

INTRODUKSJON AV ET FORSKNINGSPROSJEKT: NORSK IN-SITU ROCK STRESS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF HYDROELECTRIC POWER (NoRSTRESS)**Introduction of a research project: Norwegian in-situ Rock Stress for Sustainable Development of Hydroelectric Power (NoRSTRESS)**

Nghia Trinh, SINTEF AS
Helene Strømsvik, SINTEF AS

SAMMENDRAG

Norsk vannkraftteknologi har et verdensomspennende renommé som kostnadseffektiv, miljømessig bærekraftig og et anerkjent, velprøvd konsept. Noen særtrekk ved norske vannkraftanlegg er utslag under vann, uforede trykktunneler, luftputekamre, samt utbredt bruk av anlegg under jord. En viktig del av det norske konseptet er måling av in-situ bergspenninger. Ved minimal bruk av stålforing på trykksiden er det svært viktig at minste hovedspenning i bergmassen er tilstrekkelig høy for å ta bort risikoen for hydraulisk brudd i bergmassen i trykksatte deler av kraftverket. Forståelse og innhenting av nøyaktig informasjon om in-situ bergspenninger er av en avgjørende betydning for design av kraftverk. Til tross for omfattende undersøkelser og vurdering av bergspenninger har det likevel oppstått hydrauliske brudd i et fåtall vannkraftprosjekter i Norge. Disse hendelsene har forårsaket ulike typer skader på tunnelsystem og til dels alvorlige konsekvenser for omgivelsene.

For å bidra til en mer pålitelig måling av bergspenninger i vannkraftprosjekter, tar NoRSTRESS sikte på å:

- Forbedre kunnskapen om hvordan stedlige bergspenninger påvirkes av regionale spenninger og lokale variasjoner som geologi, topografi og tektonikk.
- Identifisere responsen i bergmassen ved spenningsrelatert instabilitet langs vannveissystemet som følge av hyppig og stor endring i vanntrykket inne i tunnelene.
- Forbedre og videreutvikle dagens metoder og prosedyrer for måling av bergspenninger.
- Etablere bergspenningsdatabase som grunnlag for evaluering av bergspenningssituasjonen i vannkraftprosjekter og andre tunnelprosjekter under planlegging, bygging og drift. Maskinlæringsprosesser kan utvikles og inkluderes for å etablere en intelligent database. En slik database kan også utvides og forbedres med fremtidige data.
- Utarbeide en veileder for måling av in-situ bergspenninger og gunstig design av i vannkraftverk med hensyn på spenningene.

SUMMARY

Norwegian HEP has a worldwide reputation for cost efficiency, environmental sustainability, and has a proven design and construction concept. Some special features of the Norwegian HEP are lake taps, unlined tunnels, air-cushion surge chambers, unlined pressure shafts, and underground powerhouses. An essential part of this design concept is the utilisation of in-situ rock stress measurements to prevent hydraulic jacking/fracturing situations in unlined tunnels. This method facilitates less need for steel lining. Thus, the understanding of rock stress and

precise and reliable measurement of in-situ rock stress is of crucial importance. Despite of comprehensive investigations and evaluations of in-situ rock stress, hydraulic failures have happened in Norwegian HEP projects, which have caused different levels of damage to the tunnels systems, and some severe consequences for the surroundings.

To contribute to a more reliable estimation of the rock stress for HEP projects, NoRSTRESS aims for:

- Improve the knowledge on in-situ rock stress as a regional stress (deep stress), and as local stress variations (shallow stress) due to local geological, topographical, and geo-tectonic features.
- Identify the behaviour of the rock mass on stress related instability along the waterway system under the condition of frequent load/unload scenarios.
- Improve and further develop in-situ measurement of in-situ rock stress.
- Establish rock stress database for the successful evaluation of in-situ rock stress in HEP and other rock engineering projects during planning, construction, and operation. Machine learning process can be included to form an "intelligent database" that can be extended & improved with future data.

INTRODUKSJON

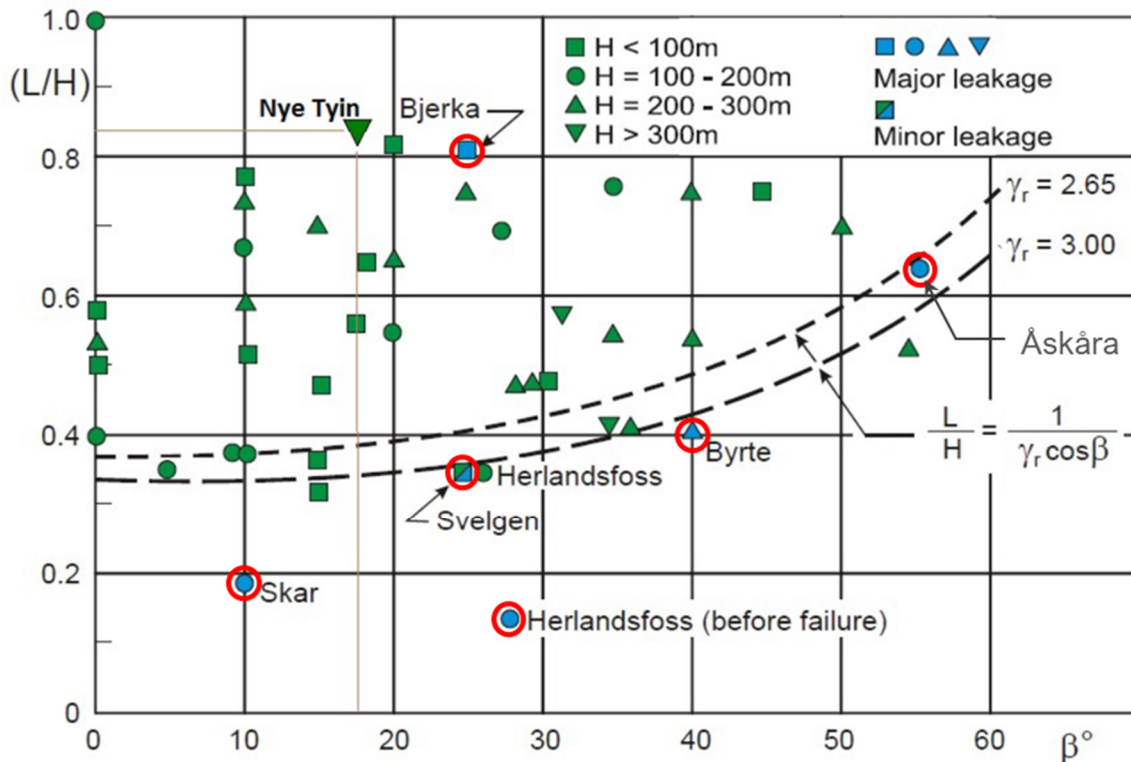
Norge er på 6. plass på verdensbasis innen produksjon av energi fra vannkraft og er anerkjent for et rent energikonsept, bestående av over 1500 kraftverk, med en installert kapasitet på ca. 31 000 MW og en gjennomsnittlig årlig produksjon på ca. 130-140 TWh, i de siste 10-20 årene (Statista, 2022). Norske vannkraftverk er basert på høyt fall, begrenset vannstrøm og mer eller mindre kontinuerlig produksjon (Grøv et al, 2011). Vannkraft er ryggraden til kraftproduksjonen i Norge (Energimeldingen 012/16) og står for ca. 90% av kraftproduksjonen i Norge, per 2021 (Energifaktanorge, 2021). Den norske vannkraftbransjen har utviklet flere innovative løsninger, som luftputekammer, utslag under vann, uforede tunneler og sjakter (Broch, 2013) og kraftstasjoner i fjell. Ca. 5000 km med tunneler har blitt drevet og nesten en tredjedel av verdens kraftstasjoner under fjell befinner seg i Norge. Norsk vannkraft kan med rette kalles en undergrunnsindustri.

Norsk vannkraftteknologi har et verdensomspennende renommé som kostnadseffektiv, miljømessig bærekraftig og er et anerkjent konsept. Dette gjelder spesielt når de kommer til uforede/sprøytebetongforede trykktunneler og uforede luftputekammer. Estimer viser at over 95% av de vannførende tunnelene i norske vannkraftverk er uforede (Panthi, 2014; Johansen, 1984). En essensiell del av dette konseptet er kunnskapen om in-situ bergspenninger. Erfaringer ervervet gjennom utvikling av norske vannkraftprosjekter har vist at in-situ bergspenninger som ikke store nok til å balansere vanntrykket i en uforet trykktunnel/sjakt, medfører risiko for hydraulisk jekking av eksisterende sprekker, eller hydraulisk brudd av bergmassen. Hydraulisk jekking betyr åpning av eksisterende sprekker i bergmassen, som er det mest vanlige hendelsesforløpet, mens brudd/splitt betyr dannelse av nye sprekker som opptrer sjeldent. Uansett årsak, begge bruddtypene medfører en situasjon med vesentlig vanntap fra trykktunnelene. Dette kan medføre alvorlige konsekvenser for både kraftverket og omliggende områder. Stålforing er et sikkert alternativ for å unngå slike situasjoner, men svært dyrt og noe man søker å redusere så mye som mulig.

Ved det norske konseptet for vannkraftverk utnyttes kunnskapen om de stedlige bergspenningene for å utforme underjordsanlegget på en slik måte at bruken av stålforing på tilløpssiden kan minimeres. Flere publikasjoner har påpekt at grundig kunnskap om stedlige bergspenninger er en nøkkelfaktor for utformingen av uforede tunneler og sjakter, noe som gir betydelig reduksjon i kostnader og byggetid (Nilsen og Thidemann, 1993; Nilsen og

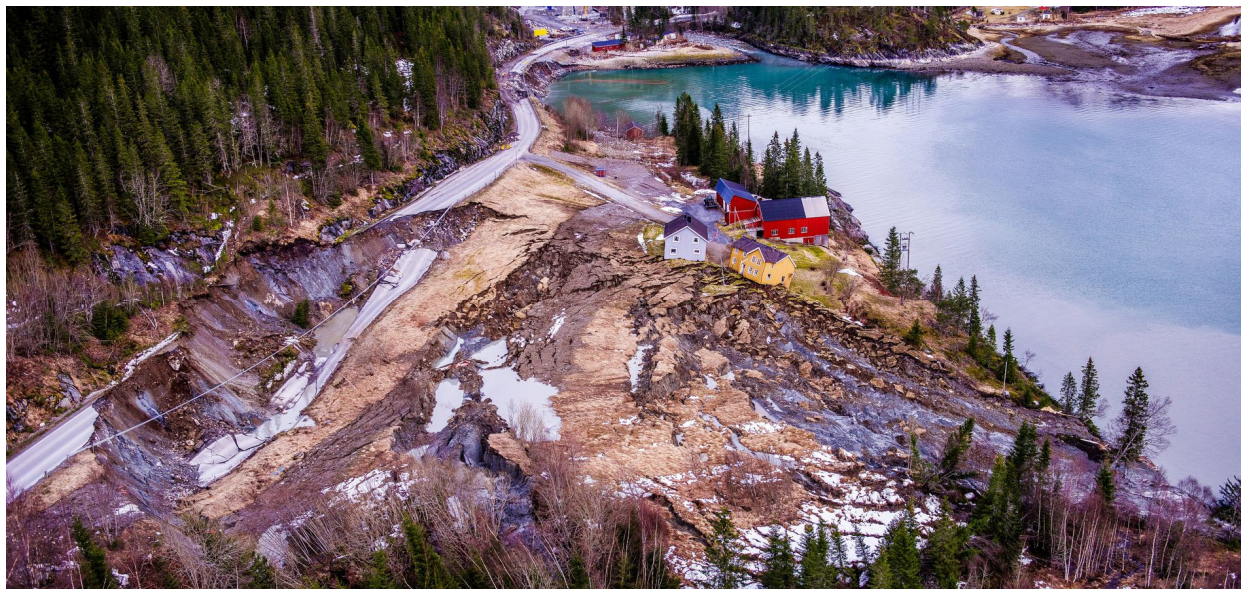
Palmstrøm, 2000; Ødegaard og Nilsen, 2018). Dette har ført til at det norske designkonseptet for vannkraftanlegg har blitt benyttet internasjonalt med suksess. Eksempler på dette er vannkraftverk i Colombia (Broch, 1984, og Broch et al., 1987), Tanzania (Marwa, 2004), Chile (Palmstrom og Broch, 2017), Portugal (Lamas et al., 2014 og Esteves et al., 2017), China (Liu, 2013), Nepal (Basnet og Panthi, 2018b; Panthi og Basnet, 2017; Panthi, 2015), og Vietnam (Trinh og Grøv, 2013).

Tadesse og Grøv (2014) mener at vannkraftverk kan utformes enda mer optimalt og bli mer effektivt enn i dagens praksis og at det i mange tilfeller benyttes et konservativt design i forhold bergmassens kapasitet. På den annen side har det oppstått hydraulisk brudd i et fåtall norske vannkraftverk, til tross for grundige undersøkelser og vurderinger av stedlige bergspenninger i forkant, se Figur 1. Basnet og Panthi (2018), beskriver tilfeller med hydraulisk brudd i vannkraftverkene Herlandsfoss, Skar, Byrte, Askara, Bjerka, og Fossmark. Hendelsene har gitt forskjellige konsekvenser for kraftverkene med ulik alvorlighetsgrad, fra store lekkasjer, alvorlig splitting og jekking av sprekker bergmassen, til indirekte tegn på jekking som merkbare lyder/støy fra bergmassen under vannfyllingsprosedyren.



Figur 1, oversikt over vannkraftverk der det har oppstått lekkasjer på grunn av hydraulisk brudd i bergmassen (Broch, 1982).

I tillegg til de overnevnte tilfellene, var det en relativt nylig hendelse ved vannkraftverket Bjørnstokk, der det hydrauliske bruddet førte til en stor vannlekkasje som videre førte til et 180 000 m³ stort skred over fylkesvei 76, som ble stengt i tre og et halvt år (Nordland Fylkeskommune, 2018; Nordal et al., 2018). Et oversiktsbilde av skredet er vist i Figur 2.



Figur 2, oversiktsfoto over skredet som ble utløst av vannlekkasjen ved Bjørnstokk vannkraftverk (Brønnøysunds Avis, 2022)

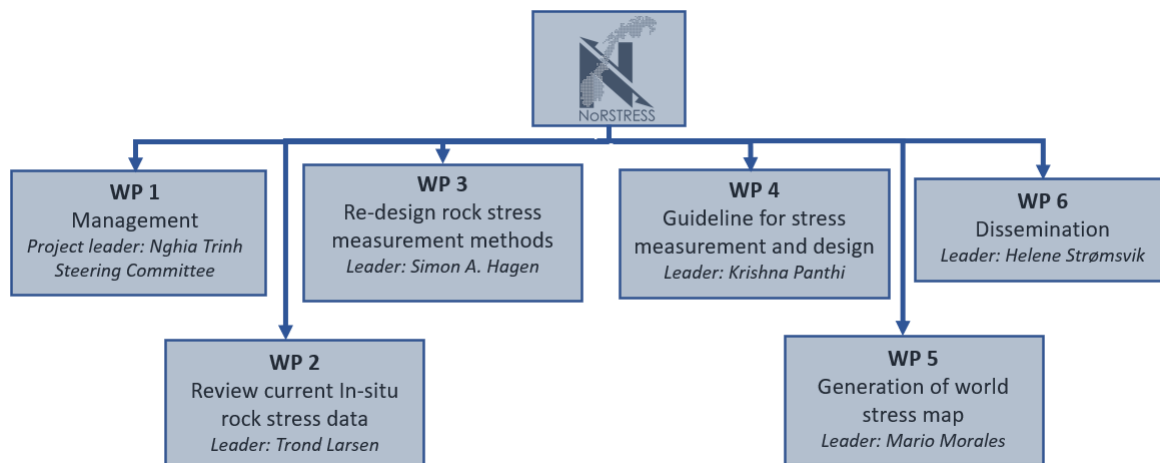
En kjent internasjonal hendelse var ved Glendoe-prosjektet i Skotland (Hencher, 2019), som kollapset etter hydraulisk brudd i bergmassen. I tillegg til dette har det også vært mindre hendelser internasjonalt med vannlekkasjer fra uforede trykktunneler, som har medført at man i enkelte miljøer sår tvil til om den norske løsningen for utforming av vannkraftverk.

Dette viser at kunnskap og metoder for å bestemme stedlige bergspenninger må forbedres betydelig for å trygt kunne bygge vannkraftverk med optimal utforming og minimal bruk av stålforing. Forskningsprosjektet NoRSTRESS sikter på å bidra til å dekke dette behovet.

OM NoRSTRESS-PROSJEKTET

NoRSTRESS er et kompetanseprosjekt for næringslivet (KPN), støttet av Forskningsrådet (prosjektnr. 320654). Budsjettet er på 17,5 mNOK, der 20% av budsjettet er bidrag fra de industrielle partnerne; Hafslund E-CO Energi AS, Hydro Energi AS, Sira-Kvina kraftselskap DA, Skagerak Kraft AS, Statkraft AS. Forskningspartnerne er SINTEF og NTNU. Prosjektet pågår i perioden fra 2021 til 2024.

Arbeidet i prosjektet er delt inn i seks arbeidspakker (WP) som jobber mer eller mindre parallelt gjennom prosjektet varighet, disse er skissert i Figur 3.



Figur 3, oversikt over arbeidspakker og ledelse for NoRSTRESS.

Her følger en kort beskrivelse av arbeidspakkene som er knyttet til den faglige delene av prosjektet:

WP2 – Review current in-situ rock stress data:

Innsamling av in-situ målinger av bergspenninger med tilhørende data om geologi, topografi og hvilken i fase av prosjektet målingene ble utført (forundersøkelser, under bygging, eller etter driftsstart). Det vil utføres analyser for å avdekke mulige korrelasjoner mellom bergspenninger og geologiske eller topografiske forhold

WP3 – Redesign rock stress measurement methods:

Grundig vurdering av dagens eksisterende metoder for måling av bergspenninger, med spesielt fokus på hydraulisk splitting for å beregne minste hovedspenning i bergmassen. Denne vurderingen vil inkludere; (i) metoder, anvendelsesområde og feilmarginer (ii) vurdering av behov ved ulike stadier av planleggingen (forundersøkelser eller under driving), og (iii) vurdering av behov og bruk av topografisk informasjon ved utførelse og evaluering av bergspenningsmålinger. I denne arbeidspakken er det også et mål om å utvikle en ny metode for estimering av minste hovedspenning, eller å forbedre eksisterende metoder for å øke påliteligheten og effektiviteten av målingene.

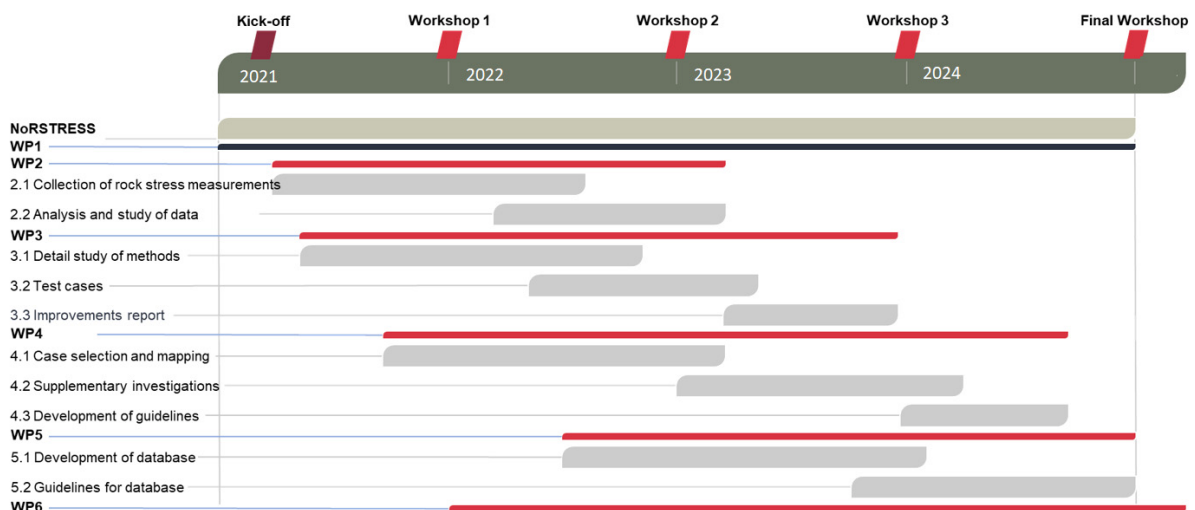
WP4 – Prepare guideline for stress measurements and design:

Vurdering av hendelser der det har oppstått hydraulisk brudd i eksisterende norske vannkraftverk. Internasjonale prosjekter vil også vurderes for å identifisere likheter og forskjeller. En omfattende analyse vil utføres for å forstå de stedlige bergspenningsforholdene ved de ulike hendelsene. En systematisk modell for evaluering bergspenninger vil benyttes, som stegvis evaluerer in-situ spenningstilstand. Denne inkluderer geologi, tektonikk, bergspenningsmålinger og analyse av bergspenningene i en 3D-modell ved numerisk analyse. Det vil utføres både 2D- og 3D-analyser ved bruk av programvarer som RS2, FLAC 2D/3D og UDEC.

WP5 – Generation of World Stress Map:

En database bergspenningsmålinger i Norge vil bygges, basert på data fra de andre arbeidspakkene i NoRSTRESS. I dette arbeidet vil veiledningen fra GFZ (Deutsche GeoForschungs Zentrum), for å gjøre databasen kompatibel med World Stress Map (WSM) og Qualitative World Stress Map (Q-WSM), som igjen bidrar til prosjektet "Fennoscandian Rock Stress Data Base". Hensikten med denne databasen er å tilby et bedre verktøy for tidlig vurdering av bergspenninger og planlegging av utførelsen av bergspenningsmålinger for vannkraftverk.

NoRSTRESS starter i 2021 og vil være ferdig i slutten av 2024. Tidsplanen for de ulike aktivitetene er vist i Figur

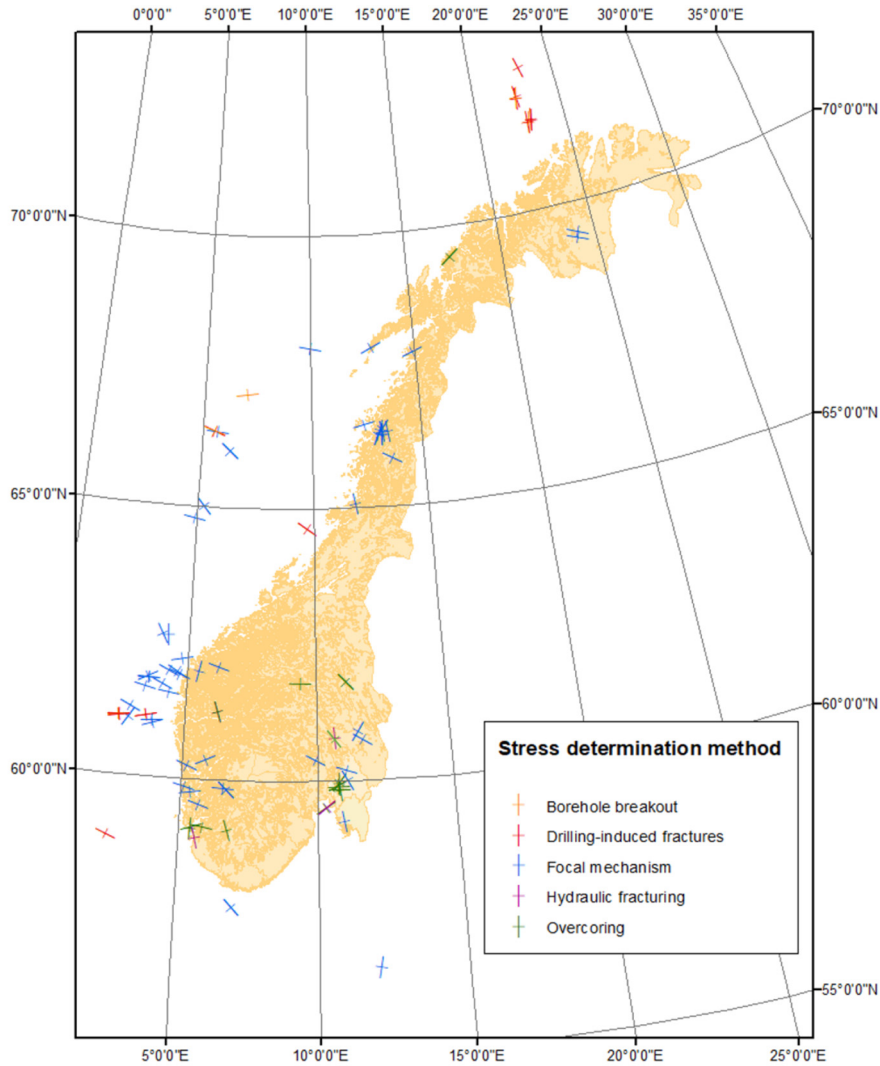


Figur 4, tidsplan for de ulike aktivitetene i NoRSTRESS.

FORSKNINGSLEVERANSE

Følgende resultater og leveranser er forventet og planlagt gjennom NoRSTRESS:

1. Oppgradering av databasen World Stress Map (WSM): det vil utføres en omfattende studie ved å utvikle og benytte en storskala/regional numerisk modell. Modellen vil inkludere den midtatlantiske ryggen i Norskehavet for å undersøke opprinnelsen og bakgrunnen for de generelt høye horisontalspenningene i Norges berggrunn. Dette vil bli en svært stor modell på flere tusen kilometer i utbredelse og flere hundre kilometer i dybde, der regionale strukturer inkluderes. Den geometriske oppløsningen vil optimaliseres for best mulig resultat. Det vil også benyttes data fra andre kilder, som WSM, jordskjelvmekanismer og oljeindustrien. Gjennom analyser vil orientering av maksimum horisontalspenninger bli beregnet og WSM-databasen ved GFZ (Deutsche GeoForschungs Zentrum) vil oppdateres for Scandinavia, denne ble senest oppdatert i 1986. NoRSTRESS vil ha tett kommunikasjon med GFZ om utveksling av spenningsdata og forskningsresultater, inkludert de seneste arbeidene til GFZ, som er Q-WSM (the Quantitative WSM database). Q-WSM er av spesiell interesse i et ingeniørgeologisk perspektiv og lokale bergspenningsforhold (grunne bergspenninger) studert i NoRSTRESS kan gi et bidrag til Q-WSM og samtidig vil NoRSTRESS dra nytte av Q-WSM.
2. En database for bergspenninger, tilrettelagt for bruk ved planlegging av norske vannkraft- og infrastrukturprosjekter: ved innsamling av tidligere bergspenningsmålinger og analyser av disse, vil det utvikles en database for bergspenninger. Det vil også legges til rette for at nye data skal kunne tilføres databasen i etterkant. Det vil utarbeides detaljerte retningslinjer av hvordan databasen bør og bør ikke brukes. Et eksempel på hvordan en slik database kan systematiseres tidligere blitt publisert i en MSc-oppgave (Simonsen, 2018), eksempel fra denne oppgaven er vist i Figur 5.
3. En manual for beste praksis: manualen vil gi en veiledning til beste praksis for undersøkelse av bergspenninger ved forundersøkelser og utførelse ved etablering av vannkraftanlegg. Manualen vil komplementere forskningsresultater fra FME HydroCEN.
4. Designmetode for uforede trykktunneler og bergrom: basert på ny kunnskap og kompetanse, vil det utvikles en ny designmetode for uforede trykktunneler. Ny kunnskap om bergspenninger opparbeidet gjennom NoRSTRESS kan brukes til å evaluere forskjellige ingeniørgeologiske problemstillinger relatert til bergspenninger, som for eksempel spenningsindusert ustabilitet gjennom hyppige sykluser med belastning og av belastning fra store endringer i vanntrykket. Et tett samarbeid med FME HydroCEN er nødvendig for å komplementere forskningen som utføres her.



Figur 5, visualisering av bergspenningsmålinger utført ved ulike målemetoder (Simonsen, 2018)

OPPSUMMERING

Forskningsprosjektet NoRSTRESS har som overordnet mål å forbedre kunnskapen om stedlige bergspenninger for å tilrettelegge for miljømessig bærekraftig utvikling av vannkraft. Forskning på både dype og grunne bergspenninger, inkludert effekten av geologiske og topografiske forhold, kan bidra til en bedre forståelse av lokale bergspenninger samt målingen av disse. Resultatene fra NoRSTRESS vil komme alle involverte prosjektpartnerne i et vannkraftprosjekt, som investorer, byggherre, entreprenør og konsulenter til hjelp. NoRSTRESS vil jobbe for å utvide verktøykassen for forundersøkelser og bergspenningsmålinger slik at både metode og kvalitet bedres. Resultatene vil også kunne komme til nytte i andre infrastrukturprosjekter der undergrunnen benyttes.

ANERKJENNELSE

Denne artikkelen er en del av forskningsprosjektet NoRSTRESS, et Innovasjonsprosjekt for Næringslivet (IPN), finansiert av Norges forskningsråd (Project number: 320654), samt industripartnerne Hafslund E-CO Energi AS, Hydro Energi AS, Sira-Kvina kraftselskap DA, Skagerak Kraft AS og Statkraft AS. SINTEF og NTNU er FoU-partnere.

KILDER

Basnet C. B. and Panthi K. K. 2018b: Roughness evaluation in shotcrete-lined water tunnels with invert concrete based on cases from Nepal. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Vol. 10, pp. 42-59.

Basnet C. B. and Panthi K. K., 2018: Analysis of unlined pressure shafts and tunnels of selected Norwegian hydropower projects. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Vol. 10, pp 486-512.

Broch E, Eslava LF, Marulanda A., 1987: Design of high pressure tunnels for the Guavio Hydroelectric Project, Colombia. In: Proceedings of the international conference on underground hydropower plants, p. 87-99.

Broch E., 1982: "The development of unlined pressure shafts and tunnels in Norway". Proceedings of the ISRM international symposium. ISRM; 1982. p. 545-54.

Broch E., 1984: Unlined high pressure tunnels in areas of complex topography. International Water Power and Dam Construction. Vol. 36(11), pp.21-23.

Broch E., 2013: Underground hydropower projects - lessons learned in home country and from projects abroad. Norwegian Tunneling Society. p. 11-19.

Brønnøysunds Avis, 2022: <https://www.banett.no/nyheter/i/zgvaOr/fem-ar-siden-raset-hadde-vi-ikke-blitt-inviteret-pa-lunsj-sa-hadde-dette-vaert-en-helt-annen-hendelse> (accessed on 30/9/2022).

Energifaktanorge, 2021: Hydropower in Norway. <https://energifaktanorge.no/en/norsk-energiforsyning/kraftproduksjon/> (accessed on 31/10/2022).

Energimeldingen 012/16 Vannkraften er ryggraden i norsk energiforsyning. Accessed on <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/energimeldingen-vannkraften-er-ryggraden-i-norsk-energiforsyning/id2484259/>.

Esteves C, Plasencia N, Pinto P, Marques T., 2017: First filling of hydraulic tunnels of Venda Nova III hydropower scheme. In: Proceedings of the world tunnel congress.

Hencher S.R., 2019: The Glendoe Tunnel Collapse in Scotland. Rock Mech. and Rock Eng. Vol 52, pp. 4033–4055.

Grøv E., Bruland A., Nilsen B., Panthi K., Lu M., 2011: CEDREN report: "Developing future 20 000 MW hydro electric power in Norway", SINTEF report.

Johansen T., 1984: Norwegian tunneling. Oslo, Norway: FHS.

Lamas LN, Leitao NS, Esteves C, Plasencia N., 2014: First infilling of the Venda Nova II unlined high-pressure tunnel: observed behaviour and numerical modelling. Rock Mechanics and Rock Engineering. Vol.47(3), pp.885-904.

Liu K., 2013: Stress calculation of unlined pressure tunnel surrounding rock in hydraulic engineering. In: Instrumentation and measurement, sensor network and automation (IMSNA). Institute of Electrical and Electronics Engineers. pp. 57-60.

Marwa EM., 2004: *Geotechnical considerations in an unlined high pressure tunnel at Lower Kihansi in Tanzania. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Vol. 63(1), pp:51-55.*

Nilsen B & Palmstrøm A (2000): *Engineering Geology and Rock Engineering. Norwegian Group of Rock Mechanics, Handbook No. 2, 249 p.*

Nilsen B & Thidemann A (1993): *Rock Engineering. Hydropower Development, Vol. No. 9, NTH Division of Hydraulic Engineering, 156 p.*

Nordal, S., Grøv, E., Emdal, A., L'Heureux, J. (2018) " Skredene i Tosbotn, Nordland, 1. og 2. april 2016". Accessed on: https://www.nfk.no/_f/p34/i7e686f6b-c4ef-4f78-832b-5aea0ce744c8/tosbotn-rapport_15-mai-2018.pdf/

Ødegaard H & Nilsen B (2018): *Engineering Geological Investigation and Design of Transition Zones in Unlined Pressure Tunnels. 10th Asian Rock Mechanics Symposium, Singapore November 2018, 10 p.*

Palmstrom A. and Broch E., 2017: "The design of unlined hydropower tunnels and shafts: 100 years of Norwegian experience". *International journal on hydropower and dams. vol. 3.*
 Panthi K. K., 2014: *Norwegian design principle for high pressure tunnels and shafts: its applicability in the Himalaya. Journal of Water, Energy and Environment 2014, Vol.14, pp.36-40.*

Panthi K. K., 2015. *Himalayan rock mass and possibility of limiting concrete lined pressure tunnel length in hydropower projects in the Himalaya. Geosystem Engineering, vol. 18 (1), pp. 45-50.*

Panthi K. K. and Basnet C. B., 2018: *State-of-the-art design guidelines in the use of unlined pressure tunnels / shafts for hydropower scheme. Proceeding of the 10th Asian Rock Mechanics Symposium and the ISRM International Symposium held in Singapore for the period 29 Oct - 3 Nov 2018, pp. 1-13. ISBN 978-981-11-9003-2.*

Panthi KK, Basnet CB., 2017: *Design review of the headrace system for the Upper Tamakoshi project, Nepal. International Journal on Hydropower and Dams. Vol.1, pp. 60-67.*
 Regjeringen (2015) *Facts – Energy and water resources in Norway. Accessed in: https://www.regjeringen.no/contentassets/fd89d9e2c39a4ac2b9c9a95bf156089a/facts_2015_energy_and_water_web.pdf*

Simonsen L.L. Aurora, 2018: *"Updated Norwegian In-situ Rock Stress Database", Master thesis at Norwegian University of Science and Technology, Department of Geoscience and Petroleum.*

Statista, 2022: " *Hydropower production in Norway 2008-2020*", published by Bruna Alves , Mar 16, 2022. Available at <https://www.statista.com/statistics/1024893/electricity-production-from-hydro-power-in-norway/> (accessed on 31/10/2022).

Tadesse B.D. & Grøv E., 2014: *Pressure design in unlined tunnels and shafts. Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life. Foz do Iguaçu, Brazil.*

Trinh Q.N., Grøv E., 2013: *Norwegian hydropower technology applied in Vietnam. Norwegian Tunneling Society. p. 111-115.*