

10.mars 2016

Gamle Elektro, rom EL6 i 2. etasje

Bergspenningsmålinger – Hydraulisk splitting, σ_3

Trond Erik Larsen

Forskningsingeniør | Research Engineer

SINTEF Byggforsk | SINTEF Building and Infrastructure

P.O.Box 4760 Sluppen, 7465 Trondheim | Visit: Sem Sælands vei 1

+47 415 05 782 trondel@sintef.no

[SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer](#) | [SINTEF Certification](#) | [SINTEF Nettbokhandel](#)

www.sintef.no/byggforsk | *Teknologi for et bedre samfunn*

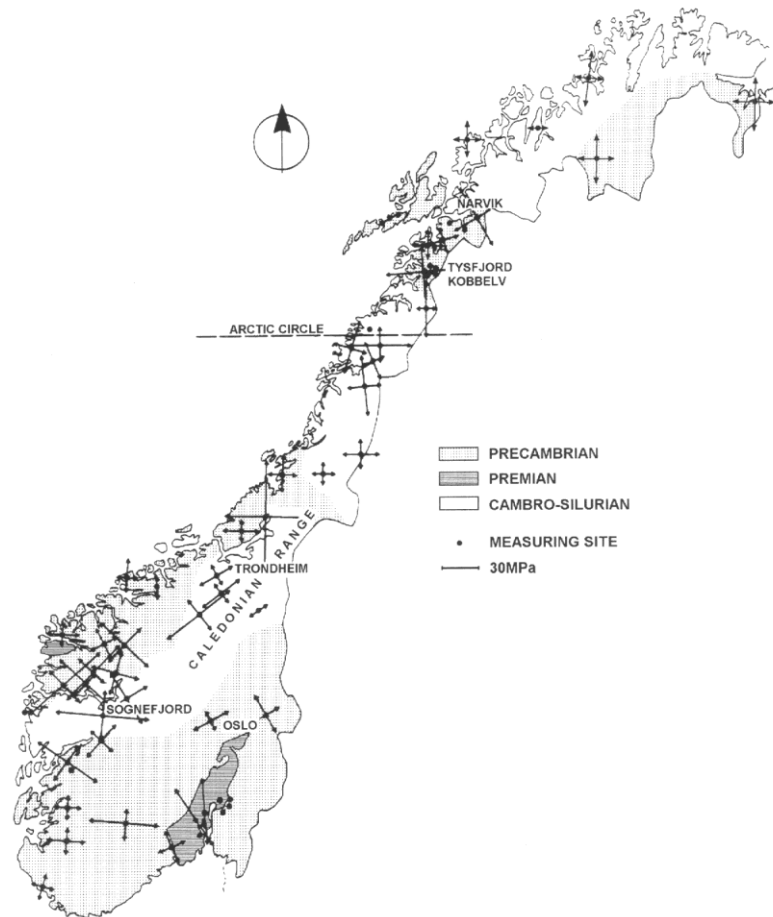
Bergspenningsmåling

- Benyttes for måling av bergspenninger i en ingeniørmessing sammenheng. Blant annet:
 - Dimensjonering av bergsikring
 - Redusere kostnader i forbindelse med sikring
 - Viktig inngangsparameter ved numerisk modellering
 - Design og orientering av bergrom, haller og gruver (2D og 3D)
 - Trimming/fjerning av pilarer i gruver
 - Pilarer med liten last har liten nytteverdi (2D)
 - Plassering av konus (betongpropper) ved vannkraftverk (3D og hydraulisk splitting)
 - Måle bergspenninger i dype hull (forundersøkelser med hydraulisk splitting)

Bergspenninger i Norge

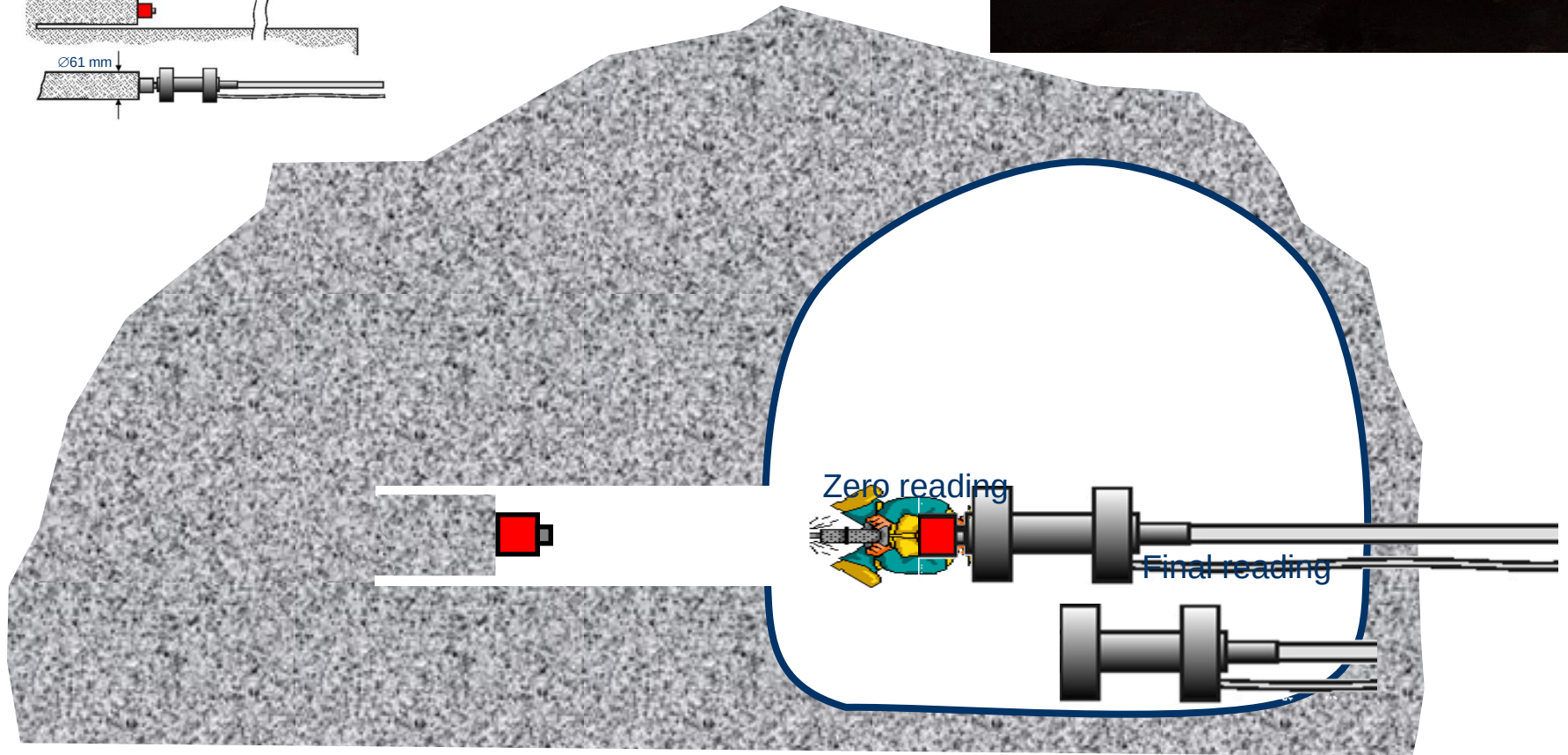
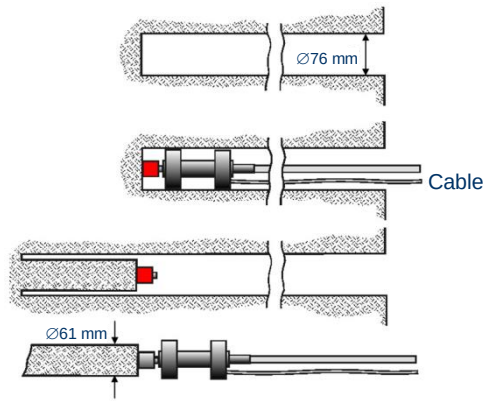
- Områder med spesielt høye horisontale spenninger
 - Prekambriske grunnfjellsområder (Vestlandet, Trøndelag, Nord-Norge)
 - Permiske intrusiver i Oslo-feltet (drammensgranitt og larvikitt)
- Generelle retninger: σ_H normalt og σ_h parallelt kaledonske fjellkjede

Bergspenninger i Norge



Metoder bergspenningsmåling

- 2-dimensjonal spenningsmåling med overboring



Metoder bergspenningsmåling

Langtidsdoorstopper LTMD

Langtidsdoorstopper

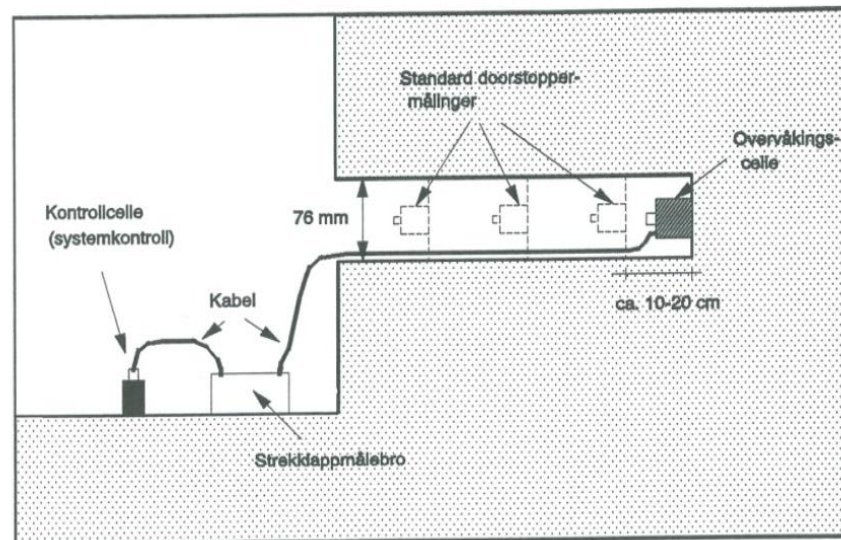
Langtidsdoorstopperen blir limt i bunnen av hullet (Ø 76 mm) som på forhånd er utflatet med en spesialborkrone. Under boringen av hullet, inn til ønsket dyp, blir det gjort standard doorstoppermålinger med jevne mellomrom (5 – 6 stk.) innover i hullet for å finne de initiale bergspenningene, se figur 1. Metoden for enkeltmålingene er beskrevet i vedlegg 1. Den siste standardmålingen blir tatt så nær det planlagte huldyp for langtidsdoorstopperen som mulig (normalt innenfor 10 – 20 cm).

Langtidsdoorstopperen blir så installert.

Avlesningene gjøres med en målebro (måleforsterker) for strekkklappmålinger.

Avlesningshyppigheten tilpasses situasjonen som

skal overvåkes. Målebroen kan fraktes ut og inn av gruva mellom hver avlesning.

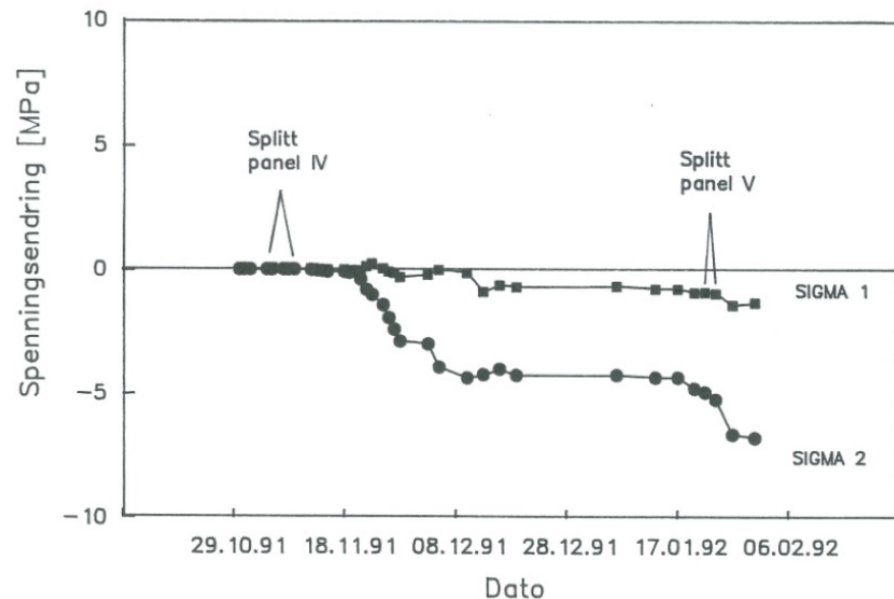


Figur 1: Måleprosedyre ved installasjon av langtidsdoorstopper i horisontale hull

Metoder bergspenningsmåling

Langtidsdoorstopper LTMD

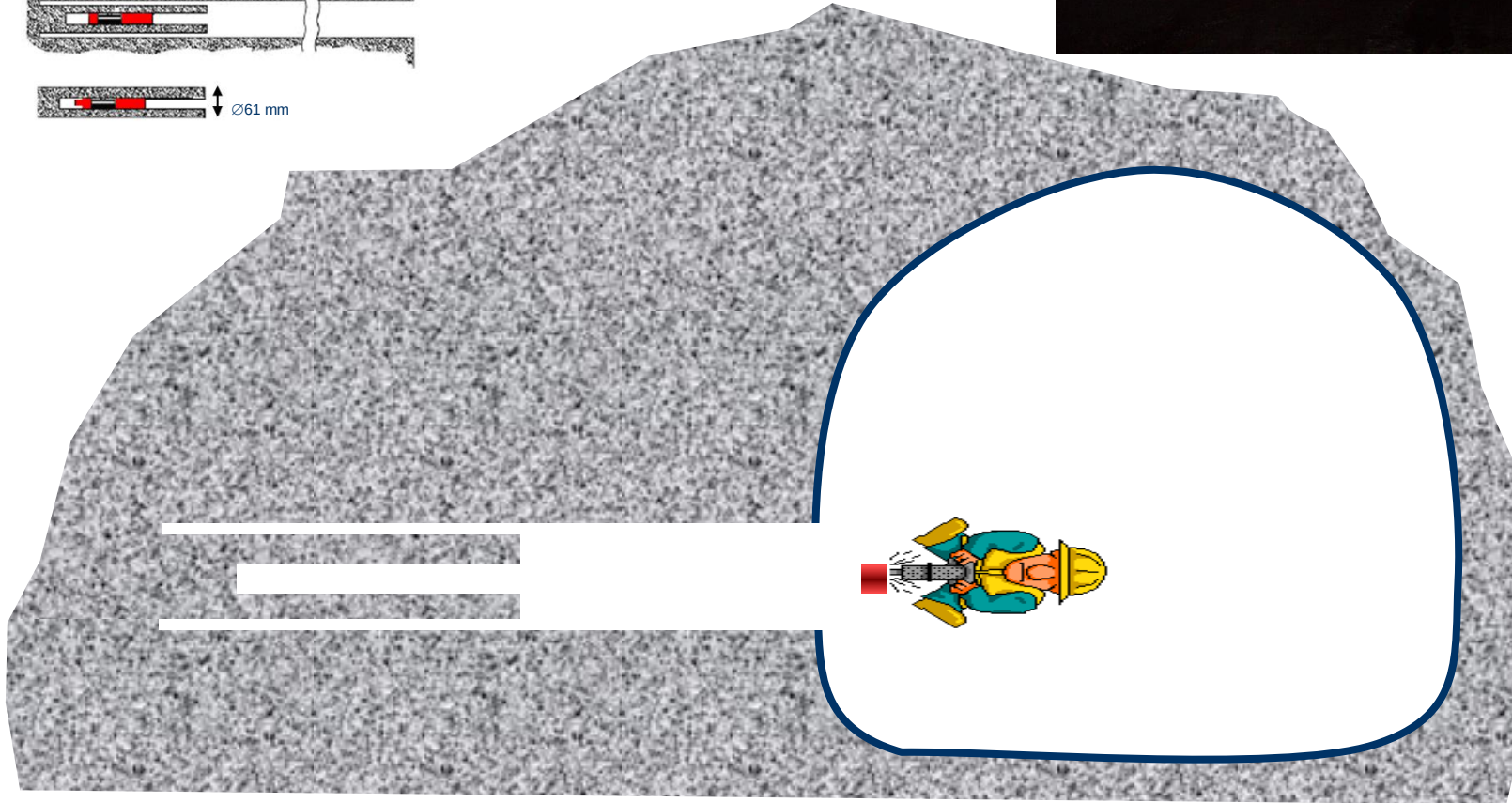
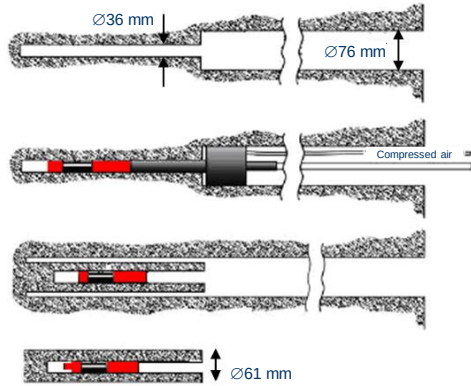
I tilknytning til en av de installerte langtidsdoorstopperene vil det monteres en doorstopper-dummy som må avleses ved jevne mellomrom for å kontrollere at målesystemet virker som det skal. Dummyen er ikke limt fast til fjell og skal gi de samme verdiene under hele måleperioden. Ved avlesning av 5 langtidsdoorstopperne vil avlesningsprosedyren være som følger: Avlesning av alle langtidsdoorstopperene samt avlesning av doorstopper-dummy. Målebroen kobles til med en kontakt. Verdiene fra avlesningene legges inn i et regneark der spenningsendringene plottes. Det anbefales at målingene gjøres av samme person.



Måleprinsippet for strekkklappmålinger er at strekkklappene registrerer motstandsendringer som relateres til tøyningendringer. Spenningsendringene kan så beregnes ved å bruke tøyningdifferansen fra null-avlesning til avlesningstidspunktet og de elastiske egenskapene til bergarten. Den beregnede spenningsendringen blir så sammenlignet med spenningsverdiene for de initiale målingene.

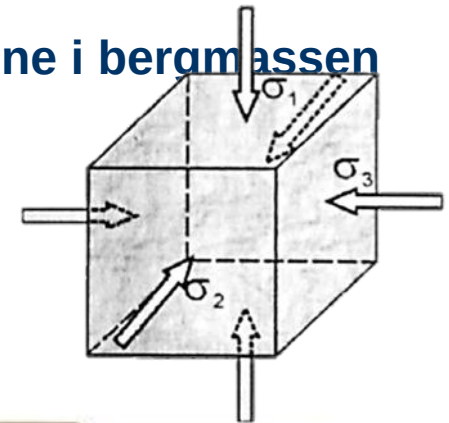
Metoder bergspenningsmåling

- 3-dimensjonal spenningsmåling med overboring



Metoder bergspenningsmåling

- Tøyninger på 3 strekkapprosetter leses av før og etter overboring. Logger kontinuerlig under overboring
- Benytter Hooke's lov ved beregning av målt spenning fra:
 - Målte tøyninger
 - Elastiske egenskaper
- Måler størrelse og retning til de 3 hovedspenningene i bergmassen



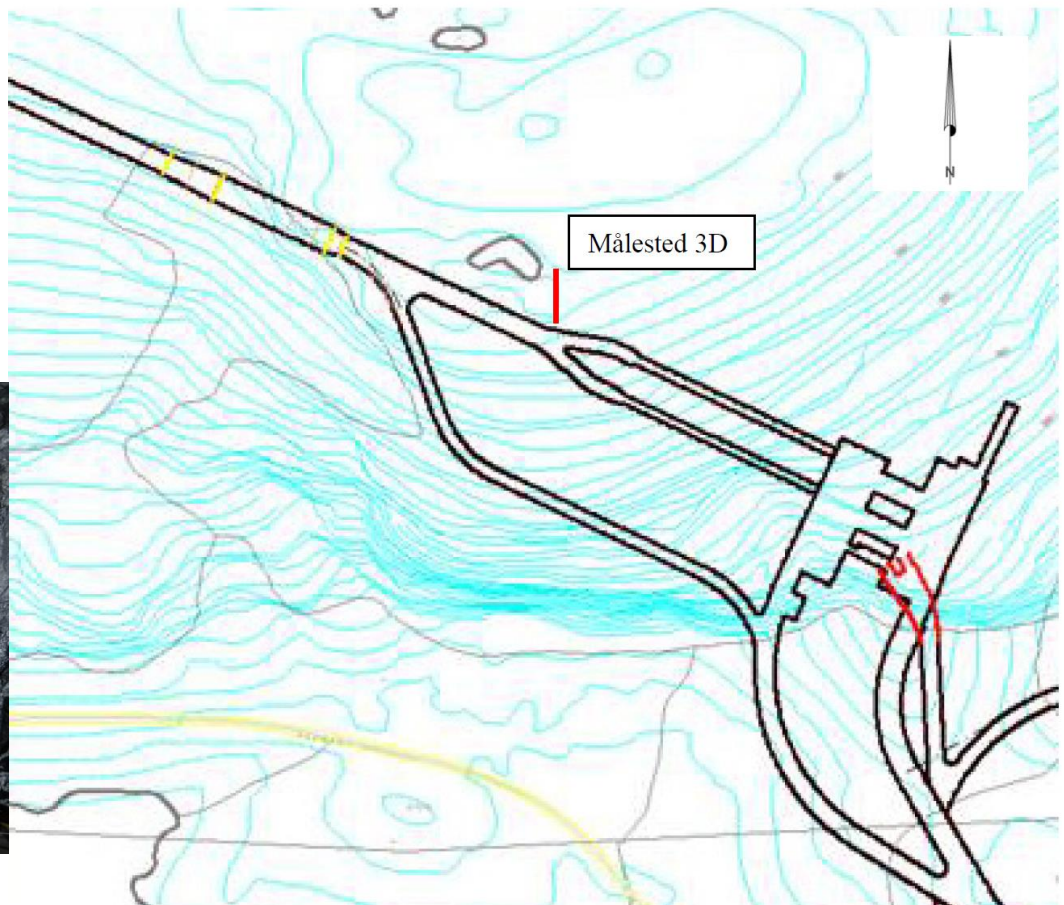
Plassering av konus ved kraftverk

- Ved høytrykksanleg må minste hovedspenning (σ_3) skal være større en vanntrykket ved betongpropp
- Ved veldig høye vanntrykk kan det være nødvendig å gjøre spenningsmåling (3D)før plassering av kraftstasjon
 - Området for planlagt plassering kan være avspent
 - Kortes mulig lengde med stålrør fra kraftstasjon til betongpropp
 - Optimal orientering av kraftstasjonshall i forhold til spenninger og sprekkeorientering

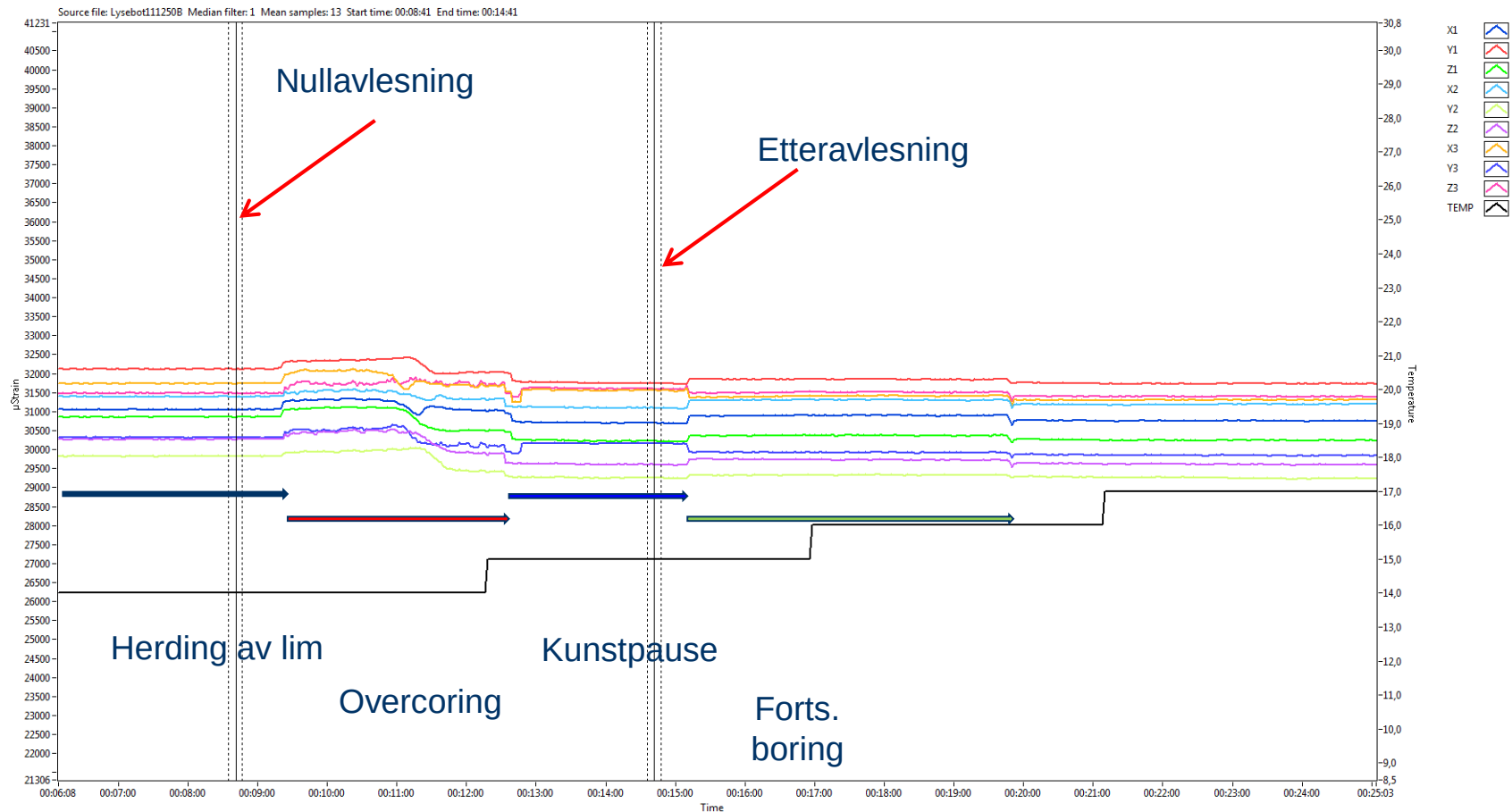
Plassering av konus ved kraftverk

■ Orientering av splittehull

■ 3-dimensjonal bergspennings måling

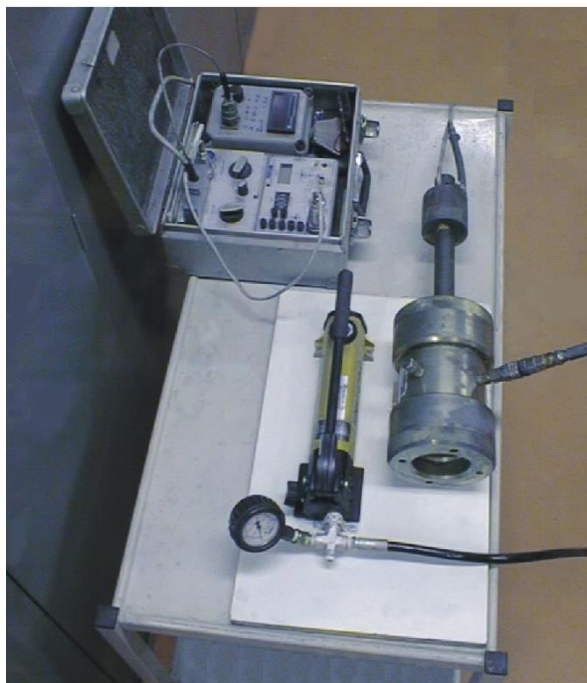
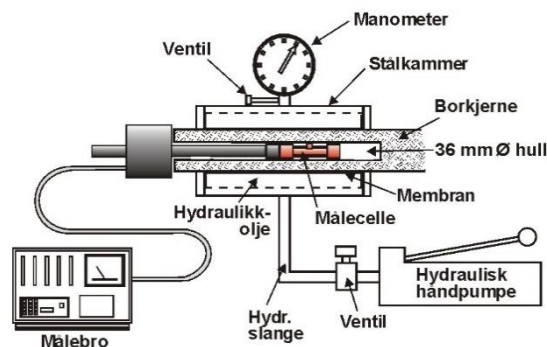


Måledata 3-dimensjonal bergspenningsmåling

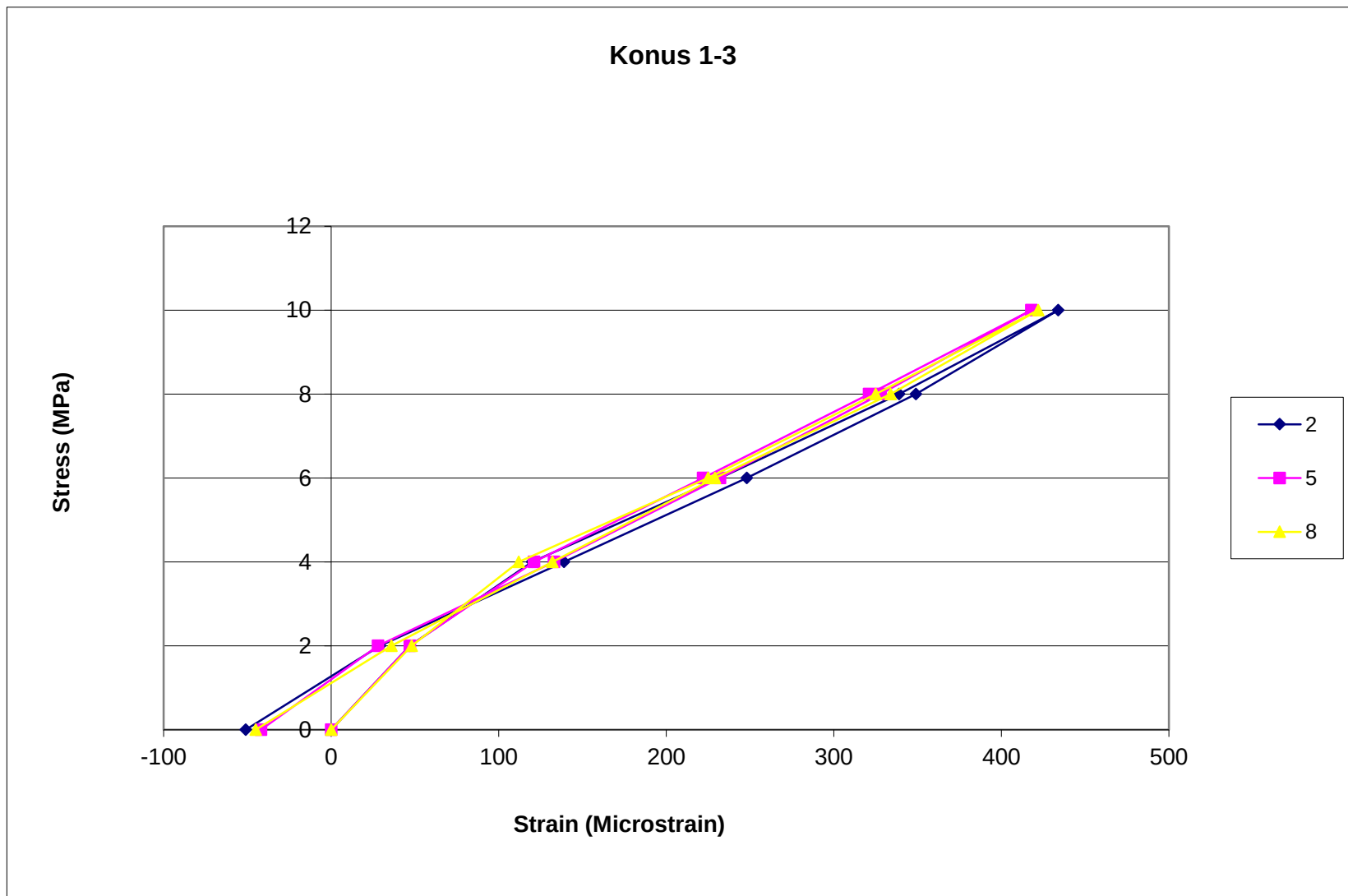


Måledata 3-dimensjonal bergspenningsmåling

■ Biaksialcelle



Måledata 3-dimensjonal bergspenningsmåling



Måledata 3-dimensjonal bergspenningsmåling

 * In Situ Stress Measurement Report *

Client Name: LysebotnII Kraf Project Name: Implenla
 Borehole Name: Lysb08 Project Number: 102010
 Borehole orientation: Trend 360.0 Elevation angle 5.0
 Overburden: 700.0 SF: 0.5

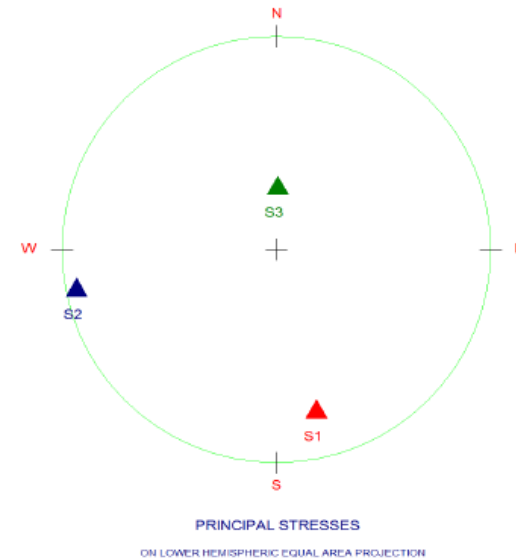
MEASUREMENT RESULT

DEPTH (m)	3-D READINGS									2-D READINGS				E (GPa)	nu	rho (kg/m3)
	Theta=0			Theta=90			Theta=225									
	a	0	45	a	0	45	a	0	45	0	90	45	135			
12.5	355	373	636	295	574	663	186	155	118	0	0	0	0	54.5	0.27	2688
13.0	289	248	357	224	319	314	351	354	344	0	0	0	0	51.4	0.30	2688
14.5	271	332	559	272	524	488	401	524	219	0	0	0	0	49.0	0.32	2688
15.0	154	101	357	176	510	449	430	488	198	0	0	0	0	58.8	0.37	2688

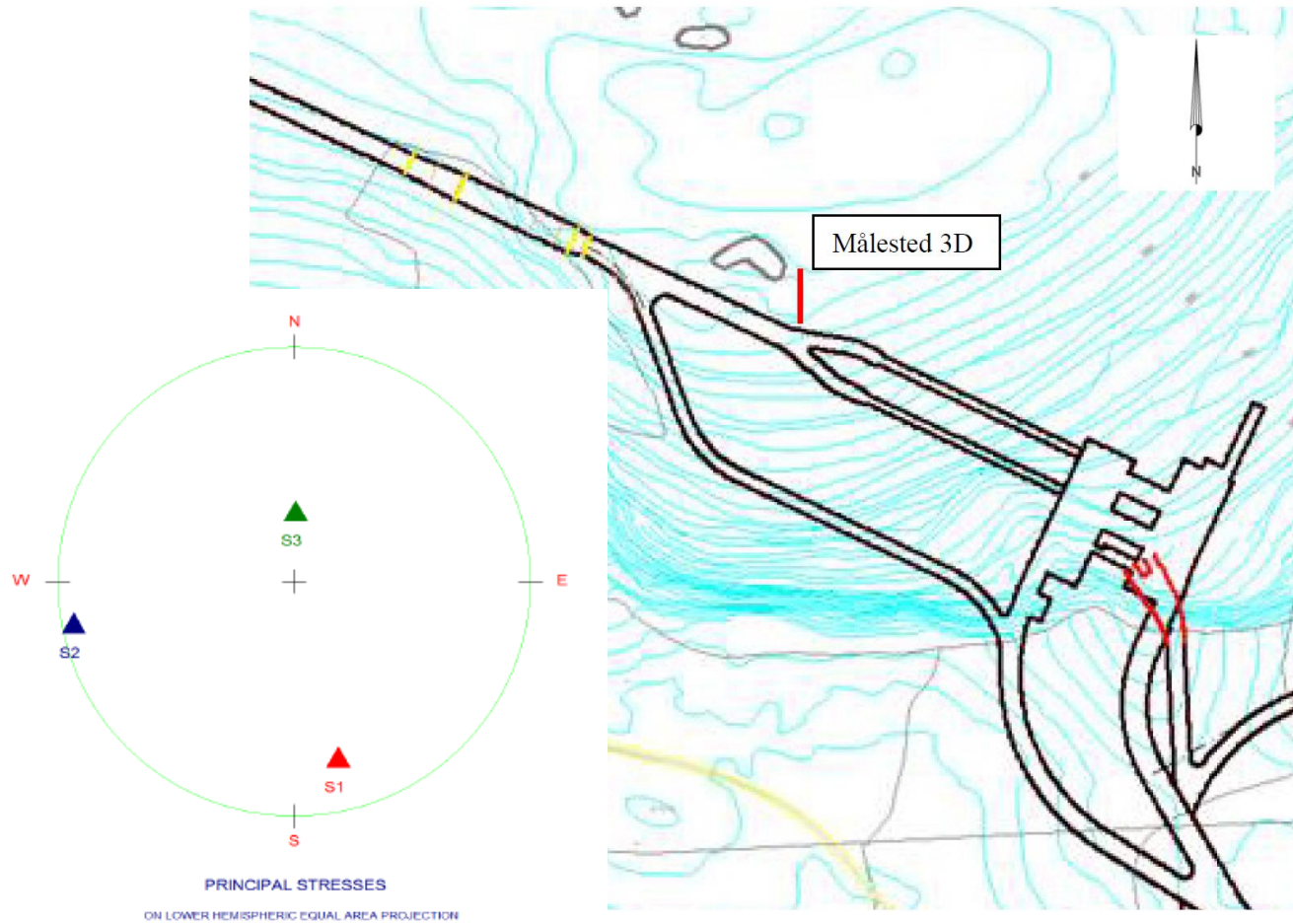
 * STATISTICAL RESULTS OF IN-SITU STRESSES *
 * MEAN AVERAGE DEVIATION STANDARD DEVIATION TREND PLUNGE *
 * *
 * SIGMA1 25.21 1.03 1.21 166.2 22.7 *
 * SIGMA2 15.74 1.38 1.65 258.5 5.5 *
 * SIGMA3 10.90 1.22 1.45 1.4 66.6 *

 * 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 *

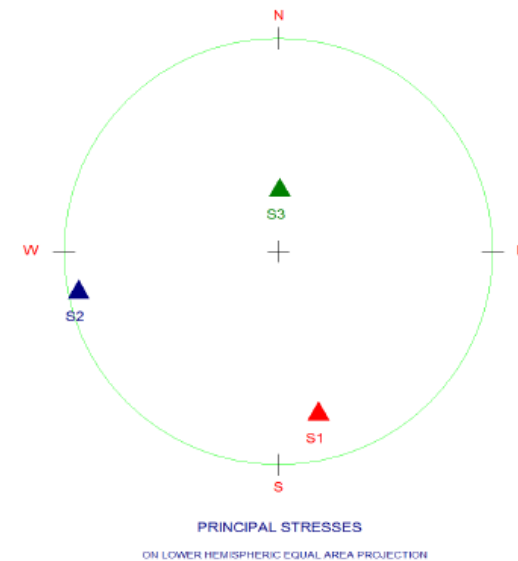
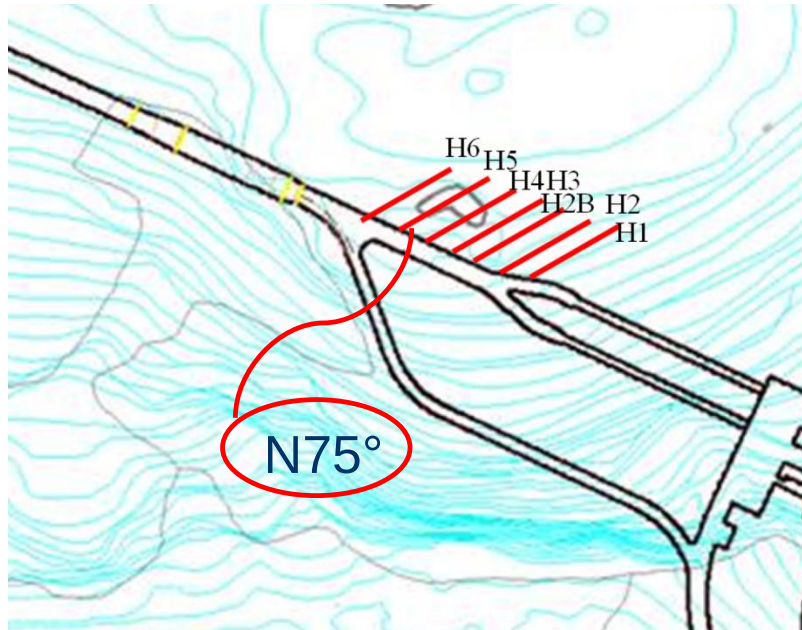
 * GRAVITY STRESS *
 * VERTICAL STRESS: 19.44 HORIZONTAL STRESS: 8.48 *



Plassering av konus ved kraftverk



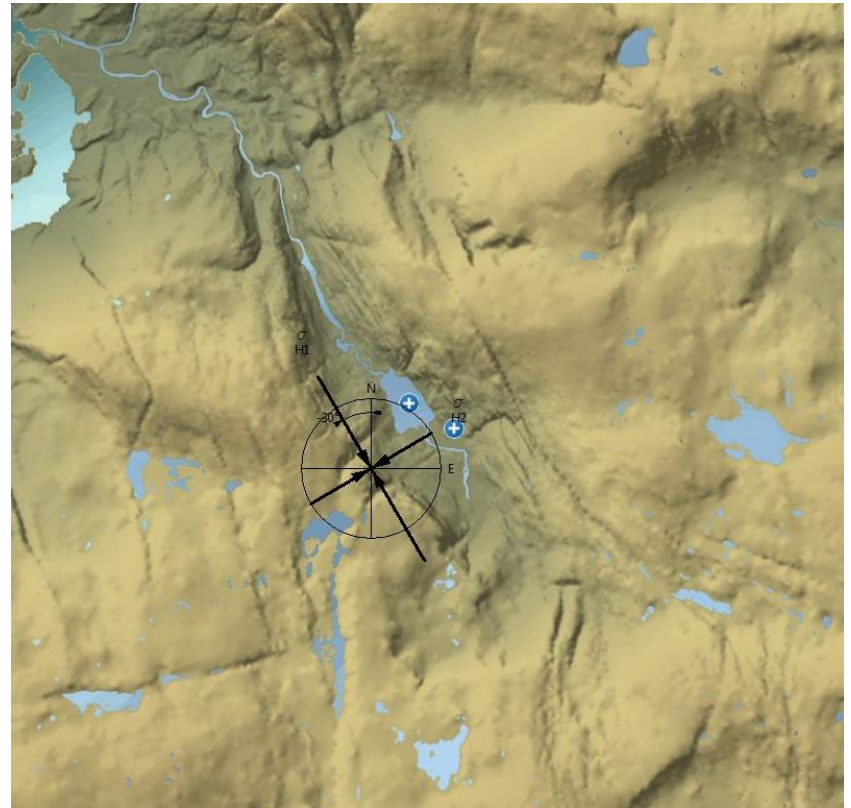
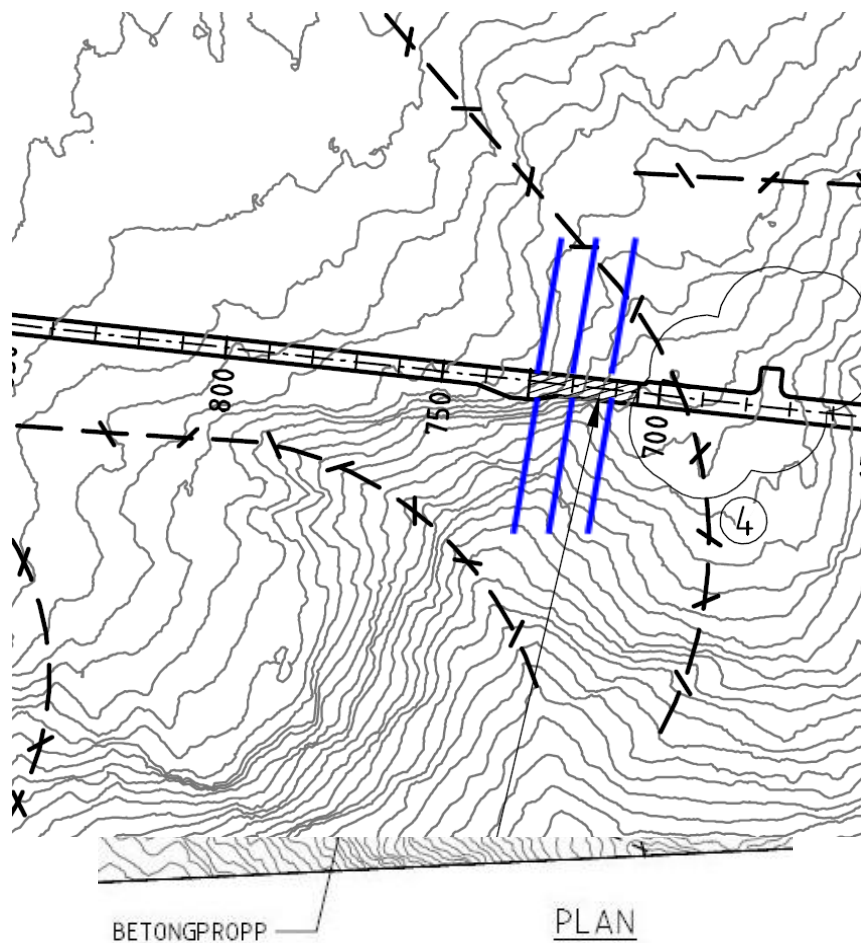
Plassering av konus ved kraftverk



Hydraulisk splitting

- 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 3-dimensjonal for orientering av splittehull
- Dersom ikke 3-dimensjonal bergspenningsmåling blir utført, blir retningen for boring av splittehull tatt ut fra topografiske kart, "lesing av landskap og erfaring.

Hydraulisk splitting

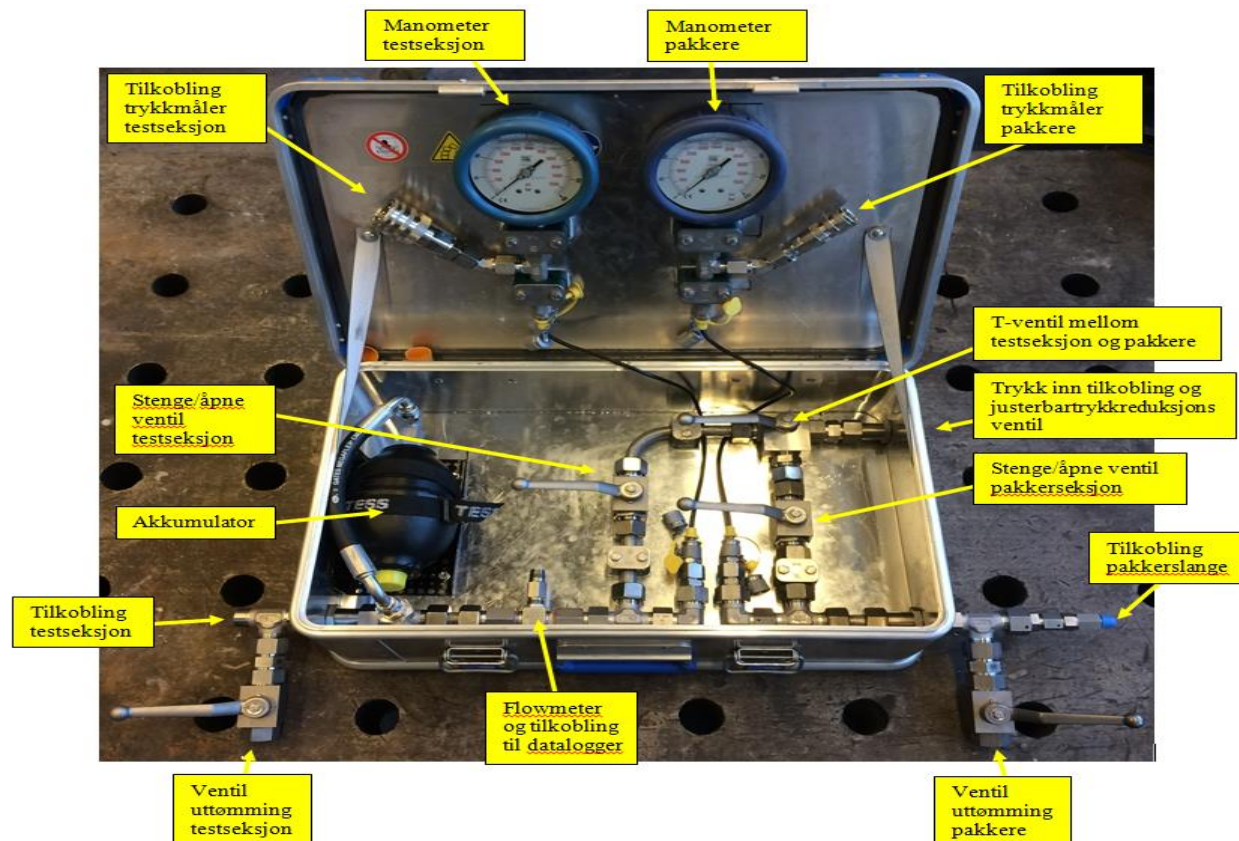


Hydraulisk splitting

Utstyr:

- Høytrykkspumpe 0-10 (ISRM) 0-25 (ASTM) l/min
- Dobbelpakkere (2-3 MPa overtrykk, vann)
- Den berømte kranekassen

Hydraulisk splitting



Hydraulisk Splitting

Utstyr:

- Trykksensorer, flowmeter, loggeprogram
- Innbygd trykksensorer ved dyp over 200m (har da vertikal dybde fra hvor trykkmåler står)

Hydraulisk Splitting

Testprosedyre:

- Trykksette testseksjon inntil splitt (trykkoppbygging ca. 1 min)
- Shut-in bør skje raskt etter splitt viss man vil vite om splitten skjer parallelt med hullet (sammenligning med 2.syk 3.syk), da kan man bruke minste hovedspenning til å beregne største spenning normalt på hullet.

Hydraulisk splitting

Testprosedyre

- Gjennåpning 2-3 ganger
 - Viktig med lang gjennåpning for å spre sprekken ut i formasjonen (min. 30 sek.) når man skal finne minste hovedspenning
- Lukketrykk (shut-in) måle 3-4 ganger
- Uttømming av testseksjonen mellom sykluser for å lukke sprekken totalt.
- Orientering av hovedspenninger normalt på borehullet
 - Under forutsetning at man vet om sprekken har vridd seg i formasjonen (forskjell på lukketrykk 1 og 2)
 - Minste = normalt på sprekk
 - Største = langs sprekk
 - Avtrykkspakker og orienteringsverktøy

Hydraulisk splitting

Tolkning:

- Mange metoder for å finne shut-in
- Skal man orientere og bestemme flere hovedspenningsretninger må man:
 - Ha kontroll på om sprekken har vridd seg i formasjonen
 - Bruke lukketrykk 1.syk for å ha en anelse om dette har skjedd
 - Standard formel (Kirch)
- Korrekt strekkfasthet for å kalkulere flere hovedspenninger
 - Fra lab (brazilianer)
 - Felt

Hydraulisk splitting

■ Beregning av bergspenning

■ Minste hovedspenning

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

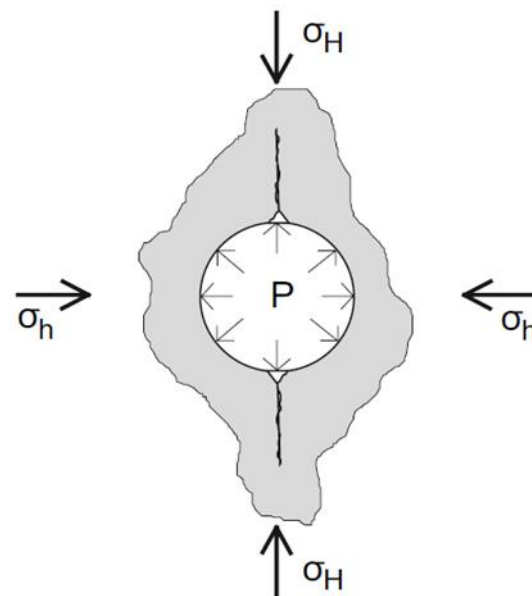
■ Største hovedspenning

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

■ Strekkstyrke av bergmasse

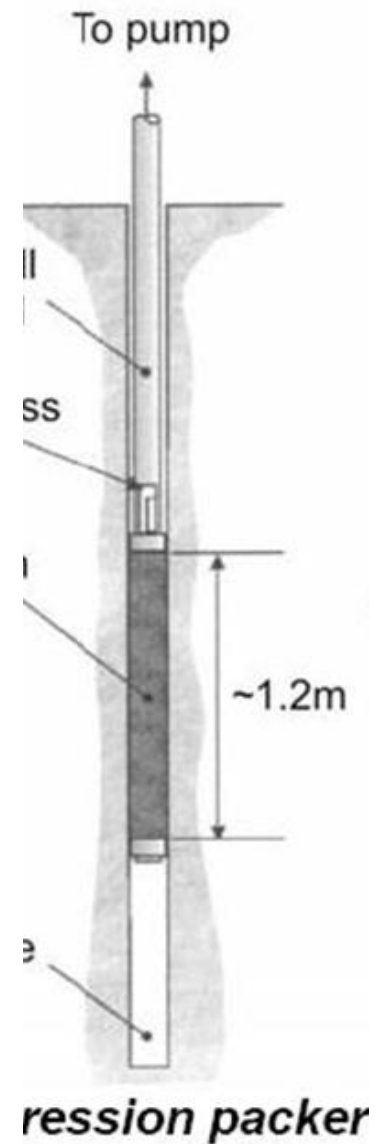
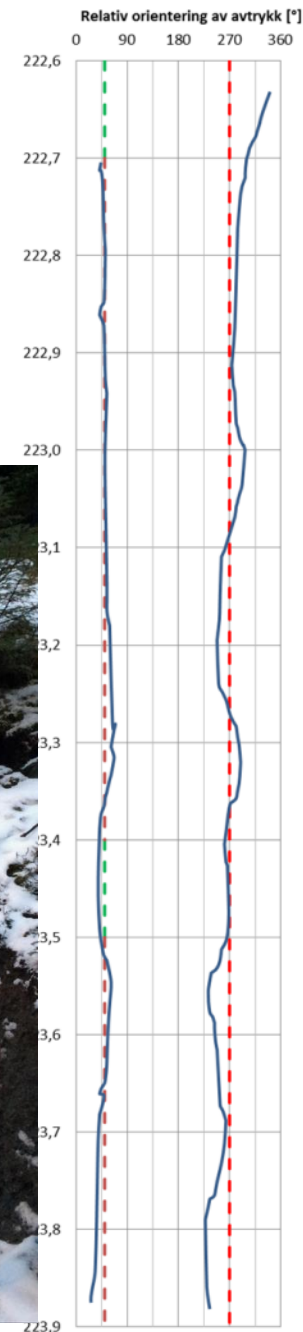
$$\text{Strekfasthet (T)} = \text{Splittetrykk (P}_b\text{)} - \text{Gjenåpningstrykk (P}_r\text{)}$$

evt. bestemt på kjerner fra tester i lab



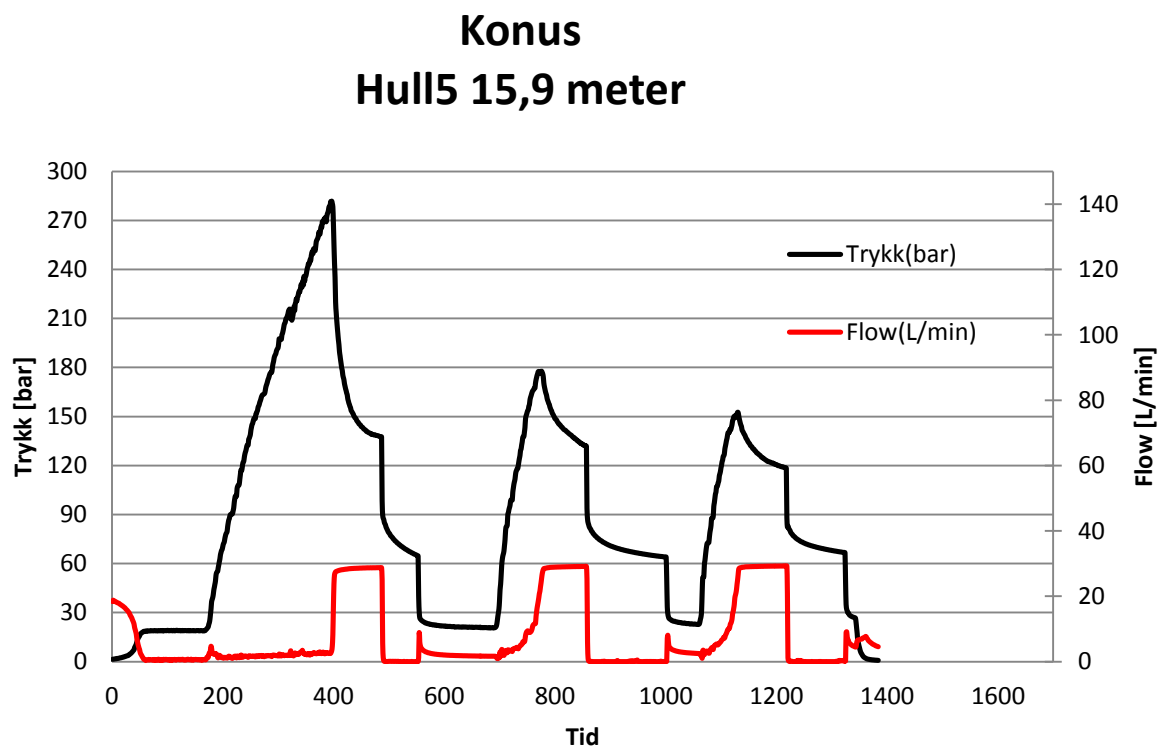
Hydraulisk splitting

- Sprekkeorientering med avtrykkspakker
- Gir retning på største hovedspenning
- Orienteringsverktøy med ligger



Plassering av konus ved kraftverk

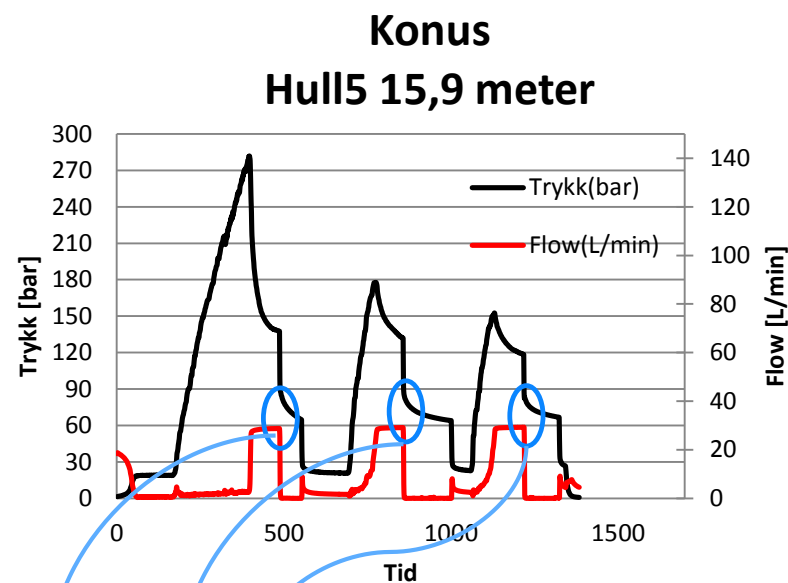
- Splittekurve som viser trykk og vannstrøm (flow) som funksjon av tid



Plassering av konus ved kraftverk

Splitterresultater fra konus

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



8,7	8,4	8,2	8,4	
9,3	9,3	9,2	9,3	8,6
11,0	10,4	10,4	10,6	14,9
10,2	9,7	9,7	9,9	15,2
9,6	9,5	9,3	9,5	14,6
10,2	10,1	10,0	10,1	18,2
10,4	9,9	9,8	10,0	14,0

Plassering av konus ved kraftverk

* In Situ Stress Measurement Report *

Client Name: LysebotnII Kraf Project Name: Implenia
Borehole Name: Lysb06 Project Number: 102010
Borehole orientation: Trend 360.0 Elevation angle 5.0
Overburden: 700.0 SF: 0.5

MEASUREMENT RESULT

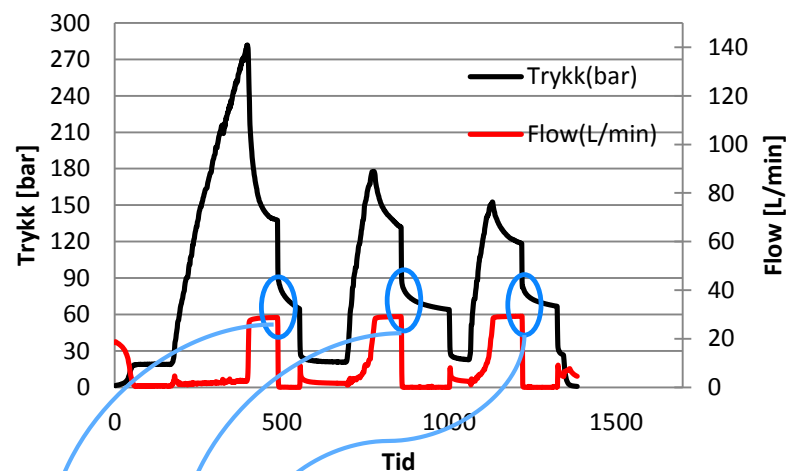
DEPTH (m)	3-D READINGS									2-D READINGS				E (GPa)	nu	rho (kg/m3)
	Theta=0			Theta=90			Theta=225									
	a	0	45	a	0	45	a	0	45	0	90	45	135			
12.5	355	373	636	295	574	663	186	155	118	0	0	0	0	54.5	0.27	2688
13.0	289	248	357	224	319	314	351	354	344	0	0	0	0	51.4	0.30	2688
14.5	271	332	559	272	524	488	401	524	219	0	0	0	0	49.0	0.32	2688
15.0	154	101	357	176	510	449	430	488	198	0	0	0	0	58.8	0.37	2688

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	13.69	74.7
MAXIMUM HORIZONTAL STRESS	23.10	164.7

GRAVITY STRESS		
VERTICAL STRESS:	18.44	HORIZONTAL STRESS: 8.48

Konus Hull5 15,9 meter



8,7	8,4	8,2	8,4	
9,3	9,3	9,2	9,3	8,6
11,0	10,4	10,4	10,6	14,9
10,2	9,7	9,7	9,9	15,2
9,6	9,5	9,3	9,5	14,6
10,2	10,1	10,0	10,1	18,2
10,4	9,9	9,8	10,0	14,0

Sammendrag spenningsmåling ved konus

- Minste hovedspenning (σ_3) fra 3D-overcoring er målt til 10,9MPa $\pm 1,5$ MPa, det vil si 9,4 MPa som laveste verdi. Bergspenningsmålingene med 3-dimensjonal overcoring anses som meget vellykkede.
- Gjennomsnittet av alle målte lukketrykk (σ_3) med hydraulisk splitting fra de vellykkede splittetestene er 12,5MPa $\pm 3,3$ som gir 9,2 MPa som laveste verdi.
- I målehull H5 er det laveste registrerte lukketrykket 8,2MPa ved huldyp 15,9 meter, mens gjennomsnittet av alle testseksjonene i målehull H5 er 9,4MPa. Standardavviket av alle målte testseksjonene i BH5 er $\pm 0,5$ MPa som gir minste hovedspenning (σ_3)= 8,9 MPa

Takk for oppmerksomheten

