

**ROCARC - ROCK ANCHORING FOR STABILIZATION OF INFRASTRUCTURES, EI  
OVERSIKT AV PROSJEKTET OG ARBEIDET SÅ LANGT****ROCARC - Rock anchoring for stabilization of infrastructures, an overview of the project  
and the work so far**

Bjarte Grindheim, PhD stipendiat, NTNU

Are Håvard Høyen, sjefingeniør, Statens vegvesen

Charlie C. Li, professor, NTNU

**SAMANDRAG**

Prosjektet ROCARC siktar på å utvikla ein oppdatert metode for dimensjonering av aktiv strekkforankring. For å nå det målet skal prosjektet undersøka blant anna: korleis staglasta vert overført til bergmassen, korleis brot oppstår i bergmassen, og korleis heftstyrken mellom mørtel og berg vert bestemt på ein realistisk måte. På slutten av prosjektet skal retningslinjer for dimensjonering av stag verta formulert. Forskningsprosjektet er sett saman av tri delar: fysiske modelltestar i laboratoriet, full-skala feltforsøk og numerisk modellering. Per dags dato har dei full-skala feltforsøka blitt gjennomført og er under analyse, dei fysiske modelltestane i laboratoriet er godt i gang med ein publisert artikkel og arbeidet med den numeriske modelleringa vil begynne ved slutten av året.

**SUMMARY**

The ROCARC project aims to develop an updated method for dimensioning of rock anchors. To achieve that goal, the project will among others investigate: how the anchor load is transferred to the rock mass, how failure develops in the rock mass, and how the bond shear strength between the grout and the rock is decided in a realistic manner. At the end of the project, new guidelines for rock anchor design will be formulated. The research project consists of three parts: physical model tests in the laboratory, full-scale field tests and numerical modelling. So far in the project, the full-scale field tests have been finished and are under analysis, while the physical model tests are well under way with a published article, and the numerical modelling will start at the end of the year.

**1 INNLEIING**

Høgkapasitetsstag/aktiv strekkforankring er mykje brukt til stabilisering av fjellskjeringar, konstruksjon av spuntveggar, byggfundament, vindturbinar, betongdammar og brutårn (Fig. 1). Vanlegvis vert stag brukt i saman med andre typar overflatesikring, avhengig av bruksområdet. Stabilisering av spuntveggar og brutårn brukar ein stor del av budsjettet til Statens vegvesen, for eksempel blei 2.3 millionar NOK brukt på stagforankring av spuntveggar til Lørentunnelen, som er eit typisk urbant vegprosjekt. Bygginga av vindturbinfundamentet står for ein stor del av dei totalkostnadane

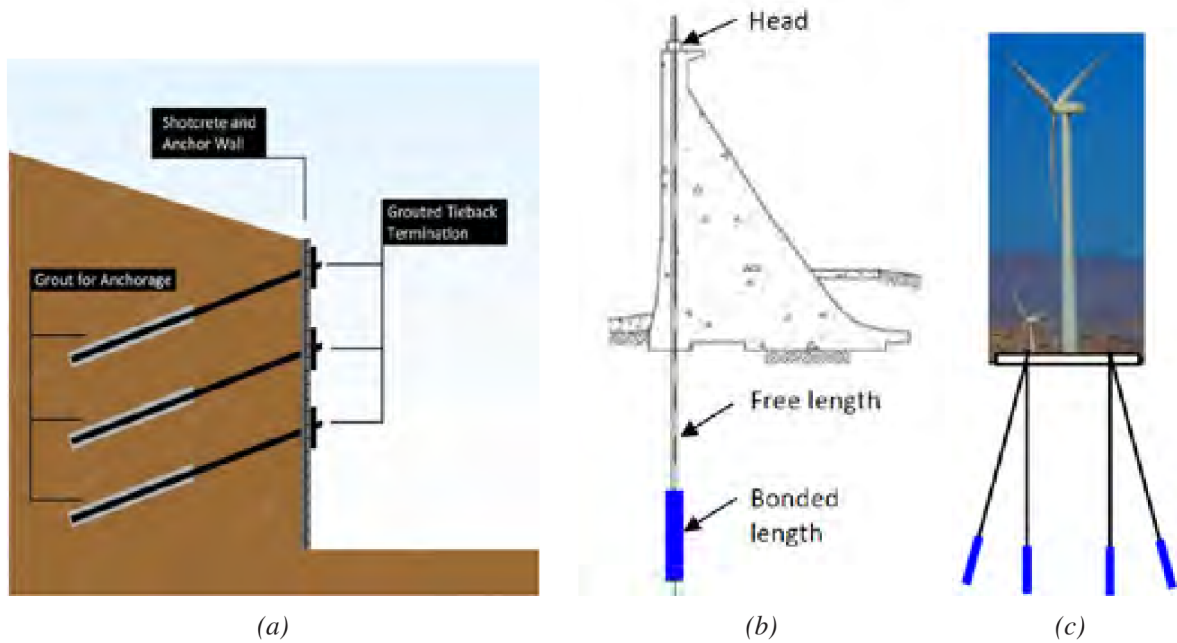


Fig. 1: Eksemplar på strekkforankring med lisser eller stag (a) forsterking av ein spuntvegg, (b) stabilisering av ein demning og (c) stabilisering av fundamentet til ein vindturbin.

til ein vindturbin. Fornybar energi produsert av vindturbinar vil spele ei viktig rolle i det framtidige energimarknaden. Dammar til norsk vasskraft vil i løpet av dei neste 15 åra bli oppgradert for omtrent 10 milliardar NOK og rundt 50% av dammane er betongdammar (Energi Norge 2014). Oppgradering med boltar og stag er blant dei vanlegaste brukte tiltaka for å auka sikkerheita.

Forståinga for ytinga til stag i bergmassen har i dag kunnskapshol. ROCARC-prosjektet siktar på å utvikla og forsterka det forskingsbaserte grunnlaget til både utdanning og praksis, samt forskingskompetansen i akademiske miljø i dei relevante utdanningane. Prosjektet er eit samarbeid mellom Universitetet i Tromsø og Noregs Teknisk-naturvitskaplege Universitet (NTNU), og skal styrka bachelorprogramma innan ingeniørvitenskap ved universiteta. Det skal også styrka mastergrad- og doktorgradsutdanninga og forskinga innan ingeniørgeologi og byggingsteknikk ved NTNU. Prosjektet vil fornya kunnskapen innan stagforankring til bruk i praksis og til utvikling av nye retningslinjer for myndigheitene og næringslivet. Forskinga, formidlinga og implementeringa av den nye kunnskapen vil bli oppnådd igjennom samarbeid med den offentlege sektoren, den private sektoren og forskingsinstitusjonar.

### 1.1 Dagens løysingar, kunnskapsbehov og prosjekt mål

Forspent strekkforankring har blitt brukt til blant anna å auka stabiliteten til dammar, forsterking av landkar, bergskjeringar og fundament. Strekkforankring kan variera mykje i type, lengde og diameter. I ROCARC-prosjektet er det lagt vekt på storskala permanente stag med høg kapasitet av typen som er illustrert i Fig. 2. Brown (2015) gjorde nyleg ein gjennomgang av praksisen for storskala strekkforankring og konkluderte med at kunnskapen har stort sett vert uforandra sidan

1970-tallet. Grunnprinsippa for dimensjonering vart utvikla på 1960- og 70-tallet (Littlejohn & Bruce 1977, Hobst & Zajíc 1983, Bruce 2004), og sidan då har det vert lite utvikling.

Strekkforankring består av tri komponentar: ein forankringslengde på enden av boreholet, ein fri lengde og eit låsehovud på utsida av bergmassen. Dette er demonstrert i Fig. 1b.

Forankringslengda er den delen av staget som er festa til bergmassen med mørtel. Dersom ein skal stabilisera eit svakt lag i ein bergmasse må forankringslengda vera plassert i det kompetente berget bak det svake laget. Etter innstøypinga vert ei forspenning påført staget av ein jekk som vert plassert på låsehovudet. Forspenninga vert påført for å redusera deformasjonen til den stabiliserte bergmassen. På utsida av boreholet vert ei plate og strekkelementet til låsehovudet festa på ein støypt betongsokkel.

Dei nåverande prinsippa for dimensjonering er i hovudsak basert på arbeidet til Littlejohn & Bruce (1977). Littlejohn & Bruce (1977) skreiv at strekkforankring kan gå i brot på ein eller feire av dei følgjande måtane (sjå Fig. 2):

1. i bergmassen i form av ei kjegle,
2. i eller langs mørtel-berg grenseflata,
3. i eller langs stål-mørtel grenseflata, og
4. i stålet til staget/lissene eller låsehovudet.

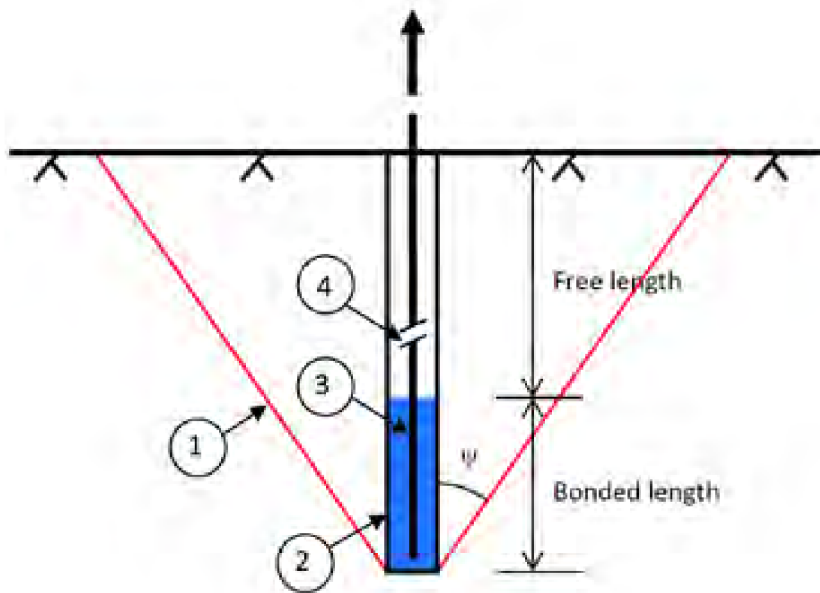


Fig. 2: Skissa av brotmekanismane til strekkforankring frå litteraturen. (1) Brot i bergmassen rundt staget, (2) brot i grenseflata mellom mørtel og berg, (3) brot i grenseflata mellom stål og mørtel og (4) strekkbrot i stålet.  $\psi$  er vinkelen til brotplanet.

Kapasiteten til kvar enkelt brotmekanismane må bereknast for å forsikra stabiliteten til strekkforankringa. Prinsippa til Littlejohn & Bruce (1977) for dimensjonering er brukt i Statens vegvesen V220 Geoteknikk i vegbygging (Statens vegvesen 2018), Wyllie (2009), NVE (2005) og andre.

Dei brotmekanismane det er knytt mest usikkerheit til er brot i bergmassen (brotmekanisme 1) og brot langs mørtel-berg grenseflata (brotmekanisme 2). Metoden som i dag blir brukt for å dimensjonera mot brot i bergmassen er rekna som konservativ, og leiar mest sannsynleg til overdimensjonert forankring. Dette kjem frå mangel på kunnskap om korleis bergmassen går i brot under lasta frå strekkforankringa. Motstanden mot utrivning blir berekna basert på skjerstyrken til bergmassen langs ei kjegleforma brotflata (sjå Fig. 2). Skjerstyrken og kjeglevikelen ( $\psi$ ) vert vald basert på mengda sprekkesett og trykkstyrken til bergmassen.

Ein metode for dimensjonering av vertikal strekkforankring mot brot i bergmassen brukar kun eigenvekta til bergmassen, i ei kjegle av homogent berg, som motstand mot utrivning (Brown 2015). Denne metoden ignorerer at motstanden mot utrivning er ein kombinasjon av skjerstyrken til bergmassen og eigenvekta. I Noreg vert skjerstyrken til bergmassen brukt i dimensjoneringa av strekkforankring, men det knytt stor usikkerheit til den estimerte verdien for skjerstyrken. Storleiken og plasseringa til kjeglevinkelen er avhengig av staget og eigenskapane til bergmassen. I praksis vert kjeglevinkelen vanlegvis antatt å vere enten  $30^\circ$  eller  $45^\circ$  og den vert plassert midt i eller nedst i mørtelen. Ein kjeglevinkel på  $30^\circ$  vert brukt for mjuk, svært oppsprukken eller forvitra bergmasse og  $45^\circ$  for kompetente bergmassar (Hobst & Zajíc 1983, Littlejohn 1993). Kjeglevinkel på  $45^\circ$  har blitt brukt innan damteknikk sidan 1950-tallet (Morris & Garrett 1956, Banks 1957). Wyllie (2009) illustrerte korleis sprekkesett i bergmassen påverkar brotkjeglja, men brotmønster som Wyllie (2009) introduserte er kun gyldige for stag som ikkje har ein fri lengde. For stag som er lokalisert djup inne i bergmassen er det framleis usikkert korleis sprekkene påverka lastoverføringa og forma til brotlekamen. Den mykje brukte dimensjoneringsmetoden mot brot i bergmassen, der ein antar ein kjeleforma brotlekam, lid av fleire manglar som inkluderer:

- ei uklar spenningsfordeling i den overliggande bergmassen;
- forma på utrivningslekamen er ukjent;
- ingen kunnskap om påverkinga frå sprekkene; og
- skjerstyrken til bergmassen vert antatt å vera konstant og verdiane som er anbefalt i litteraturen og i reglane til Statens vegvesen er konservative.

Heftstyrken mellom mørtel og berg er også usikker, sidan det er avgrensa med datakjelder og kvaliteten på dei er usikre. Heften på mørtel-berg grenseflata består av følgjande tri komponentar: adhesjon, friksjon og fortanning. Lastekapasiteten til mørtel-berg grenseflata vert vanlegvis berekna som skjerstyrken gangar arealet til grenseflata. Skjerstyrken mellom mørtel og berg vert i praksis vald frå tabellar ut frå bergtypen og forholda; tabellane er i hovudsak avleia frå dataen publisert av Littlejohn & Bruce (1977). Skjerstyrken kan også bli berekna basert på den einaksiale trykkstyrken (UCS) til berget, då antar ein at skjerstyrken er lik 10% av UCS opp til ein maksimalverdi på 4.2 MPa (Brown 2015). Overflata til boreholet har stor innverking på skjerstyrken, ruleiken til boreholet har meir å seie for skjerstyrken enn berget sin UCS. Dersom bergoverflata er ru nok vil ein unngå tap av heft, då vil mørtelen gå i brot framfor berget. I det tilfellet vil styrken til mørtelen og ruleiken vera dimensjonerande faktorar. Effekten frå omgjevnadstrykket

på skjerstyrken er ikkje tatt med i dimensjoneringa. Standard framgangsmåten mot brot mellom mørtel-berg, som har blitt brukt i mange tiår, lid også av fleire manglar som inkluderer:

- skjerstyrken vert antatt å vera jamt fordelt langs mørtel-berg grenseflata som kan føra til unødig lange forankringslengder;
- ein upassande definisjon på skjerstyrken basert på UCS til berget;
- ruleiken til boreholet er ikkje vurdert;
- effekten frå endringar i normalspenninga er ikkje inkludert;
- den gradvise brotutviklinga langs mørtel-berg grenseflata er ikkje inkludert; og
- effekten frå geologiske strukturar, som for eksempel sprekker, er ikkje tatt med.

Dimensjoneringskriteria til brotmekanisme 3 og 4 er akseptable sidan eigenskapane til både mørtel og stål kan testast og har blitt testa grundig i laboratoriet.

Det har blitt stilt spørsmål om dei nåverande dimensjoneringsmetodane er for konservative og at det er behov for å samla inn ny data, spesielt for harde bergartar (Heimli 1978, Ongstad & Bergh-Christensen 2010). Byggeindustrien ynskjer at nye og betre prosedyrar for dimensjonering av strekkforankring skal bli utvikla, slik at ein unngår konservativ dimensjonering og får frigjort midlar.

Hovudmålet til ROCARC-prosjektet er å utvikla ein oppdatert metode for dimensjonering som leiar til realistiske og økonomiske løysingar for dimensjonering av aktiv strekkforankring. For å nå dette målet vil prosjektet undersøka (1) korleis staglasta vert overført til bergmassen og korleis brot oppstår i bergmassen (brotmekanisme 1); (2) korleis ein lastberande boge vert indusert i bergmassen under lasta frå strekkforankringa; (3) korleis ein kan bestemma skjerstyrken til mørtel-berg grenseflata; og til slutt (4) vil det bli formulert nye retningslinjer for dimensjonering av strekkforankring.

## 1.2 Ny kunnskap og ambisjonar

Prosjektet har som mål å utvide kunnskapen om spenningsfordelinga og brotmekansimane i bergmassen under lasta frå strekkforankring, og skjerstyrken til mørtel-berg grenseflata. Måla vil bli nådd igjennom laboratorieforsøk, fullskala feltforsøk og numerisk modellering.

Det dette som prosjektet skal undersøka er: utviklinga av ein lastberande boge mellom blokkene i bergmassen når lasta frå forankringa vert overført til bergmassen, evaluering av skjerstyrken til bergmassen, vurdering av skjerstyrken langs mørtel-berg grenseflata ved å inkludera den gradvise brotutviklinga, og utvikling av eit spesielt testprogram i laboratoriet samt i felt. Undersøkinga av den lastberande bogen og kjeglebrotet i bergmassen vil først bli demonstrert gjennom laboratorieforsøk, deretter vil det bli forsøkt å måle dette i felt med geofysiske metodar og avslutningsvis vil det bli verifisert i numeriske modellar. Laboratorieforsøka og instrumenteringa av feltforsøka er nytt, spesielt den seismiske overvakinga av brotutviklinga i bergmassen med geofonar.

Forskningsgruppene på NTNU, SINTEF og NGI har produsert ei rekke publikasjonar med høg innverking innan bergsikring (f.eks. Li & Stillborg (1999), Li (2010), Li & Doucet (2012), Li et al. (2016), Li (2017), Stjern (1995), Lepine & Lia (2014), Energi Norge (2014), Shabanimashcool

et al. (2018)). Den strålende forskningskompetansen til gruppene garanterer suksess i å skapa ny kunnskap om strekkforankring.

Universiteta UiT og NTNU har begge høgt rangerte bachelor- og masterprogram i ingeniørvitenskap innan bygg og ingeniørgeologi. Forankring av betongkonstruksjonar til bergoverflata er grunnleggande i alle bygg- og anleggsprosjekt i Noreg og andre land med berggrunn av høg kvalitet. Det universiteta vil bidra med er erfaring som vil auka kvaliteten og relevansen for undervising og praksis.

### 1.3 Forskingsspørsmål og hypotese, teoretisk tilnærming og metode

Som nemnt i seksjon 1.1 er brotmekanisme 1 og 2 dei man er mest engsteleg for når det kjem til dimensjonering av strekkforankring. Når ein skal dimensjonera forankring for å unngå brot i bergmassen må ein forstå korleis lasta vert overført frå forankringa til bergmassen, og korleis brot utviklar seg. Tema som treng å bli undersøkt for å betre forståinga for brotmekanisme 1 er: (1) spenningsfordelinga i bergmassen; (2) brotutviklinga i bergmassen; (3) innflytinga frå sprekker på den lastberande bogen; og (4) estimering av skjerstyrken til bergmassen.

Når ein skal dimensjonera strekkforankring mot brotmekanisme 2 er fokuset på å bestemma skjerstyrken til grenseflata mellom mørtel-berg. Skjerstyrken er knytt til ruleiken til boreholet og styrken til berget, men den avhenger kanskje også av omgjevnadstrykket i bergmassen. Tema som treng undersøking for å auke forståinga for brotmekanisme 2 er: (1) skjerspenningsfordelinga langs mørtel-berg grenseflata; (2) korleis bestemme skjerstyrken på grenseflata; (3) innverknaden frå normalspenninga og sprekker; og (4) brotutviklinga langs grenseflata.

#### 1.3.1 Spenningsfordeling og brot i bergmassen

Lasta frå eit stag vil endra både deformasjonen og spenninga i ein bergmasse. Forskyvinga til staget vil gjer at blokkene i bergmassen roterer og dannar ein lastberande boge i bergmassen (Fig. 3). Lastekapasiteten til bogen er direkte påverka av sprekkparameterane, som er tettleiken, orienteringa og overflateruleiken. Langs mørtel-berg grenseflata vil det kunne oppstå horisontal dilatans som vil kunna indusera horisontale spenningar i bergmassen. Når differensialspenningane i bergmassen er store nok vil det oppstå skjerbrot. Brotflatene i bergmassen vil delvis oppstå i det intakte berget og delvis følgje dei eksisterande diskontinuitetane. Plasseringa av forankringslenga i bergmassen påverkar brotutviklinga. Ei kjegleforma brotverflata kan bli danna når den er plassert relativt grunt. Når den er plassert på eit moderat djup vil ein kunne få stor vertikal deformasjon på bakkeflata. Dersom den er plassert djupt nok vil det ikkje oppstå skjerbrot i bergmassen eller vertikal deformasjon på overflata, då vil staget vera solid installert i bergmassen. Dette er den ynska plasseringa av forankringslengda. Ei av oppgåvene til ROCARC-prosjektet er å finna det kritiske djupet for strekkforankringa under gitte bergmasseforhald. Sprekkene i berget spelar ei stor rolla når det kjem til danninga av den lastberande bogen, dei påverkar korleis sekundærspenningane og deformasjonane fordelar seg i bergmassen. Ei gunstig orientering på sprekkene vil auke lastekapasiteten til staget. I motsett ende vil ugunstig orientering på sprekkene kunna minka lastekapasiteten. Geometrien til den potensielle brotflata er påverka av den lastberande bogen, omgjevnadstrykket og sprekkene.

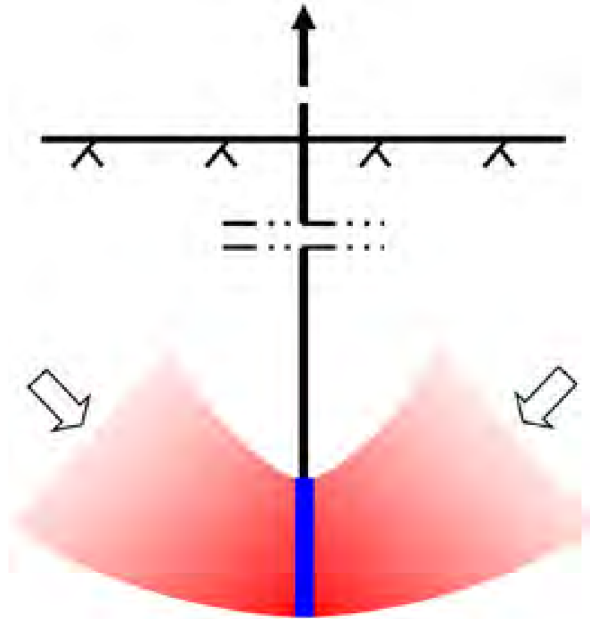


Fig. 3: Lastberande boge som omkransar staget.

### 1.3.2 Gradvis skjersbrotutvikling langs mørtel-berg grenseflata

Dagens dimensjoneringsmetode mot brotmekanisme 2 brukar ein gjennomsnittleg skjersstyrke langs grenseflata mørtel-berg. Fordelinga av skjerspenningane langs grenseflata er avhengige av strekkrafta i staget. Tri distinkte steg har blitt identifisert for skjerspenningsfordelinga langs mørtel-berg grenseflata (Fig. 4). I steg 1 vert staget deformert elastisk under ei relativt liten last. Då er skjerspenninga størst på den proksimale enden og minkar eksponentielt mot den distale enden. I steg 2 aukar lasta og det oppstår ei delvis avbinding mellom mørtelen og berget på den proksimale enden, og det utviklar seg gradvis mot den distale enden når lasta aukar vidare. I steg 3 har ein fått heftbrot langs heile grenseflata som resulterer i ei jamn restspenning. I det siste steget har staget blitt utsett for stor forskyving. Ein trur den maksimale kapasiteten til mørtel-berg bindinga vert nådd under steg 2. Lastekapasiteten til mørtel-berg bindinga er avhengig av diameteren til boreholet, forankringslengda, ruleiken til bergoverflata og omgjevnadstrykket i bergmassen.

Det har blitt samla inn nyttig data i frå byggeindustrien, slik som uttrekksforsøka til Bergh-Christensen & Ongstad (2012). Denne dataen og kunnskapen frå byggeindustrien har blitt brukt som referanse for design av laboratorie- og feltforsøka.

Prosjektet vil bli gjennomført ved laboratorieforsøk, feltforsøk og numerisk modellering. Dei fysiske modellane vert lagt med blokker av steinliknande materiale for å simulera ein oppsprukken bergmasse. Ei stålblokk som simulerer eit stag er integrert i blokkmodellen. Når staget belastar veggan vert deformasjonen til heile modellen overvaka. Dette vert brukt til å vise kvalitativ utviklinga av den lastberande bogen, innverknaden til sprekkorienteringa og brotutviklinga i modellen. Feltforsøka siktar på å verifisera funna frå laboratorieforsøka i ekta bergmassar og undersøka skjersstyrken til mørtel-berg grenseflata. Feltforsøka vil bli instrumentert for å måla deformasjonane

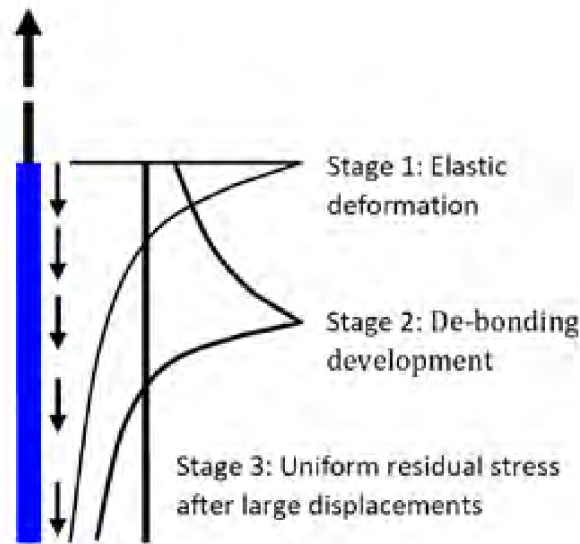


Fig. 4: Gradvis brotutvikling langs mørtel-berg grenseflata.

og spenningsendringane i bergmassen. Brotutviklinga i bergmassen vert overvaka av eit mikroseismisk målingssystem. Skjerstyrken til mørtel-berg grenseflata vil bli funnen igjennom ei rekke uttrekksforsøk med varierende forankringslengder. Uttrekksforsøka vil bidra til å finna den optimale forankringslengda i ein gitt bergmasse. Numerisk modellering vil bli brukt til å føresjå åtferda til bergmassar under lasta frå strekkforankringa. Dei numeriske modellane vil bli kalibrert med dataen frå laboratorie- og feltforsøka. Prosjektet forventar å utvikla ein metodikk for dimensjonering av strekkforankring med numerisk modellering.

Potensielle risikoar som kan forhindra at måla vert nådd er vanskar med å karakterisera komplekse bergmassar, og implementering av testdata i formuleringa av ein prosedyre for dimensjonering av strekkforankring. Disse utfordringane vil bli løyst ved hjelp av numerisk modellering.

## 2 KONSEKVENSAR AV PROSJEKTET

### 2.1 Potensielle konsekvensar av prosjektet

Resultatet av prosjektet vil bidra til kunnskap om mekanismane til den lastberande bogen, den koniske brotforma i bergmassen, og ein metode for estimering av skjerstyrken langs mørtel-berg grenseflata. All den nye kunnskapen vil komma som følgje av oppdatert vitenskapleg data som vil bli brukt til å forbetra den nåverande metoden for dimensjonering. Prosjektet vil også utvikla ein ny metodikk for numerisk modellering av strekkforankring. Til slutt vil den nye kunnskapen bli brukt til å utforma nye retningslinjer for dimensjonering av strekkforankring.

Bachelor- og mastergradsprogramma ved universiteta UiT og NTNU utdannar og undervisar ingeniørar i Noreg. Prosjektet vil styrka den forskingsbaserte ingeniørutdanninga ved universiteta. Både master- og bachelorstudentar frå universiteta vil bli involvert i prosjektet igjennom laborieforsøk og numerisk modellering. Det er forventa at resultatata frå prosjektet vil bli brukt



i studieprogramma til universiteta. Den nye kunnskapen vil også bli brukt i master- og doktorgradsutdanninga ved institutta IGP og IBM ved NTNU.

Bergsikring med boltar og stag er eit kjerneforskningsfelt ved NTNU, der master- og doktorgradsprogram har blitt etablert på temaet. Prosjektet er strategisk viktig for å forsterka forskingsfeltet på NTNU. Resultata frå prosjektet vil bli formidla til byggeindustrien igjennom partnerane i prosjektet. Prosjektet vil løfta teknologien og kunnskapen om strekkforankring i landet. Den nye kunnskapen vil betra sikkerheita for infrastruktur og minke byggekostnadane. Prosjektet har potensial til å adressera minst eit av FN's berekraftsmål som er "Industri, innovasjon og infrastruktur - Bygge solid infrastruktur og fremma inkluderande og berekraftig industrialisering og innovasjon".

## 2.2 Tiltak for kommunikasjon og utnytting

Målgruppa for prosjektet er studentar, konsulentar, ingeniørar og offentlege tenestemyndigheiter i byggesektoren. Byggeindustrien er involvert i styringa av prosjektet igjennom referansegruppa eller ved å rettleie Ph.d. kandidaten. Resultata i prosjektet vil bli presentert til målgruppa igjennom seminar, kurs, og nasjonale og internasjonale konferansar. Kommunikasjonsmidla inkluderer:

- ein presentasjon per år på den årlege Bergmekanikkdagen i 2022, 2023 og 2024,
- ein til to forskingsartiklar og ein internasjonal konferanseartikkel i 2022,
- ein til tri forskingsartiklar og ein internasjonal konferanseartikkel i 2023, og
- retningslinjer for dimensjonering av strekkforankring.

## 3 IMPLEMENTERING

Opgåvene i prosjektet er laboratorieforsøk, feltforsøk og numerisk modellering. Ein Ph.d. kandidat og ein post-doktor (to år) er involvert på fulltid i prosjektet. Prosjektet har varigheit på fire år sidan det i hovudsak består av tidkrevjande testar. Prosjektet er organisert i fem arbeidspakkar (work packages, WP): WP1 prosjektleiing, WP2 laboratorieforsøk, WP3 feltforsøk, WP4 numerisk modellering og WP5 formidling av resultata.

### 3.1 Prosjektleiing og prosjektgruppe

Prosjektleiaren er Charlie Li, professor ved NTNU. Ekspertisen til Li er innan feltet bergmekanikk med fokus på bergsikring. Han har publisert ei rekke med artiklar saman med doktorgradsstudentar. Ein av artiklane hans "Analytical models for rock bolts" som blei publisert i *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* er den mest siterte artikkelen om bolting (sitert 484 gangar ifølgje Google Scholar). Arbeidet hans innan bergsikring har hatt stor innflyting på det internasjonale miljøet innan bergmekanikk.

Dette forskingsprosjektet samarbeider med FME forskingssenteret HydroCen ved NTNU. HydroCen er eit Forskningsrådsfinansiert senter med WP1 vasskraftanlegg som eit av fire prioriterte forskingsfelt i perioden 2017-2023. Professor Leif Lia er leiaren av arbeidspakke WP3.

Institutt for geovitskap og petroleum (IGP) ved NTNU er verten for prosjektet. Samarbeidspartnerane i prosjektet er Norsk Bergmekanikkgruppe (NGB), institutt for bygg- og miljøteknikk (IBM)

ved NTNU, Universitetet i Tromsø (UiT), Statens vegvesen, SINTEF bygg og infrastruktur, Norges geotekniske institutt (NGI), NORSAR, Multiconsult og Norconsult. HydroCen er ein støttepartner.

Prosjektet har ein internasjonalt partner i Kungliga Tekniska högskolan (KTH), Sverige, med gruppa til førsteamanuensis Fredrik Johansson. Dr. Fredrik Johansson er også medlem i referansegruppa til prosjektet.

### 3.2 Prosjektorganisering og -leiing

Prosjektet er leia av prosjektleiaren med støtte frå ei referansegruppa som består av representantar frå alle partnerane. Prosjektet er delt opp i fem arbeidspakkar (Fig. 5). Arbeidspakke WP1 er prosjektleiing leia av prosjektleiaren. WP2 er laboratorieforsøka som vert hovudsakleg utført av Ph.d. kandidaten, SINTEF og Statens vegvesen, WP3 feltforsøk, WP4 numerisk modellering og WP5 formidling.

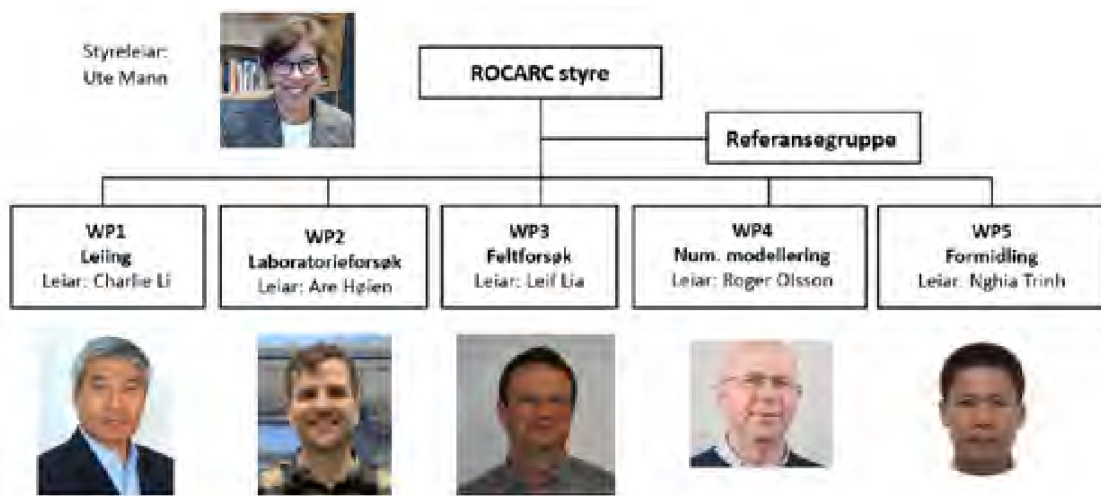


Fig. 5: Prosjektstrukturen i prosjektet med leiarane for kvar arbeidspakke.

#### 3.2.1 WP1: Prosjektleiing

WP1 inkluderer prosjektleiing, koordinering, kommunikasjon med partnerar, og kunnskapsutveksling. Arbeidspakken består hovudsakleg av tri oppgåver: Oppgåve T1.1 er organisering og leiing, oppgåve T1.2 er kommunikasjon, koordinering og kunnskapsutveksling med partnerane, medan T1.3 inneberer at prosjektleiaren følgjer opp framgangen i prosjektet kvar tredje månad og han passar på at framgangen samsvarar med milepælane.

#### 3.2.2 WP2: Laboratorieforsøk

Laboratorieforsøka siktar på å studera den lastberande bogen og brotbanen i ein blokkmodell under den konsentrerte lasta frå eit stag i kontrollerte omgjevnadar. Ei todimensjonal ramme på  $1.2 \times 1.9$  m vart bygd for laboratorieforsøka. Minst fem forskjellige blokkmonster skal bli satt opp med blokker av steinliknande material. Blokkstorleiken og orienteringa til blokkene vil bli variert i

forsøka. Ei stagblokk er integrert i modellen og kan belastast med trykk. Forskyvinga til alle blokkene i modellen vil bli overvaka av eit digitalt bilde korrelerings (digital image correlation, DIC) målesystem under testane. DIC er ein optisk metode som målar deformasjonane på objektets overflata ved å spora rørsle til gråverdimønsteret på blokkene under forsøka. Den lastberande bogen og brotbana i modellen vil bli analysert ved hjelp av bileta frå DIC målingane. Det vil bli påført ulike horisontaltrykk på modellen for å vurdere effekten av in-situ spenninga på den lastberande bogen og brotmønsteret.

### **3.2.3 WP3: Feltforsøk**

Feltforsøka er delt i to grupper, WP3a og WP3b. WP3a siktar på å undersøke den lastberande bogen og den kjegleforma brotlekamen i bergmassen under opptrekkforsøk av fullskala stag. Testane vart gjennomført i ein medium sterk bergmasse. Gruppe WP3b skal undersøke den kritiske forankringslengda til stag i ein bergmasse.

I WP3a vart fullskala stag installert i ein bergmasse trekt opp for å teste styrken til bergmassen. Under forsøka var endringane i spenning og forskyving målt med lastceller og ekstensometer ved ulike lokasjonar i bergmassen. Den lastberande bogen, som er endringa i deformasjon og spenning i bergmassen, og lokasjonen til den potensielle kjegleforma brotflata vil komma fram i datamålingane. Forankringsdjupet vart variert i testane. Bergmassen vart også overvaka av eit mikroseismisk målesystem, som siktar på å lokalisera brotbana og følgje brotprosessen. Resultata frå laboratorieforsøka bidrog til å velgje plasseringa for instrumenteringa.

Under WP3b vart fullskala stag trekt opp frå ein medium sterk bergmasse for å teste skjerstyrken til mørtel-berg grenseflata. Forankringslengda til staga vart variert. Forhaldet mellom forankringslengda og skjerstyrken til mørtel-berg grenseflata skal bli etablert gjennom feltforsøka.

### **3.2.4 WP4: Numerisk modellering**

I tillegg til laboratorie- og feltforsøka vil den lastberande bogen og utviklinga av brotflata i bergmassen verte undersøkt numerisk. I det første stadiet vil laboratorie- og feltforsøka verte simulert. Det første stadiet av den numeriske modelleringa vart kalibrert etter laboratorieforsøk i ein liten testrigg og resultata hjelpte i planlegginga av feltforsøka. Det andre stadiet av den numeriske modelleringa skal bygge opp modellar basert på bergmassen frå feltforsøka. Dei modellane vil hjelpe med tolkinga av resultata frå feltforsøka. Til slutt vil ein metodikk for numerisk modellering av strekkforankring bli etablert. Den lastberande bogen og utviklinga av brotflata i bergmassen vert studert i detalj med numeriske modellar. Analytiske metodar skal også bli utvikla for å utforska fysikken bak brot i bergmassen rundt strekkforankring.

### **3.2.5 WP5: Formidling av resultata**

Formidlinga av resultata frå prosjektet inkluderer undervising i relevante emnar hjå universiteta som er med i prosjektet, kommunikasjon med partnerane, samfunnet og akademiske miljø igjennom seminar, møter, konferansar og forskingsartiklar.

I tillegg til ei doktoravhandling, skal 5-8 forskingsartiklar bli publisert i prestisjetunge internasjonale tidsskrifter. Resultata frå prosjektet vil også bli presentert på seminar og kurs frå NBG, nasjonale

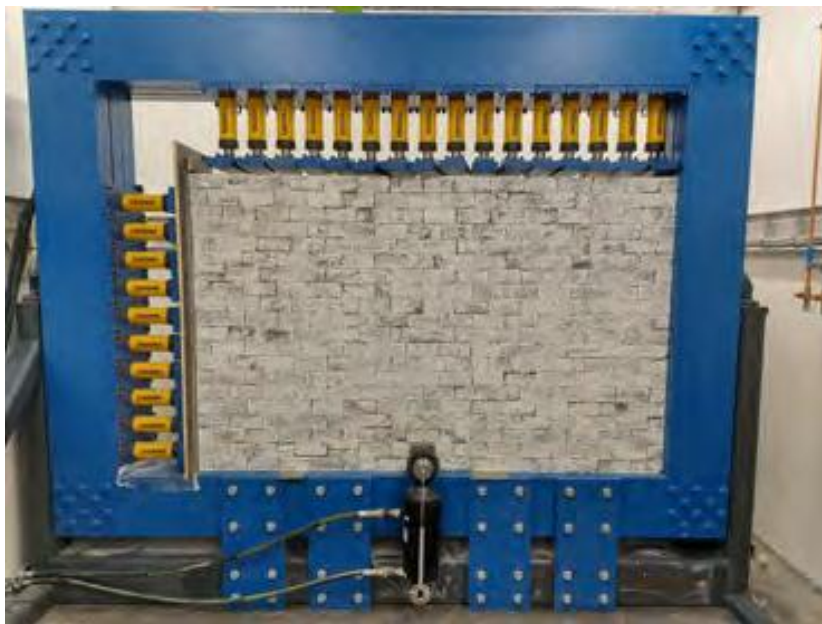
og internasjonale konferansar, slik som Bergmekanikkdagen og europeiske bergmekanikk konferansar, som for eksempel EUROCK. På slutten av prosjektet vil ein arbeidsverkstad bli heldt. Eit resultat frå prosjektet skal vere eit dokument om ”Retningslinjer for dimensjonering av strekkforankring” som skal bli levert til byggeindustrien.

#### 4 ARBEIDET SÅ LANGT I PROSJEKTET

ROCARC-prosjektet vart starta med eit kick-off møte 13.august 2020 og har nå vert i gang i litt over 2 år. Prosjektet er godt i gang med både laboratorie- og feltforsøk. Arbeidet som har blitt gjort så langt vert forklart kort i underseksjonane som kjem.

##### 4.1 Laboratorieforsøk

Ein storskala testrigg har blitt utvikla som ein del av prosjektet (Fig. 6) for å simulera effekten opptrekk av eit stag har på bergmassen. Testriggen vart ferdig i starten av hausten 2022 og første runde med forsøk vart gjennomført i starten av oktober 2022. Det er planlagt at forsøka i riggen skal bli gjennomført fram til sommaren 2023.



*Fig. 6: ROCARC-testrigg for simulering av opptrekk av stag i ein bergmasse.*

Under bygginga av den store testriggen vart det utvikla ein liten testmodell for å halde framgangen i prosjektet i gang. Denne testmodellen har blitt brukt til opptrekkforsøk i friksjonsmaterial, material med låg kohesjon og blokkmateriale.

##### 4.1.1 Laboriemodellforsøk i friksjonsmaterial og material med låg kohesjon

Fysiske todimensjonale modellforsøk vart utført i den lille testriggen for å studera brotmønster i friksjonsmaterial og material med låg kohesjon, under ei konsentrert løftekraft midt i modellen

som simulera løft frå eit stag. Forankringsblokka i modellen overførte lasta til materialet igjennom friksjonen på grenseflata mellom blokka og materialet. Ein kjegleforma brotlekam vart løfta i begge forsøka for friksjonsmaterial og material med låg kohesjon, vist i Fig. 7. Forsøka var ein del av masteroppgåva til Høgset (2021).



Fig. 7: Opptreksforsøk i mini-testtrigg med (a) friksjonsmaterial og (b) material med låg kohesjon.

#### 4.1.2 Laboratorieforsøk av ein blokkmodell

Todimensjonale opptreksforsøk vart gjennomført i den same litle testtriggen for å studera den lastberande bogen og brotmønsteret til ein blokkmodell under lasta frå eit stag. Lastpåføringa i blokkmodellen var lik som for friksjonsmaterialet og materialet med låg kohesjon. Tøyingane til alle blokkene vart målt med DIC teknologi (Fig. 8a). Frå DIC målingane kunne ein sjå lastberande bogar bli indusert i kvart lag igjennom den horisontale trykktøyinga. Brotmønsteret vart konisk i blokkmodellen også (Fig. 8b). Forsøka er beskriven grundig i Aasbø (2021) og Grindheim et al. (2022).

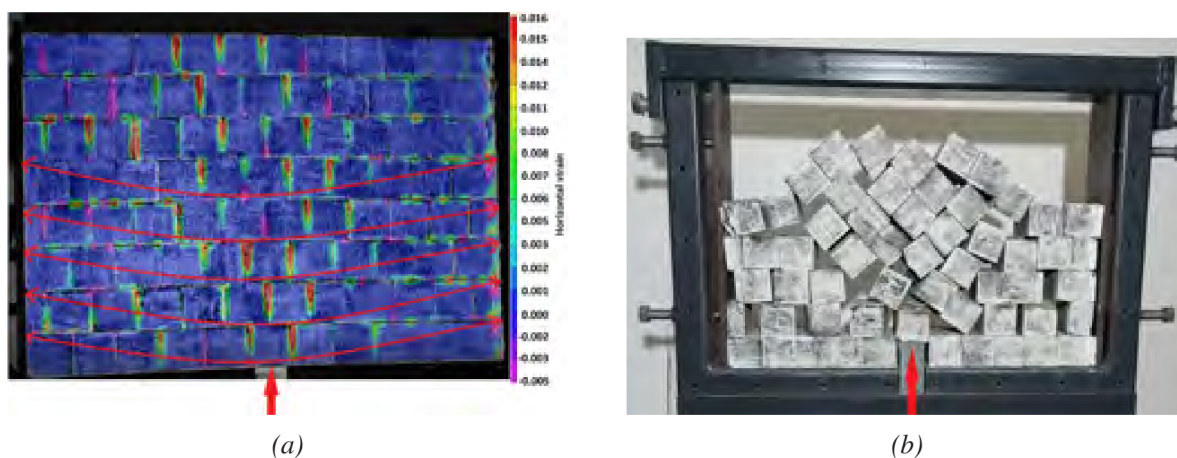


Fig. 8: Opptreksforsøk i blokkmodell med betongblokker. (a) Horisontal tøying i blokkmodellen frå DIC med tolka lastberande bogar og (b) brotmønster i blokkmodellen.

## 4.2 Feltforsøk

Fullskala opptrekkforsøk vart utført i kalksteinsgruva til Verdalskalk i Tromsdalen. Dei vart gjennomført i to omgangar for å teste lastekapasiteten til stag med ulike forankringsoppsett og lastekapasiteten til bergmassen. Oppsettet for dei ulike feltforsøka er vist i Fig. 9. Testane viste at forankringsoppsettet, utan og med endeplate, påverka åtferda til staga (Fig. 10) og forma til brotlekamen var avhengig av dei eksisterande sprekkene i bergmassen (Fig. 11). Resultata frå feltforsøka er under analyse på nåverande tidspunkt.

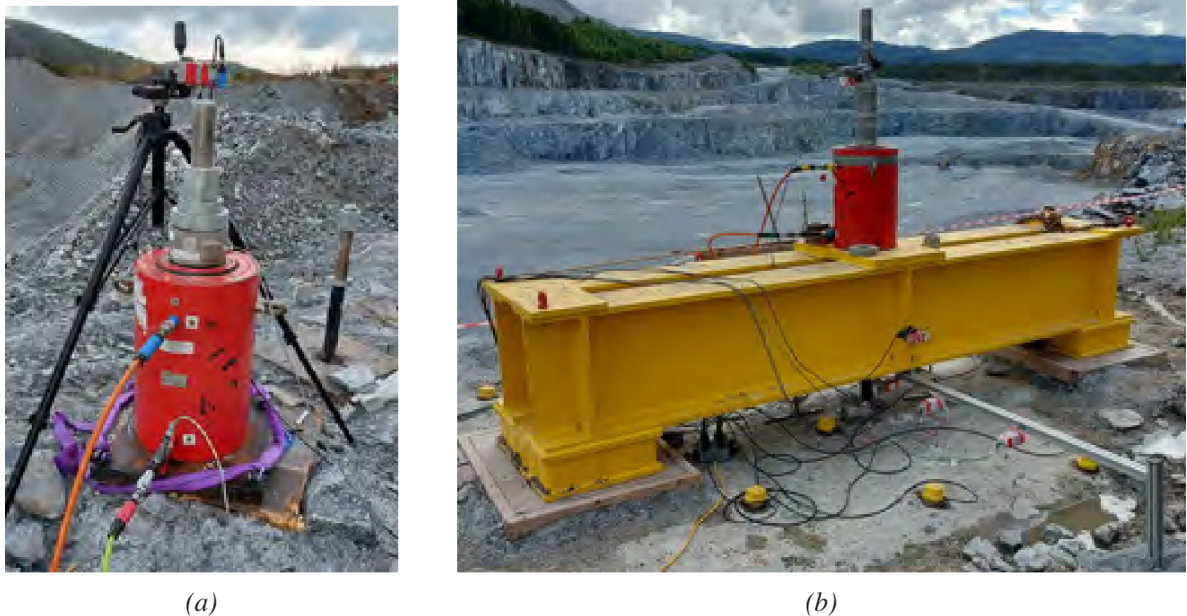


Fig. 9: Oppsett for feltforsøka som testa (a) skjærstyrken til grenseflatene stag-mørtel og mørtel-berg og (b) brot i bergmassen.

## 4.3 Numerisk modellering

Den numeriske modelleringa så langt i prosjektet har vart av forsøka i den litle testtriggen. Modelleringa har blitt brukt til å verifisera resultata frå dei fysiske testane. Forsøka har blitt modellert i UDEC og frå dei numeriske modellane kunne ein tydeleg sjå dei lastberande bogane (Fig. 12).

### 4.3.1 Planlagt numerisk modellering

Det er planlagt ei rekke med ulike scenario som skal bli modellert numerisk i prosjektet. Resultata frå laboratorie- og feltforsøka skal bli brukt til kalibrering av numeriske modellar i UDEC og 3DEC. Kalibreringa vil bli brukt til å modellere fullskala forankring (5-20 m lange stag, Fig. 13a), linjer med stag (Fig. 13b) og grid med stag (Fig. 13c). Dette er etterspurt av byggebransjen (Heimli 1978, Ongstad & Bergh-Christensen 2010) og dagens dimensjoneringsmetode for grid med stag er i hovudsak basert på vekt av overliggende masse (Hobst & Zajíc 1983, Brown 2015), som er konservativt (Brown 2015). I tillegg er det ikkje sikkert at forma på brotlekamen i dagens litteratur er representativ.

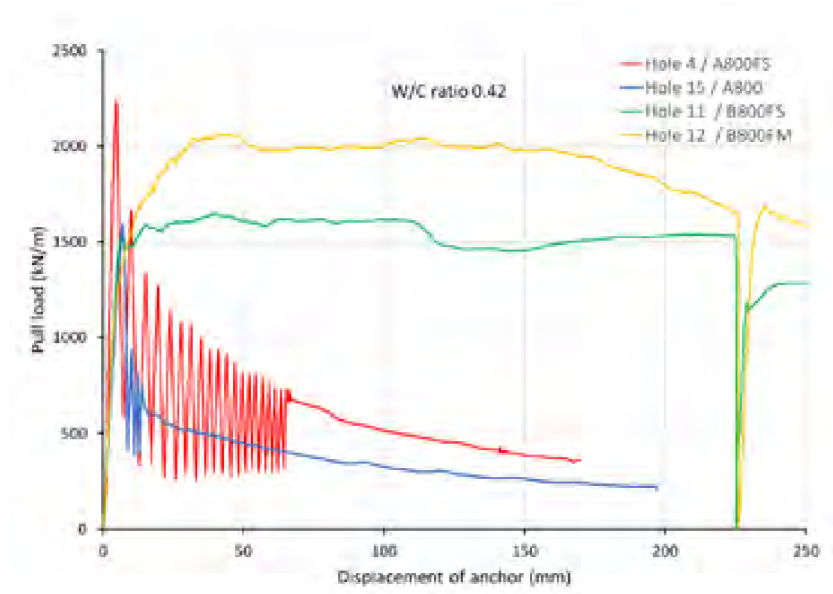


Fig. 10: Last per meter for staga som testa stål-mørtel og mørtel-berg bindinga (A) utan og (B) med endeplate.



Fig. 11: Brot i bergmassen rundt staget.

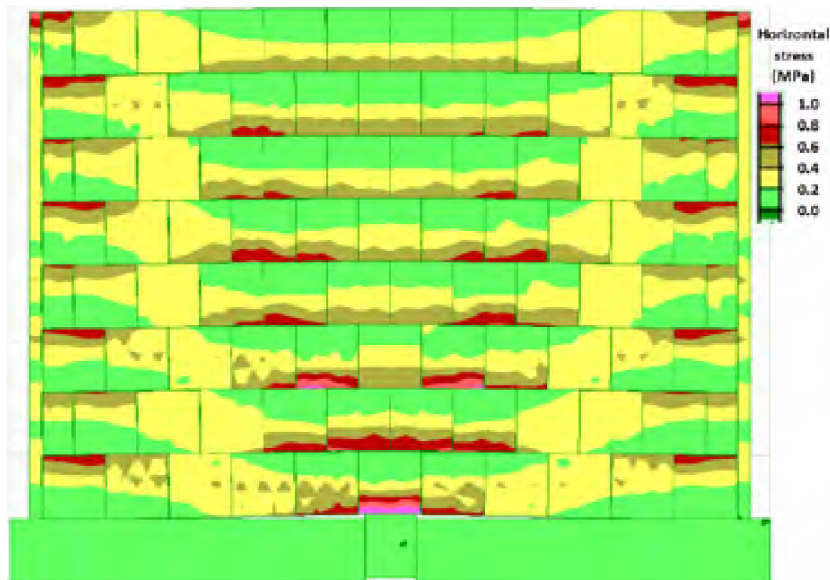


Fig. 12: Horisontalspenning i numerisk modell av blokkforsøk i den lille testtriggen med tydelige lastberende bogar i kvart lag.

#### 4.4 Formidling

Resultata frå prosjektet vert formidla igjennom kurs, seminar, konferansar og vitskapelege artiklar. Prosjektet held eit årleg referansegruppemøte for partnerane i prosjektet med oppdatering på framgangen og ny kunnskap. Resultata frå forsøka i mini testtriggen har vorte publisert i ein tidsskriftsartikkel (Grindheim et al. 2022) og presentert på konferansen EUROCK 2022. Vidare har prosjektet blitt presentert på Vårsleppet og planleggast presentasjonar på Bergmekanikkdagen 2022-24. Internasjonalt er det planlagt at prosjektet skal presenterast på ISRM konferansen i Salzburg i 2023. Det vert også gjennomført masteroppgåver i prosjektet, der er ein masterstudent jobbar med prosjektet i dag og to masteroppgåver er allerede fullført (Høgset 2021, Aasbø 2021).

## 5 OPPSUMMERING

ROCARC-prosjektet er ei viktig satsing på strekkforankring som har vorte etterspurt av byggebransjen. Prosjektet varar i fira år og har som mål utvikla ein oppdatert metode for dimensjonering av strekkforankring. Det har vorte gjennomført laboratorie- og feltforsøk i prosjektet som har vist at ein lastberande boge oppstår i bergmassen når staga vert trekt opp og at forma til brotlekamen er avhengig av dei eksisterande sprekkene i bergmassen. Det som står att er laboratorieforsøk, analyse av feltforsøka og numerisk modellering. Når alle delane av prosjektet er fullført vil resultata bli brukt til formulering av nye retningslinjer for dimensjonering av strekkforankring.

## TAKK TIL

Forfatarane anerkjenner den finansielle støtta frå Noregs forskingsråd igjennom forskingsprosjektet ROCARC med prosjektnummer 303448, og partnerane i prosjektet som er Norsk Bergmekanikk-



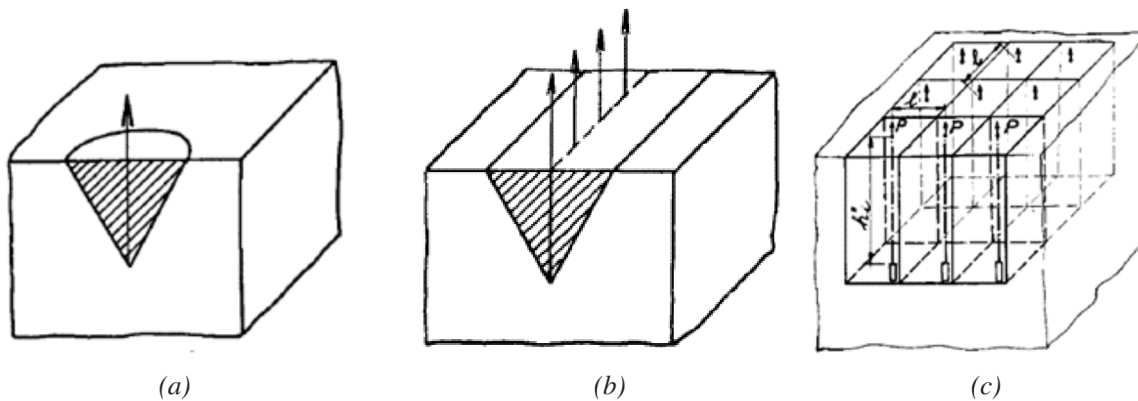


Fig. 13: Form på utrivingslekam frå litteraturen for (a) enkelt stag, (b) linje med stag og (c) grid med stag (Hobst & Zajíc 1983).

gruppe (NBG), NTNU, SINTEF, NGI, UiT, Statens vegvesen, Multiconsult AS, Norconsult AS og NORSAR. Takk til Verdalskalk AS som let oss bruka gruva i Tromsdalen som testlokasjon og all hjelpa med gjennomføringa av feltforsøka.

## REFERANSAR

- Aasbø, K. S. (2021): "Laboratory tests and numerical modeling of block models for evaluation of rock mass behaviour when subject to an anchoring load", Masteroppgåve, NTNU, Trondheim, Noreg.
- Banks, J. A. (1957): "Allt-na-lairige prestressed concrete dam", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 6(3), 409–28.
- Bergh-Christensen, J. & Ongstad, A. (2012): "Uttreksforsøk på innstøpte bolter i alunskifer", Artikkel presentert på Bergmekanikkdagen, Oslo, Noreg.
- Brown, E. T. (2015): "Rock engineering design of post-tensioned anchors for dams - a review", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 7(1), 1–13.
- Bruce, D. A. (2004): "Evolution of rock anchor practice over three decades", in 'Ohio River Valley Soils Seminar XXXV', ADSC, American Society of Civil Engineers, Ohio River, USA, p. 9.
- Energi Norge (2014): "Fjellbolter i betongdammer", Publ./ Energi Norge AS nr. 374-2014, Oslo, Noreg.
- Grindheim, B., Aasbø, K. S., Høien, A. H. & Li, C. C. (2022): "Small block model tests for the behaviour of a blocky rock mass under a concentrated rock anchor load", *Geotechnical and Geological Engineering* .
- Heimli, P. (1978): "Forankring med kabelstag", Artikkel presentert på Bergmekanikkdagen, Oslo, Noreg.

- Hobst, L. & Zajíc, J. (1983): "*Anchoring in Rock and Soil*", Elsevier Scientific Publishing Company, New York, USA.
- Høgset, H. M. (2021): "*A study of failure in frictional and low-cohesive materials under the load of ground anchors through small-scale physical model tests and numerical simulations*", Masteroppgåve, NTNU, Trondheim, Noreg.
- Lepine, C. T. & Lia, L. (2014): "*Capacity of passive rock bolts in concrete dams - Improved design criteria*", International symposium on Dams in a global environmental challenges (ICOLD), Bali, Indonesia.
- Li, C. C. (2010): "A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **47**(3), 396–404.
- Li, C. C. (2017): *Rockbolting: Principles and Applications*, Butterworth-Heinemann, Elsevier, Oxford, England.
- Li, C. C. & Doucet, C. (2012): "Performance of d-bolts under dynamic loading", *Rock Mechanics and Rock Engineering* **45**, 193–204.
- Li, C. C., Kristjansson, G. & Høyen, A. H. (2016): "Critical embedment length and bond strength of fully encapsulated rebar rockbolts", *Tunnelling and Underground Space Technology* **59**, 16–23.
- Li, C. & Stillborg, B. (1999): 'Analytical models for rock bolts', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **36**(8), 1013–1029.
- Littlejohn, G. S. (1993): "*Overview of rock anchorages*", In: Hudson JA, Brown ET, Fairhurst C, Hoek E, editors. *Comprehensive rock engineering* 4, Pergamon Press, Oxford, England.
- Littlejohn, G. S. & Bruce, D. A. (1977): "*Rock anchors - state of the art*", Foundation publications LTD., Brentwood, Essex, England.
- Morris, S. S. & Garrett, W. S. (1956): "The raising and strengthening of steenbras dam", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 1*, **5**(1), 23–48.
- NVE (2005): "*Retningslinjer for betongdammer*", Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo, Noreg.
- Ongstad, A. & Bergh-Christensen, J. (2010): "*Strekforankring i berg*", Artikkel presentert på Bergmekanikkdagen, Oslo, Noreg.
- Shabanimashcool, M., Olsson, R., Valstad, T., Lande, E. J., Berzins, A., Tuominen, K. & Lapsins, J. (2018): "*Numerisk modellering av forankrede fundamenter for vindturbiner*", Artikkel presentert på Bergmekanikkdagen, Oslo, Noreg.
- Statens vegvesen (2018): "*Geoteknikk i vegbygging*", Statens vegvesen, Oslo, Noreg.
- Stjern, G. (1995): "*Practical performance of rock bolting*", PhD avhandling, Noregs Tekniske Høgskole (NTH), Trondheim, Noreg.
- Wyllie, D. C. (2009): "*Foundations on rock*", 2 edn. E & FN Spon, London, England.