

Bergspenningsmålinger i vannkraftprosjekter – 2 eksempler

NBG – Vårsleppet 2016
Freyr Palsson



Bergspenningsmålinger i vannkraftanlegg i berg, hvorfor?

- En viktig forutsetning for ufôrete trykksatte vanntunneler:
 - minste hovedbergspenning skal være høyere en vanntrykket i tunnelen for å hindre hydraulisk splitting av bergmassen, som kan føre til lekkasje fra tunnelen.
- I vannkraftanlegg er det mest kritiske punktet ofte i overgangen fra ufôret tunnel til fôret tunnel (konus)
- Kartlegging av bergspenninger ved måling viktig ved prosjektering av vannkraftanlegg i berg.

To case study: Eiriksdal og Torolmen

➤ Eiriksdal kraftverk

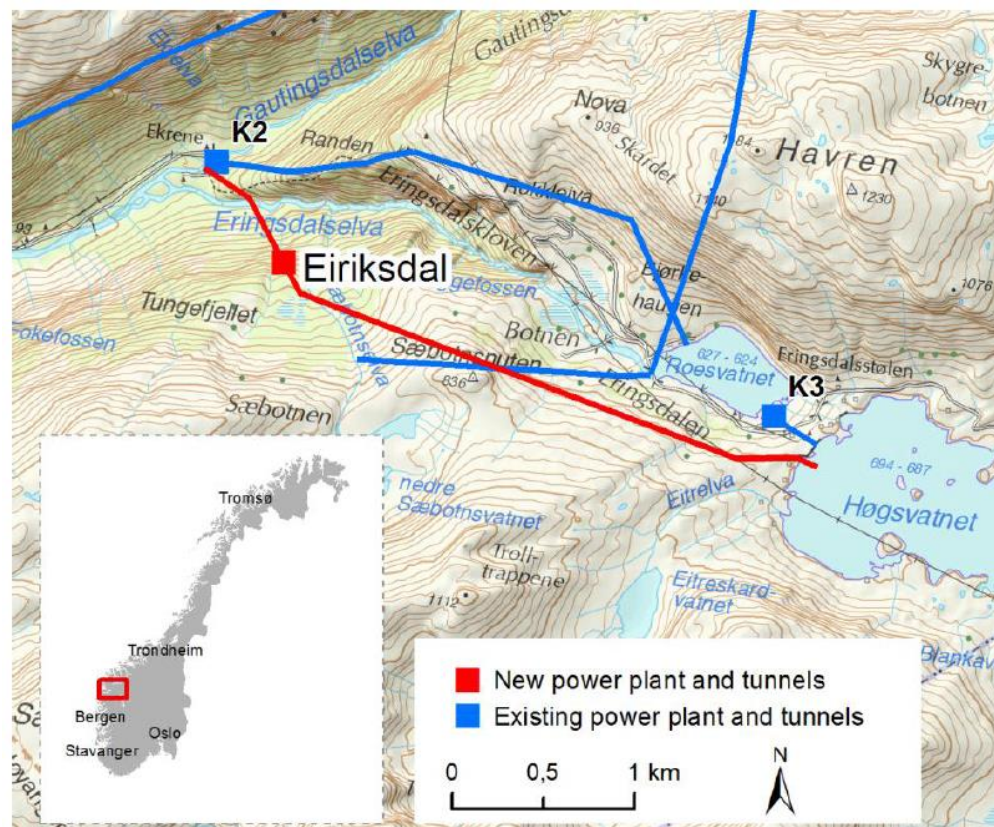
- Vannkraftanlegg ferdigstilt i 2014
- Tema: Bergspenningsmålinger utført under driving av anlegget
- Foredraget bygger til dels på artikkel: *Underground hydropower construction under high stress conditions – Case: Eiriksdal power plant, Høyanger, Norway*. Publisert i Publication 22, NFF. Forfattere: Johannes Hope, Arne Myrvang og Freyr Pálsson

➤ Torolmen kraftverk

- Lite vannkraftverk i konseptstudie fase
- Tema: Hydraulisk splitte målinger fra dagen for kartlegging av minste hovedspenning på konus nivå

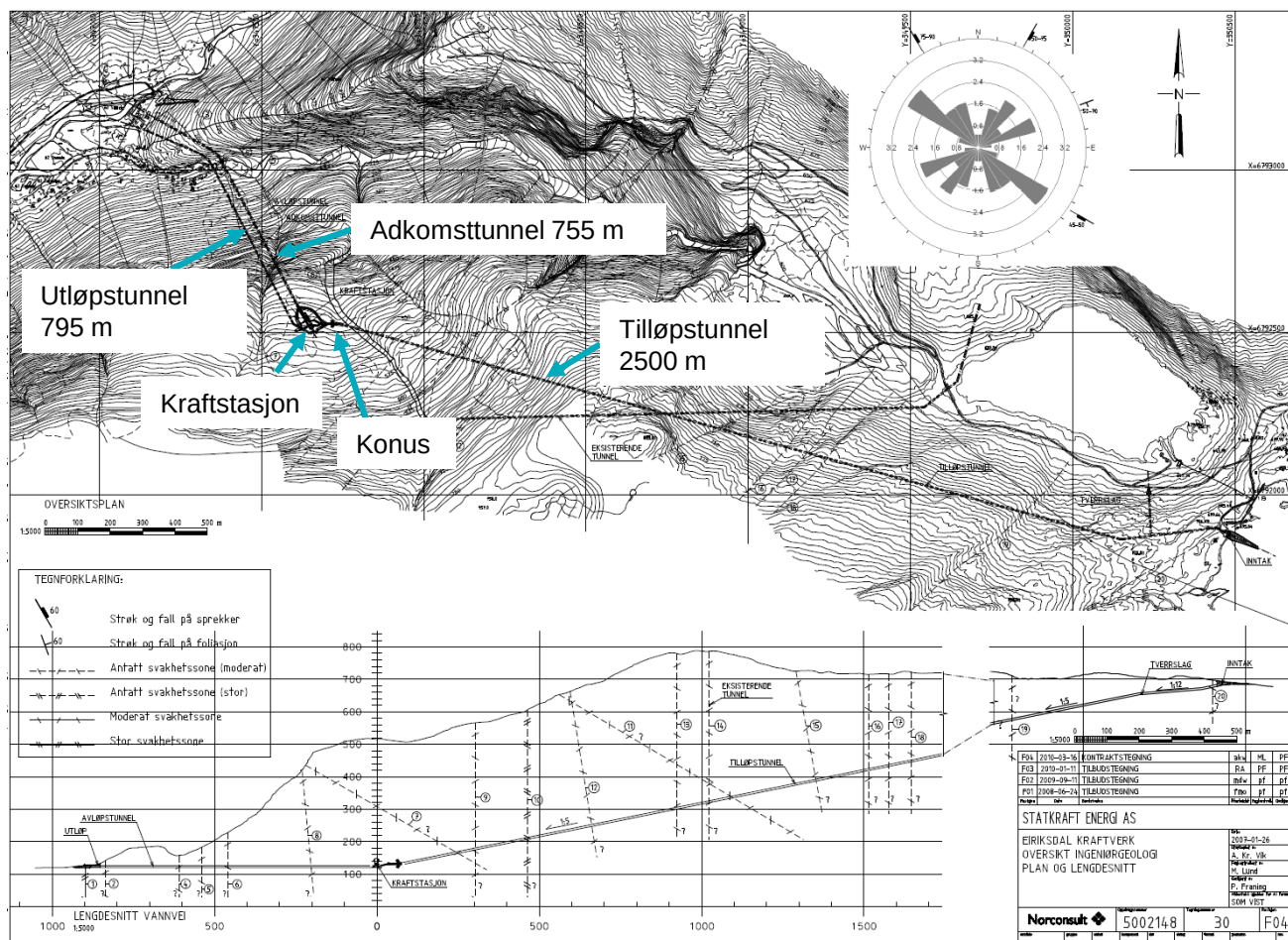
Eiriksdal kraftverk

- Byggherre: Statkraft Energi AS
- Rådgiver bygg og ingeniørgeologi: Norconsult AS
- Entreprenør bygg: Skanska
- Høyanger kommune
- Erstatte to eldre kraftverk K2 (1938) og K3 (1955) med kraftstasjoner og rørgate i dagen.
- Eiriksdal kraftverk: ufôret trykktunnel, kraftstasjon, utløpstunnel og adkomsttunnel i berg.
- Inntak ved Høgsvatnet
- Utnytter fallhøgde på ~ 570 m
- 80 MW, 320 GWh
- Byggestart i 2010
- Ferdigstilt i 2014



Eiriksdal kraftverk – grunnforhold og tunnelsystem ved anleggsstart

- Prekambrisk granitisk til dioritisk gneis.
- Plassert i område med høye tektoniske bergspenninger.

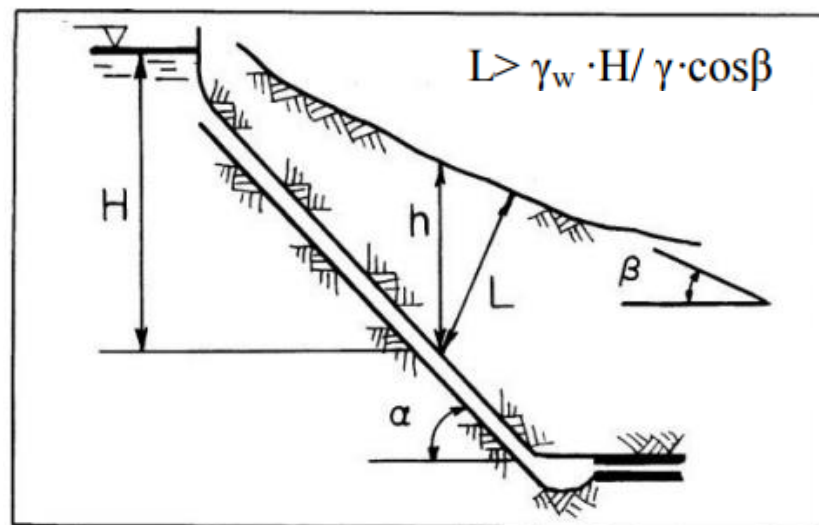


Eiriksdal kraftverk – design i prosjekteringsfasen

- I prosjekteringsfasen ble konus og kraftstasjon plassert etter vurdering av:
 - Topografi, geomorfologi og geologien
 - Erfaringer fra tunnelprosjekter i området (Høyangertunnelen, 1982).
 - Likevektsbetrakning: antatt minste bergspenning σ_3 ($L \cdot \gamma \cdot \cos(\beta)$) > vanntrykk ($H \cdot \gamma_w$) og skal tilfredsstille sikkerhetsfaktor på 1,2 (varierer fra oppdrag til oppdrag).

$$F = \frac{\sigma_3}{H \cdot \gamma_w} > 1,2$$

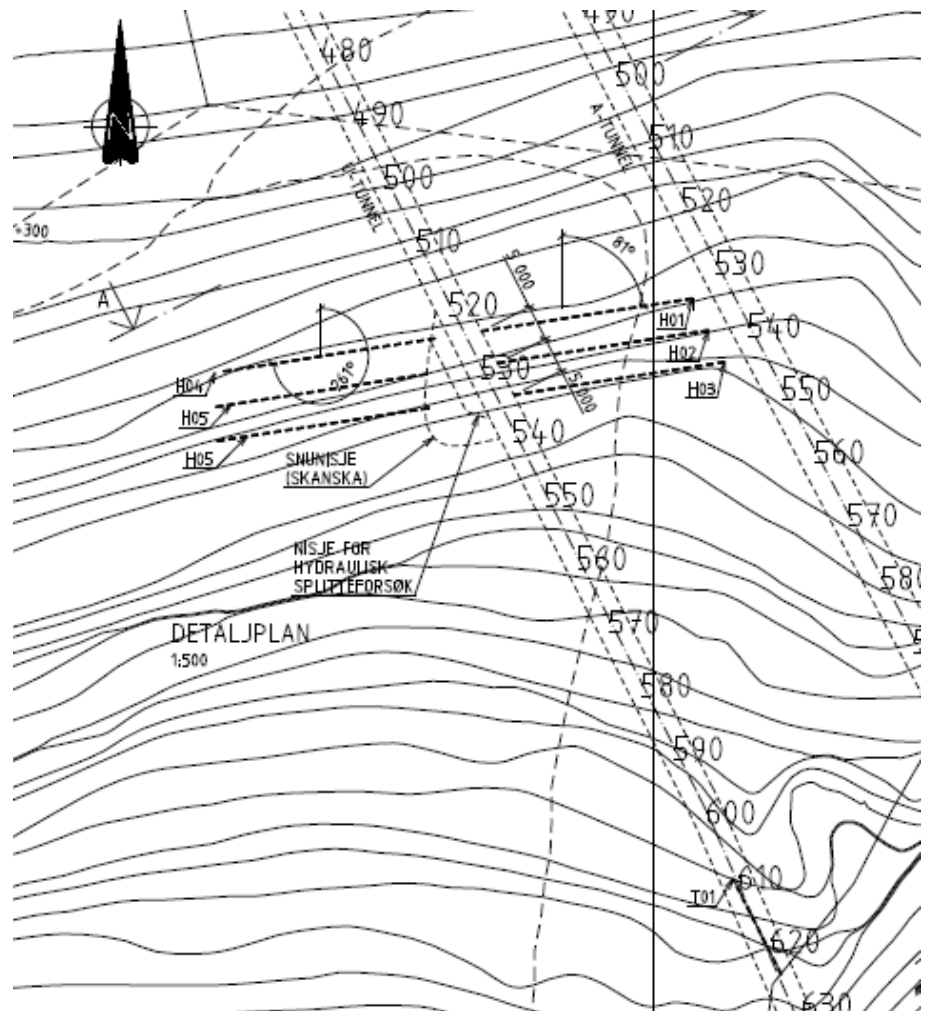
- Opplegg for bergspenningsmålinger under driving av utløpstunnelen.



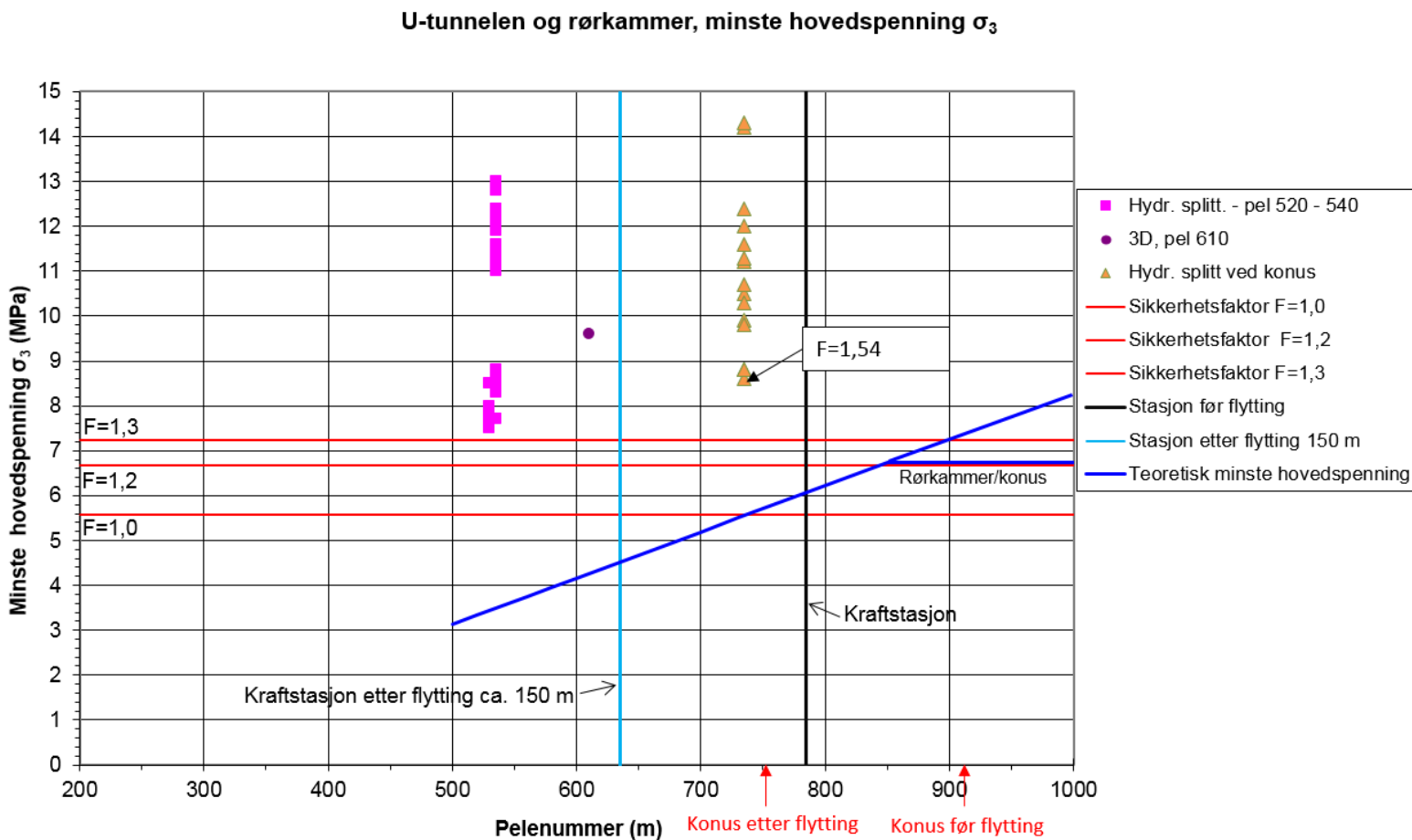
Kilde Broch, 1985, NFF Publ. no 3

Eiriksdal kraftverk – bergspenningsmålinger under driving av utløpstunnelen

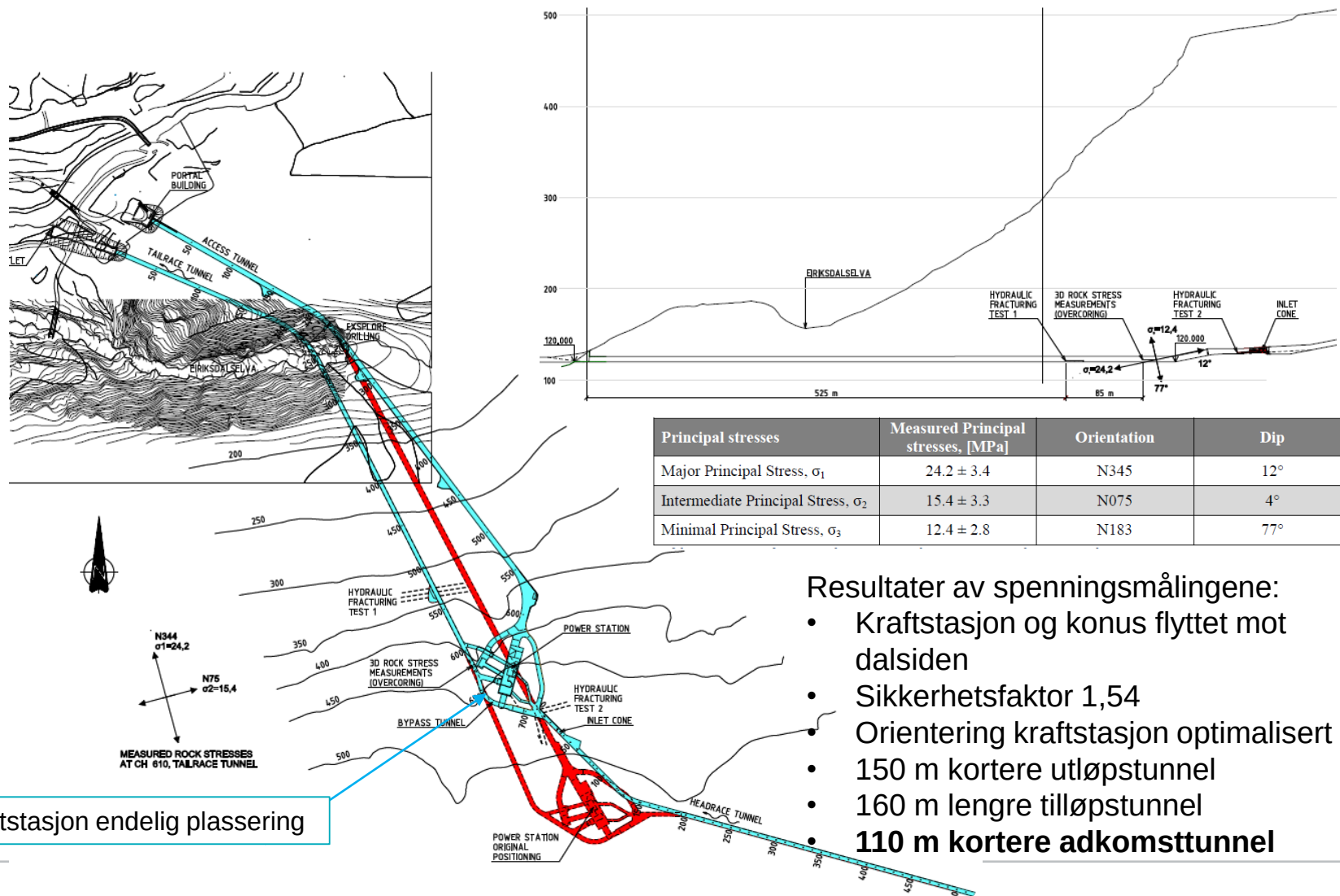
- Betydelig sprakefjell etter driving under Eiriksdalelva
- Planlagt første runde hydraulisk splitting og 3d bergspenningsmålinger i ca. pel 500 - 510
- Utført splittetester i pel 525 – 535 i 4 hull parallelt dalsiden.
- Utført 3d målinger i pel 610 fra stuff helgen etter.



Eiriksdal kraftverk – bergspenningsmålinger prognose og resultater



Eiriksdal kraftverk – bergspenningsmålinger resultater



Resultater av spenningsmålingene:

- Kraftstasjon og konus flyttet mot dalsiden
- Sikkerhetsfaktor 1,54
- Orientering kraftstasjon optimalisert
- 150 m kortere utløpstunnel
- 160 m lengre tilløpstunnel
- **110 m kortere adkomsttunnel**

Eiriksdal kraftverk – Oppsummering

- Hydraulisk splitteforsøk brukt til endelig plassering av konus
- Godt samsvar mellom hydraulisk splitteforsøk og 3d målinger
- 3d målinger bekreftet antatt minste hovedspenning normalt på dalsiden
- Resultater av bergspenningsmålingene ga grunnlag for flytting av kraftstasjon mot dagen.
 - Økonomisk gevinst i form av kortere adkomsttunnel
- 3d målinger:
 - Ga verdifulle parametere til optimalisering av kraftstasjonens orientering
 - Videre brukt ved numeriske analyser av kraftstasjonshallen og trafohallen

Eiriksdal kraftverk er et godt eksempel på viktigheten av:

- Godt planlagt opplegg for bergspenningsmålinger;
- Flexibilitet til optimalisering av design under driving av vannkraftverk i berg

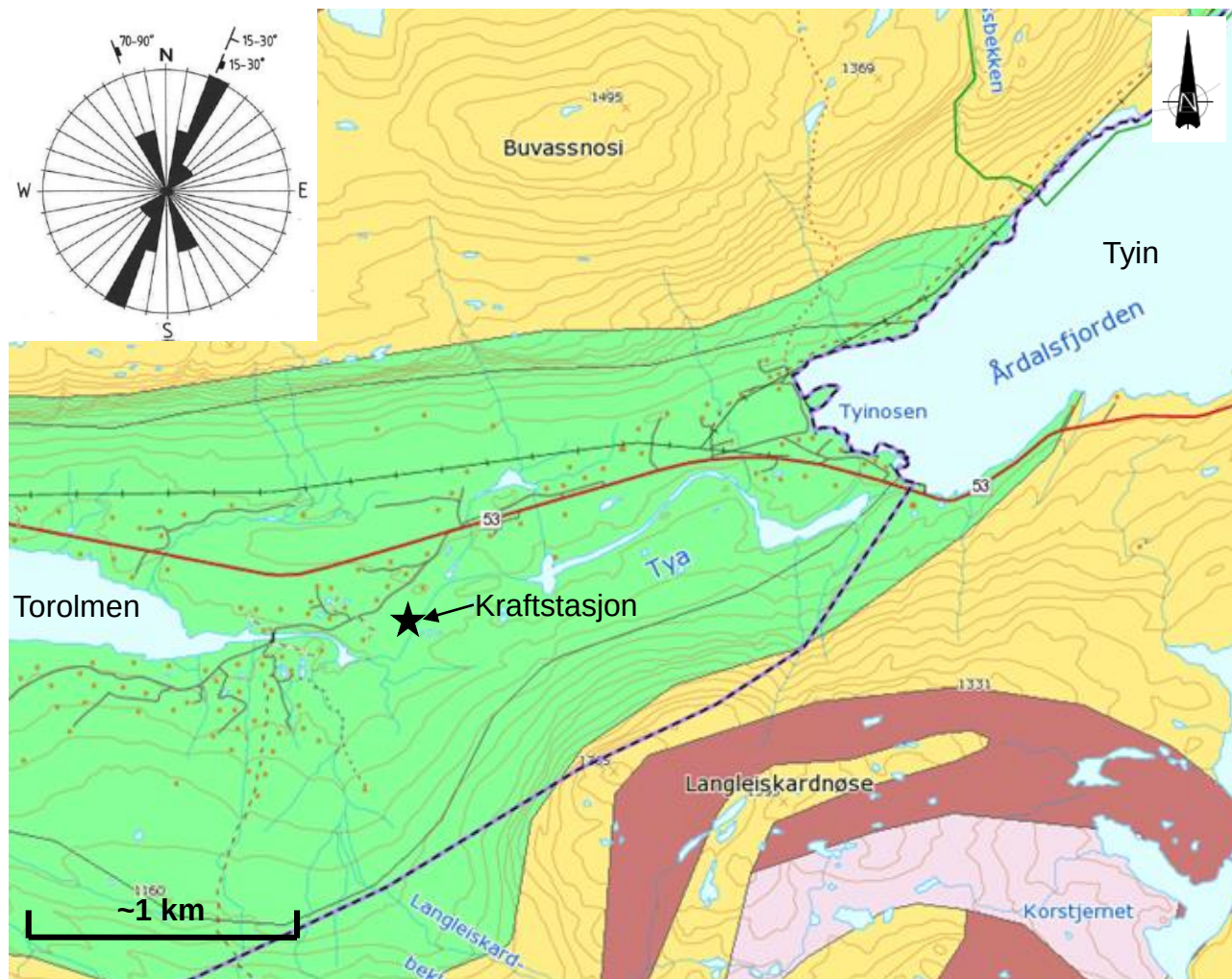
Torolmen kraftverk

- Byggherre: Hydro Energi As
- Konseptstudie fase
- Torolmen kraftverk planlagt plassert i tilknytning til eksisterende tappetunnel mellom magasinene Tyin og Torolmen for Nye Tyin kraftverk
- Nominell fall høyde ca. 25 m



Torolmen kraftverk – grunnforhold og vanntrykk

- Anlegg i fyllitt (Fortun-Vangdekket)
- Foliasjon strøk mot NNØ
- Fall 25-30° mot øst
- Kraftverket plassert i bred slak dal
- Sannsynligvis forholdsvis høye horisontale spenninger i dalføret
- Fallhøyde ved konus ca. 57 m
- 25% trykkstøt → vanntrykk på ca. 71 m
- Overdekning konus ca. 43 m



Torolmen kraftverk – vurderinger av bergspenninger

- Forutsetning: $\sigma_v = \sigma_3$
$$\frac{\sigma_3}{P} = \frac{1,16 \text{ MPa}}{0,7 \text{ MPa}} = \geq 1,5$$
- Fos mot hydraulisk splitting/jekking av bergmassen 1,5 ved trykkstøt (likevektsbetraktning)
- Tommelfingerregel i tidligfase: Bergoverdekning > 60% av max vanntrykk
→ Fos mot hydraulisk splitting i tunnelen 1,02 ved trykkstøt.
- flatt terreng → store konsekvenser for prosjektet hvis σ_3 er for liten
- Høyest aktuelt med spenningsmålinger i stasjonsområdet
- Utført hydrauliske splitte/jekke forsøk i 4 kjerneborhull fra dagen.



Torolmen kraftverk – resultater fra hydraulisk splitting/jekking

Dybde i hull	Teoretisk vertikal spenning (pgh) MPa
33	0,87
36	0,97
38,6	1,04
39	1,05
42	1,13
43	1,16
45	1,21
48	1,29
51	1,37

Hull 1			Hull 2		
Dybde	Splitt/ jekk	Resultat MPa	Dybde	Splitt/ jekk	Resultat MPa
31,8	s	3,4/3,0/3,0	32,5	j	1,9/1,9/1,8
35,8	s	4,0/3,8/3,7	35,6	j	1,1/1,2/1,2
38,8	s	3,6/3,5/3,4	38,6	j	1,0/1,0/1,0
41,8	s	3,2/3,0/3,1	45,6	s	2,7/2,6/2,4
44,8	j	3,0/2,8/2,8	48,9	s	2,7/2,3/2,3
47,8	s	3,3/3,3/3,2	51,9	s	2,7/2,6/2,3
Hull 3			Hull 4		
Dybde	Splitt/ jekk	Resultat MPa	Dybde	Splitt/ jekk	Resultat MPa
35,4	s	2,8/2,6/2,5	32,7	s	2,8/2,3/2,2
38,4	s	3,5/3,2/3,0	35,7	s	2,2/2,1/2,2
40,3	j?	2,0/1,8/1,8	38,7	s	2,1/2,1/2,0
43,3	s	2,7/2,7/2,7	41,7	s	3,6/3,2/3,1
46,3	s	2,6/2,6/2,6	44,7	j	2,8/2,8/2,8
47,9	j	1,8/1,9/1,9	47,7	s	3,3/3,2/3,0

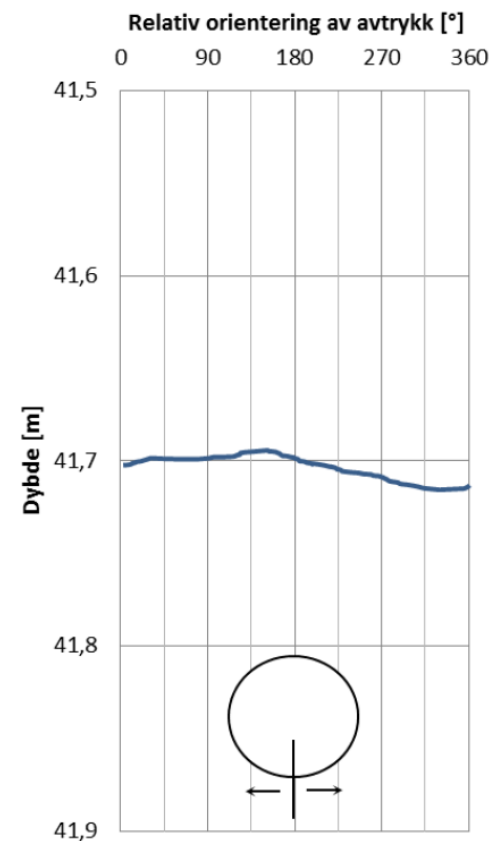
- Alle avtrykksmålinger (7 stk) viser sprekker etablert ved splitting og jekking tilnærmet horisontalt.
- Avtrykksmålingene bekreftet at det er de vertikale bergspenningene som er de laveste.
- Laveste spenningmålinger målt ved jekking av eksisterende sprekker
- Resultater gir sikkerhetsfaktor mot hydraulisk splitting i tunnel på 1,58 ved trykkstøt

Vannstand	Vannsøyle mVS	Vanntrykk MPa	Minste hoved- spenning, MPa	Sikkerhets- faktor
HRV	57	0,56	1,12	2,00
Trykkstøt	71	0,70	1,12	1,58

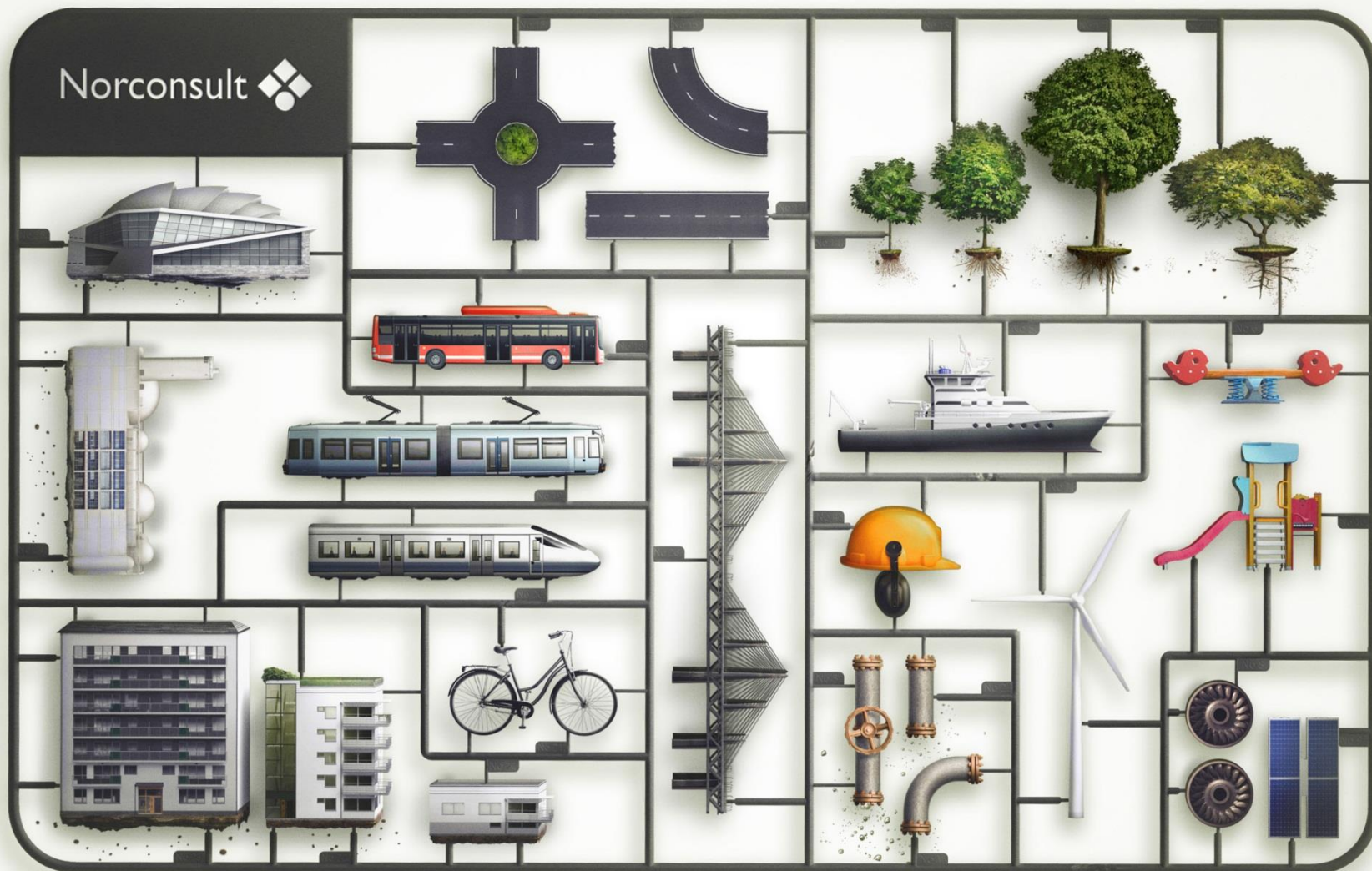
Torolmen kraftverk – oppsummering

- Teoretisk skal målehullene orienteres parallelt med σ_1 eller σ_2 (her horisontale hull) - det kravet ble ikke gjennomførbart å oppfylle
- Avtrykksmålingene viste åpning på horisontale sprekker som stemmer overens med det som var forventet: at $\sigma_v = \sigma_3$
- Flatt terreng → ikke mulig å flytte stasjonen/konus innover i berget.
- Resultater fra hydraulisk splitte målinger angir en tilfredsstillende sikkerhetsfaktor i kraftstasjonsområdet.
- Anisotropi: Bergets strekkfasthet lavest langs lagdelingen og høgst tvert på lagdelingen
 - Forhold som kan gi feil resultat av splittemålingene
- Det vil være viktig med spenningsmålinger i horisontale hull i byggefasen for å tilfredstille de teoretiske forutsetningene

4 BH04 vertikalt hull



-
- Spesielle takker til:
 - Statkraft Energi AS (v/Prosjektleder Johannes Hope)
 - Hydro Energi ASsom ga tillatelse til presentasjon av disse prosjektene.



Takk for meg!