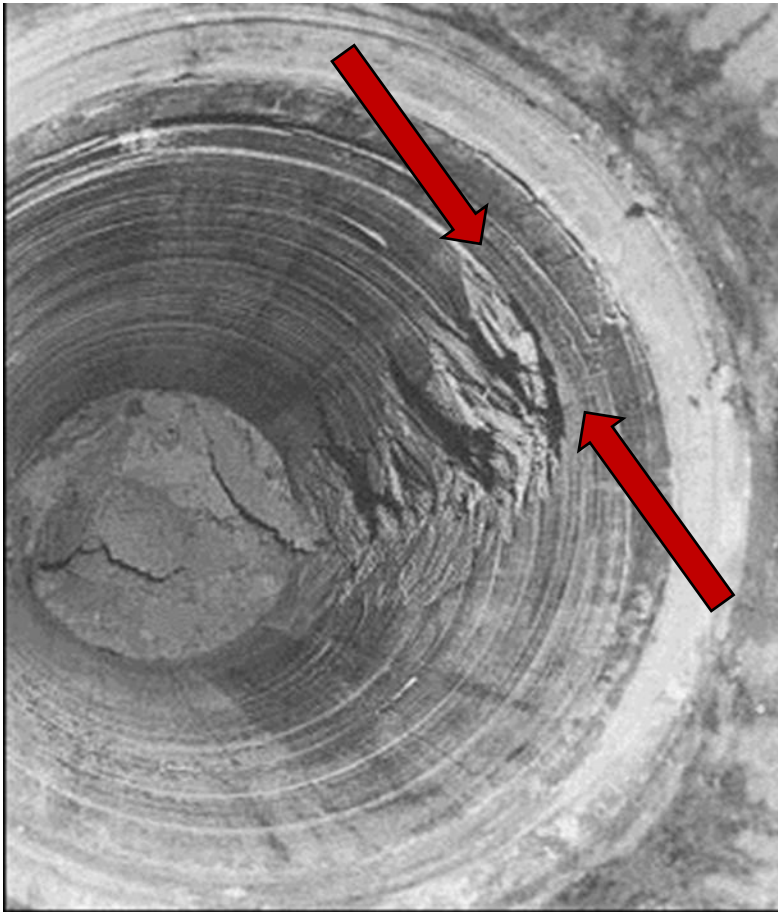
Høy horisontal spenning

Høy vertikal spenning

Høy spenning som vist

Høye spenninger i borehull «Borehole breakout»

- Avskalling i borehull på grunn av høye tangentielle spenninger



«Coredisking» ved kjerneboring

- Spenningskonsentrasjoner i hullbunnen under kjerneboring



Bergspenningsmålinger - bruksområder – Anvendt bergmekanikk

- Benyttes for vurdering av bergspenningsforholdene i en ingeniørmessing sammenheng
 - Utforming og orientering av bergrom, haller og gruver
 - Viktige inngangsparametere ved numerisk modellering
 - Stabilitet; dimensjonering av bergsikring og sikringsbehov
 - Bestemmelse av ulike elementær i vannkraftprosjekter (uforede tunneler)
 - Bestemmelse av trykk for sementbasert injeksjon (tetting av bergmasse)

Ulike m



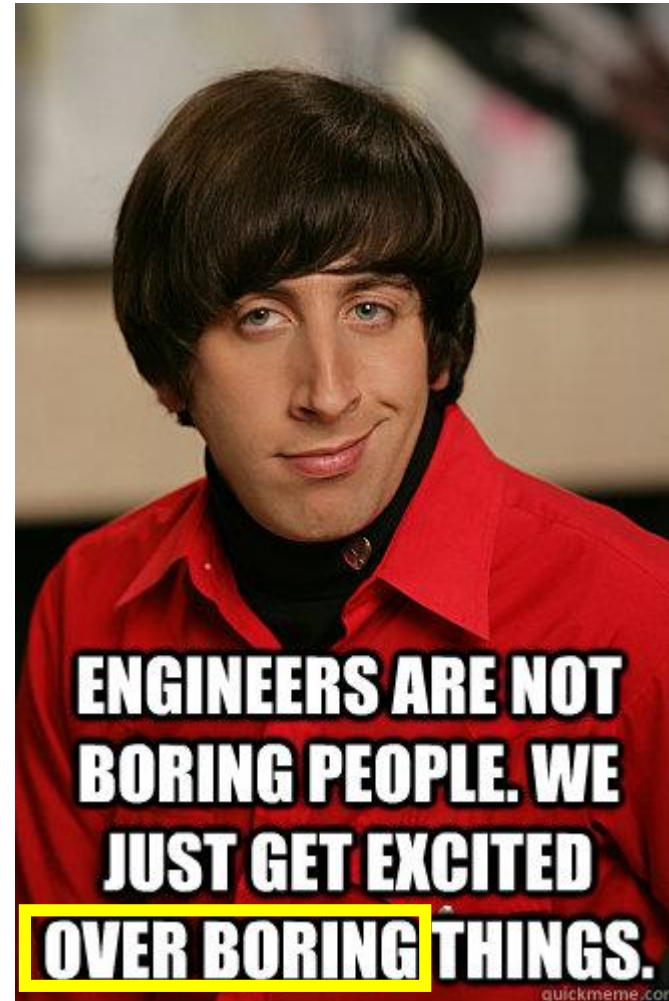
- De mest brukte og kjente metoden
- 2D overboring
 - Doorstopper (CSIRO), Doorstopper (SINTEF),
- 3D overboring
 - Triaxial cell (CSIR), NTNU/SINTEF 3D celle, Hollow Inclusion celle (CSIRO), *LVDT celle (SMCOY)*
- Hydraulisk splitting
 - Mye egenutviklet utstyr, Mini-Frac (CSIRO), mange leverandører av pakkere (oljebransjen)



- Alle overnevnte metoder har forskjellige aktører med ulikt utstyr og prosedyrer som har sine "fordeler og ulemper"
- Beregningsprogrammer og kalkulering
- 2 internasjonale standarder ISRM og ASTM ("Suggested Test Method")

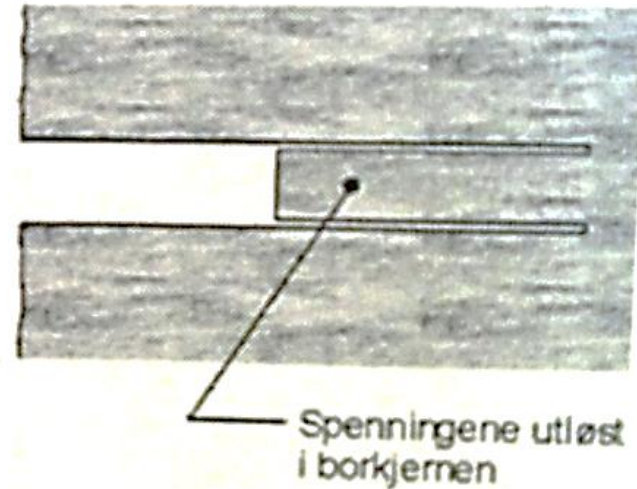
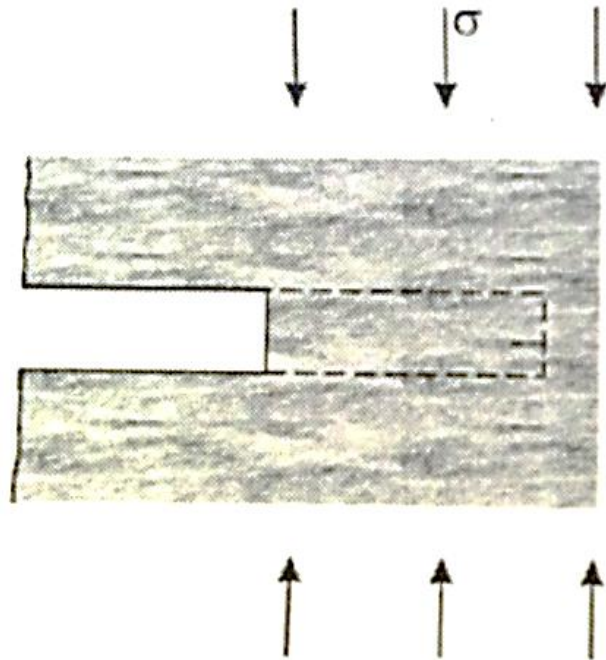
Bestemmelse av bergspenninger

- Overboringsmetoder
 - 2D overboring «Doorstopper»
 - 3D overboring



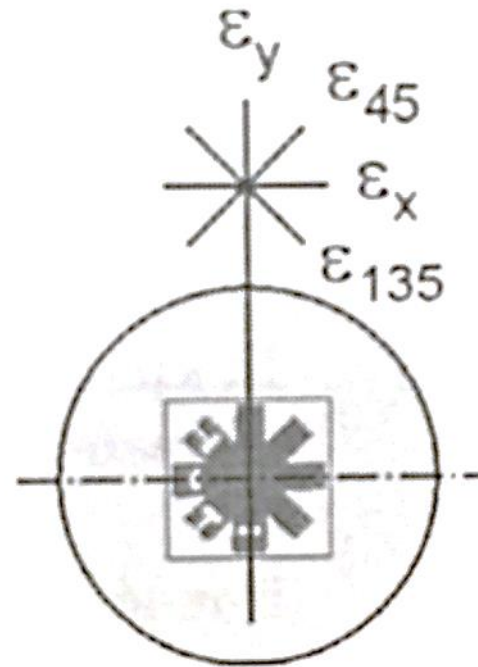
Overboringsmetoden

- «Overcoring»
- Frigjøring av spenninger
- Målbare deformasjoner/tøyninger (passiv metode)



2D overboring (Doorstopper)

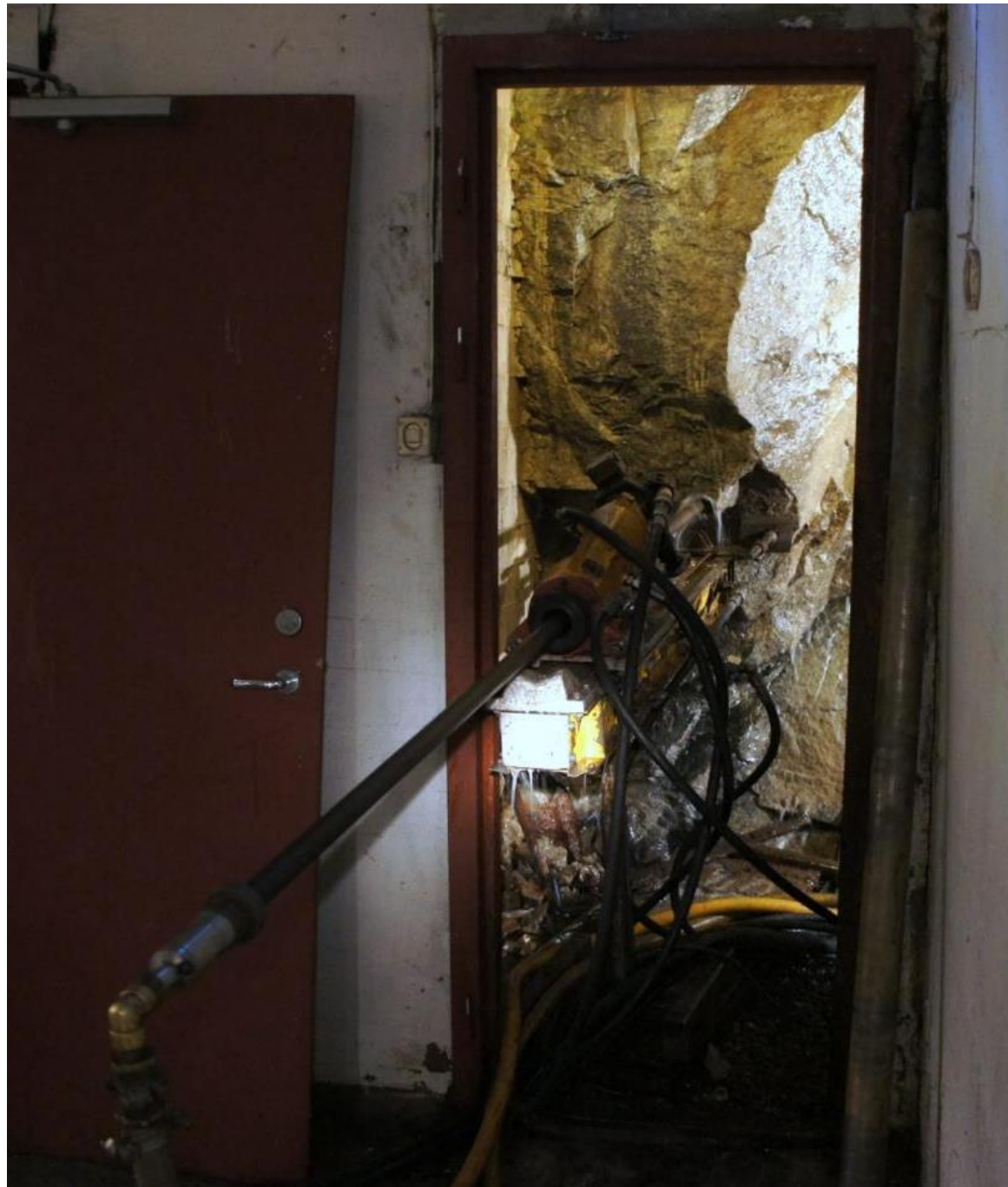
- Tøyninger på strekkapprosett leses av før og etter overboring
- Benytter Hooke's lov ved beregning av spenning fra:
 - Målte tøyninger (doorstopper)
 - Bestemme elastiske egenskaper (Laboratorium)



2D Overboring

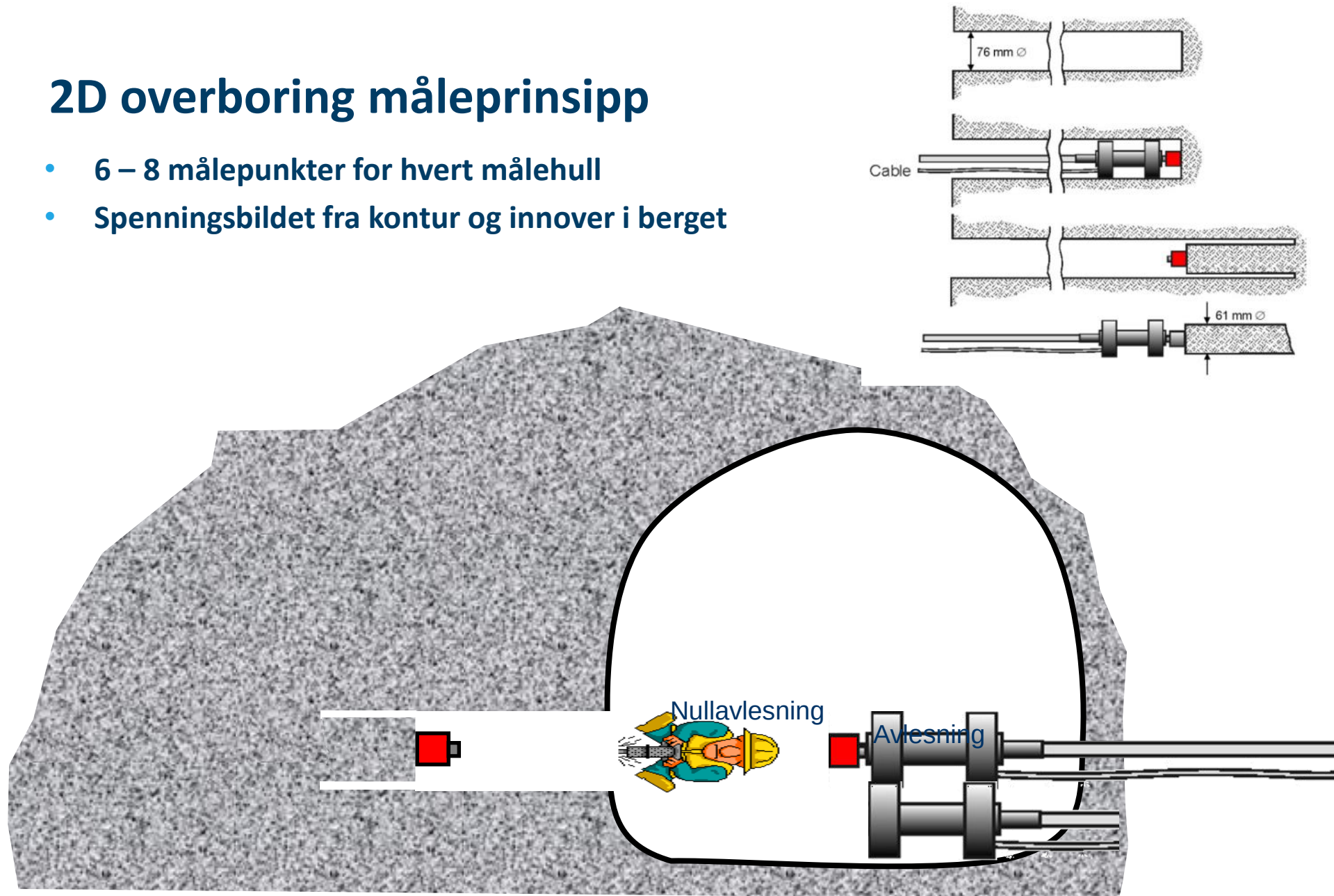
- Gjøres normalt i eksisterende tunneler og bergrom
 - Under driving/bygging
 - Ved utvidelse
 - Ved andre nærliggende anlegg

Kan også utføres i undersøkelseshull



2D overboring måleprinsipp

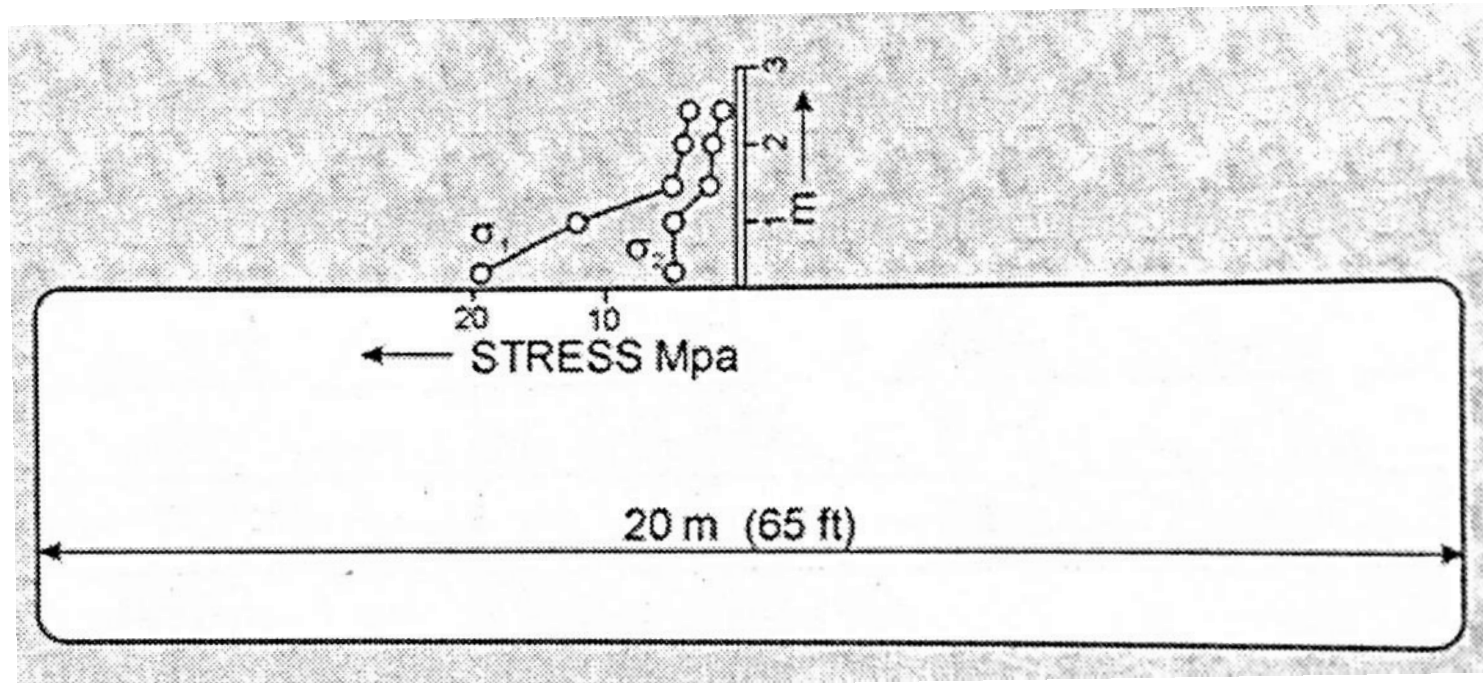
- 6 – 8 målepunkter for hvert målehull
- Spenningsbildet fra kontur og innover i berget





2D overboring «takhull»

- Måle horisontalspenninger i «hengen»
 - Kontrollere/måle innspenning i rom med stor spennvidde



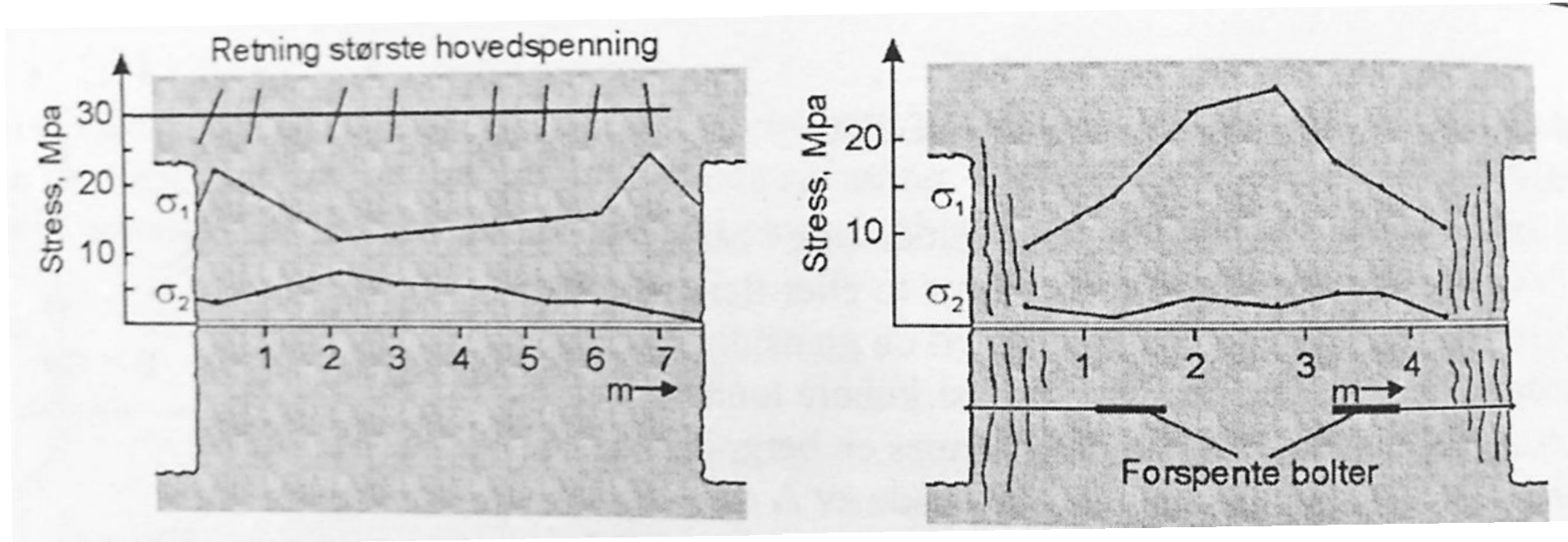
2D overboring «takhull»

- Bergrom med stor spennvidde (Ballangen dolomittgruve)



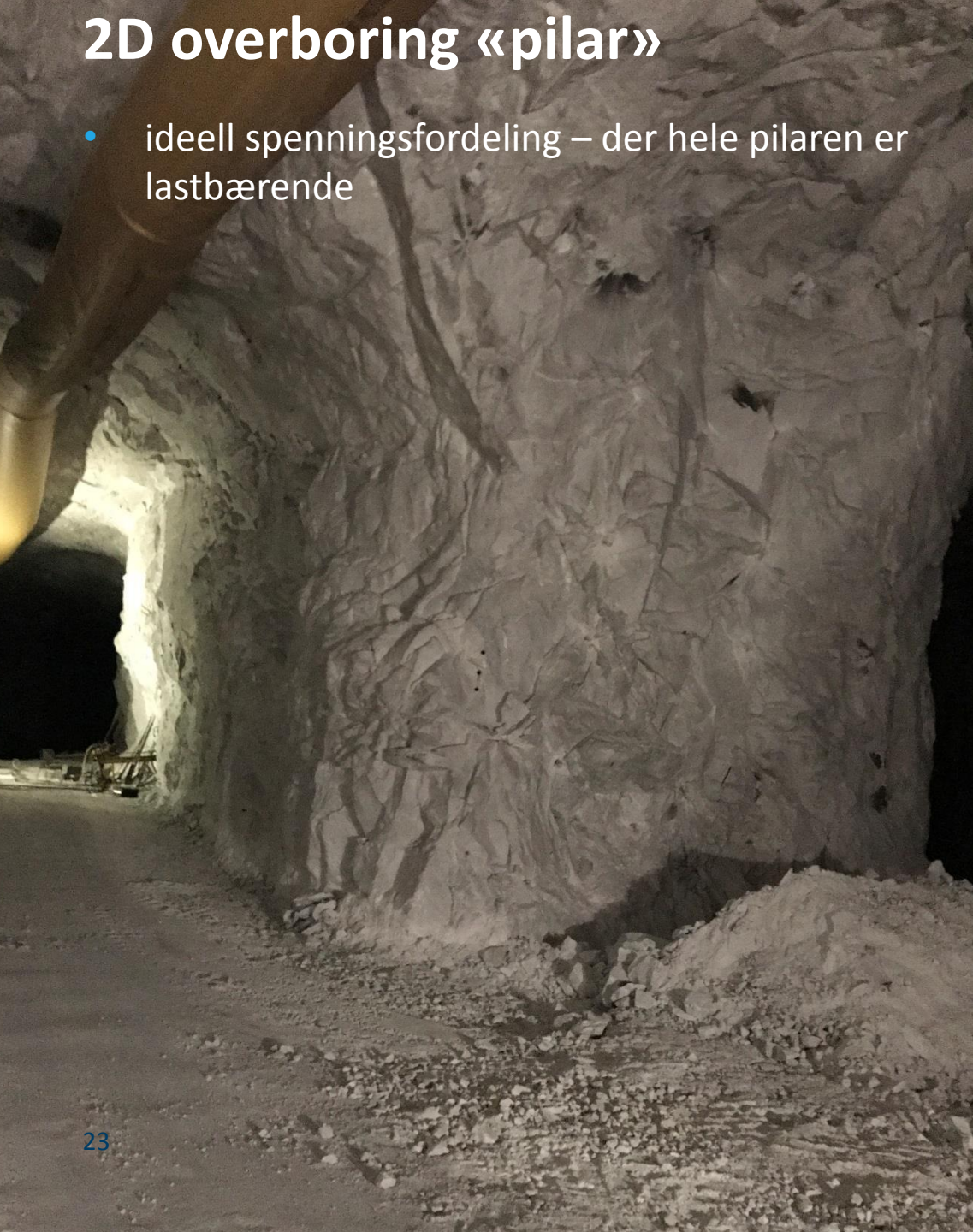
2D overboring «pilar»

- Måle pilarbelastning
 - «Kamelrygg» (ideell spenningsfordeling – der hele pilaren er lastbærende)
 - «Dromedarrygg» (overbelastet/begynnende bruddtilstand)

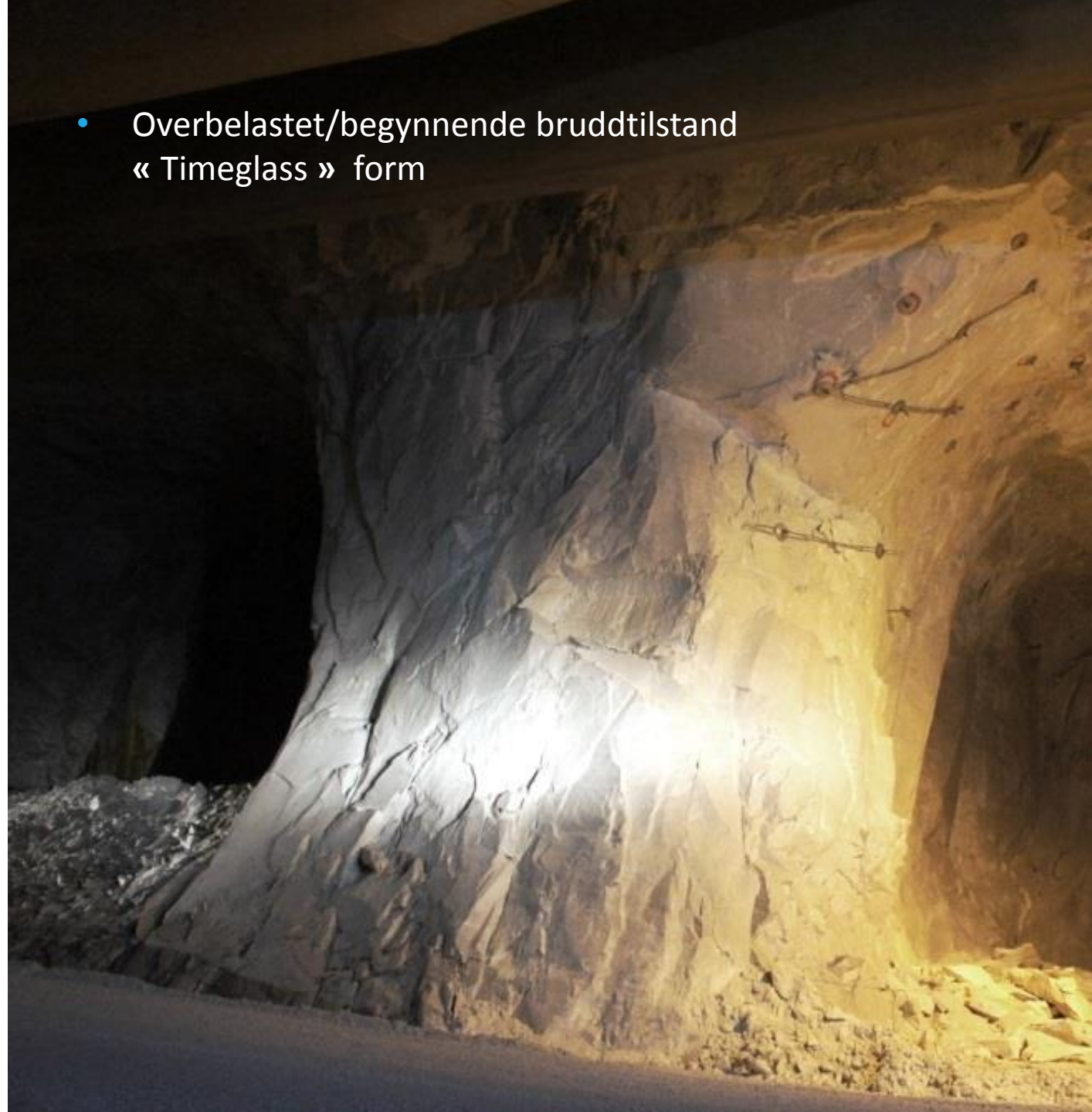


2D overboring «pilar»

- ideell spenningsfordeling – der hele pilaren er lastbærende

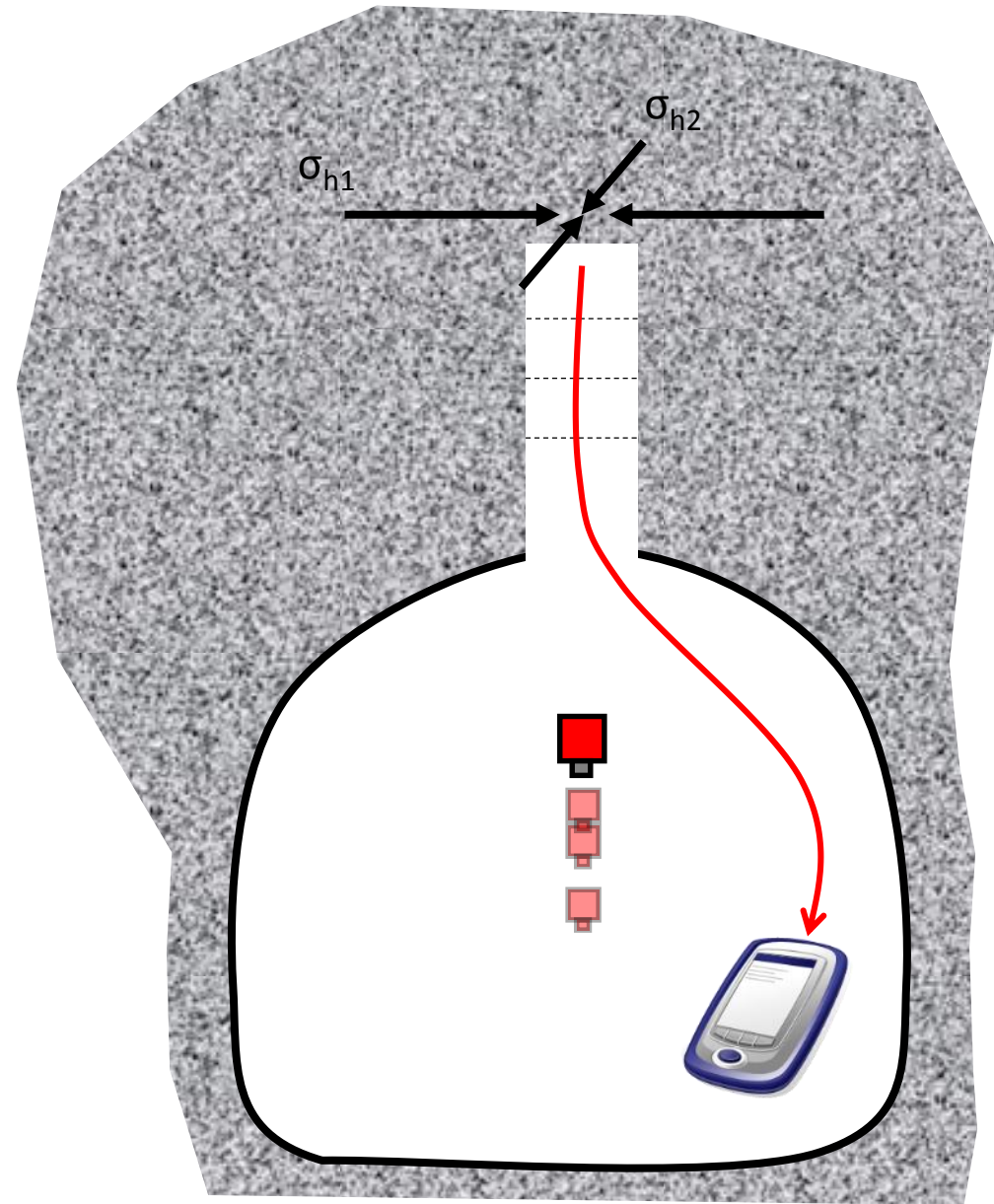


- Overbelastet/begynnende bruddtilstand « Timeglass » form



2D langtidsdoorstopper

- Vanlige 2D doorstoppermålinger gjennomføres i flere omganger inn mot punktet hvor den modifiserte doorstopperen skal plasseres
- Dette gir en "basisverdi" for spenningene ved målestedet
- Langtidsdoorstopperen monteres
- Avlesninger tas regelmessig fra langtidsdoorstopperen ved hjelp av en målebro eller en datalogger



2D overboring "Doorstopper"

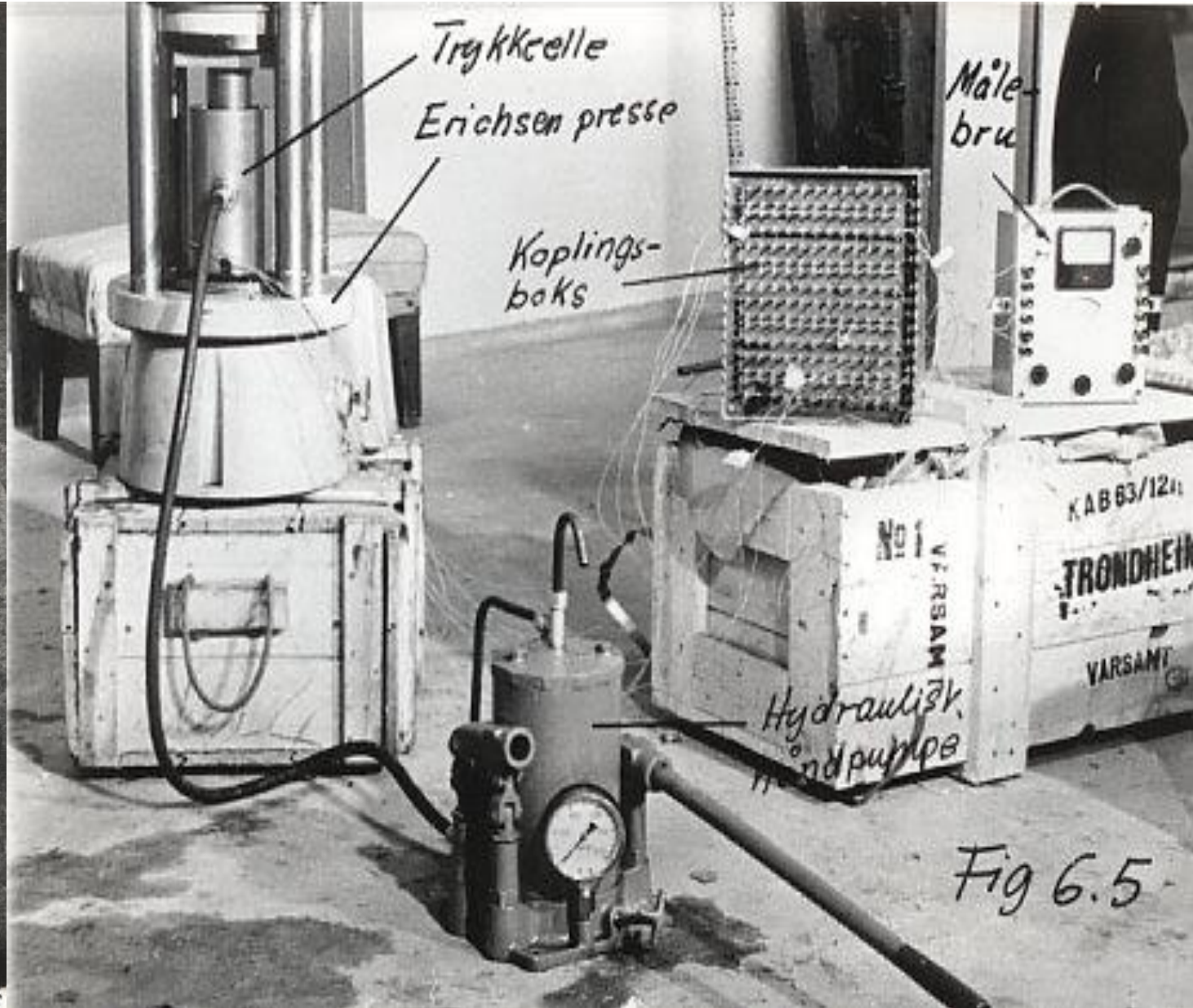
- **Fordeler**

- Trenger kun liten del av intakt kjerne
- Lett å få målinger ved "dårlig fjell" eller coredisking
- "Billig og rask" målemetode, 1-2 arbeidsdager pr. målehull (SINTEF)
- Måler både i horisontale og vertikale hull
 - Horisontale hull for å måle pilarlast
 - Vertikale hull for måling horisontalpilarlast

- **Ulemper**

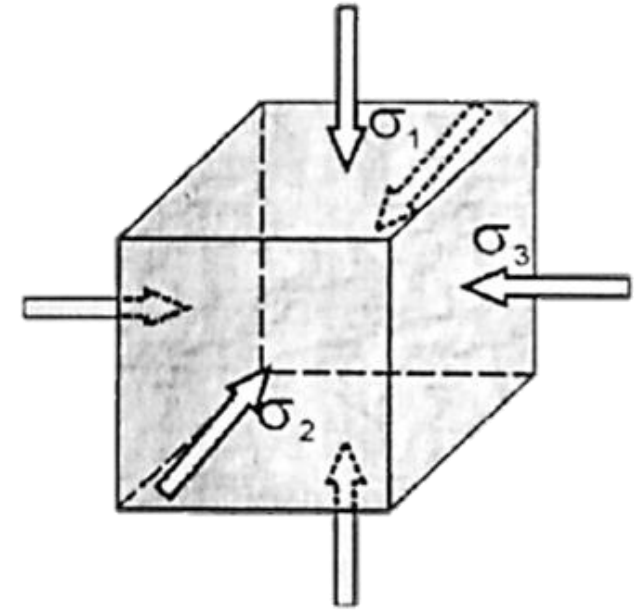
- Måler kun spenninger i et plan normalt på boreretning
- Metoden krever tørt målehull (Finnes nyere metoder som kan gjøres i vannfylte hull)
- Maks 20 m dype hull





3D overboring

- Tøyninger på 3 strekkapprosetter leses av før og etter overboring
- Benytter Hooke's lov ved beregning av spenning fra:
 - Målte tøyninger (Strekklapprosettene)
 - Bestemme elastiske egenskaper (Biaksialcelle/laboratorium)
- Måler størrelse og retning til de 3 hovedspenningene i bergmassen



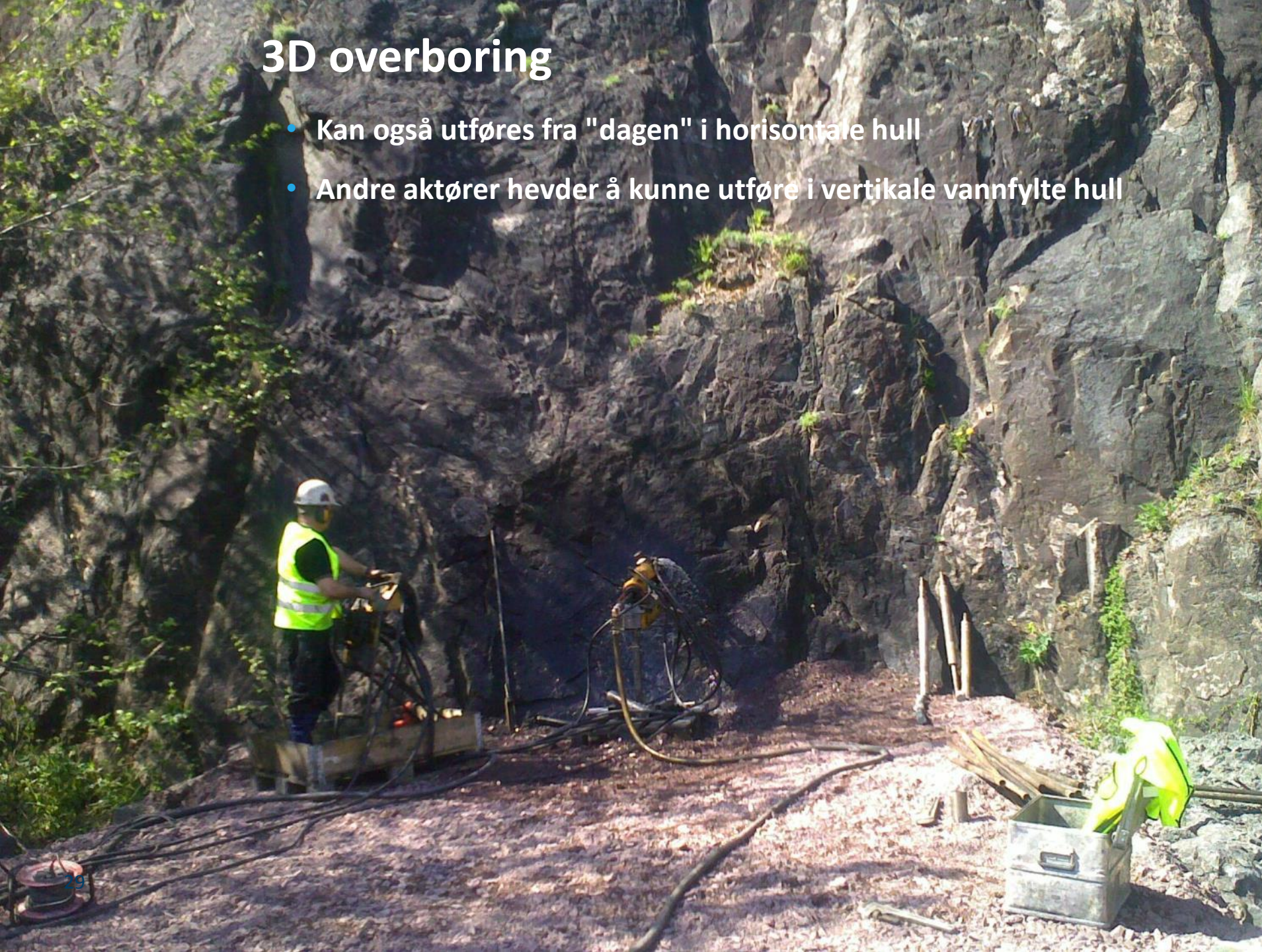
3D overboring

- Utføres som regel fra eksisterende tunneler i planleggingsfasen
- Kan også utføres tidlig i byggefasen (adkomsttunnel o.l.)



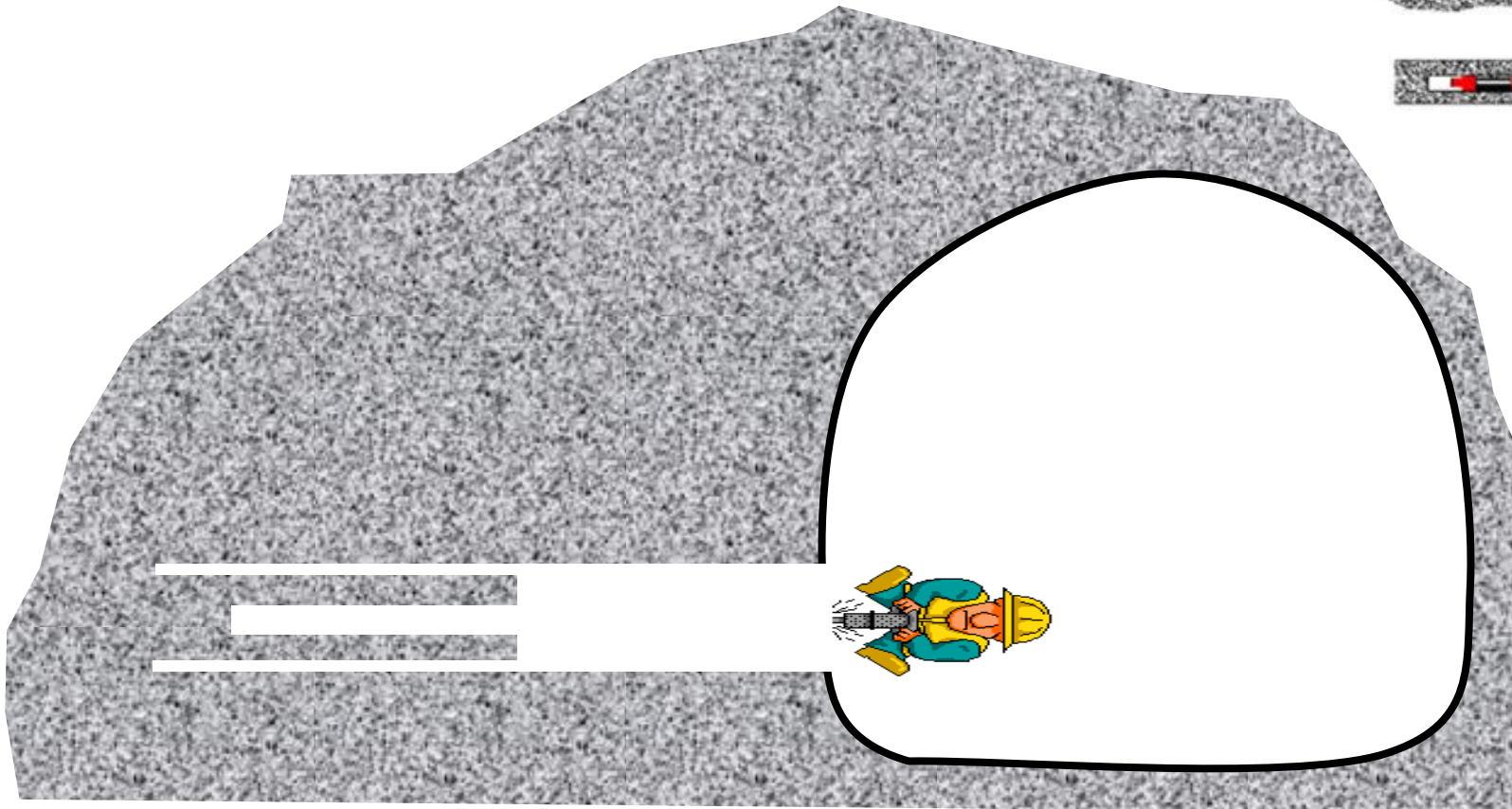
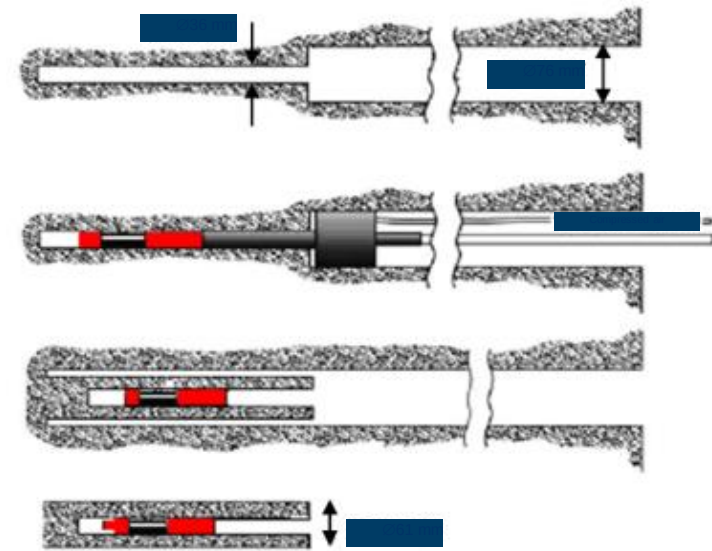
3D overboring

- Kan også utføres fra "dagen" i horisontale hull
- Andre aktører hevder å kunne utføre i vertikale vannfylte hull

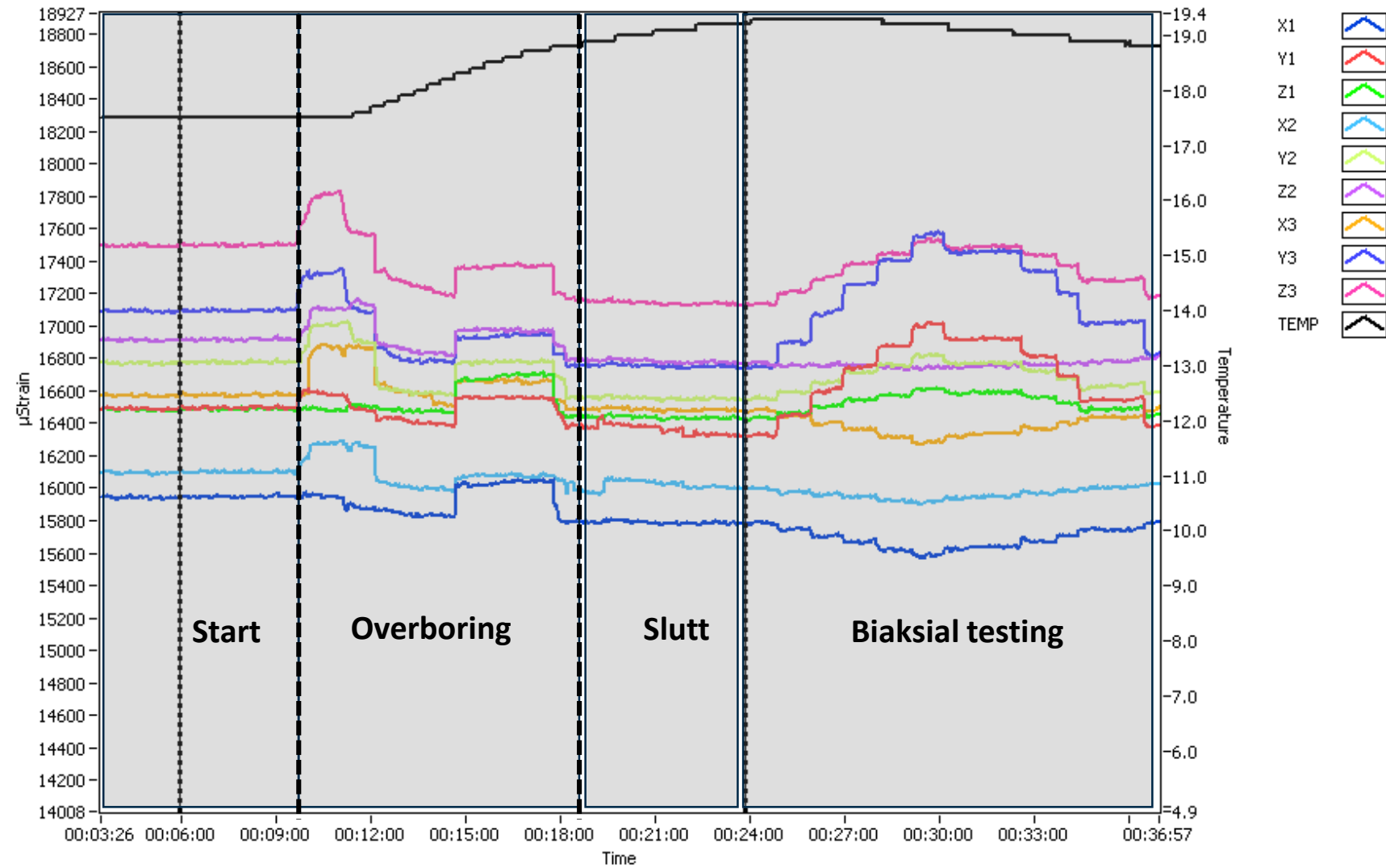


3D overboring

- Målingene utføres min. 1-1,5 diameter fra tunnelveggen (utenfor influensområdet)
- Logger tøyningene underveis i boringen
- 7 - 10 målepunkter i hvert målehull

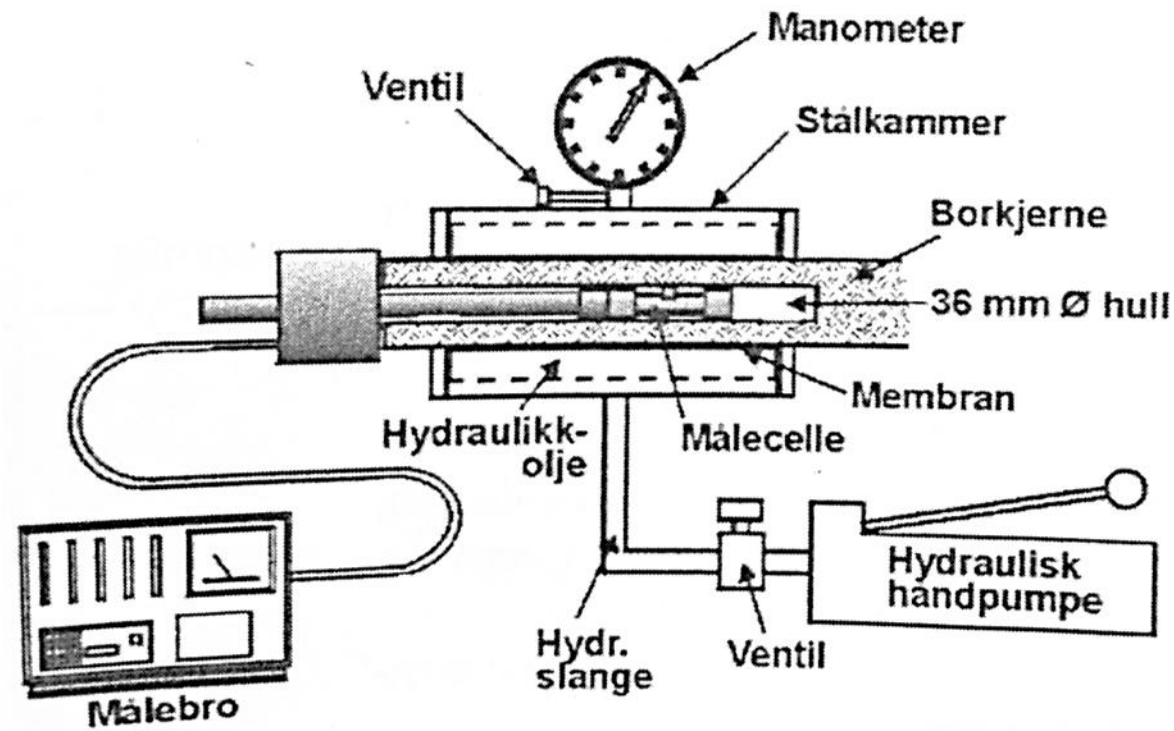


Tøyninger fra 3D overboring



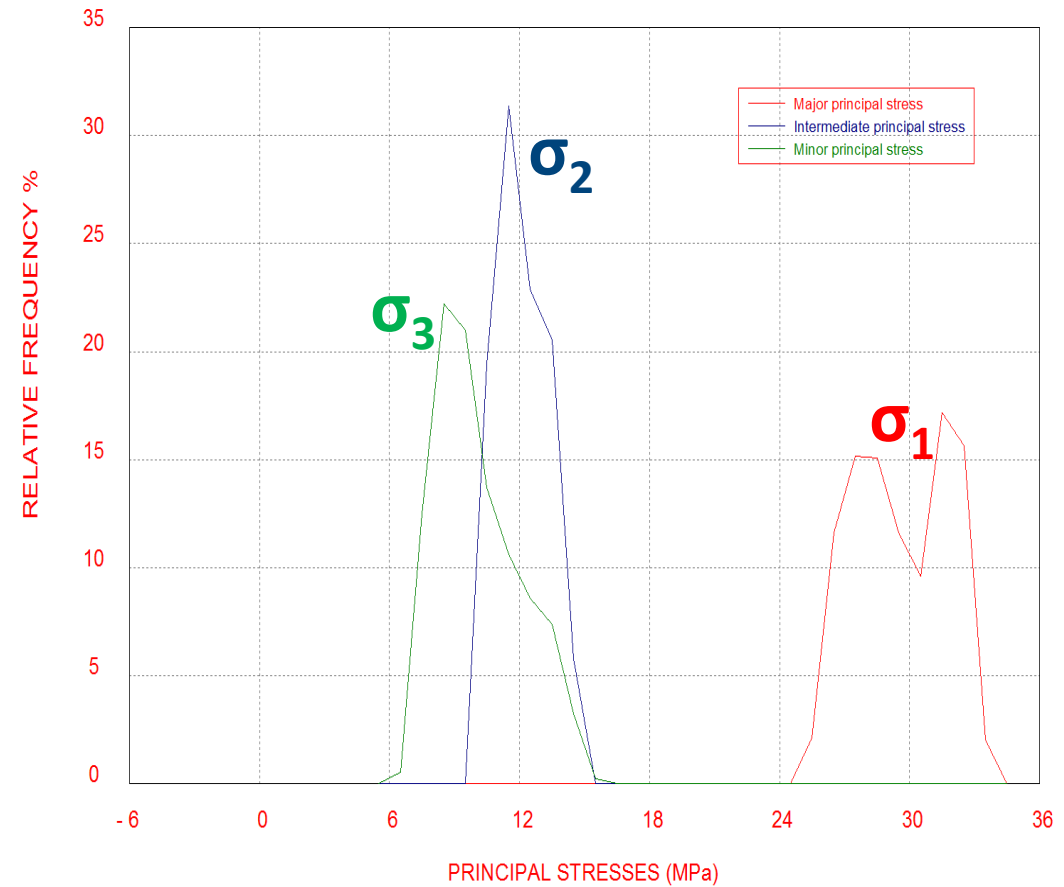
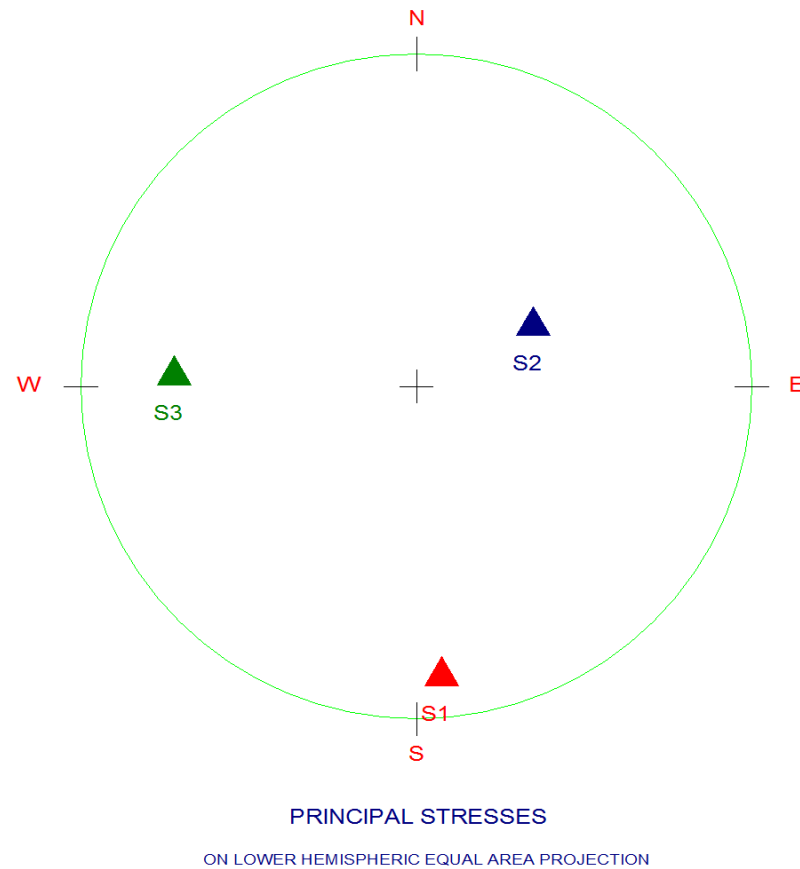
3D målecelle testes i biaksialcelle

- Stegvis hydraulisk omslutningstrykk
- Bestemmelse av elastiske konstanter
- Måles med samme "forhold" som utført 3D måling



3D overboring resultatpresentasjon

- Spenningsberegning i «DISO»



3D overboring

- **Fordeler**

- Måler in-situ bergspenning (orientering og størrelse på 3 hovedspenningene i bergmassen)
- Den best utviklede metoden i dag
- Et målehull gjennomføres i løpet 2-4 dager (SINTEF)

- **Ulemper**

- Krever en viss bergmassekvalitet
 - Tørt målehull (gjelder ikke alle typer 3D celler)
 - Lav oppsprekning
- Andre måleceller har lang herdetid på lim pr måling (ca. 24 timer)
- Vanskelig å utføre ved høye spenninger (coredisking)

Hydraulisk splitting



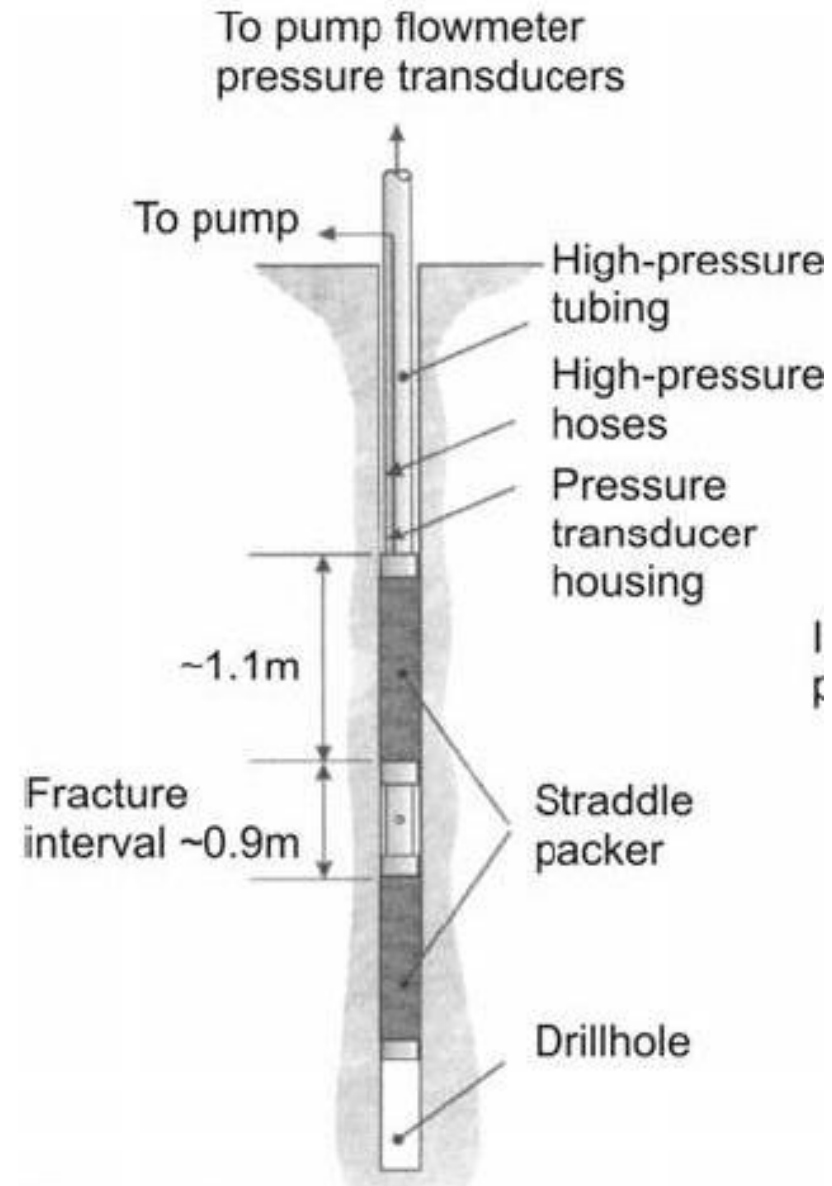
Hydraulisk splitting

- In-situ bergspenningmålingsmetode

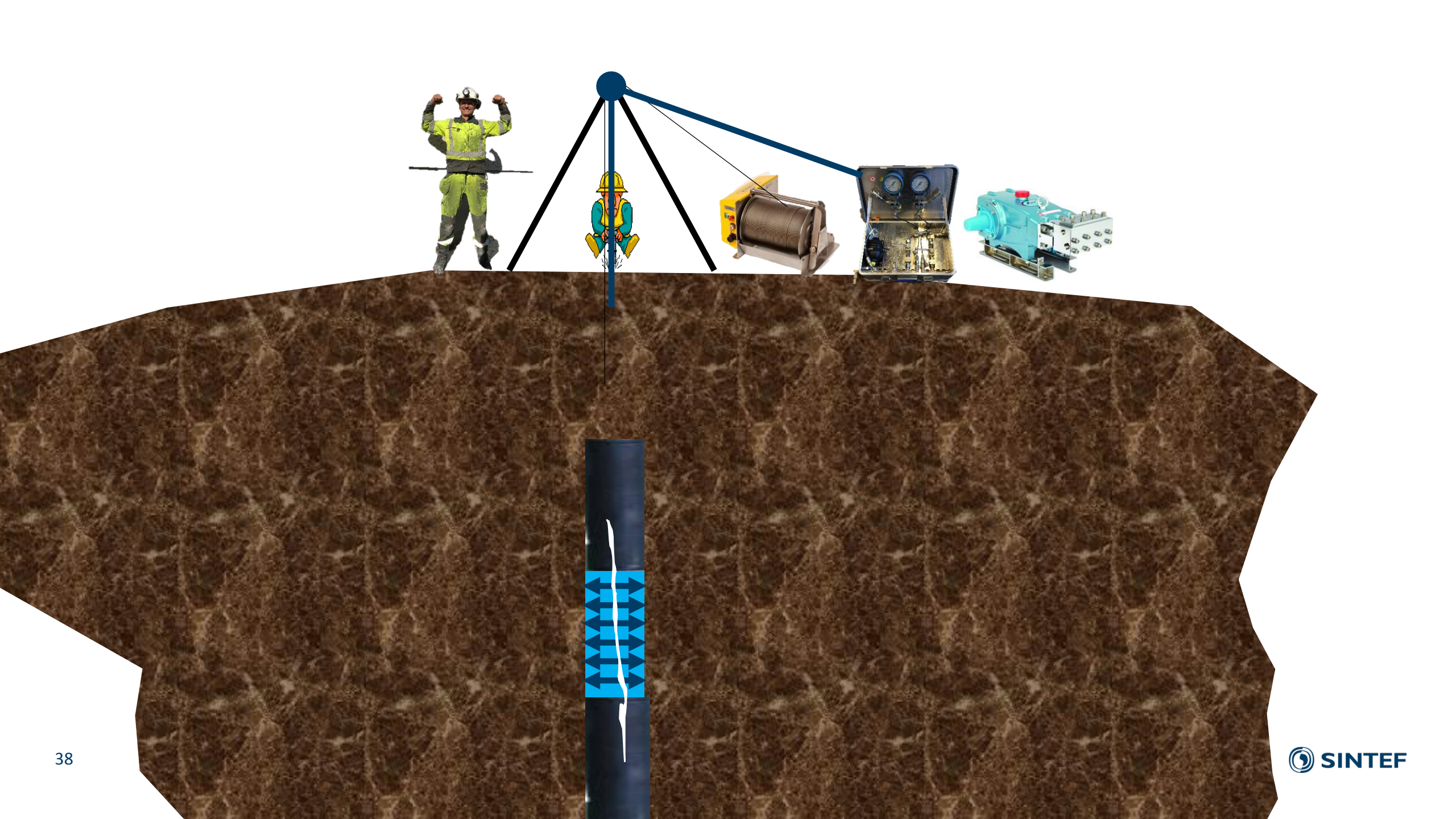


Hydraulisk splitting

- Aktiv metode
- Pakkere stenger av en seksjon i borhullet
- Bestemme in-situ bergspenning i planet normalt på borehullet

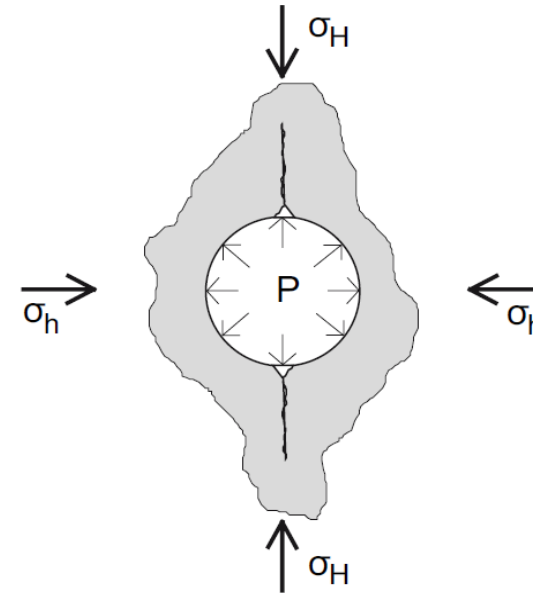
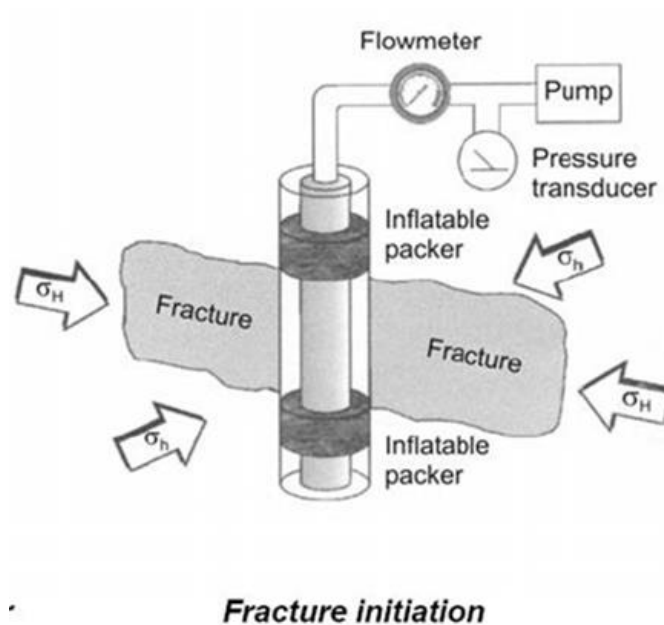


Straddle packer arrangement



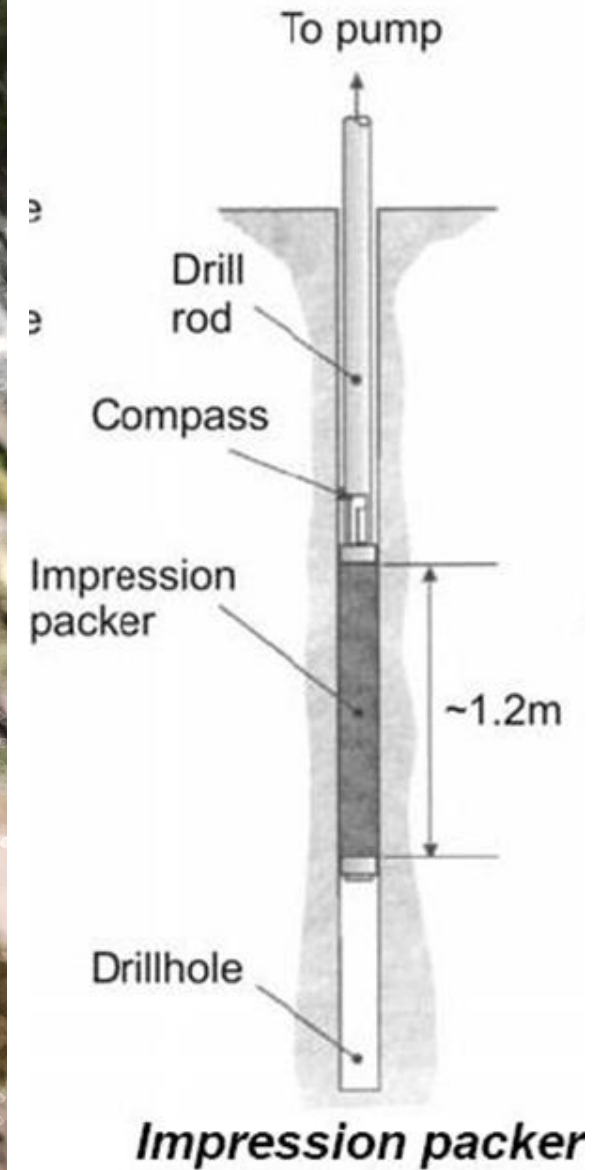
Hydraulisk splitting

- Vann trykkes i testseksjonen og til splitting av bergmassen skjer
- Stenger vanntilførsel og måler trykket



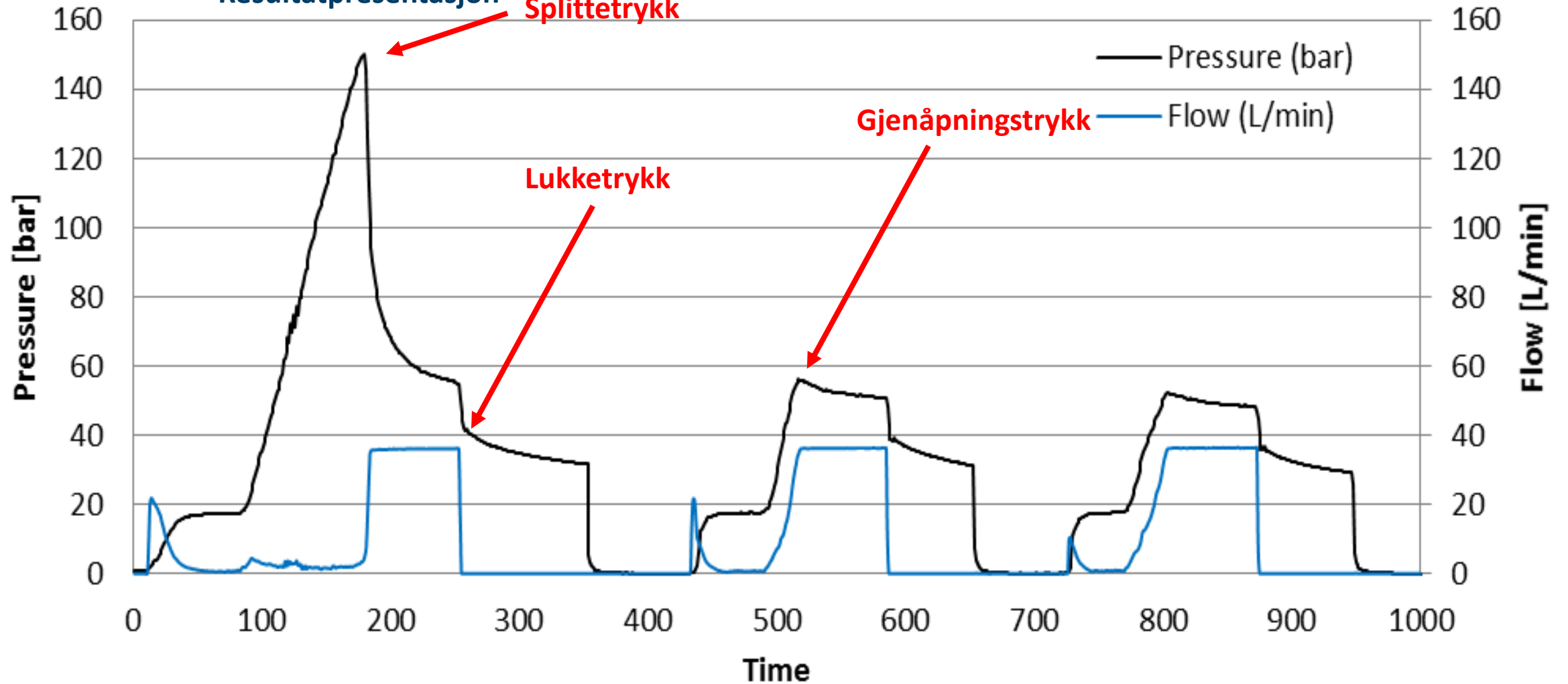
Hydraulisk splitting

- Sprekkeorientering med avtrykkspakker
- Finne retning til målte spenninger



Hydraulisk splitting

- Resultatpresentasjon



Hydraulisk splitting

- Beregning av bergspenning

- Minste hovedspenning (avhengig av hullorientering)

$$\sigma_3 / \sigma_h = \text{Lukketrykk (P}_s\text{)}$$

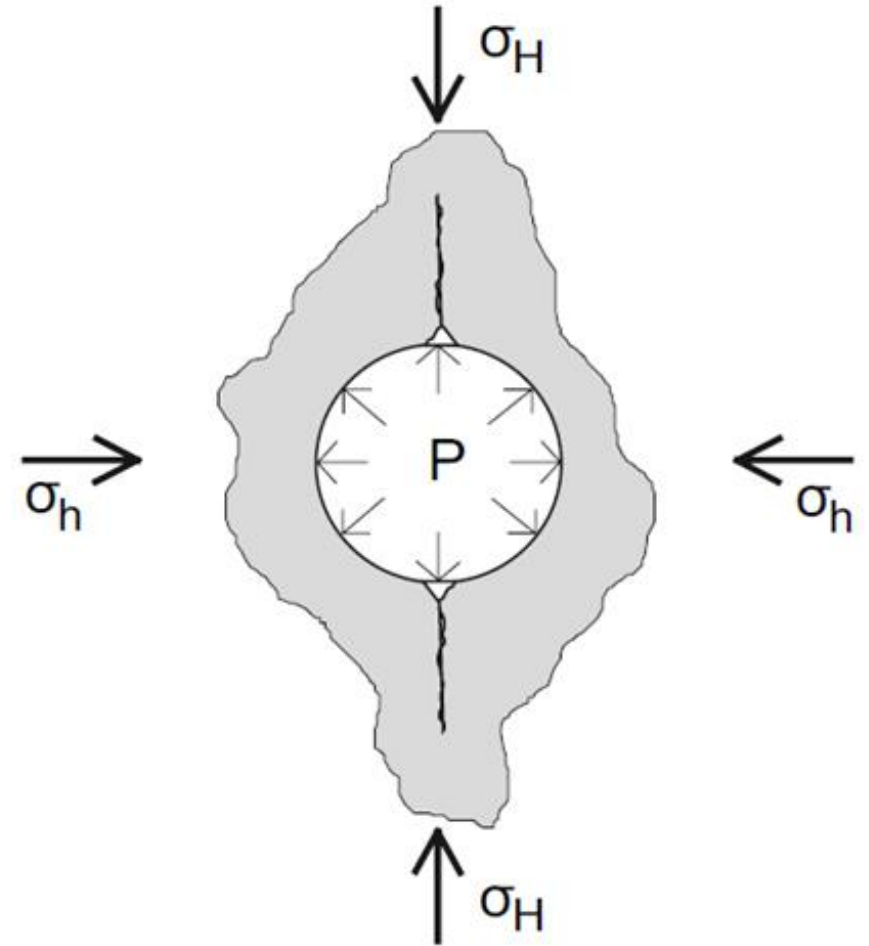
- Største hovedspenning

$$\sigma_1 / \sigma_H = 3 \cdot (P_s) + \text{Strekfasthet (T) - Splittetrykk (P}_b\text{)}$$

- Strekkstyrke av bergmasse

$$\text{Strekfasthet (T)} = \text{Splittetrykk (P}_b\text{)} - \text{Gjenåpningstrykk (P}_r\text{)}$$

evt. bestemt på kjerner fra tester i lab



Hydraulisk splitting - bruksområder

- Måling av bergspenning i dype nedadgående/vertikale hull fra "dagen"



Hydraulisk splitting - bruksområder

- Måling av bergtrykk langs trykktunneler



A photograph showing two workers in high-visibility yellow and grey suits and hard hats with headlamps. They are in a dark tunnel, working on a rock face. One worker is holding a long, black hydraulic splitting tool against the rock, which has red spray-painted markings (the number '13' and some lines) on it. The other worker is standing next to him, also holding the tool. The rock face is uneven and layered. The floor is dark and rocky.

Hydraulisk splitting - bruksområder

- Plassering av betongpropp i vannkraftstasjoner

Hydraulisk splitting - bruksområder

Bestemmelse av trykk for sementbasert injeksjon
(tetting av bergmasse)



Hydraulisk splitting

- **Fordeler**

- Aktiv metode – måler minste hovedspenning direkte! (NB! Orientering må være korrekt)
Trenger ikke konverteres fra tøyning til spenning
- Måler over et langt større område (ca. 1m) sammenlignet med 2D/3D
- Måler i vannfylte/tørre hull
- Rask og lett i utførelse

- **Ulemper**

- Gir kun minste hovedspenning (lukketrykk)
 - Største hovedspenning må beregnes
- Styrke anisotropi i bergmassen kan føre til splitting i en retning som ikke er minste hovedspenning
- Må ha en viss bergmassekvalitet
(Stor oppsprekking fører til jekking av eksisterende sprekker)
- Metoden kan også brukes på eksisterende sprekker ved et visst antall sprekkesett – Hydraulisk jekking

Prosjekteksempel – anvendelse av bergspenningsmålinger

Berspenningsmålinger ved SINTEF/NTNU

- Utført siden 1964 – over 50 års erfaring!
- SINTEF - Kommersiell testing fra 1970
 - 15 land
 - 315 prosjekt med bergspenningsmålinger
 - 169 prosjekt med 3D
 - 60 prosjekt med 2D
 - 114 prosjekt med hydraulisk splitting



Prosjekt eksempel – Vannkraftverk i berg

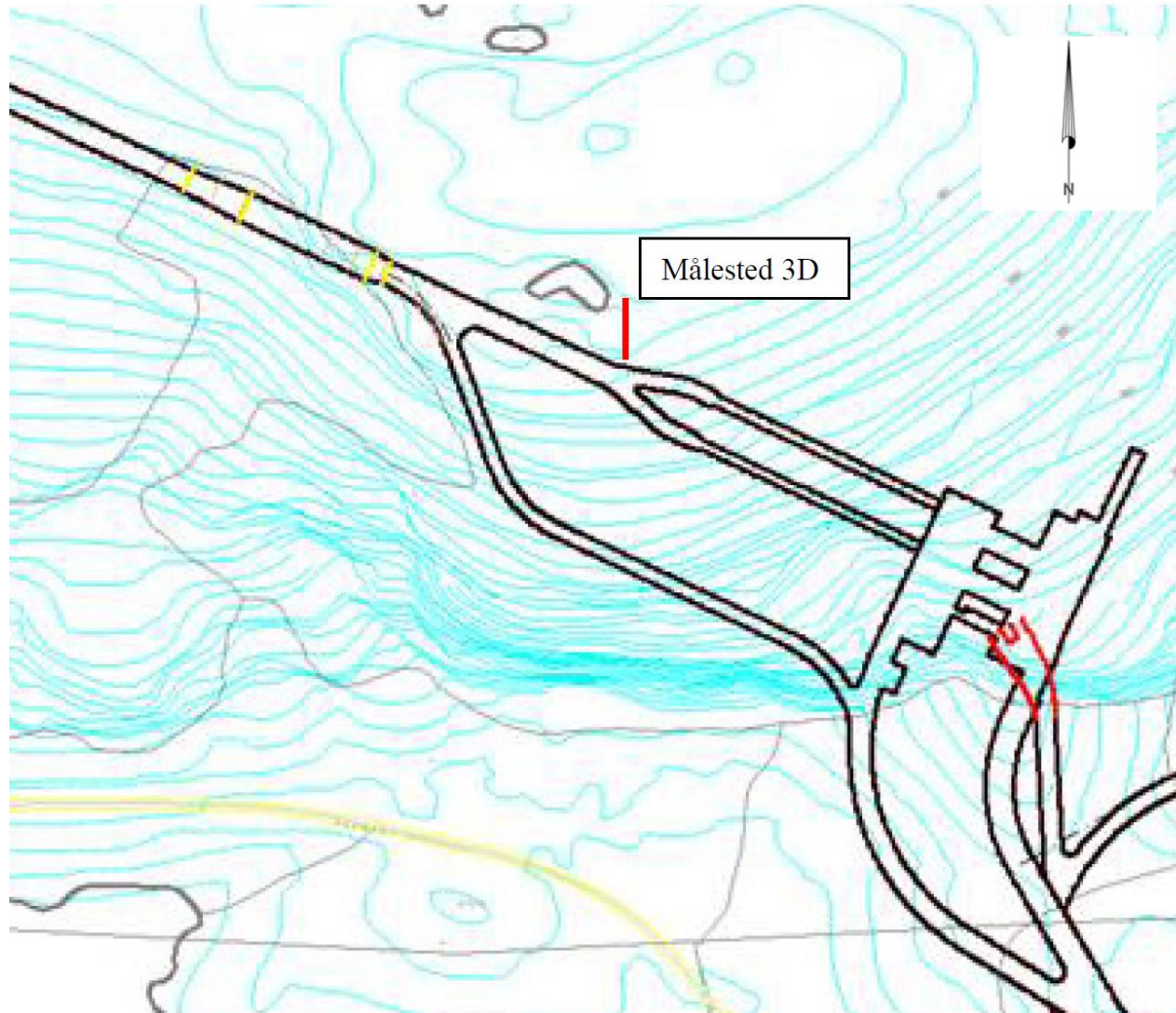
- Ved høytrykksanlegg skal minste hovedspenning (σ_3) være større en vanntrykket ved betongpropp
- Uforet trykktunnel
- Kortest mulig lengde med stålrør fra kraftstasjon til betongpropp



Prosjekt eksempel – Vannkraftverk i berg

- Hydraulisk splitting er foretrukket metoden for bestemmelse minste hovedspenning (σ_3)
- For å kunne foreta en sikker tolking av splitteresultatene må målehullene være orientert parallelt med en av hovedspenningsretningene i bergmassen
 - En feil orientering vil kunne medføre skjærspenninger i sprekkeplanet som induseres under splittingene, og kunne medføre feil tolking av måleresultatene.
 - SINTEF anbefaler 3D for orientering av splittehull
 - Dersom ikke 3D bergspenningsmåling blir utført, blir retningen for boring av splittehull tatt ut fra topografiske kart, "lesing av landskap og erfaring"

3D bergspenningsmåling – for orientering av splittehull

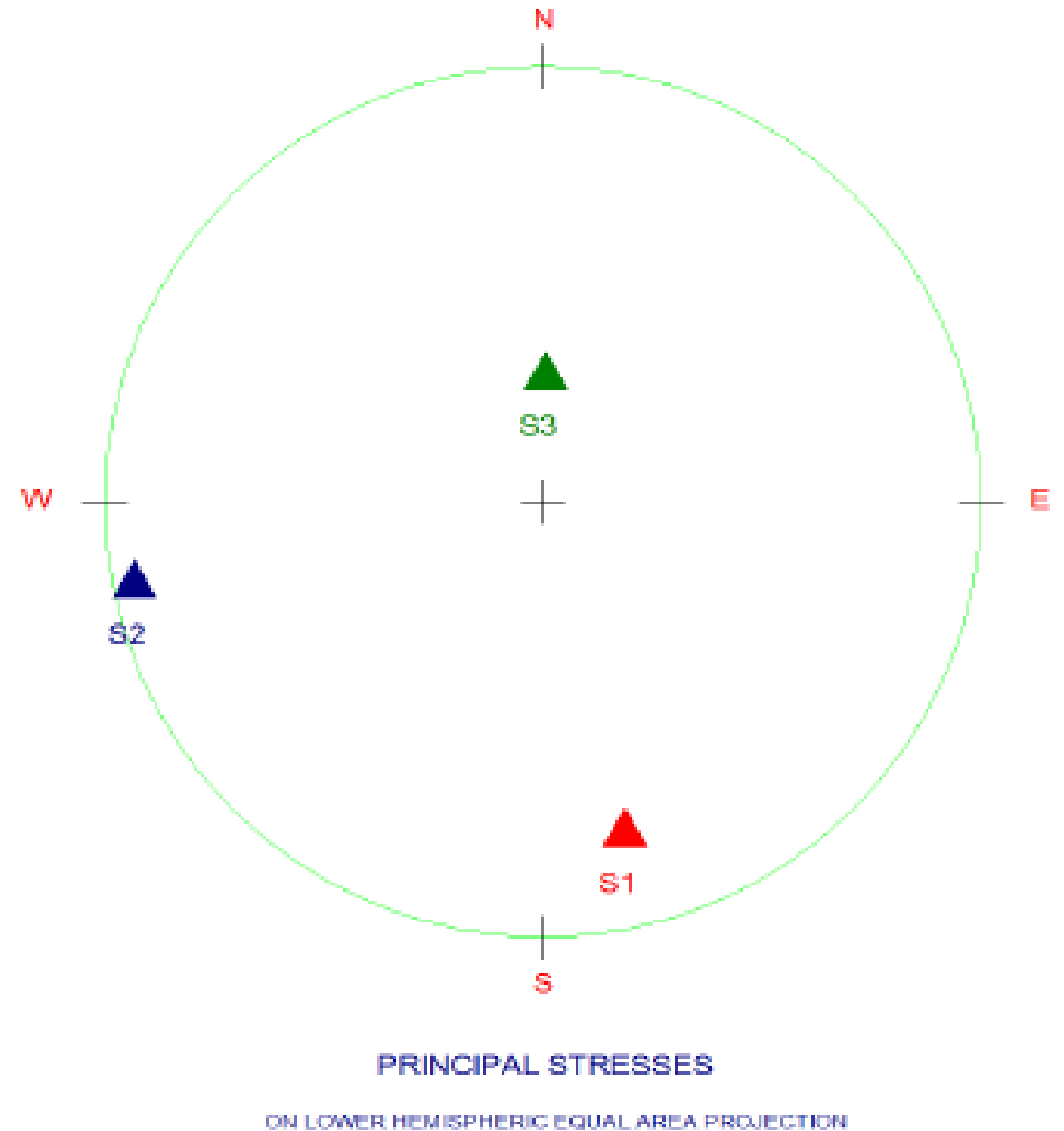


Resultat 3D bergspenningsmåling

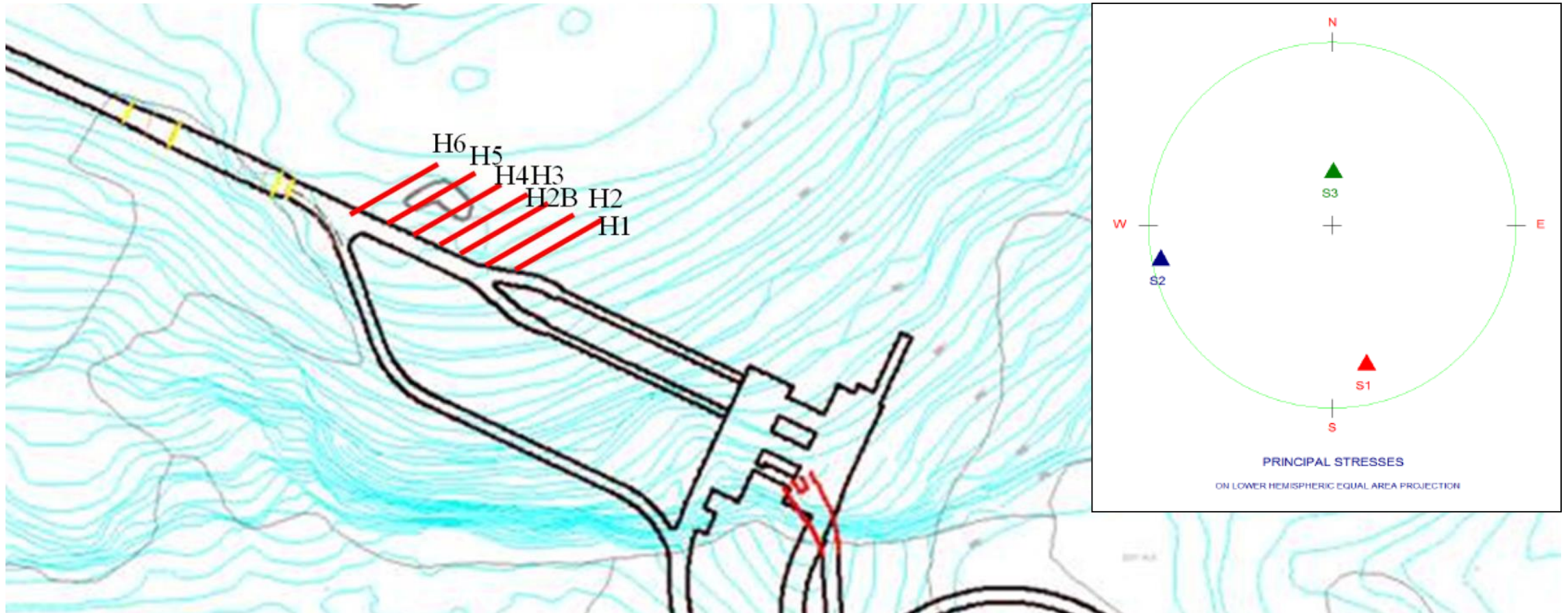
```
*****
*                               *
*      STATISTICAL RESULTS OF IN-SITU STRESSES      *
*                               *
*      MEAN      AVERAGE DEVIATION    STANDARD DEVIATION    TREND    PLUNGE *
*                               *
* SIGMA1      25.21          1.03          1.21          166.2    22.7 *
* SIGMA2      15.74          1.38          1.65          258.5     5.5 *
* SIGMA3      10.90          1.22          1.45           1.4    66.6 *
*                               *
*****
```

```
*****
*                               *
*      IN-SITU STRESSES IN VERTICAL AND HORIZONTAL DIRECTIONS      *
*                               *
*      STRESS              MAGNITUDE              ORIENTATION      *
*                               *
*      VERTICAL STRESS              13.07              *
*      MINIMUM HORIZONTAL STRESS      15.69              74.7      *
*      MAXIMUM HORIZONTAL STRESS      23.10             164.7      *
*                               *
*****
```

```
*****
*                               *
*      GRAVITY STRESS              *
*      VERTICAL STRESS:    18.44      HORIZONTAL STRESS:    8.48      *
*                               *
*****
```



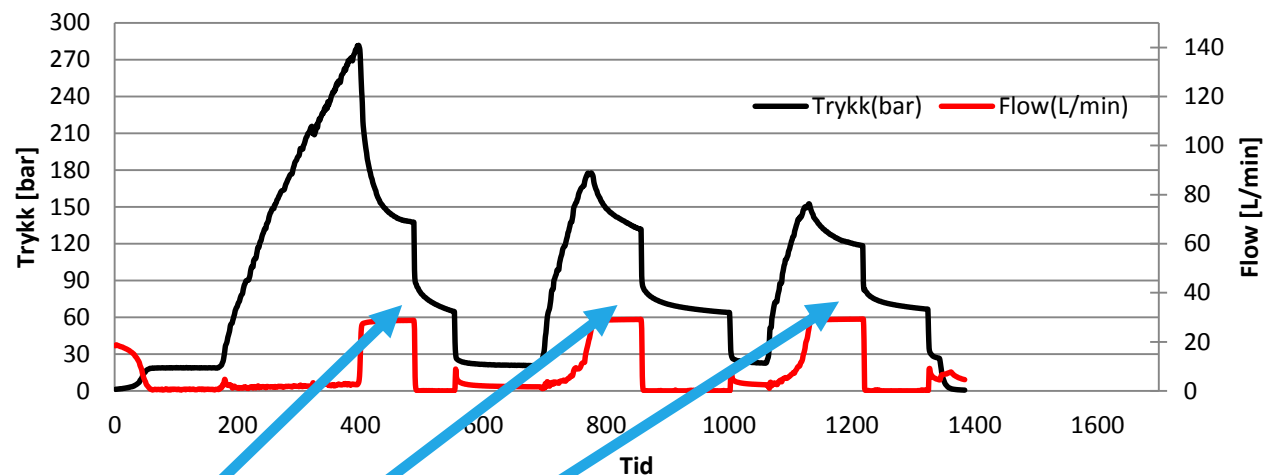
Plassering av målehull for hydraulisk splitting



Resultat hydraulisk splitting

Hull5 15,9 meter

Lokalitet: Konus	Borehull orientering [°]	Testdybde [m]	Splittetrykk P _f [MPa]	Gjennåpnings trykk P _{re} [MPa]
BH1	N75/DIP+5	27,9	30,9	21,0
BH1	N75/DIP+5	24,9	26,3	17,6
BH1	N75/DIP+5	21,9	30,7	20,7
BH1	N75/DIP+5	18,9	29,0	21,0
BH2B	N75/DIP+5	27,9	34,7	22,2
BH2B	N75/DIP+5	24,9	32,8	23,2
BH2B	N75/DIP+5	21,9	27,8	16,6
BH2B	N75/DIP+5	18,9		
BH2B	N75/DIP+5	15,9	25,5	14,0
BH2B	N75/DIP+5	12,9	25,5	13,1
BH4	N75/DIP+5	15,9	20,3	18,1
BH4	N75/DIP+5	12,9	21,7	18,2
BH5	N75/DIP+5	27,9	20,2	11,5
BH5	N75/DIP+5	24,9	23,0	12,2
BH5	N75/DIP+5	21,9	22,6	12,2
BH5	N75/DIP+5	18,9	25,5	11,9
BH5	N75/DIP+5	15,9	28,2	17,8
BH5	N75/DIP+5	12,9	31,6	19,2
BH6	N75/DIP+5	27,9	27,2	16,9
BH6	N75/DIP+5	24,9	29,3	14,4
BH6	N75/DIP+5	21,9	17,5	13,8
BH6	N75/DIP+5	18,9	24,7	12,1
BH6	N75/DIP+5	15,9		
BH6	N75/DIP+5	12,9	31,3	16,1



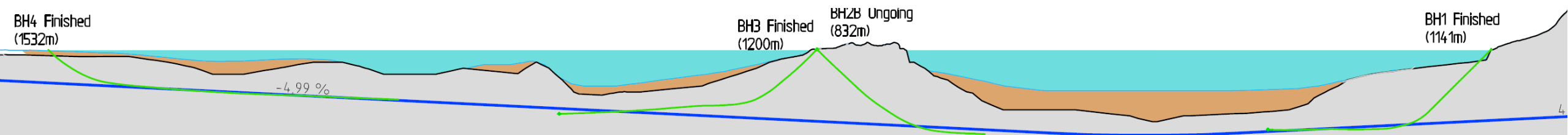
Sammendrag prosjekteksempel

- Minste hovedspenning (σ_3) fra 3D overboring er målt til **$10,9 \pm 1,5$ MPa**. 3D overboring anses som meget vellykkede.
- Gjennomsnittet av alle målte lukketrykk (σ_3) med hydraulisk splitting fra de vellykkede splittetestene er $12,5 \pm 3,3$ MPa
- Gjennomsnittet i målehull H5 er **$9,4 \pm 0,5$ MPa**, det laveste registrerte lukketrykket 8,2MPa.
- Vellykket prosjekt med sammenfallende måleresultater med 2 forskjellig metoder



Videreutvikling og fremtidige satsninger

- Økning av etterspørsel på bergspenningsmålinger – spesielt i infrastruktur prosjekter
- Hydraulisk splitting under kjerneboring
- SINTEF er i dialog med produsent vedrørende utvikling av måleutstyr for wireline
- Muliggjør testing i både retningsstyrte og dype hull <2000 m



Oppsummering - ulike metoder for bestemmelse av bergspenninger

- **De mest brukte og kjente metodene:**
- **2D overboring**
 - Doorstopper (CSIRO), Doorstopper (SINTEF), USBM, Sibra celle
- **3D overboring**
 - Triaxial cell (CSIR), NTNU/SINTEF 3D celle, Hollow Inclusion celle (CSIRO), LVDT celle (SMCOY),
- **Hydraulisk splitting**
 - Mye egenutviklet utstyr, Mini-Frac (CSIRO), mange leverandører av pakkere (oljebransjen)
- Alle overnevnte metoder har forskjellige aktører med ulikt utstyr og prosedyrer som har sine "fordeler og ulemper"
- Beregningsprogrammer og kalkulering
- 2 internasjonale standarder ISRM og ASTM ("Suggested Test Method")

Takk for oppmerksomheten!



Teknologi for et bedre samfunn