

**FME HydroCen – NORSK STORSATSNING PÅ VANNKRAFT****FME HydroCen – New Norwegian research initiative on Hydropower**

Hege Brende, Senterleder i HydroCen, NTNU

Leif Lia, Professor, Institutt for bygg og miljøteknikk (IBM), NTNU

Bjørn Nilsen, Professor, Institutt for geovitenskap og petroleum (IGP), NTNU

**SAMMENDRAG**

Artikkelen beskriver aktiviteter og planer for Forskningsprogrammet HydroCen (Norwegian Research Centre for Hydropower Technology), som ble etablert ved NTNU i januar 2017 som et av åtte nye Forskningscentre for Miljøvennlig Energi (FME). HydroCen representerer en tverrfaglig satsning med deltakelse fra flere NTNU-institutter, SINTEF, NINA og alle de største vannkraftaktørene i Norge. Forskningsprogrammet har et årlig budsjett på ca. 50 mill. NOK, og finansieres med 50% fra NFR, 25% fra bransjen og 25% fra forskningspartnerne (egenbidrag). Det er allerede igangsatt og planlagt over 30 PhD og Post doc. i senteret, og ytterligere 15 er pågående i assosierte prosjekter. HydroCen omfatter fire faglige tema: 1) Vannkraftkonstruksjoner, 2) Turbin og generator, 3) Marked og tjenester og 4) Miljødesign. Det gis her en oversikt over aktivitetene i HydroCen, med spesiell vekt på prosjektene som er igangsatt innenfor tunneler og andre deler av vannveien for vannkraftanlegg.

**SUMMARY**

This paper describes activities and plans related to HydroCen (Norwegian Research Centre for Hydropower Technology), which in January 2017 was established at NTNU as one of the eight new Centers for Environment-friendly Energy Research (FME). HydroCen is a multidisciplinary research initiative with participation by several NTNU Departments, SINTEF, NINA and the major Norwegian hydropower companies. The research program has an annual budget of about 50 MNOK and is financed 50% by NFR (Norwegian Research Council), 25% by industry partners and 25% by the research partners (in-kind). More than 30 PhDs and Post Docs are already affiliated with HydroCen, and 15 with associated projects. HydroCen includes four research topics; 1) Hydropower structures, 2) Turbine and generators, 3) Market and services and 4) Environmental design. This paper gives an overview of the HydroCen research activities, with main focus on research connected to hydropower tunnels.

**INNLEDNING**

Vannkraftutbygging representerer på mange måter utgangspunktet for den store aktiviteten innenfor tunneldriving og fjellsprenning i Norge. Mange av de imponerende prosjektene som er bygd i berg de senere år, som olje- og gasslagre og store fjellhaller – med Gjøvikhallen som det mest ekstreme – hadde neppe vært mulig uten kunnskapen fra vannkraftutbyggingen. Da

aktiviteten innenfor vannkraftutbygging var på det høyeste på 1970- og første del av 1980-tallet ble mer enn 3 mill. m<sup>3</sup> utsprengt årlig under jord. Selv om aktiviteten senere har avtatt – ikke minst etter statsminister Stoltenbergs nyttårstale i 2001 som fastslo at tiden for de store vannkraftutbygginger var over - er det fortsatt, som NFF Tunnelstatistikk også viser, betydelig aktivitet knyttet til vannkraftutbygging (ca. 0,8 mill. m<sup>3</sup> utsprengt under jord i 2017).

Norge har i dag rundt 300 kraftstasjoner i berg, og rundt 3500 km vannkrafttunneler, og er med sin årlige produksjon på rundt 140 TWh en stormakt når det gjelder vannkraft (verdens 6. største produsent). De senere år har mye av aktiviteten vært knyttet til oppgradering av eksisterende kraftverk som Lysebotn II på 370 MW (satt i drift i 2018) og til bygging av nye småkraftverk. Det bygges samtidig også en del nye store prosjekt som Rosten kraftverk, 80 MW (satt i drift i 2018) og Leikanger kraftverk, 77 MW (under bygging).

Oppgradering og ombygging av eldre norske vannkraftverk kan gi betydelig økning av effekt og produksjon og med dette tilrettelegge for mer fleksibel drift. Det kan i så fall legges til rette for nye måter å kjøre vannkraftanlegg på; såkalt «effektkjøring». Slik kjøring medfører hyppige av- og påslag og økte påkjenninger på vannveier – herunder også for stabilitetsforhold og bergsikring. I tillegg har det de senere år vært økt fokus på etablering av balansekraft i form av pumpekraft, og forskning og utredninger for etablering av norsk vannkraft som «Europas grønne batteri» er blitt gjennomført. En slik omlegging vil medføre nye tekniske behov i vannkraftanleggene.

Dette er noe av bakgrunnen for at HydroCen (Norwegian Research Centre for Hydropower Technology) i 2016/17 ble etablert som et av åtte nye norske Forskningsssentre for Miljøvennlig Energi (FME). Organiseringen av senteret, visjonene og oversikt over det faglige innholdet (arbeidspakker og prosjekter) vil bli kort beskrevet i det følgende, med hovedvekt på aktiviteten innenfor den delen av prosjektet som er viktigst for Fjellsprengere; Tunnelsystemer.

## **ORGANISERING OG DELTAKERE**

HydroCen er ett av Forskningsssentrene for miljøvennlig energi. Dette er en konsentrert og langsiktig satsing innenfor forskning på fornybar energi, energieffektivisering, CO<sub>2</sub>-håndtering og samfunnsvitenskap. Forskingen skal skje i tett samarbeid mellom forskningsmiljø, næringsliv og forvaltning.

NTNU er vertsinstitusjon og hovedforskningspartner i HydroCen sammen med SINTEF Energi og Norsk institutt for naturforskning (NINA). Arbeidspakke WP1 Vannkraft-konstruksjoner ledes av Professor Leif Lia, mens prosjektet WP1.1 Tunnelsystemer ledes av Professor Bjørn Nilsen. HydroCen har mer enn 40 nasjonale og internasjonale partnere innen forskning, industri og forvaltning.

HydroCen arbeider som det framgår av Fig. 1 tett sammen med vannkraftsektoren for å levere nye løsninger, kunnskap og kompetanse. Produksjonsselskaper, leverandører, konsulenter og myndigheter engasjerer seg aktivt i senteret for å sikre høy relevans for næringsliv og samfunn, bidra til implementering av resultater og utvikling av nye innovasjoner.



Fig.1. Oversikt over forsknings- og brukerpartnere i HydroCen.

Kombinasjonen av sterke og tverrfaglige kompetansemiljø, tilgjengelig laboratorieinfrastruktur og erfarne industriaktører som bidrar med konkrete prosjekt, data og problemstillinger, gir en unik plattform for å utvikle og posisjonere norsk vannkraft inn i fremtidens fornybare energisystem. Fremtidens energisystem vil bestå av både nye og velkjente produksjonsformer, men trolig i en helt annen sammensetning enn det vi ser i dag.

## TVERRFAGLIG FORSKNINGSAKTIVITET

HydroCen skal gjennom sin forskningsinnsats bidra til å styrke Norges posisjon som en ledende vannkraftnasjon og sikre at norsk vannkraftsektor kan utnytte mulighetene i fremtidens fornybare energisystem.

HydroCen har definert fire forskningsområder:

- Vannkraftkonstruksjoner
- Turbin og generator
- Marked og tjenester
- Miljødesign

Med mer enn 110 års sammenhengende drift og utvikling av vannkraftsystemet er Norge i en unik posisjon for videre vekst i sektoren. Både i Europa og på verdensbasis øker uregulerbar kraftproduksjon fra vind og sol dramatisk, og markedets krav til fleksibilitet og dynamikk, slik som muligheter for lagring og rask respons, er i rask utvikling. Her har norsk vannkraft potensiale til å levere en kombinasjon av effekt, energi, lagring, tilgjengelighet og stabilitet som foreløpig ingen andre fornybare energikilder er i stand til.

Klimaendringer er en pådriver for store endringer innen energibruk, -lagring og teknologiutvikling. Energisystemene og energimarkedene endrer seg drastisk og en rekke miljømessige og samfunnsøkonomiske hensyn bidrar til at vannkraftindustrien er sterkt regulert. Videre vil fremtidig tilgang til vannressurser kunne ha store implikasjoner for produksjon av vannkraft. I tillegg står vi overfor utstrakt revisjon av norske vannkraftkonsepsjoner og implementering av EUs vanndirektiv. Innføring av vanndirektivet gir mange usikkerheter for sektoren og det er et stort behov for løsninger som optimaliserer avveiningene mellom produksjon, markedsmuligheter og miljømessige konsekvenser. I den

sammenhengen er en helhetlig tilnærming viktig, med tverrfaglig samarbeid mellom områder som teknologi, marked og miljø.

HydroCen nøkkeltall for forskning:

- Varighet på åtte år og totalt budsjett på 400 mill. kr.
- 17 nystartede prosjekt.
- 30 PhD og Post doc. i senteret, og ytterligere 15 pågående i assosierte prosjekt.
- Mer enn 30 pågående assosierte prosjekt relatert til vannkraft gjennom programmer som ENERGIX og Horizon2020 (EU), med et samlet budsjett på >300 mill. kr.
- 47 pågående masteroppgaver (2018).

## PROSJEKT I ARBEIDSPAKKE WP1.1 TUNNELSYSTEMER

De aller fleste vannkrafttunnelene her i landet er bygd og har vært i drift lenge uten problemer i form av større ras eller lekkasje (jekking/splitting). Det finnes imidlertid også eksempel på at det har skjedd utrasning og utlekkasje med store konsekvenser for drift og økonomi.

Ras har i enkelte tilfeller skjedd under driving av tunnelen, men i de fleste av tilfellene har raset skjedd etter oppfylling av vannveien, vanligvis mellom ½ og 2 år etter vannfylling, men i noen tilfeller også etter lang tids drift av kraftverket (opptil 20-30 år etter oppstart, som i eksempelet vist i Fig. 2). Dessverre ser vi at dette også skjer i nye kraftverk, noe som viser at det fortsatt finnes et forskningsbehov.



*Fig. 2. Ras tilløpstunnel ved Kvanngabotn kraftverk etter mer enn 20 års drift.*

Ingeniørgeologimiljøet ved NTNU har lenge vært involvert i undersøkelser, oppfølging og forskning knyttet til stabilitet og ras i tunneler, inklusive vanntunneler. Denne aktiviteten følges i dag opp gjennom instituttets deltakelse i HydroCen.

Betydningen av forskning på denne problemstillingen kan illustreres av følgende tall fra tidligere studier:

- Bruland & Thidemann (1991) fant på grunnlag av inspeksjon av 45 vanntunneler at det i snitt hadde skjedd 1 utfall/ras per 5,5 km tunnel, med i middel 20 % innsnevring av vannveien som resultat. Totalt antall blokkeringsras ved denne undersøkelsen ble oppgitt til sju.
- Aagaard (2005) beskrev i foredrag på Bergmekanikkdagen 2005 seks nye blokkeringsras. Kostnaden for utbedring av de forskjellige rasene ble oppgitt å ha vært mellom 4 og 50 mill. kr.

Av eksempel på ras i vanntunneler av nyere dato, er de følgende to fra 2017 blant de mest kjente:

- Matre Haugsdal, hvor et ras på 20-30 m<sup>3</sup> i tilløpstunnelen høsten 2017 (Fig. 3), etter bare ½ års drift, førte til at det måtte drives ny tverrslagtunnel inn til driftstunnelen og lages omløpstunnel forbi rasstedet. Reparasjonskostnadene beløp seg ifølge Teknisk Ukeblad (2017) til 40 mill. kr.
- Nedre Vinstra kraftverk, hvor et ras i 2015 medførte nær full blokkering i en av de to tilløpstunnelene. Omfattende oppryddingsarbeid, med fjerning av 2500 m<sup>3</sup> rasmasser og driving av bypass-tunnel forbi rasstedet ble utført i 2016-17. Raset ga ifølge Byggeindustrien (2017) et estimert årlig energitap på 15 GWh.



*Fig. 3. Ras med innpressing av sikringsbuer i veggene i tilløpstunnel ved Matre Haugsdal.*

Erfaringene har vist at de fleste rashendelser i vanntunneler i Norge er knyttet til svakhetssoner/forkastninger som inneholder svelleleire (montmorillonitt). Dette var tilfelle for Matre Haugsdal, og sannsynligvis også for Nedre Vinstra, hvor det er rapportert at raset hadde sammenheng med en kryssende svakhetsone. Med hensyn til stabilitetsforhold er den alvorligste konsekvensen av svelleleire at den ekspanderer ved vannopptak og gir et stort trykk mot sikringskonstruksjoner, som vil kunne klappe sammen hvis de ikke er riktig designet og dimensjonert. Tunnelen vil i mange tilfeller være stabil under driving, før vannfylling, men når tunnelen fylles med vann vil forholdene endres, og stabilitetsproblemer og ras kan i noen tilfeller inntreffe selv der hvor det under driving var vurdert at stabiliteten

var under kontroll. Det var sannsynligvis dette som skjedde ved Matre Haugsdal, hvor prøvetaking og testing av leirmateriale fra svakhetssonen etter tømning klart har vist at en her hadde å gjøre med meget aktiv svelleleire (svelletrykk for finstoff fra svakhetssonen på 0,7 MPa, eller 70 tonn/m<sup>2</sup>), se Fig. 4. Dette illustrerer at slanke sikrings-konstruksjoner som sprøytebetongbuer har sine begrensninger i brede soner med aktiv svelleleire, og at det må stilles strenge krav til design og utførelse dersom denne typen sikring skal kunne vurderes som et alternativ til full utstøpning.

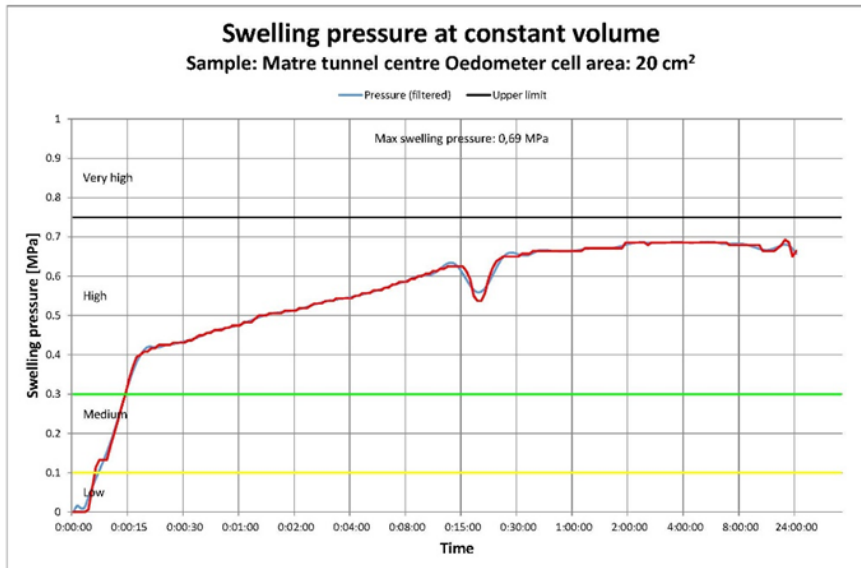


Fig. 4. Svelletrykk for sleppemateriale fra Matre Haugsdal målt i ødometer ved Ingeniørgeologisk laboratorium, NTNU.

Ras av den typen som er beskrevet ovenfor skjer selvfølgelig ikke bare i Norge. Det finnes mange eksempler på ras i vanntunneler forårsaket av svellende mineraler som smekttitt og montmorillonitt også fra andre land. I andre geologiske formasjoner, og spesielt i områder med yngre sedimentære og vulkanske bergarter, er imidlertid erfaringen at problemene like ofte skyldes svellende bergarter (skiferbergarter, vulkansk tuff m.v.) som svellende leirmineraler i svakhetssoner. Denne problemstillingen er vel kjent bl.a. fra Chile, hvor også norske vannkraftutbyggere har møtt store utfordringer på grunn av dette.

Et sentralt spørsmål i denne sammenhengen er hvorfor stabilitetsproblemer og ras knyttet til svakhetssoner og svelleleire fortsatt kan skje, når problemstillingen tross alt er godt kjent? Mye av svaret antas å ligge i følgende punkter:

- Sikringstiltakene er prosjektert med mangelfull informasjon og/eller har fått et uheldig design. Hovedårsaken vurderes å være at forundersøkelsene har vært mangelfulle og/eller for dårlige.
- Utfordringene med hensyn til stabilitet er ikke observert og/eller ikke forstått, og lite eller ingen sikring utført i partier med tvilsom stabilitet. Dette vurderes i stor grad å skyldes at oppfølgingen under bygging har vært for dårlig.



- Utfordringen er undervurdert slik at det er utført mangelfull/for dårlig sikring. Mange tilfeller av stabilitetsproblemer og ras har skjedd i partier som har vært sikret med sprøytebetong, som har sine begrensninger i soner/partier med svelleleire.
- Kvaliteten og/eller bestandigheten av bergsikringen har vært for dårlig. Spesielt ras som skjer etter lang tids drift, som f.eks. Kvænangsbotn-eksemplet i Fig. 2, kan skyldes dette forhold.

Kompetansen som er nødvendig for å unngå stabilitetsproblemer og ras i vanntunneler, er i stor grad til stede, men hendelsene beskrevet ovenfor, kombinert med nye problemstillinger knyttet til bestandighet, effektkjøring og «uvante geologiske forhold» (som svellende berg), indikerer at det nok er behov for mer kunnskap og økt fokus på dette området. Med utgangspunkt i dette er det innenfor den delen av HydroCen-arbeidspakke 1 som omhandler tunnelsystemer (WP1.1), ved IGP igangsatt 2 PhD-prosjekt som er fokusert på stabilitetsforhold, og med hovedfokus mot henholdsvis:

PhD 1) Stabilitet og sikringsproblematikk relatert til svellende bergmasse (Lena Selen)

PhD 2) Konsekvenser av effektkjøring for stabilitetsforhold langs vannveien (Bibek Neupane)

Forutsetningen for at vannveien med trykktunnel og -sjakt skal kunne fungere som forutsatt, uten ukontrollert lekkasje på grunn av hydraulisk jekking/-splitting under oppfylling, er at minste hovedspenning  $\sigma_3$  i ethvert punkt langs vannveien, fram til den såkalte overgangssonen (overgangen mellom uforet og foret tunnel, «Transition zone» i Fig. 5) er mindre enn vanntrykket.

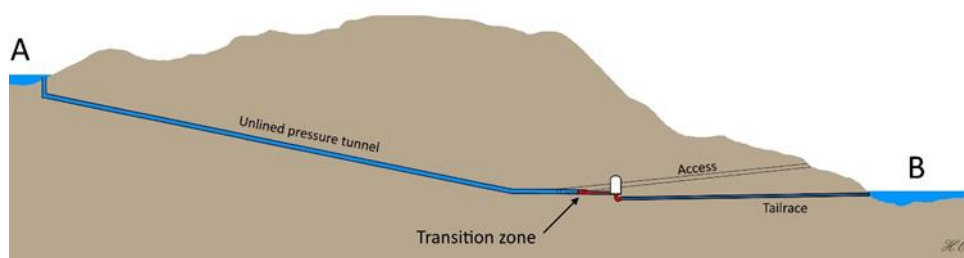
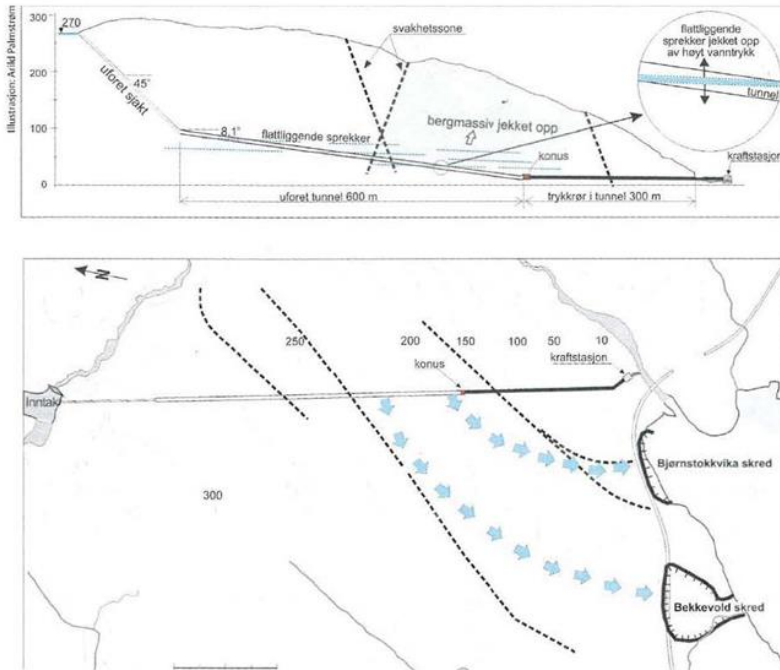


Fig. 5. Typisk geometri for vannvei og konus («Transition zone») i norsk vannkraftanlegg (fra Ødegaard & Nilsen, 2018)

For å sikre at denne betingelsen er oppfylt utføres likevektsberegninger eller numeriske analyser på grunnlag av etablerte prosedyrer, og i de aller fleste tilfeller har en på dette grunnlag unngått problemer med hydraulisk jekking. I enkelte tilfeller, stort sett av eldre dato, og med Fossmark kraftverk (Garshol, 1988) som et av de «nyeste» tilfellene, har det likevel oppstått problemer. For å oppnå større sikkerhet mot splitting er det derfor i dag vanlig å foreta spenningsmålinger i området inn mot planlagt konus- eller pluggplassering. Tolkningen av slike målinger er imidlertid noen ganger usikker, og målingene er også relativt kostbare. I enkelte tilfeller, som f.eks. ved Tosbotn kraftverk i 2016, valgte utbyggeren å utforme overgangs-sonen bare på grunnlag av teoretiske analyser, uten å gjøre spenningsmålinger. Utformingen førte til splitting av trykktunnelen som illustrert i Fig. 6.



Figuren viser hvor sprekke i fjellet oppstod og hvordan lekkasjevann kan ha beveget seg (blå piler) fra vanntunnelen til skredområdene.

*Fig. 6. Tolkning av mulig hydraulisk jekking av flattliggende sprekker ved Tosbotn kraftverk (fra Palmstrøm & Buen, 2017).*

Total kostnad for hendelsen ved Tosbotn er stipulert til i overkant av 100 mill. kr (Helgelendingen, 2018). Dette, og tidligere, lignende hendelser illustrerer at det er et behov for videre utforskning av metodikken omkring undersøkelser og design av konus- og pluggområde, og med utgangspunkt i dette er følgende PhD-prosjekt igangsatt ved IGP:

PhD 3) Optimalisering av testmetoder og design av konusområdet i uforede trykktunneler (Henki Ødegaard)

Introduksjon av store mengder uregulerbar fornybar energi (sol- og vindkraft) i det nordeuropeiske nettet, har ført til pris- og lastvariasjoner av andre format enn det nordiske vannkraftsystemet er dimensjonert for. Norsk vannkraft med store magasin og store høydeforskjeller er meget godt egnet til å utnytte de kommende forretningsområdene, men foreløpig forsvarer ikke dette markedet bygging av nye pumpekraftverk. Det er derfor satt i gang et PhD-prosjekt ved IBM for å finne nye måter å bygge om eksisterende kraftverk til pumpekraftverk, der tunnelsystemet og plassering av turbin i vertikalplanet er flaskehalsen. Fig. 7 viser et situasjonsbilde fra feltarbeid i forbindelse med dette PhD-prosjektet:

PhD 4) Ombygging og tilpasning av tunnelsystemet for oppgradering til effektkjøring og pumpekraftverk (Livia Pitorac)





*Fig. 7. Fra tunnelskanning øvre del av svingekammeret ved Roskrepp kraftverk (foto: Livia Pitorac).*

I forbindelse med at mange eksisterende kraftverk har bytta løpehjul (turbiner) for å øke effekten, har flere av de samme kraftverkene opplevd problemer med ustabile sandfang. Effekten har blitt ytterligere forsterka av at svingningene i strømmettet har økt, slik at vannkrafttunnelene blir påkjent av trykk- og vannhastighetsvariasjoner på en helt annen måte enn tidligere. Tonstad kraftverk (960 MW, 3800 GWh) i Sira-Kvina er ett av kraftverkene som har opplevd mest problemer, og det bygges derfor en stor fysisk modell av sandfanget til Aggregat V på NTNU. I modellen skal de ulike dynamiske fenomen studeres. Modellen i skala 1:10 er vist i Fig. 8.



*Fig.8. Modell av Tonstad-sandfanget ved Vassdragslaboratoriet, NTNU (foto: Thai Mai).*

Problemstillinger knyttet til sandfang er tema for følgende PhD-prosjekt som er igangsatt ved IBM:

PhD 5) Utforming, dimensjonering og stabilitet av sandfang (Ola Haugen Havrevoll)

## SLUTTKOMMENTARER

Som det fremgår av beskrivelsene ovenfor er forskningsaktiviteten relatert til WP1.1 Tunnelsystemer i hovedsak organisert som PhD-prosjekter. All aktivitet er organisert med utstrakt kontakt mot brukerpartnerne, og innspill fra disse sikres gjennom jevnlige møter i fagutvalg. PhD-prosjektene er alle koblet opp mot aktuelle kraftverksprosjekt, med tilgang til dokumentasjon og befaring av tunneler sikret gjennom brukerpartnerne.

Aktuelle problemstillinger og resultater fra de respektive HydroCen prosjektene vil bli formidlet bl.a. gjennom jevnlige presentasjoner på Fjellsprengnings- og Bergmekanikkdagen. Det kan i den sammenheng allerede henvises til innlegg nr. 10 ved årets Fjellsprengningsdag, hvor uforede luftputekammer vil bli diskutert.

## Referanser

Bruland A & Thidemann A (1991): Sikring av vanntunneler. SINTEF Bergteknikk, Rapport STF36A91056, 88 s.

Byggeindustrien (2017): Har utbedret ras i tilløpstunnelen til Nedre Vinstra kraftverk. <http://www.bygg.no/article/1315358> Publisert 22.05.2017.

Garshol K (1988). Fossmark kraftverk, utlekkasje frå trykksjakt. Fjellsprenningsteknikk/Bergmekanikk/Geoteknikk 1988, NJFF, s. 25.1-25.11.

Helgelendingen (2018): Helgeland Kraft og fylkeskommunen blir ikke enig om regninga etter Tosbotn-rasene – planlegger nye møter. Avisartikkel datert 10.10.2018.

Palmstrøm A & Buen B 2017. Leirskred forårsaket av brudd i kraftverkstunnel. GEO, Mars 2017, s. 38-40.

Teknisk Ukeblad (2017): Matre Haugsdal kraftverk. <https://www.tu.no/artikler/splitter-nytt-kraftverk-i-sta-etter-tunnel-ras-turbiner-fra-1950-matte-overta/404955> Publisert 5.9.2017.

Ødegaard H & Nilsen B (2018): Engineering Geological Investigation and Design of Transition Zones in Unlined Pressure Tunnels. Submitted to 10th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS10), Singapore November 2018.

Aagaard B (2005): Blokkeringsras i vanntunneler – eksempel fra overføringstunnel Svelgen, Blåfalli Vik. Fjellsprenningsteknikk/Bergmekanikk/Geoteknikk 2005, NJFF, s. 30.1-30.14.