

REMEDY – et BegrensSkade prosjekt

Sluttrapport

NGI rapport 20170774-01-R



Norconsult

GEO
VITA

Multiconsult

RAMBOLL

Hallingdal
Bergboring

ENTREPRENØRSERVICE

Kynningsrud

JETGRUNN

KELLER

VEIDEKKE

SKANSKA

Finans Norge

HWE

Statens vegvesen

BANE NOR



Den synkende by

Oslo har bygget landets dyreste bygg på det eksperter mener er landets dårligste grunn.



#MAVITE
Debatt. Oslos raske vekst krever utbygging. Likevel overses betydningen av systematisk oversikt over byens undergrunn.
Beretninger om en varslet katastrofe?

Byutvikling. Bjørvika synker, uten at det ble forutsett av fagkyndige. Det er det flere grunner til.

REMEDY – et BegrensSkade prosjekt

BegrensSkade-prosjektene har vært bransjeomfattende forskningsprosjekt finansiert av Norges forskningsråd samt private aktører i byggenæringen. Det første BegrensSkade prosjektet startet i 2012, og med avslutningen av REMEDY (BegrensSkade II) har det totalt pågått 10 år av forskning innenfor temaer relatert til skadeforebygging i forbindelse med grunnarbeider.

BAKGRUNN FOR REMEDY

Behov for bygging i undergrunnen har økt kraftig i forbindelse med fortetting av urbane strøk og utbygging av infrastruktur. Utbyggingen skjer i områder med mer utfordrende grunnforhold enn tidligere, f.eks. i havneområder med bløte grunnforhold og på gjenvunnet mark med pågående innsynkning. I tillegg er prosjektene mer komplekse med dypere utgravninger og tunneler tett på og under eksisterende bebyggelse. Prosjektene krever kompetanse for å ivareta nabobebbyggelse og unngå skader.

Kostnaden for slike skader forårsaket av geotekniske arbeider er beregnet til 3 - 8 % av den totale investeringskostnaden i byggeprosjekter (SGI, 2013, Deltares, 2019). De totale estimerte kostnadene for 'geoteknisk skade' oppgår til svimlende 13 milliarder NOK per

år i Norge, hvis man tar utgangspunkt i total omsetning i byggebransjen. Kostnadene dekkes av forsikringsselskaper, eiendomseiere, aktører involvert i utbyggingsprosjektene, og i stor grad statlige etater (med andre ord av det norske samfunnet). Det er et enormt potensial for kostnadsbesparelser ved å redusere antall og omfang av skader forårsaket av grunnarbeider.

BegrensSkade I-prosjektet hadde fokus på kartlegging av skadeårsaker og innsamling av data fra bransjen, og viste at det er stor verdi for bransjen å øke kunnskapen om skader forårsaket av grunnarbeid. REMEDY er en videreføring av forskningsprosjektet BegrensSkade I, som ble avsluttet i 2015.



MÅLSETNING I REMEDY

Et av hovedfunnene i BegrensSkade I var at det ble avdekket at det på generelt grunnlag ofte mangler systematisk vurdering av risiko i prosjekter som omfatter geotekniske arbeider. Usikkerheter og risiko blir vanligvis vurdert indirekte i forbindelse med planlegging og prosjektering, men ikke eksplisitt.

Byggeprosjektene utvikles over tid og går gjennom en planleggingsfase, prosjekteringsfase og byggefase før bygget er ferdig. I de ulike fasene tas det beslutninger som vil påvirke risikoen for skader. I alle faser er det ulike aktører involvert som blir del av og vil kunne påvirke beslutningsprosessen. Figuren nedenfor viser en illustrasjon over byggeprosessens faser, med aktører og typiske beslutninger, som kan påvirke prosjektrisikoen.

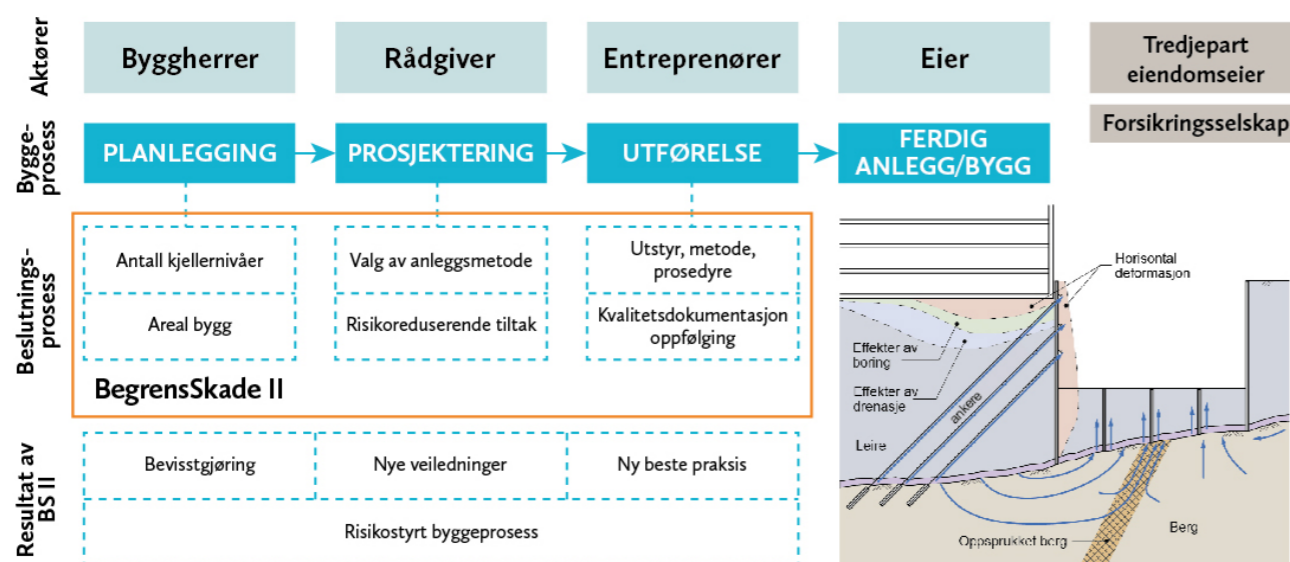
Hovedmålsetningen i REMEDY var å utvikle risikoverktøy for bransjen, for å bedre dokumentere risikovurderinger, for å støtte beslut-

HOVEDMÅLSETNING:

Redusere risiko for skader ved integrering av risikometoder i planlegging, prosjektering og utførelse av grunn- og fundamenteringsarbeider.

ninger i hele byggeprosessen fra planlegging til prosjektering og utførelse, samt forbedre kommunikasjonen mellom alle aktører.

På kort sikt er det en målsetning at verktøy som utvikles skal tas i bruk av bransjen og redusere skaderisiko og kostnader i fremtidige prosjekter. På litt lengre sikt er det en visjon om at arbeidet med risikovurderinger skal være integrert i planlegging, prosjektering og utførelse av geotekniske arbeider.



ARBEIDSPAKKER

I tillegg til arbeid med utvikling av risikoverktøy har det i REMEDY vært fokus på å videreføre arbeid fra BegrensSkade I. Arbeidet i REMEDY er utført innenfor fem arbeidspakker:

WP1 - BORING FOR PELER OG ANKERE

Redusere risiko for vskader ved integrering av risikometoder i planlegging, prosjektering og utførelse av grunn- og fundamenteringsarbeider.

WP2 - DYPE BYGGEGROPER

Sammenstilling av norsk database over målinger rundt dype utgravinger, utarbeidelse av figurer som viser forventede deformasjoner og poretrykksreduksjon avhengig av blant annet anleggsmetode.

WP3 - HYDROGEOLOGISK MODELLERING

Vurdering av drenerasje og poretrykksreduksjon rundt dype utgravinger og muligheter og begrensninger med hydrogeologisk modellering av problemstillingen.

WP4 - VIBRASJONER ÅRSAKET AV ANLEGG SARBEIDER

Det er vurdert vibrasjonseffekter av anleggsarbeider, med spesielt fokus på sprengning og revisjon av grenseverdier for å unngå bygningsskade.

WP5 - RISIKOMETODER OG RISIKOHÅNDTERING

Utvikling av risikoverktøy for å støtte beslutningsprosesser og redusere skaderisiko og kostnader.

PARTNERE

REMEDY har hatt 18 partnere som representerer alle aktører i bygg- og anleggssektoren. Norges Forskningsråd (NFR) støtter arbeidet via programmet "Brukerstyrt innovasjonsarena (BIA)". Finansieringen fra partnerne og NFR har vært avgjørende for realisering av prosjektet og det bransjeomfattende samarbeidet.

REFERANSER:

Deltares 2019. Learning from case studies and monitoring of underground construction works. Reducing failure costs with GeolImpuls. Presentasjon av Associate Professor Mandy Korff, TU Delft/Deltares 2019-06-12.

SGI, 2012. Skadekostnader i byggprosessen – En litteraturgjennomgang. Varia 642, SGI, Linköping. Rapport i prosjektet Effektivare markbyggande.



Bakgrunn

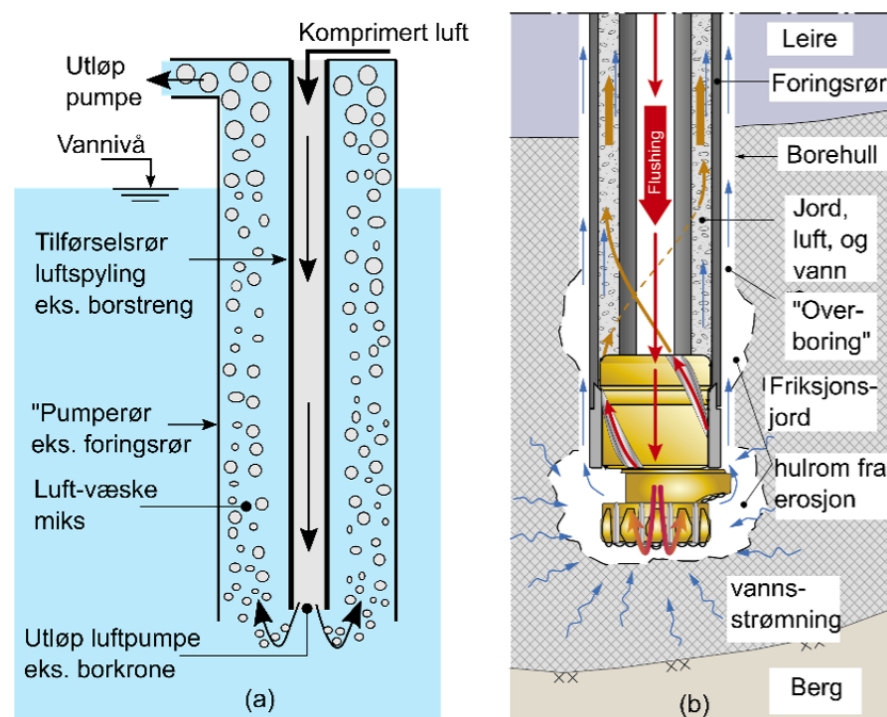
I løpet av de siste 15-20 årene har det i Skandinavia vært en betydelig økning i bruk av peletyper som bores gjennom løsmasser og inn i fast berg, eksempelvis stålkerne- og rørpeler. Dette kommer tydelig frem i pelestatistikk fra Sverige utgitt av Pålkommisjonen (2022). Økningen har trolig vært enda større i Norge og kan blant annet forklares ved at boring muliggjør peling i varierende grunnforhold og gir en sikker innfesting i berg. I tillegg har det skjedd en kontinuerlig utvikling av boreutstyr og økning i dimensjoner på borede rør. Gjennom studier i BegrensSkade I fant Langford et al. (2015) og Karlsrud et al. (2015) en klar indikasjon på at boring av foringsrør for peler og ankere kunne føre til betydelig større setninger rundt byggegrøpene enn tidligere rapporterte studier hadde vist (Peck, 1969; Mana og Clough, 1981; Long, 2001; Karlsrud og Andresen, 2008). Å forstå installasjonseffekter og influens på omgivelsene fra boring er avgjørende for å kunne redusere risiko for skader på nærliggende bygg og infrastruktur.

Gjennom BegrensSkade-prosjektene, og ved hjelp av de mange partnerne, har man kunnet utføre en unik systematisk innsamling og analyse av måledata og erfaringer fra fullskala feltforsøk (Lande et al., 2020), samt en rekke bygge- og anleggsprosjekter i Norge der det har blitt utført boring for peler og/eller forankringer. I BegrensSkade II er det i tillegg utført modellforsøk med boring av minaturpel i sand for å øke kunnskap og forståelse av de fysiske effekter på omkringliggende grunn ved spyling med vann under boring (Lande et al., 2021). Denne rapporten oppsummerer de viktigste resultater og erfaringer som er opparbeidet gjennom arbeider relatert til arbeidspakke I (WP1) i BegrensSkade II.

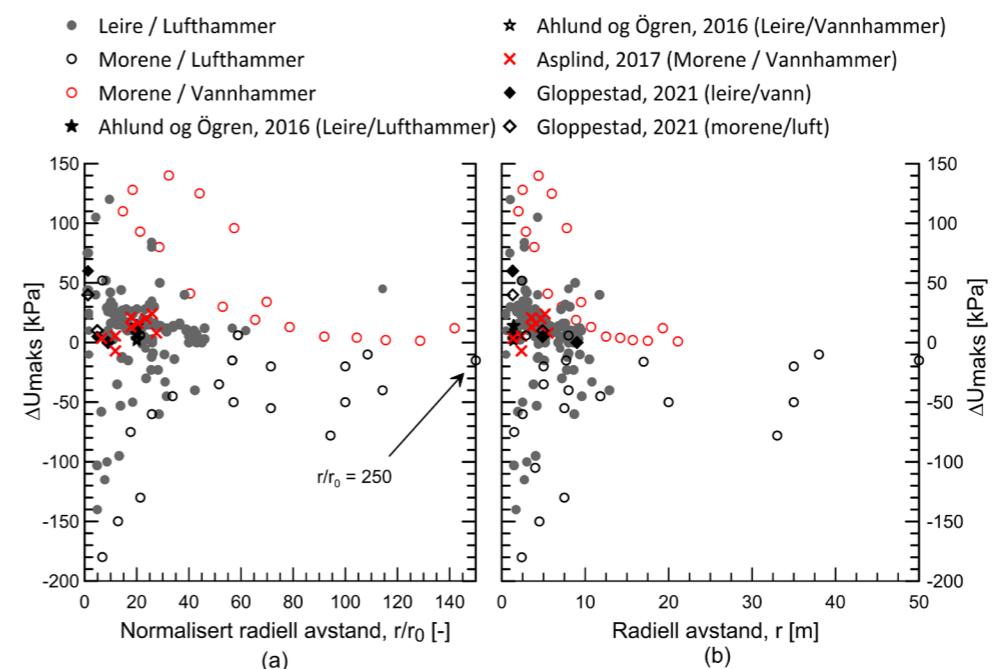
Rapporterte feltforsøk (Lande et al. 2020; Ahlund og Ögren 2016) og prosjektstudier (Konstantakos et al. 2004; Kullingsjö 2007; Bredenberg et al. 2014; Haugen et al. 2015; Sandene et al. 2020) har indikert at boring av foringsrør med luftdrevet senkhammer (DTH-hammer) kan føre til betydelige setninger i omkringliggende grunn umiddelbart etter boring. Hypotesen man har jobbet med i BegrensSkade II har vært at setningene skyldes lokal erosjon og massetap rundt foringsrør, og at denne mekanismen ofte er observert når man har boret i siltige/sandige masser eller friksjonsmasser (morene) over berg. Massetapet er videre antatt å være knyttet til såkalt "mammutpumpe-effekt" (Behringer 1930; Kato et al. 1975) som fører til et undertrykk inne i foringsrør i forhold til poretrykket i grunnen og dermed potensiell vannstrømning inn mot borkrone som kan erodere silt og sand partikler som illustrert i figur 1.

PÅVIRKNING FRA BORING PÅ PORETRYKK

Figur 2 presenterer en sammenstilling av poretrykksmålinger utført i løsmasser ved boring av foringsrør for peler i 10 bygge- og samferdselsprosjekter i Norge. I tillegg er resultater rapportert av Ahlund og Ögren (2016), Asplind (2017) og Gloppestad (2021) inkludert. Figuren viser maksimale endringer i poretrykk (ΔU_{maks}) mot henholdsvis normalisert radiell avstand r/r_0 (a) og avstand i meter (b) mellom poretrykksmåler og aktuelt foringsrør/pel. Det bemerkes at poretrykksmålerne (piezometere) i de aktuelle prosjekt har vært installert til ulike dybder i løsmassene. Det har ellers vært benyttet ulike loggeintervall i de ulike prosjektene, som trolig har medført at man ikke har klart å måle faktiske ekstremverdier i de fleste tilfellene.



Figur 1. Illustrasjon av prinsipp for "Mammutpumpe" (a) og mulig erosjon av friksjonsmasser (silt/sand/grus) lokalt rundt borkrone som følge av boring med luftdrevet senkhammer (b).



Figur 2. Maksimale endringer i poretrykk (ΔU_{maks}) målt ved boring av foringsrør for peler mot normalisert radiell avstand r/r_0 (a) og radiell avstand r i meter (b). Måledata er fra X ulike prosjekter med diameter på foringsrør fra 140 mm til 710 mm, inkludert data rapportert fra to masteroppgaver i Sverige (Ahlund og Ögren, 2016 og Asplind, 2017). Symboler med rød farge er fra boring med vannhammer og svarte symboler er fra boring med lufthammer.

Resultatene kan benyttes som veiledning i forbindelse med valg av boremetode og ikke minst ved evaluering av utførelse av boring og potensial for å skape uønskede setninger i omkringliggende grunn.

Dataene viser følgende generelle trender:

- Boring gjennom leire (solide symboler) fører typisk til betydelige, men midlertidige, poretrykksøkninger (positive verdier for ΔU_{maks}). Det er i samsvar med resultater fra feltforsøk med boring av ankere i bløt leire som ble utført i BegrensSkade I (Lande et al., 2020; Lande et al., 2015b), samt forsøk for å sammenligne luft- og vanddrevet senkhammer i Sverige (Ahlund og Ögren, 2016). Trykkøkningene er vurdert å hovedsakelig skyldes høy borsynk som medfører varierende grad av massefortregning tilsvarende rammede lukkede peler. Effekt av kontinuerlig spyling med vann eller luft ved boring ser ut til å bidra til ytterligere trykkøkninger. Resultatene viser at poreovertrykk dissiperer relativt raskt etter at boring er avsluttet.
- Boring med luftdrevet senkhammer fører typisk til betydelig reduksjon i poretrykk (negative verdier for ΔU_{maks}) i piezometere installert i morene/sand/grus (åpne symboler). Disse resultatene underbygger hypotesen om at boring med luftdrevet borsystem medfører "mammutpumpe-effekt" som illustrert i figur 1 (Bernoulli, 1738; Venturi, 1797). I noen av disse prosjektene har man også målt relativt umiddelbare setninger i omkringliggende grunn under boringen. Erfaringer fra flere prosjekter som er fulgt opp i BegrensSkade-prosjektene tilsier at disse fysiske effektene fra boring med lufthammer generelt øker risiko for setninger i grunnen. Resultatene fra boring med vanddrevet senkborhammer (røde symboler) viser hovedsakelig midlertidige økte poretrykk (positive verdier for ΔU_{maks}), noe som underbygger at metoden ikke medfører tilsvarende pumpeeffekt som luftdrevet borsystem.

- Resultat fra poretrykksmålinger utført i morene/sand/grus med relativt høy permeabilitet viser at poretrykkene generelt reetablerer seg til omtrent referansetrykk kun få timer etter endt boring. Dette samsvarer med resultater fra Lande et al. (2020), Asplind (2017) og Ahlund og Ögren (2016). Poretrykksmålinger i løsmasser som er mer permeable enn leire kan gi indikasjon på om man borer i akvifer med stor vannstrømning. Hvis det er tilfelle, kan det medføre økt risiko for uønsket erosjon under boring og bør dermed tas i betraktning ved vurdering av boreprosedyre og eventuelt endring av boremetode.

Som en del av BegrensSkade II er det samlet inn data fra boring med vanddrevet senkhammer i leire- og moreneavsetninger for å kunne vurdere massebalansen av borkaks, og dermed også risiko for massetap med påfølgende setninger i omkringliggende grunn. Figur 2 presenterer resultat fra disse boringene i dimensjonsløst system som foreslått av Lande m. fl. (2021) basert på modellforsøk. Denne metoden muliggjør sammenligning av mengde borkaks med de mest sentrale boreparametrene ved å introdusere normalisert massebalanse ($M_{c,norm}$) og normalisert strømningsrate (Q_{norm}). Massebalanse er forholdet mellom volum borkaks (in-situ) og det teoretiske volum som foringsrøret opptar i grunnen. Verdi av $M_{c,norm}$ under 1 indikerer at det oppstår noe massefortregning, mens verdi over 1 indikerer et netto massetap (volumtap). Normalisert strømningsrate er definert som følger:

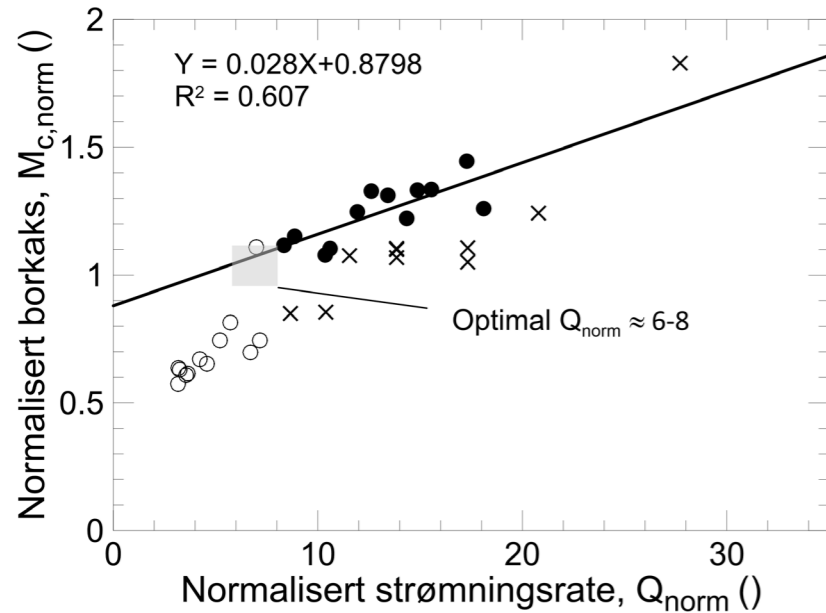
$$Q_{norm} = \frac{Q}{A_{pel} \times V_{pen}}$$

Q er mengde spylevann ("flow rate") benyttet til å drive senkhammer og transportere borkaks opp av borhull gitt i $dm^3/minutt$. A_{pel} er tverrsnittsareal av foringsrør (pelerør) i dm^2 , og V_{pen} er borsynk i $dm/minutt$.

De svarte solide symbolene viser resultat fra boring i morene, mens de åpne sirklene representerer boring gjennom leire. Den svarte linjen viser en lineær tilpasning til dataene for boring i morene. Resultat fra utførte modellforsøk er inkludert for sammenligning. Resultatene fra boring i både leire og morene viser en klar sammenheng i økende volum borkaks med økende grad av normalisert strømningsrate. Det er også i samsvar med modellforsøkene, men det ser

imidlertid ut som resultat for normalisert massebalanse fra boring i morene konsekvent ligger noe over resultatene fra modellforsøk for tilsvarende verdier av normalisert strømningsrate. Dette er vurdert å være relatert til lave spenninger i jorda i modellforsøkene sammenlignet med fullskala boring, effekter av varierende grunnforhold, samt ulike dimensjoner på borkrone (inkludert spylekanaler) for fullskala boring og i modellforsøk.

- Boring i morene × Modellforsøk (sand), Lande et al. 2021
- Boring i leire — Lineær tilpasning (morene)

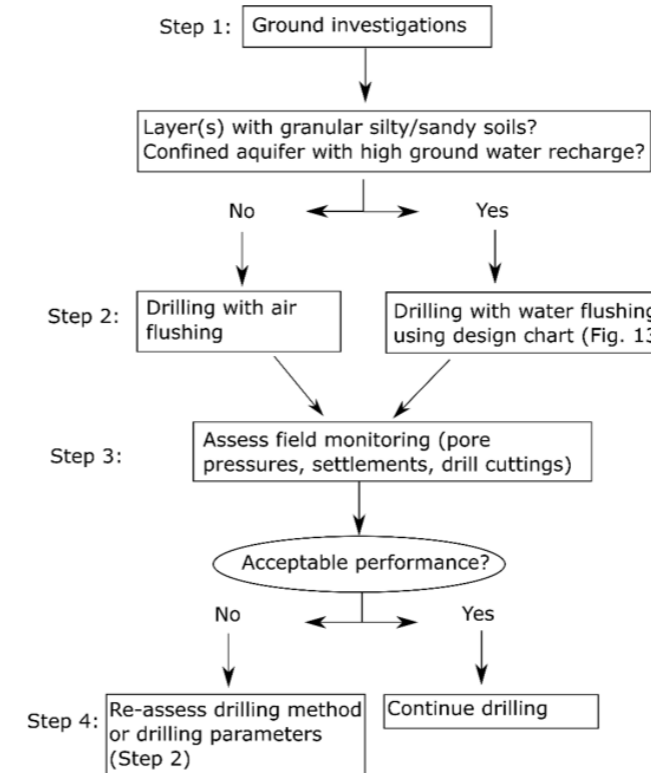


Figur 3. (denne siden) Normalisert strømningsrate (Q_{norm}) mot normalisert massebalanse ($M_{c,norm}$) for foringsrør som er boret med vandrevet senkhammer.

Figur 4. (motsatt side) Foreslått flytdiagram for valg av boremetode for tilfeller der det skal bores i urbane miljø og/eller under krevende grunnforhold.

VALG AV BOREMETODE OG PROSEDYRE BASERT PÅ GRUNNFORHOLD

Basert på den samlede erfaringen fra BegrensSkade I og II er det utarbeidet et enkelt flytdiagram som kan benyttes som veiledning for valg av boremetode under planlegging og gjennomføring av prosjekter, se Figur 4. Metodikken er i hovedsak ment for tilfeller i urbane strøk hvor hensyn til omgivelser/tredjepart vurderes viktig og/eller under spesielt krevende grunnforhold.



De ulike steg i flytdiagrammet er beskrevet i det påfølgende:

- Vurdering av grunnforhold.**
Erfaringer viser at boring for peler og ankere i grunnforhold der man har siltige/sandige masser medfører høy risiko for lokal erosjon og tap av jordvolum rundt foringsrør. Dersom disse lett eroderbare massene befinner seg i en vannførende akvifer eller i forhold med artesisk poretrykk, øker risikoen betraktelig. Det er anbefalt at grunnundersøkelsene utføres med metoder og i et slikt omfang at det er mulig å kartlegge om det er slike "problematiske" forhold. Dette kan medføre økt behov for sammenhengende prøveserier, trykksonderinger, poretrykkmålinger og pumpetester.
- Valg av luft- eller vandrevet borhammer**
Dersom man i GU i steg 1 avdekker lag med siltige/sandige masser i kombinasjon med lukkede akvifer med stor vannstrømning, er det anbefalt å velge vandrevet borhammer som reduserer risiko for uønsket erosjon. Ved bruk av vandrevet borsystem kan man benytte metode for vurdering av massebalanse som vist i figur 3 for tilpasning av boreprosedyre. Dersom grunnforhold tilsier at det ikke er lett eroderbare masser er det mindre risiko og boring med lufthammer kan velges.
- Analysere resultat fra instrumentering.**
Uavhengig om det er valgt luft- eller vandrevet borhammer bør det i forbindelse med oppstart av boring være etablert tilstrekkelig instrumentering til å kunne vurdere påvirkning på omgivelsene. Dette bør minimum omfatte måling av setninger i nærhet til der det bores, fortrinnsvis i flere dybder for å kunne fange opp eventuell erosjon. Poretrykksmålere er også anbefalt.
- Revurdering av boremetode og prosedyrer**
Dersom man gjennom steg 3 kan dokumentere at valgt boremetode og prosedyre gir tilfredsstillende resultat, kan man fortsette uten endringer.



REFERANSER:

Ahlund, R. and Ögren, O. 2016. "Pore pressures and settlements generated from two different pile drilling methods." Master of Science thesis. Dept. of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology KTH.

Asplund, M. 2017. "Pore water pressure and settlements generated from water driven DTH-drilling – a field study." Master of Science thesis. Dept. of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology KTH.

Bernoulli, D. 1738. Hydrodynamica, sive de viribus et motibus fluidorum commentarii: opus academicum ab auctore, dum Petropoli ageret, congestum (In Latin, source ETH-Bibliothek Zürich, RAR 5503).

Gloppestad, J.S. 2021. Nyhavna Øvre – Pelefundamentering omforent med anstrengt områdestabilitet og In-Situ poreovertrykk i grunnen. Geoteknikkdagen 26. november 2021, pp. 50.1-50-25.

Haugen T., Ahmed, T., Olsson, A & Lande, E. J. (2015). Ei8 Knapstad – Retvet, Hobøelva bru. Erfaringer knyttet til boring av stålørpeler. BegrensSkade rapport delprosjekt 4.

Karlsru, K. and Andresen, L. 2008. "Design and performance of deep excavations in soft clays." In Proc., 6th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, VA: Missouri Univ. of Science and Technology.

Lande, E.J., Karlsrud, K., Langford, J. and Nordal, S. 2020. Effects of drilling for tieback anchors on surrounding ground - results from field tests. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 146 (8): 05020007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002274](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002274).

Lande, E.J., Veslegard, G. and Simonsen A. 2015. Forbedring og videreutvikling borede stag og peler. Metoder, utførelse og dokumentasjon. BegrensSkade report 3.4.

Lande, E.J. and Karlsrud, K. 2015. Feltforsøk stagboring. Dokumentasjon av effekter ved boring i leire. BegrensSkade report 4.1.

Lande, E.J., Ritter, S., Tyvold, H. and Nordal, S. 2021. Physical modelling of pile drilling in sand. Canadian Geotechnical Journal. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0373>.

Langford, J., Karlsrud, K., Lande, E.J., Eknes, A.Ø. and Engen, A. 2015. "Causes of unexpectedly large settlements due to deep excavations in clay." In Proc., 16th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Edinburgh, 1115-1120. London: ICE Publishing. <https://doi.org/10.1680/jecsmge.60678.v013.156>.

Karlsru, K., J. Langford, E.J. Lande, G. Baardvik (2015) Vurdering av skader og deformasjoner knyttet til utførelse av stagforankring og borede peler i byggeprosjekt, BegrensSkade delrapport nr. 1+2.4

Kempfert, H.G and Gebresellassie, B. 1999. Effect of anchor installation on settlement of nearby structures in soft soils. Proceedings of the international symposium on geotechnical aspects of underground construction in soft ground, 665-670. Tokyo/Japan 19-21 July 1999.

Konstantakos, D.C., Whittle, A.J., Regalado, C. and Scharner, B. (2004). Control of ground movements for a multi-level-anchored, diaphragm wall during excavation. Proc. 5th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Eng. New York, Paper No. 5.68.

Kullingsjø, A. 2007. "Effects of deep excavations in soft clay on immediate surroundings – Analysis of the possibility to predict deformations and reactions against the retaining system". Doctoral thesis Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2007. ISBN 978-91-7385-002-5.

Mana, A.I. and Clough, G.W. 1981. "Prediction of movements for braced cuts in clays." J. Geotech. Geoenviron. Eng. 107 (6): 759-777.

Peck, R.B. 1969. "Deep excavations and tunneling in soft ground." In Proc., 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 225-290. London: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

Pålkommissionen. 2022. Pålkommissionen (palkommissionen.org)

Rønning, S. 2011. E6 Trondheim-Stjørdal, Parsell Trondheim – Dagsone vest. Geotekniske aspekter knyttet til rørsput, noen erfaringer ved utførelsen. Fjellsprengningsteknikk, bergmekanikk/geoteknikk, 2011 Oslo.

Sandene, T., Ritter, S., and Lande, E.J. 2021. "A case study on the effects of anchor drilling in soft, low sensitive clay and sandy, silty soils." Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground". Elshafe, Viggiani and Mair (eds). 2021 ISSMGE, London, UK. Taylor and Francis publishing. ISBN 978-0-367-33733-9.

Venturi, G.B. 1977. Recherches Experimentales sur le Principe de la Communication Laterale du Mouvement dans les Fluides appliqué a l'Explication de Differens Phenomènes Hydrauliques

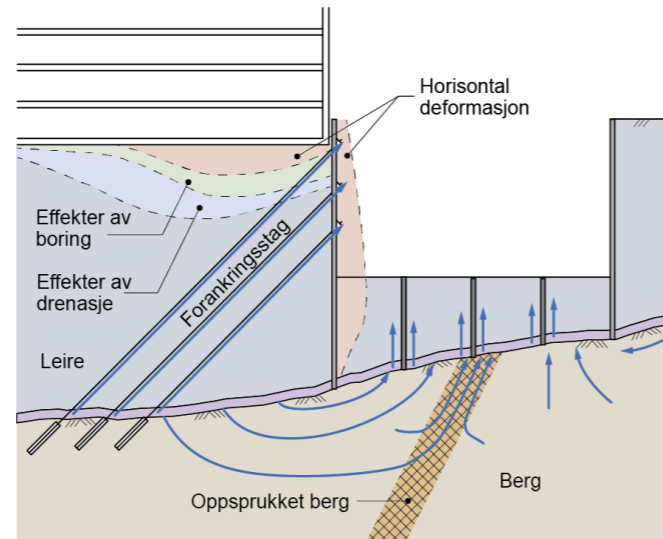
WP2 - DYPE BYGGEGROPER: NORSK DATABASE FOR PORETRYKKSREDUKSJON OG SETNING

Bakgrunn

Ved etablering av dype byggegrop og fundamenter i løsmasser er det uunngåelig å påvirke massene i større eller mindre grad. Arbeider som i tillegg foregår under grunnvannsnivå har dessuten potensiale til å påvirke poretrykksforholdene i berg og løsmasser i stor avstand fra der hvor arbeidene pågår. Summen av påvirkningen kan medføre deformasjoner og setninger som påfører skade på bygninger og infrastruktur. Årsaken til setninger og eventuelt setningsskader kan normalt skyldes tre ulike forhold:

- Elastiske og plastiske deformasjoner i løsmasser som følge av spenningsendringer og avlastning når byggegrop er gravet ut
- Effekter av installasjonsarbeider, som vibrasjoner, massefor-trenging, omrøring og utspyling av løsmasser under ramming eller nedboring av spunt, peler og ankere
- Etablering av drenasjeveier som medfører poretrykksreduksjon med påfølgende konsolideringssetninger, spesielt i bløt leire

Mens det internasjonalt normalt er vesentlig fokus på deformasjoner som følger av selve utgravingen, er det under norske grunnforhold (bløt leire med typisk 5 til 80 m dybde til fast berg) ofte reduksjon av poretrykk ved berg som medfører betydelige setninger, også i stor avstand fra byggegrop. I tillegg kan det ved ugunstig kombinasjon av grunnforhold, metode og utførelse oppstå vesentlige setninger



Figur 1: Ulike bidrag til setninger som følge av byggeprosarbeider

som følge av selve installasjonsarbeidene helt lokalt. Vurdering av skadesaker i BegrensSkade-prosjektet (Karlsruud m.fl. 2015) bekreftet disse årsakssammenhengene ved sammenstilling av måledata fra en rekke byggegrop.



Bygegrop og fundamenteringsarbeider påvirker omgivelsene, avhengig av grunnforhold, byggemetoder og avbøtende tiltak

NORSK DATABASE

I REMEDY-prosjektet er dataene som ble samlet inn i BegrensSkade ytterligere systematisert og beriket med tilgjengelig metadata om grunnforhold og byggemetoder. Det er i tillegg supplert med måledata fra langt flere byggegrop fra typisk norske, bløte grunnforhold. Det er i REMEDY benyttet all mulig måledata som i sum kan bidra til et empirisk erfaringsgrunnlag for hvordan utføres av dype byggegrop og fundamentering i typisk norske grunnforhold med bløt leire kan påvirke omgivelsene. Databasen inkluderer observasjoner fra setningsmålinger, inklinometer og poretrykksmålinger, men fordi setningsmålingene ofte er påvirket av konsolideringssetninger og inklinometermålingene er få, er resultater fra poretrykksmålingene hovedfunnet i arbeidet.

HOVEDFUNN

Setningsdata indikerer at store setninger nært inntil byggegrop ($x/H < 2$ til 4) ofte er relatert til løsninger med borede ankere, eventuelt i kombinasjon med borede peler. Årsaker er mest sannsynlig installasjonseffekter som følge av boringen. Setninger i større avstand fra byggegrop ($x/H > 4$) skyldes i hovedsak konsolideringssetninger grunnet drenasje til byggegropen og reduksjon av poretrykk ved berg. Dette er forårsaket av frigraving av berg eller drenerende lag, men også av installasjon av ankere eller peler som har medført drenasjeveier fra morene og berg til byggegrop.

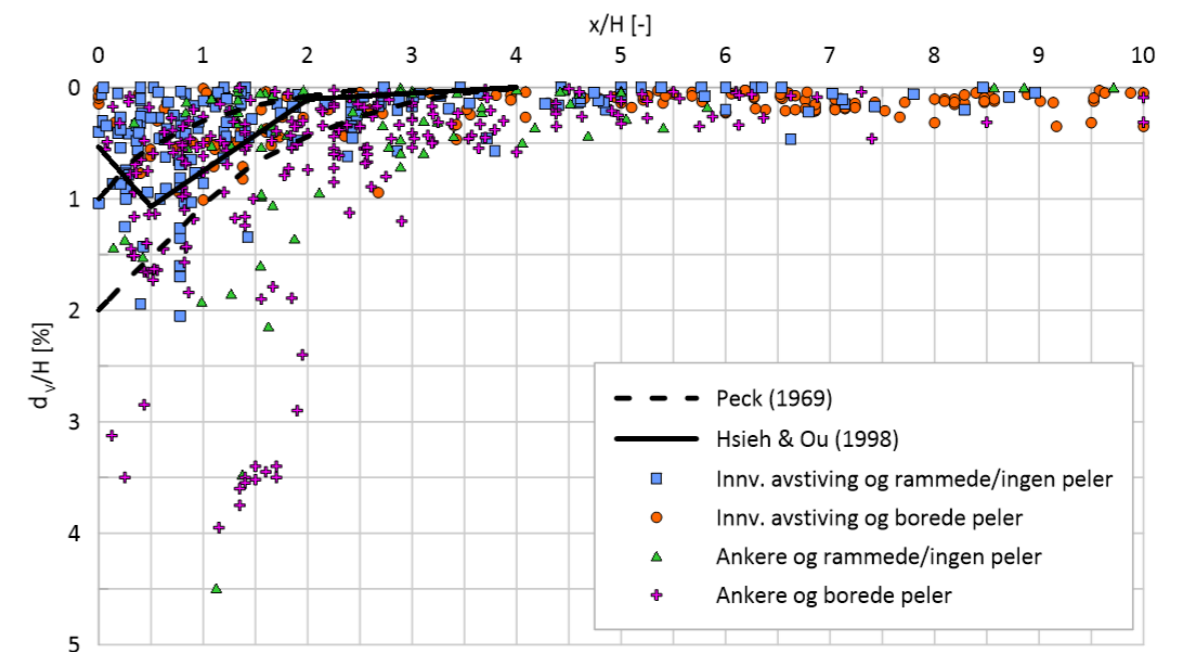
Observasjoner av poretrykk indikerer at byggemetoder som har potensiale til å forårsake drenasje ved bergnivå har høy sannsynlighet å medføre poretrykksreduksjon. Det er en spredning, men trenden i dataene er klar. Bygegrop som har innvendig avstiving, rammede eller ingen peler og heller ikke har frigraving av berg medfører i svært liten grad poretrykksreduksjon i områdene rundt. For å kompensere for midlertidig poretrykksreduksjon er det normalt vanlig å utføre en tetteskjerm i berg (forinjeksjon tilsvarende det som utføres ved tunnelbygging) for å redusere vannlekkasjer. I tillegg vil det vanlig

å installere vanninfiltrasjonsbrønner i berg, som midlertidig tiltak i anleggsperioden, for å pumpe inn vann slik at poretrykksnivået opprettholdes til tross for lekkasjer. Målinger i databasen indikerer at slike tiltak har svært god effekt, med kanskje 30-60 % reduksjon i poretrykksfall sammenlignet med hva som ville forventes av poretrykkreduksjon uten tiltak. Det er i tillegg vist at det er av stor betydning om det eksisterer et lag av vannførende løsmasser over berg eller ikke.

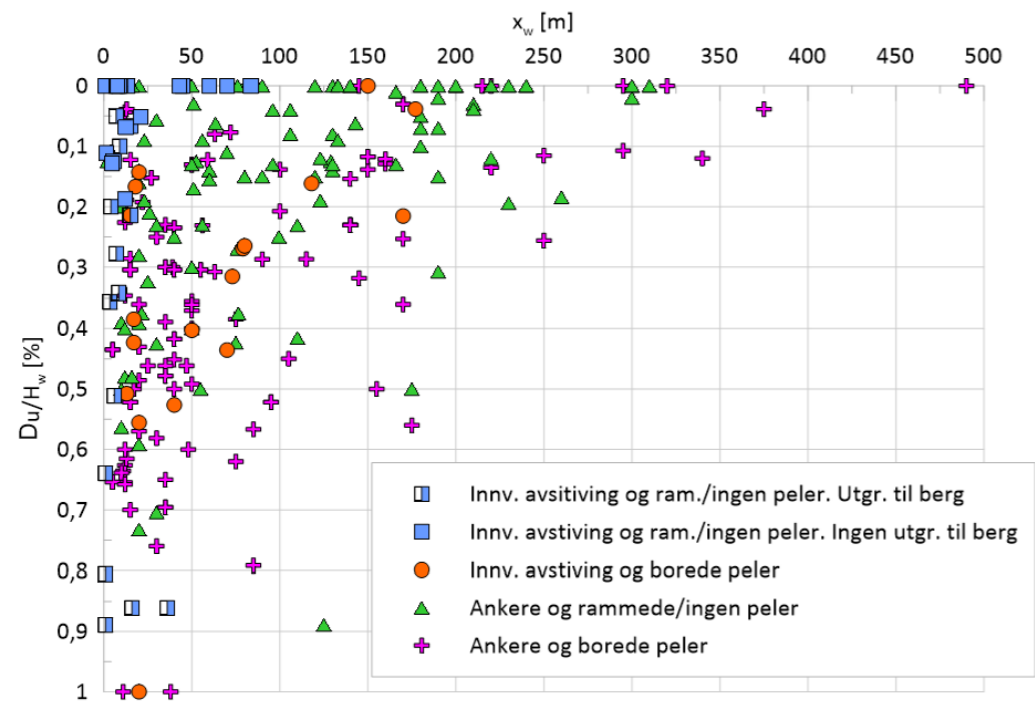
Problemstillingen er kompleks og det vil være utfordrende å gjøre detaljerte vurderinger med høy presisjon for et nytt prosjekt. Dataene som er samlet inn bidrar allikevel bidra i vesentlig grad til å øke kvaliteten på risikovurderinger som kan utføres spesielt i tidligfasen til et prosjekt. Databasen vil gi et bedre grunnlag for:

- Å kunne kvantifisere effektene en byggegrop kan ha på omgivelsene basert på erfaringsdata, også som et godt verktøy i kommunikasjon til beslutningstagere som ikke har geoteknisk fagkompetanse
- Å ta kunnskapsbaserte valg for metode for avstiving og pelefundamentering og basert på mulige konsekvenser og stedlige grunnforhold. I tillegg kan konsekvensen av dybden av byggegropen vurderes.
- Å vurdere behov og omfang av avbøtende tiltak, samt kontrollopplegg

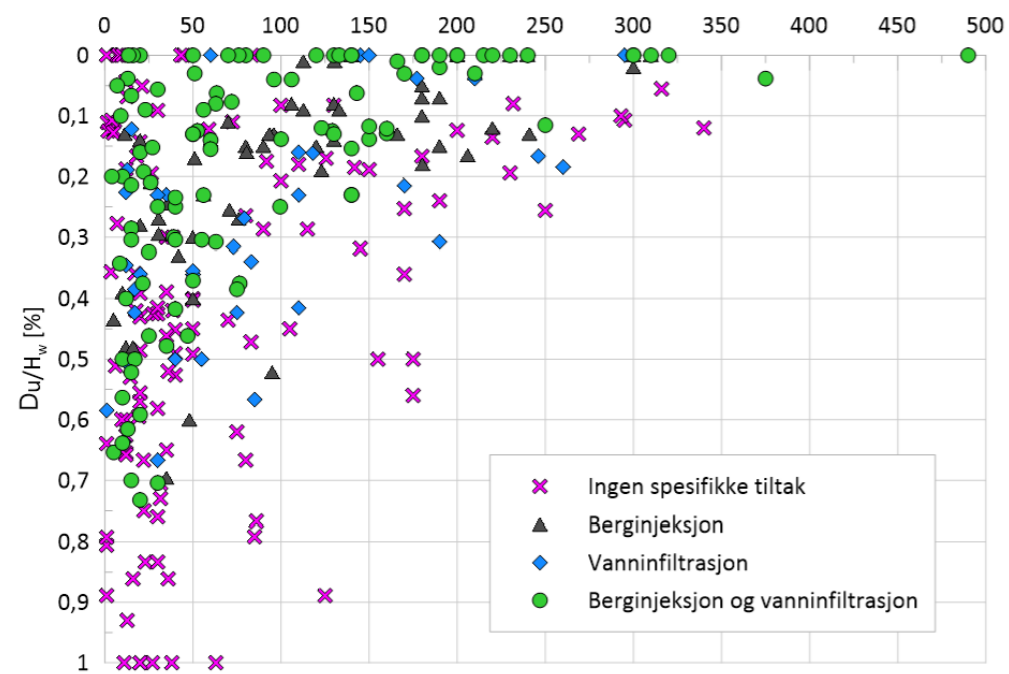
Nedenfor er noen nøkkelfigurer fra databasen presentert (figur 2-4), som viser sammenheng mellom forventet setning med avstand fra byggegropen og forventet poretrykksreduksjon med avstand fra byggegropen. I figurene er data systematisert med hensyn til anleggsmetode samt tiltak som er utført i de ulike prosjektene. Det vises for øvrig til artikkel hvor databasen er presentert i sin helhet med inngående analyse av dataen (Sandene mfl., 2023).



Figur 2: Observasjoner av setninger og avstand fra byggegrop normalisert mot utgravningsdybde. Avstivings- og fundamenteringsmetoder.



Figur 3: Poretrykksmålinger normalisert mot utgravingsdybde under grunnvannstand mot avstand fra byggegrøp, med avstivings- og fundamenteringsmetoder



Figur 4: Målt poretrykksreduksjon normalisert mot utgravingsdybde under grunnvannstand mot avstand fra byggegrøp og tiltak mot reduksjon



REFERANSER:

Karlsrud, K., Langford, J., Lande, E. J., Baardvik, G. (2015). Vurdering av skadeårsaker og deformasjoner knyttet til utførelse av stagforankringer og borede peler i byggegrøper. Begrensningsdelrapport nr 1+2.4.

Sandene, T., Langford, J., Ritter, S., Long, M., Kahlström M., Ritter, S. (2023). A Norwegian database for deep excavations in soft clay with focus on installation effects and groundwater drainage (sendt inn til review). Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering

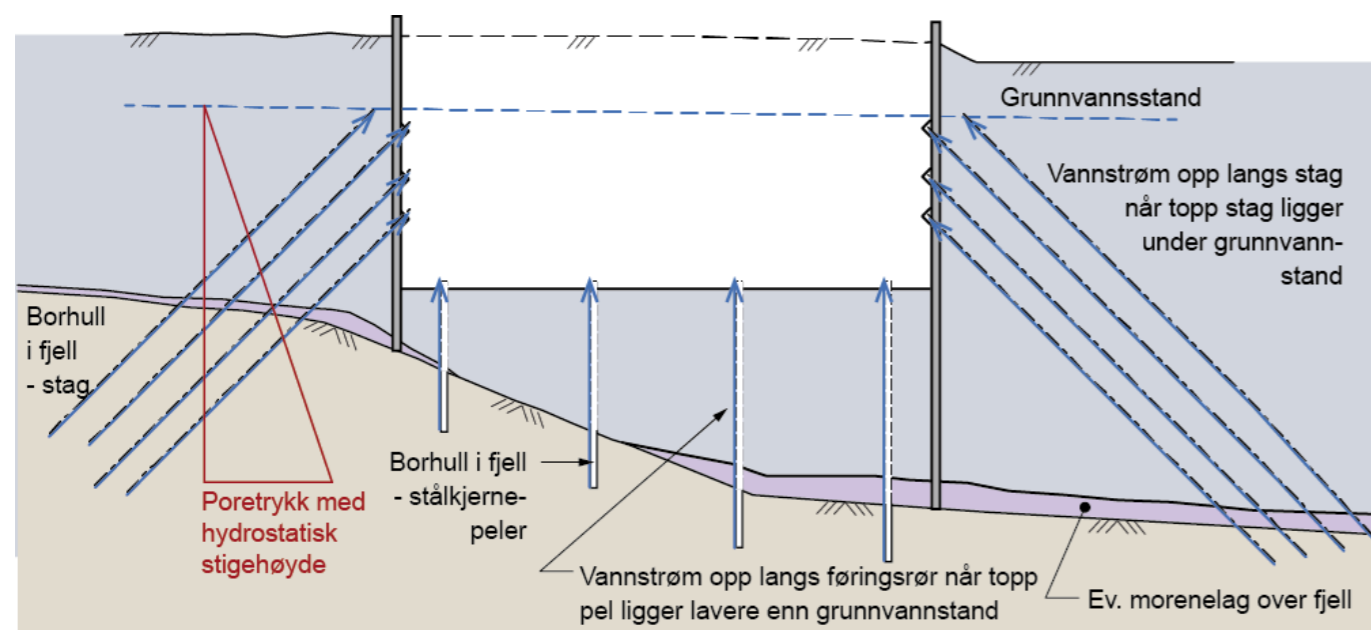
Bakgrunn

Poretrykksreduksjon kan oppstå som følge av etablering av byggegrop og utførelse av grunnarbeider som skaper dreneringsvei fra permeable lag under leiren (Figur 1). I norske grunnforhold med bløt, marin leire over lukkede akviferer kan det oppstå poretrykksreduksjon i stor avstand, flere hundre meter, fra byggegrop (BegrensSkade, 2016).

Akseptkriterier for maksimalt tillatt størrelse for poretrykksreduksjon må vurderes utfra setningsømfintligheten av omkringliggende bebyggelse og infrastruktur. Det vises også til aktsomhetsplikten i Vannressursloven.

For å unngå skader på bebyggelse må det vurderes behov for, planlegges og prosjekteres med tiltak i forbindelse med dype utgravinger. Sammenstilling av måledata fra norske prosjekter gir et godt grunnlag for vurdering av hva som kan forventes av poretrykksreduksjon i nye prosjekter (det vises til figurer sammenstilt i WP2, samt Sandene et al. 2023). Vurderingen må utføres utfra stedlige grunnforhold og hydrogeologiske forhold, dybde for aktuell byggegrop, samt hvilke anleggsmetoder og omfang av tiltak som er planlagt. Likevel er spredningen i erfaringsdataen betydelig og det vil være en usikkerhet kring utfallet i ethvert prosjekt. I enkelte prosjekter brukes hydrogeologisk numerisk modellering for å vurdere effekten av ulike anleggstekniske valg og skadebegrensende tiltak. Det har til dels vært uenighet i bransjen hvor pålitelige slike modeller er, og hvordan modelleringsresultat bør brukes til.

Akseptkriterier for maksimalt tillatt størrelse for poretrykksreduksjon må vurderes utfra setningsømfintligheten av omkringliggende bebyggelse og infrastruktur. Det vises også til aktsomhetsplikten i Vannressursloven.



Figur 1: Mulige scenarier for drenering til byggegrop.

For å unngå skader på bebyggelse må det vurderes behov for, planlegges og prosjekteres med tiltak i forbindelse med dype utgravinger. Sammenstilling av måledata fra norske prosjekter gir et godt grunnlag for vurdering av hva som kan forventes av poretrykksreduksjon i nye prosjekter (det vises til figurer sammenstilt i WP2, samt Sandene et al. 2023). Vurderingen må utføres utfra stedlige grunnforhold og hydrogeologiske forhold, dybde for aktuell byggegrop, samt hvilke anleggsmetoder og omfang av tiltak som er planlagt. Likevel er spredningen i erfaringsdataen betydelig og det vil være en usikkerhet kring utfallet i ethvert prosjekt. I enkelte prosjekter brukes hydrogeologisk numerisk modellering for å vurdere effekten av ulike anleggstekniske valg og skadebegrensende tiltak. Det har til dels vært uenighet i bransjen hvor pålitelige slike modeller er, og hvordan modelleringsresultat bør brukes til.

OMFANG AV ARBEID I REMEDY

I REMEDY er det undersøkt nærmere hvordan hydrogeologisk numerisk modellering kan benyttes i anleggsprosjekt. Leveransene i delprosjektet inkluderer:

D3.1 State of Art Report (REMEDY, 2022a)

Dette er et litteraturstudium om problemstillingen med drenering til byggegrop, egnede grunnundersøkelser, hydrogeologisk modellering og skadebegrensende tiltak.

D3.2 Grunnvannsmodellering som et verktøy for å estimere setninger rundt byggeproper (REMEDY, 2022b)

Rapporten er en case-studie som har sett på usikkerheter og verdien av å bruke grunnvannsmodellering som et verktøy for byggeprosjekt hvor det skal utføres omfattende grunnarbeid.

D3.3 Numerical hydrogeological modelling of drainage to an excavation (REMEDY, 2022c)

Denne rapporten foretar seg utviklingen av en konseptuell modell med tilhørende hydrogeologisk modellering av en fremtidig byggegrop i Oslo ved bruk av SEEP/W 2D. Hensikten med modelleringen er å undersøke effekten av drenering fra installasjon av stålkjerner-peler og avbøtende tiltak ved tetteskjerm til varierende dybde under planlagt gravenivå.

D3.4 Using hydrogeological numerical modelling to predict drainage to excavations – findings from four Norwegian case studies (REMEDY, 2022d)

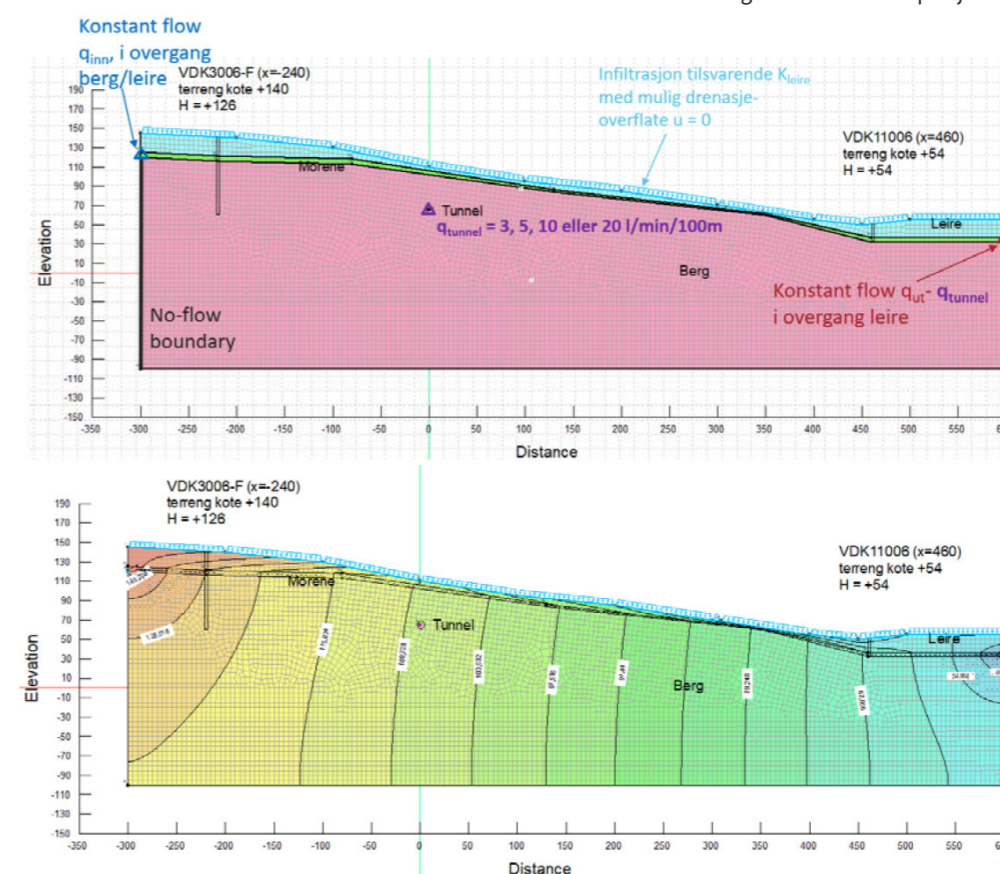
Rapporten diskuterer og oppsummerer konklusjonene fra arbeidspakken rundt bruken av hydrogeologisk modellering for å predikere drenering til en byggegrop i typisk norske grunnforhold.

HYDROGEOLOGISK MODELLERING

I case-studiene ble grunnvannsstrømning modellert i antatt representative to-dimensjonale snitt av de ulike prosjektene hvor det enten hadde foregått eller var planlagt anleggsarbeider med byggegrop (tre caser) eller bergtunnel (én case). Formålet for case-studiene var noe forskjellig, men for alle ble modellens evne til å forutsi realistisk eller målt poretrykksreduksjon undersøkt. Noen generelle funn fra prosjektene er at:

- Valg av grensebetingelser og det drenerende lagets hydrauliske konduktivitet K er de to faktorene som fører til størst usikkerhet i resultatene.
- Forenklet antagelse av grunnvannsstrømning i berg med kontinuums materiale fører til at det er særlig stor usikkerhet knyttet til influensområdet størrelse.
- Samsvaret mellom simulerte resultater og målte/forventede verdier varierte fra case til case. Det kanskje mest oppsiktsvekkende var en betydelig forskjell i resultat mellom to uavhengige modeller som ble laget for samme case. To rådgivere satte opp hver sin modell slik hvert team mente var mest realistisk. Beregnet poretrykksreduksjon i de to modellene hadde en forskjell på 1 til 4 m, nok til å ha mye å si for de forventede terrengsetninger over tid. Hovedforskjellen mellom de to modellene gjaldt først og fremst antatte grensebetingelser ikke forskjellig konduktivitet. For begge modeller ble valg av grensebetingelser vurdert som fornuftige.

Gjennom arbeidet med de fire casene og andre lignende prosjekt, fremstår det som at de fleste prosjekt og grunnforhold må anses som komplekse mht. hydrogeologi, mye knyttet til begrensninger i datagrunnlaget (grunnundersøkelser og målinger av in-situ poretrykks- og grunnvannsnivåer). Det er ikke grunn til å tro at usikkerheten som introduseres av i forenklinger i forbindelse med hydrogeologiskmodellering er større i andre prosjekt enn i de case som er vurdert i REMEDY.



Figur 2: Eksempel på to-dimensjonell numerisk modell i SEEP/W.

Ytterligere grunnundersøkelser kunne ha medført at av valg av grensebetingelser ble mer harmonisert, men dette illustrerer noe av modelleringens største utfordring:

Det er som regel umulig å ha fullstendig oversikt over geologien og grunnvannsstrømmingen for hele influensområdet til en byggegrop eller tunnel. Dette gjør at det, nesten uansett hvor mye grunnundersøkelser som utføres, alltid vil være usikkerheter i den numeriske modelleringen. Det er viktig å utføre sensitivitetsanalyser for å vurdere hvordan ulike parametere og grensebetingelser påvirker resultatene.

Det er ikke dermed sagt at hydrogeologisk modellering ikke har noen verdi i anleggsprosjekt, men det er viktig å være bevisst på usikkerheter i resultatene, samt sikre at disse blir kommunisert videre til de ulike aktørene i prosjektet.

Usikkerheter kan fremfor alt reduseres ved å innhente et godt grunnlag om grunnforholdene, spesielt med hensyn til potensialet for drenerasje til planlagt byggegrop. Å opparbeide seg områdeforståelsen, å utarbeide den konseptuelle modellen, er som regel den mest omfattende oppgaven innenfor modellering. Det er også denne prosessen som avdekker graden av usikkerhet knyttet til grunnforhold – hva vet vi, hva vet vi ikke, og hva mer bør vi vite? Det er nødvendig å kartlegge lagdeling, løsmassetykkelsen under og i området rundt byggegropen, den hydrauliske konduktiviteten til permeable lag under leirlagen, samt bergmassens sprekesoner. For byggegrop er det ikke uvanlig at det er begrenset med grunnundersøkelser i berg, og også begrenset med informasjon om løsmassene, med mindre prosjektet ligger i et område med eldre grunnundersøkelser. Det kan være store usikkerheter knyttet til den hydrauliske konduktiviteten av berg og løsmassene. Lugeon-test, pumpe-test, slugtest er eksempler på forsøk som kan brukes for å bestemme den hydrauliske konduktiviteten. I tillegg har det blitt stadig mer vanlig å ta i bruk geofysiske metoder som blant annet kan indikere lagdeling, løsmassetykkelse/bergoverflate og vannførende sprekesoner. Uansett omfang av datagrunnlag er det viktig å gjennomføre sensitivitetsanalyse ved hydrogeologisk modellering, av antatt konduktivitet og grensebetingelser som kan ha vesentlig betydning for resultatet.



Figur 3: Lekkasje staggjennomføring innvendig

TILTAK FOR Å REDUSERE KONSEKVENSENE AV DRENASJE TIL BYGGEGRUP

Når man har bestemt seg for å grave ut en byggegrop, med bruk av konstruksjonsmetoder som kan skape dreneringskanaler fra morene eller berg, er det viktig å vurdere om det er behov for å iverksette tiltak for å begrense poretryksreduksjonen for å unngå uønskede skader på omkringliggende bygg og infrastruktur. De mulige tiltakene kan grovt deles inn som injeksjon og vanninfiltrasjon. Injeksjon i berg- og løsmassene og for tetting av åpninger i byggegropen, tar sikte på å begrense innstrømmingen til gropen. Ved vanninfiltrasjon pumpes det vann ned i berget og/eller morenen med sikte på å opprettholde poretrykket. Basert på modelleringsarbeidet og litteraturstudiet, samt diskusjoner med hydrogeologer i bransjen, fremstår hydrogeologisk modellering som et godt verktøy for å:

- Opparbeide seg en helhetlig forståelse av de hydrogeologiske forholdene i prosjektområdet, og
- Synliggjøre eventuelle kunnskapshull om viktige lokale forhold og dermed behovet for ytterligere grunnundersøkelser

Uavhengig av om det er planlagt hydrogeologisk modellering anbefales det at man allerede i forprosjekt tar utgangspunkt i oppdatert erfaringsdatabase med poretryksreduksjoner for tidlig kartlegging av prosjektrisiko, gitt ulike valg av konstruksjonsmetoder, antall kjellernivåer, osv.

REFERANSER:

- BegrensSkade. (2016). Begrensning av skader som følge av grunnarbeider - Sluttrapport.
- REMEDY. (2022a). Drainage to excavations - State-of-Art report. Report 3.1.
- REMEDY. (2022b). Grunnvannsmodellering som et verktøy for å estimere setninger rundt byggegrop. Report 3.2.
- REMEDY. (2022c). Numerical hydrogeological modelling of drainage to an excavation. Report 3.3.
- REMEDY. (2022d). Using hydrogeological numerical modelling to predict drainage to excavations – findings from four Norwegian case studies. Report 3.4.



Figur 4: Lekkasje staggjennomføring utvendig svetting



WP4 - VIBRASJONER FRA ANLEGGSVIRKSOMHET – GRUNNLAG FOR REVISJON AV NORSK STANDARD 8141

Bakgrunn

Anleggsvirksomhet som sprengning, peling, kompaktering og anleggstrafikk gir vibrasjoner i grunnen som kan skade byggverk og muligens også utløse skred i sensitive masser. For å unngå skader på byggverk er tillatte vibrasjonsnivåer regulert av Norsk Standard 8141 Del 1, mens standardens Del 3 gir veiledende grenseverdier for vibrasjoner fra sprengning for å unngå utløsning av skred i kvikkleire. Innenfor REMEDY er det utført forskning for å forbedre grunnlaget innfor revisjon av standarden.

HVOR MYE VIBRASJONER TÅLER EN BYGNING?

Påstander om bygningskader er vanlige, men det er sjelden at skadene kan knyttes til vibrasjoner fra anleggsvirksomhet, selv i tilfeller med relativt store overskridelser av grenseverdiene. Dette indikerer at dagens grenseverdier kan være unødvendig strenge. For strenge grenseverdier kan lede til forsinkelser og økte kostnader og det er derfor viktig at grenseverdiene korrekt avspeiler skadepotensialet. Det finnes lite nyere forskning på dette området og det savnes spesielt informasjon om hvilken roll vibrasjonenes frekvensinnhold spiller for oppkomst av skader.



Sprengningsskade på bygning. Foto Multiconsult/Thor Watne

SPRENGNINGSFORSØK

For å få bedre kunnskap om sammenhengen mellom vibrasjoner og bygningskader er det utført to instrumenterte sprengningsforsøk. Forsøkene ble utført i samarbeide med lærere og elever ved anleggsmaskinførerlinja ved Våler videregående skole i Spjulsåsen steinbrudd i 2018 og 2020. Utførelsen av felttestene var finansiert av Vegdirektoratet, Bane NOR, Maskinentreprenørenes Forbund, Forsvarsbygg og Entreprenørforeningen Bygg og Anlegg, mens databearbeidelse og analyse av alle resultater er utført innenfor REMEDY. Se også REMEDY rapport Blasting tests (NGI 2021)

Det ble oppført tre testbygninger i steinbruddet, én med vegger i plasstøpt betong og to med vegger av Leca-blokker. Betongbygningen og én av Leca-bygningene ble fundamentert på et tynt lag av komprimert pukk på berg, mens den andre Leca-bygningen stod på en fylling, etablert av godt komprimerte masser fra steinbruddet. Bygningene ble instrumentert med vibrasjonsmålere og tøyningssivere i flere punkter og det ble også målt vibrasjoner på berg og i fyllingen.

Forsøkene var designet slik at vibrasjonsbelastning på bygningene økte mellom hver salve (minskende avstand og økt sprengstoffmengde). Totalt ble det under de to forsøkene sprengt 363 hull fordelt på ni salver. Sprengstoffmengden per salve varierte fra 7 kg og 1486 kg og lademengde pr. intervall fra 2 til 48 kg. Mellom hver salve ble bygningene inspisert grundig for å registrere eventuelle skader.

Forsøkene viste følgende:

- Bygningene ble utsatt for vibrasjonsverdier mer enn fem ganger høyere enn grenseverdien i dagens standard uten at det oppsto synlige skader. Dette indikerer at grenseverdiene for bygninger fundamentert på berggrunn og på godt komprimert stive løsmasser i dagens standard kan justeres noe oppover.
- Grenseverdiene i dagens standard er ikke frekvensavhengige, men frekvensen er indirekte tatt hensyn til ved ulike faktorer som inngår i beregningen av grenseverdien. Sprengningsforsøkene viste dominerende frekvenser som til dels avvok kraftig fra hva som er forutsatt i grunnlaget til disse faktorene.
- Vibrasjonenes dominerende frekvens varierer stort avhengig av hvilken metode som benyttes for å bestemme frekvensen, med en distinkt forskjell mellom metoder som bestemmer frekvensen i et kort intervall rundt høyeste toppverdi og metoder som benytter hele vibrasjonssignalet for å bestemme frekvensen. Dette viser på vanskeligheter ved å benytte frekvensavhengige grenseverdier som i bl.a. Amerikansk og Brittisk Standard.

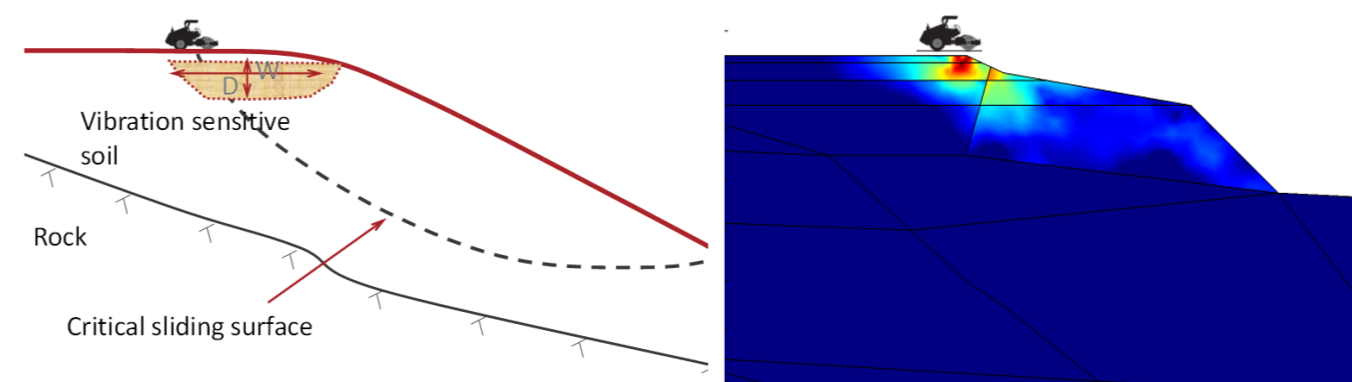
Med resultatene fra sprengningsforsøkene som grunnlag er det utarbeidet en revidert NS 8141-1, utgitt og godkjent 2022 .

EFFEKT AV SPRENGNING FOR UTLØSNING AV SKRED

Norsk Standard 8141 Del 3 gir veiledende grenseverdier for vibrasjoner fra sprengning for å unngå at vibrasjoner fra sprengning utløser skred i kvikkleire. Det er noe usikkerhet rundt grunnlaget for disse grenseverdiene og også en bekymring for at andre anleggskilder som f.eks. vibrokomprimering, med mange repeterende sykler, skulle kunne indusere store nok belastninger til å forårsake skred i kvikkleire. Slike kilder omfattes i dag ikke av standarden.



Sprengningsforsøk i Spjulsåsen steinbrudd i 2020. Testbygg i Leca blokker på fylling. Foto: NGI



Analyse av effekt av vibrasjonskomprimering på skråningsstabilitet

I REMEDY er det utviklet et numerisk verktøy for å evaluere effekten av vibrasjonskomprimering på skråningsstabilitet. Beregninger med verktøyet indikerer at vibrasjoner fra vibrasjonskomprimering kan bidra til utløsning av skred. Det er også tatt frem anbefalinger om hvordan sikker vibrasjonskomprimering kan utføres i nærheten av skråninger med lav stabilitet og sensitive løsmasser i grunnen. Se også Remedy rapport Effect of vibrations on slope stability (NGI 2019). Arbeidet med å revidere NS 8141-3 vil begynne høsten 2022 med arbeid utført i bl.a. Remedy som grunnlag.

REFERANSER:

- Remedy (2021). Vibration induced damage due to construction work – Blasting tests. Report 4.2.
- Remedy (2019). Vibration induced damage due to construction work – Effect of vibrations on slope stability. Report 4.3.
- NS8141-1:2022 Vibrasjoner og støt – Veiledende grenseverdier for bygge- og anleggsvirksomhet, bergverk og trafikk. Del 1: Virkning av vibrasjoner og lufttrykkstøt på byggverk, inkludert, inkludert tunneler og bergrom
- NS8141-3:2014. Vibrasjoner og støt – Veiledende grenseverdier for bygge- og anleggsvirksomhet, bergverk og trafikk. Del 3: Virkninger av vibrasjoner fra sprengning på utløsning av skred i kvikkleire.

WP5 - EXCEL-BASERT VERKTØY FOR RISIKOHÅNDTERING AV GEOTEKNISKE ARBEIDER

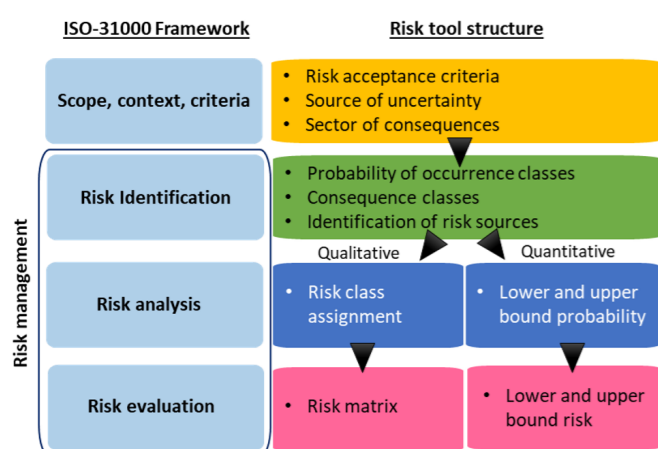
Bakgrunn

Det kvalitative risikovurderingsverktøyet, utviklet i BegrensSkade I, har blitt oppdatert til å inkludere kvantitativ risikoanalyse. Verktøyet bidrar til hovedmålet til REMEDY med å utvikle praktiske verktøy for risikovurdering og industrien, for å hjelpe beslutningstaking. Verktøyet er programmert i Visual Basic for Applications (VBA) og implementert i Excel for å forbedre brukervennligheten. Prosedyren med å bruke verktøyet er organisert i trinn som følger risikostyringsprosessen beskrevet i ISO 31000:2018: kontekstdefinisjon, risikoidentifikasjon, risikoanalyse og risikoevaluering (Figur 1).

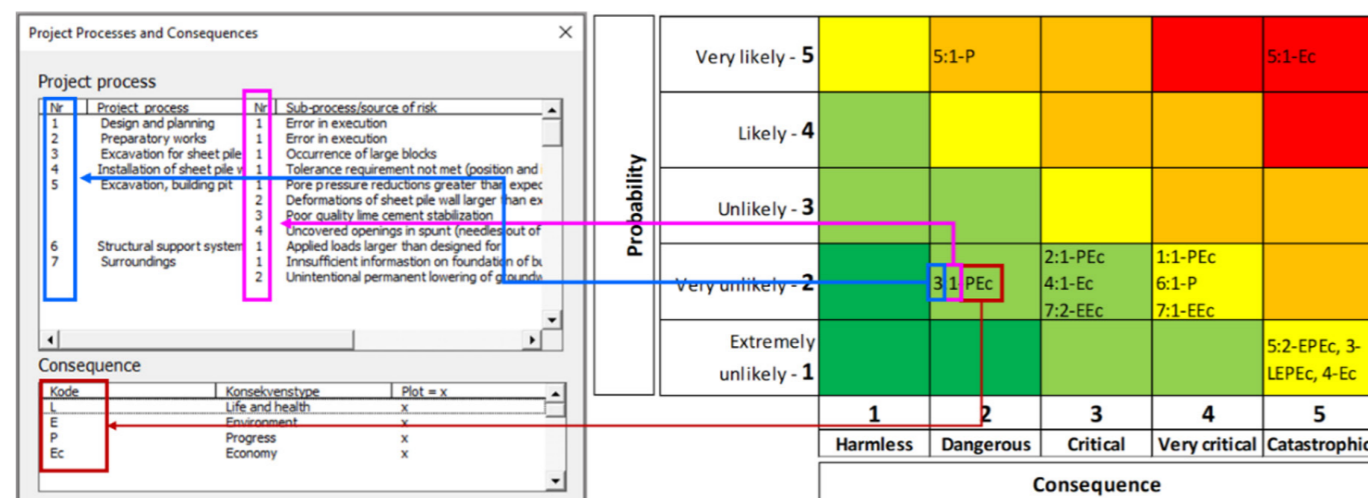
I trinn 1 må formålet med analysen og konsensus om de tolerable risikonivåene avklares. I dette trinnet defineres kildene til usikkerhet og sektorene hvor konsekvenser kan oppstå. I verktøyet er sannsynligheten for at en uønsket hendelse kan inntreffe delt inn i fem klasser i henhold til NS 5815 - "Risikovurdering av byggearbeider". Konsekvensene på grunn av en risikokilde er også delt inn i 5 klasser avhengig av alvorlighetsgrad (fra "ekstremt usannsynlig" til "svært sannsynlig"). I trinn 2 utføres risikoidentifikasjon hvor brukeren må definere alle prosjektprosesser, med delprosesser som kan forårsake uønskede hendelser eller potensielle trusler (Figur 2). Etter risikoidentifikasjon kan brukeren velge å utføre en kvantitativ eller semikvantitativ risikoanalyse i henhold til informasjonen som er tilgjengelig (trinn 3).

I den kvalitative prosedyren kvantifiseres sannsynligheten og konsekvensen for alle risikokilder med en verdi fra 1 til 5, i samsvar med sannsynlighets- og konsekvensklassene beskrevet ovenfor. I trinn 4 gjennomføres en risikoevaluering for alle definerte prosjektprosesser. Deretter evalueres alle prosesser i en risikomatrix, hvor sannsynlighetsklasser og konsekvensklasser plottes (Figur 2). Hver risikokilde vises i matrisen med følgende kode: #P: #S-K hvor:

- #P = Prosjektprosessnummer;
- #S = Delprosessnummer;
- K = Kode for konsekvenstypen. For risikokilder som genererer flere konsekvenser i ulike sektorer, er flere bokstaver plottet.



Figur 1. ISO 31000:2018 Risikostyringsramme og risikoverkøystruktur



Figur 2: Forklaring av risikokodens betydning i matrisen.

I tillegg til funksjonaliteten for en kvalitativ risikoanalyse, støtter verktøyet også en semi-kvantitativ risikoanalyse. Den uttrykker risikoen på en kvantitativ (f.eks. monetær) måte for en eksplisitt risikovurdering. Den kvantitative risikoanalyseprosedyren er integrert i verktøyet for å tillate en sømløs overgang fra kvalitativ til kvantitativ analyse (se Figur 1). Egendefinerte funksjoner ble utviklet for å konvertere kvalitative verdier til kvantitative. Kvantitative estimater for sannsynligheter og konsekvenser innhentes basert på klasser som er spesifisert i den kvalitative analysen. Resultatet av denne prosedyren er en intervallbasert risikoanalyse (figur 3).

Verktøyet har vært brukt i flere prosjekter. De siste oppgraderingene forenkler og forbedrer bruken ytterligere, og utvider forhåpentligvis også bruken i bransjen. Verktøyet kan lastes ned fra prosjektets nettside: <https://www.ngi.no/en/projects/remedy/> (under fanen Reports and publications).

Foreløpig er bare den kvalitative prosedyren validert og er tilgjengelig for nedlasting. Den kvantitative prosedyren, etter en testperiode, vil bli formelt frigitt og integrert i verktøyet.



Figur 3: Intervallbasert kvantitativ risikovurdering basert på nedre og øvre grense sannsynligheter.

GIS-BASERT VERKTØY FOR SÅRBARHETS-VURDERING AV GEOTEKNISKE ARBEIDER: GIBV-METODEN

GIBV-verktøyet er utviklet for vurdering av risiko for bygningsskade i forbindelse med planlegging av dype utgravninger og tunneler. GIBV står for Ground-work Impact (GI) og Building Vulnerability (BV). Det vil gi en indikasjon på størrelsen av forventede setninger, og i sammenheng med bygningsinfo vil det gi indikasjon på bygningsskade klasse. Verktøyet gir ingeniørteamet god oversikt over hvilke bygninger som står i fare for å få setningsskader og hvor det bør gjennomføres mer detaljerte vurderinger. I tillegg til at det raskt utføres setnings- og sårbarhetsvurderinger for et stort område, presenteres resultatene i kartformat i ArcGIS, noe som gjør det lettere å visualisere og kommunisere mulige konsekvenser av utbyggingen.

Verktøyet er implementert i programmeringsspråket python, og det er laget en "toolbox" i ArcGIS Pro som benytter flere av ArcGIS sine innebygde funksjoner (arcpy-biblioteket). Denne toolboxen

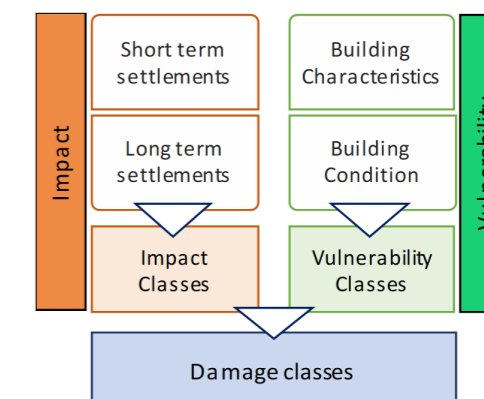
forutsetter lisens på ArcGIS Pro. Det er mulig å bruke kjernekode i python uten ArcGIS Pro lisens, men dette forutsetter inngående kjennskap til python.

GIBV-verktøyet er tilgjengelig i tre versjoner, med noe forskjellig formål og funksjonalitet, forklart kort i Tabell 1.

Tabell 1: Forklaring av de tre versjonene som gjøres tilgjengelig. Navnet på versjonene skrives i parentes.

Versjon	Forklaring
Byggegrupp (BegrensSkade Excavation)	Standardversjonen. Setningsberegninger utføres for hjørnepunkt på alle bygg. Både korttids- og langtidssetninger beregnes. Dersom brukeren legger inn bygningsinformasjon, kan det også utføres en skadevurdering (setning + sårbarhet).
Byggegrupp – terrengsetninger (BegrensSkade ImpactMap)	Fraviker fra standardversjonen ved at setningsberegningene gjøres for et rutenett over hele analyseområdet, altså ikke for bygg. Denne versjonen gir kun resultater på setning, altså ikke skadevurdering.
Tunnel (BegrensSkade Tunnel)	Både korttids- og langtidssetninger beregnes på grunnlag av erfaringsdata fra tunneler. Ellers er alt likt som for standardversjonen.

GIBV-verktøyet kombinerer klassifisering av sårbarhet (vulnerability) med fare for setningsskader (impact). Resultatet er skadeklasser (damage classes). Figur 4 viser hva de forskjellige klassifiseringene avhenger av. Faregraden (impact class) bestemmes på grunnlag av størrelsen og/eller variasjonen av totalsetningene rundt et bygg, mens sårbarhetsklassen (vulnerability class) bestemmes på grunnlag av bygningskarakteristikk og bygningens tilstand. Det gjøres oppmerksom på at en analyse kan kjøres uten å ta hensyn til sårbarhet. Da vil man kun få resultater med hensyn til faregradsklasse, altså ikke forventet skadeklasse.

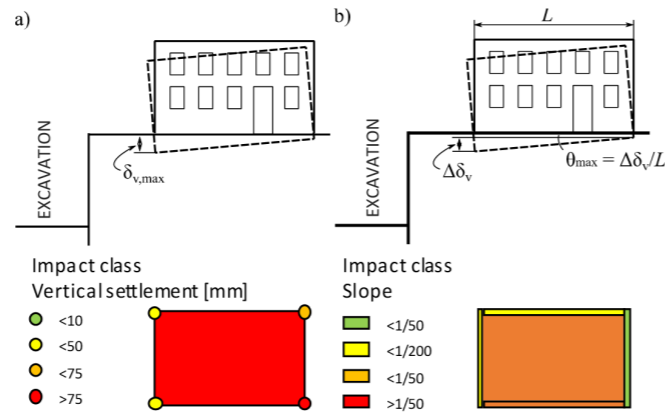


Figur 4: Metodikken i verktøyet Ground Impact and Building Vulnerability (GIBV). Impact = fare, vulnerability = sårbarhet og damage = skade. Hentet fra Piciullo et al. (2021).

Både korttids- og langtidsdeformasjoner (Langford et al., 2016) blir beregnet for alle hjørnepunktene til alle bygningspolygonene. Hellingen blir beregnet for hver linje/vegg basert på forskjellen i setning mellom linjens to hjørnepunkt. Korttidssetninger er her ment udrenerte vertikalsetninger forårsaket av forskyving av støttekonstruksjonen rundt byggegropen samt installasjonseffekter fra stag og/eller peler, det vises til erfaringsdiagram fra WP2 (Sandene et al., 2023). Langtidssetninger er her ment konsolideringssetninger som opptrer på grunn av poretryksreduksjon i løsmassene som oppstår ved drenering av grunnvann til byggegroper, det vises til erfaringsdiagram fra WP2 (Sandene et al., 2023). Slik drenering medfører poretryksreduksjon i permeable lag over berg eller i bergets forvitrede dagsone. Poretryksreduksjonen vil etter hvert føre til at grunnvann strømmer fra den overliggende lav-permeable leiren ned mot det drenerende laget under, hvorpå poretrykket også reduseres i leiren, som da fører til konsolideringssetninger over tid. Beregnes setningen for hvert lag etter angitt konsolideringstid t (Piciullo et al., 2022) basert på konsolideringsteorien fremsatt av Terzaghi og Frölich (1936)

I verktøyet kan det velges mellom to inndelinger for faregradsklasser for bygninger (Ritter et al., 2021). De kan inndeles etter største totalsetning $\delta_{v,max}$ eller største helning θ_{max} . For totalsetning er det hjørnet med størst beregnet setning som er styrende for hvilken fareklasse bygget får. For helning bestemmes fareklasse av den vegg med den største beregnede helningen – her er det altså ikke kun forskjell i setning mellom to nabhjørner δ_v , som har noe å si, men også avstanden L mellom de to hjørnene. Figur 5 illustrerer de to inndelingene.

Sårbarheten vurderes basert på en type poeng og vektsystem, for fem forskjellige parametere (geometrisk lengde, geometrisk form, struktur, fundamentering og status) og klassifiseres i henhold til Tabell 2. For ytterligere bakgrunn til valg av klassifiseringen, henvises det til Piciullo et al. (2021a).



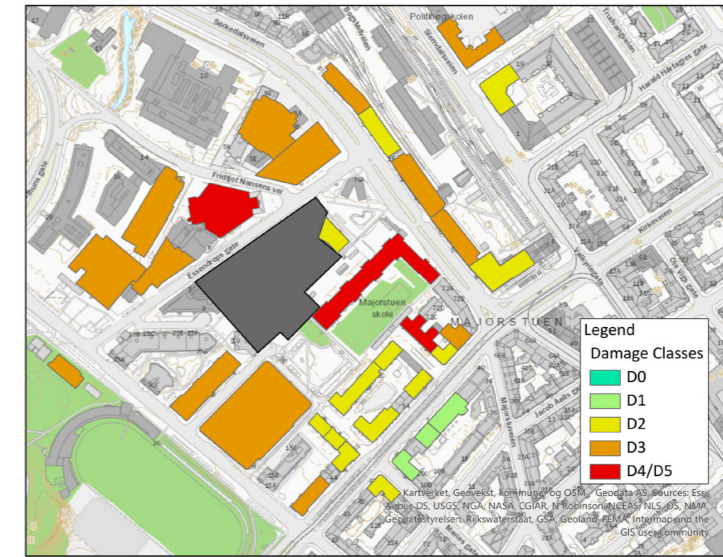
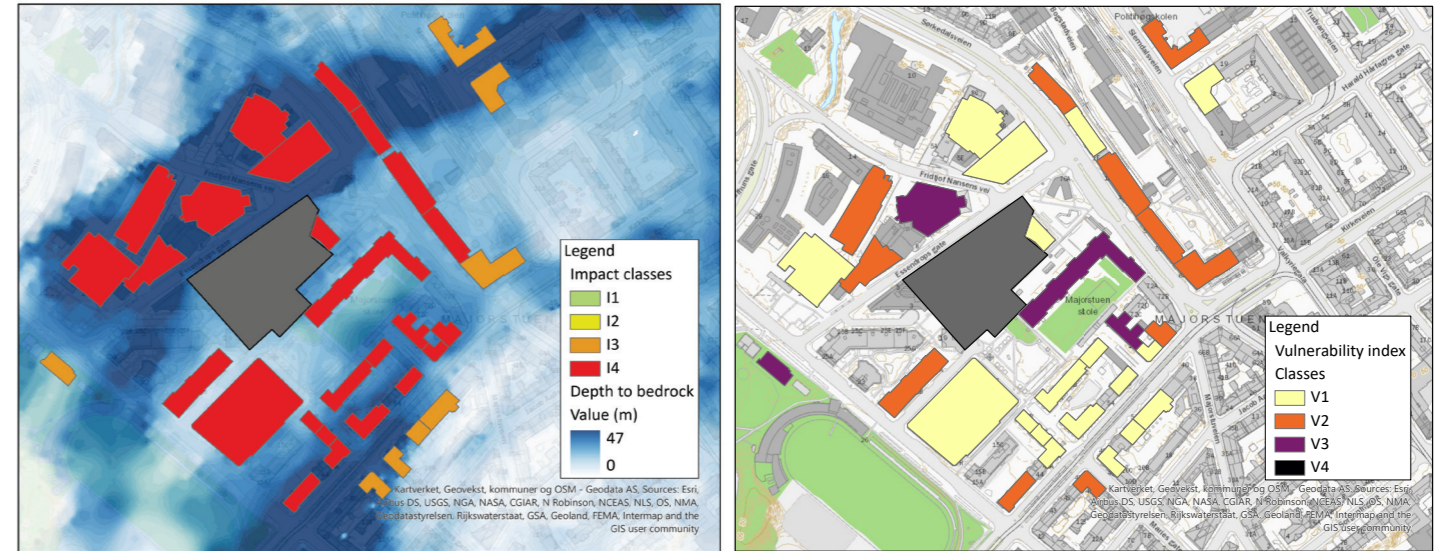
Figur 5: Rankin's (1988) faregradsklasser basert på (a) maksimum total bygningssetning og (b) beregnet helning på vegger.

		Faregrad			
		I1	I2	I3	I4
Sårbarhet	V1	1	1	2	3
	V2	1	2	3	4
	V3	2	3	4	5
	V4	3	4	5	5

Figur 6. Matrise for evaluering av skadeklasse for bygninger, basert på beregnet faregradsklasse og sårbarhetsklasse.

Karakteristikk	Parameter	Klassifisering				Vekt, p_i	Maks-verdi	Relativ vektning
		A [0]	B [5]	C [20]	D [50]			
Geometri	Bygningslengde [m]	≤ 10	11-15	16-30	> 30	0.75	37.5	30 %
	Bygningsform	> 0.75	0.75-0.5	0.5-0.35	< 0.35	0.75	37.5	
Struktur	Struktur	Stål	Armert betong	Tre, blanding	Mur, spesielle strukturer	1	50	50 %
	Fundamenterings-type	Til berg, peler	Flåte (raft)	Direktefundamentering (strip)	Trepeler, isolert	1.5	75	
Tilstand	Status (visuell skade)	Utmerket	God	Medium	Dårlig	1	50	20 %

Tabell 2. Forslag til vektingssystem for sårbarhetsklassifisering av bygninger, tilpasset etter metode fra Dzegniuk et al. (1997), (etter Piciullo et al., 2021)



Figur 7: Bygninger klassifisert etter fareklasse (a), sårbarhetsklasse (b) og skadeklasse (c).

REFERANSER:

Dzegniuk, B., Hejmanowski, R., Sroka, A. (1997). Evaluation of the damage hazard to building objects on the mining areas considering the deformation course in time. Proceedings of the 10th Int. Congr. of the Int. Society for mining surveying. DOI: 10.13140/2.1.3356.3520

Langford J., Karlsrud K., Lande E. J., Baardvik G., Engen A. (2016). Begrensskade – limitation of damage caused by foundation and ground works.

Piciullo, L. et al. (2021a) "Assessment of building damage due to excavation-induced displacements: The GIBV method," Tunneling and Underground Space Technology, 108.

Piciullo, L. et al. (2021b) "The role of excavation-induced pore water pressure reduction in the damage assessment for buildings: an application of the GIBV method," in Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney.

Piciullo, L. et al. (2022) "The use of the GIBV method for monitoring the effects of urban excavations on built heritage."

Rankin, W.J. (1988). Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effect. Geological Society, London, Eng. Geo. Sp. 5, 79-92. <https://doi.org/10.1144/GSL.ENG.1988.005.01.06>

Ritter, S. et al. (2021) 'Mapping the risk of building damage due to excavation-induced displacements'.

IMPACT OF PILE DRIVING ON SLOPE STABILITY, YEGANEH ATTARI, NTNU

(sammendrag fra artikkel presentert på Geoteknikkdagen, 2023):

Peleramming ved/i nærheten av skråninger kan være utfordrende mtp. skråningsstabilitet, spesielt hvor det er påvist sensitiv leire eller leire lagdelt med sand/silt i bekken. Det finnes ikke en standard metode for å beregne redusert sikkerhetsfaktor av en skråning på grunn av peleramming, selv om det er aktuelt for en del skred i Norge, Sverige, USA og Canada. Denne artikkelen vurderer mekanismer som kan være aktuelle når peleramming utføres i nærheten av en skråning, og tradisjonelle metoder som er i bruk i Norge når det gjelder dette problemet. Gir artikkelen noe forslag for bedre vurdering av effekter av peleramming på skråningsstabilitet basert på resultater av statiske og dynamiske analyser i Plaxis 2D samt geotekniske teorigrunnlag og prosjekterfaring. Resultater viser at tradisjonelle metoder som bruker poreovertrykk malt i felt for å redusere effektivspenningen i jorden og deretter redusere sikkerhetsfaktor kan forbedre. Peleramming kan skape et lokalt brudd i jorden som kan føre til et globalt brudd -spesielt i tilfeller hvor sensitiv leire finnes i bekken. Vurdering av effekten av strain-softening hvor skjærstyrken reduseres som en funksjon av skjærtøyningen inntil omrørt skjærstyrke er nådd er nyttig når vi har slikt type bruddmekanismer. Med bruk av strain-softening kan vi få en reduksjon i sikkerhetsfaktor i numeriske analyser for dette problemet. Det også utviklet en metode som bruker dynamiske forsyvninger og poreovertrykk i jorden pga. peleramming. Disse er estimert med bruk av Wave Theory i GRLWEAP og forenkle Plaxis 2D analyser. Deretter er sykliske degradasjonsdiagrammer benyttet for å vise oss hvis forstyrrelser i jorden pga peleramming er stor nok for å gi oss en reduksjon i udrenertskjærestyrke i forskjellige typer av leire.



Attari, Y., Eiksund, G.R., Jostad, H.P. (2023), Assessment of the impact of pile driving on slope stability, NFF, Geoteknikkdagen 2023.

Attari, Y., Jostad, H.P., Grimstad, G. et al. Evaluation of Pile Driving Effects on Slope Stability in Clay. Geotech Geol Eng (2023). <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02636-w>

SAMMENDRAG

Målsetningen for BegrensSkade-prosjektet har vært at redusere antallet og omfanget av setningsskader på nabobebyggelse i forbindelse med grunnarbeider ved dype utgravinger og fundamentering. Kostnadene for skader forårsaket av geotekniske arbeider er vurdert til 3-10 % av prosjektens total kostnad (SGI, 2013, Deltares/Korff, 2019). Basert på disse estimater og den samlede omsetningen i byggebransjen vil skadepotensialet kunne bli titalls milliarder kroner årlig. Besparelspotensialet knyttet til reduksjon av denne type skader er enormt.

Det fremste resultatet av prosjektet er utvikling av verktøy for risikovurdering og risikohåndtering. Det er utviklet et verktøy for vurdering av risiko for bygningsskade av nabobebyggelse i forbindelse med dype utgravinger og tunneler. Verktøyet er basert på en stor database over målte setninger og poretrykkpåvirkning, sammenstilt i BegrensSkade-prosjektene (BegrensSkade I og BegrensSkade II/Remedy). Verktøyet er ArcGIS basert og script er delt på open-source plattformen GitHub hvor koden kan lastes ned, videreutvikles og deles på nytt: https://github.com/norwegian-geotechnical-institute/REMEDY_GIS_RiskTool

Det er også utviklet et verktøy for risikovurdering og risikohåndtering av prosjekter. Verktøyet tar utgangspunkt i en klassisk risikomatrise hvor uønskede hendelser kan identifiseres og kartlegges systematisk, i tillegg til at verktøyet støtter oppdateringer av risikonivå i ulike prosjektfaser. Verktøyet som kan brukes for både kvalitative og kvantitative vurderinger ligger åpent tilgjengelig på BegrensSkades nettsider: <https://www.ngi.no/prosjekter/remedy/#Artikler-og-rapporter>

Begge disse verktøyene støtter beslutningsprosesser i planlegging, prosjektering og utførelse, samt kommunikasjon av risikomomenter i prosjekter. Verktøyene vil også bidra til vurdering av behov av avbøtende tiltak samt kostnadsestimater knyttet til disse tiltakene.

I tillegg til utvikling av risikoverktøy er det oppnådd resultater innenfor følgende forskningsområder:

1. Effekter av boring i forbindelse med installasjon av peler og ankere I BegrensSkade I ble det kartlagt at installasjon av peler og ankere ved boring er en hovedårsak til skader i forbindelse med grunnarbeider. Det er jobbet videre med problemstillingen i BegrensSkade II, hvor det er utarbeidet en veiledning til hvordan man bør velge boremetode og tilpasse prosedyre for utførelse basert på stedlige grunnforhold.

2. Utvidelse og analyse av byggeproppdatabase I BegrensSkade I ble det påbegynt innsamling av data på setninger og poretrykkreduksjon i forbindelse med dype utgravinger. Arbeidet er videreført i BegrensSkade II, og supplerende data er samlet inn fra byggeplasser gjennom prosjektets partnere. Dataene er analysert og det er utarbeidet nye design-figurer som viser hva som kan forventes av deformasjoner og poretrykkreduksjon i forbindelse med grunnarbeider. Disse figurer er noe av de viktigste grunnlaget for utvikling av risiko-verktøy for sårbarhetsanalyse, som er presentert ovenfor.
3. Drenasje til byggepropp og poretrykkreduksjon Problemstillingen med drenasje til byggepropp, reduksjon av poretrykk og påfølgende terrengsetninger, ble også kartlagt som en hovedårsak til setningsskader i BegrensSkade I. I tillegg til analyse av data fra byggeplasser er det utført numerisk modellering av flere case, for å vurdere verdi og usikkerheter ved bruk av denne type modeller.
4. Effekter av peleramming på skråningsstabilitet Arbeid knyttet til vurdering av reduksjon i stabilitet av skråninger med sprøbruddmateriale (kvikkleire) er utført i forbindelse med doktorgrad ved NTNU. Arbeidet vil være et skritt på veien til å kunne anbefale en ny metode for vurdering av stabilitet i forbindelse med peling. I dag finnes det ikke en bransjestandard for å vurdere og følge opp skråningsstabilitet ved peling, hvilket medfører usikkerheter i bygge- og anleggsprosjekter.
5. Revisjon av grenseverdier for vibrasjoner i forbindelse med sprengning Det er i BegrensSkade prosjektet utført to fullskala sprengningsforsøk, hvor det er målt vibrasjoner på testbygg fundamentert på berg og løsmasser. Resultatene fra forsøkene har bidratt til revisjon av NS-EN 8141-1:2022 Vibrasjoner og støt. Veiledende grenseverdier for bygge- og anleggsvirksomhet, bergverk og trafikk. Standarden ligger ute på høring.

Alle rapporter og annet publisert materiale finnes tilgjengelig på BegrensSkade IIs hjemmeside, under fanen Artikler og rapporter: <https://www.ngi.no/en/projects/remedy/>

BegrensSkade II / REMEDY - Risk Reduction of Groundwork Damage

This R&D program has the aim to reduce the risk of damage caused by groundwork (excavation, foundation and construction work) during and after execution of a project, and the risk of damage to neighbouring structures.



ARTIKLER

Attari, Y., Jostad, H.P., Grimstad, G. et al. Evaluation of Pile Driving Effects on Slope Stability in Clay. *Geotech Geol Eng* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02636-w>

Attari, Y., Eiksund, G. & Jostad, H.P. (2023). Assessment of the impact of pile driving on slope stability. *NFF Geoteknikkdagen 2023*.

Lande, E.J., Ritter, S. & Nordal, S. (2021). Small-scale modelling of pile drilling in sand – investigation of the influence on surrounding ground. *Proc. 10th Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Cambridge, 28-30 June 2021*, Chapter in book: *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, CRC Press. DOI: 10.1201/9780429321559-40

Lande, E. J., Sandene, T., Langford, J. & Ritter, S. (2022). Reduksjon av skader fra boring av peler og ankere – Anbefalinger fra BegrensSkade II. https://nff.no/wp-content/uploads/sites/2/2022/12/Fjellspregningskonferansen-2022_-_web.pdf

Lande, E.J., Karlsrud, K., Langford, J. & Nordal, S. (2020). Effects of drilling for tieback anchors on surrounding ground - results from field tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 146(8). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002274 <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0002274>

Lande, E.J., Ritter, S., Tryvold, H. & Nordal, S. (2021). Physical modelling of pile drilling in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, vol 58. DOI: 10.1139/cgj-2020-0373 <https://cdnsiencepub.com/doi/full/10.1139/cgj-2020-0373>

Langford, J., Norén-Cosgriff, K., Lacasse, S., Brekke, A. & Koelsch, G. (2019). Risk assessment of vibrations caused by groundworks. *XVII European conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Reykjavik, Iceland. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0041. https://www.ecsmge-2019.com/uploads/2/1/7/9/2/1790806/0041-ecsmge-2019_langford.pdf

Langford, J., Lande, E.-J., Sandene, T., Kahlström, M., Nadim, F., Norén-Cosgriff, K., Piciullo, L., Ritter, S., Hauser, C., Lysdahl, A. Attari, Y. & Formreide, R. (2021). BegrensSkade II – REMEDY – Risk reduction of groundwork damage: An Overview. *Nordisk Geoteknikermøte nr. 18*. Helsinki, IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci.* 710 012073. DOI: 10.1088/1755-1315/710/1/012073 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/710/1/012073>

Langford, J.; Ritter, S.; Lysdahl, A. K.; Anes, E. W.; Piciullo, L. (2023). Assessing potential building damage caused by leakage to urban tunnels. *Geomechanics and Tunnelling* 16, No. 6, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1002/geot.202300028>

Langford, J., Lysdahl, A.O.K., Ritter, S, Anes, E.W. & Piciullo, L. (2023). ArcGIS-verktøy for å vurdere innlekkasjekrav og konsekvenser av tunnel i urbane områder. *NFF Bergmekanikk og Geoteknikkdagen 2023*.

Norén-Cosgriff K.M., Ramstad N., Neby A. , Madshus C. (2020). Building damage due to vibration from rock blasting. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. DOI:10.1016/j.soildyn.2020.106331. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726119312916>

Norén-Cosgriff, K., Ellingsen, S. , Resvoll, R. & Hov, S. (2022). The new Museum of the Viking Age - Assessment of vibration from groundworks to avoid damage to artefacts. *Applied Acoustics*. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.108862 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X22002365>

Piciullo, L., Ritter, S, Lysdahl, A.O.K., Langford, J. & Nadim, F. (2020). Assessment of building damage due to excavation-induced displacements: the GIBV method. *Journal of Tunnelling and underground space technology*. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103673 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779820306271> (ikke open access)

Piciullo, L., Bekele, J., Depina, I., Nadim, F. & Langford, J. (2021). A management tool to reduce the risk of damage caused by geotechnical groundworks. *Nordisk Geoteknikermøte nr. 18*. Helsinki, IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci.* 710 012058. DOI: 10.1088/1755-1315/710/1/012058 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/710/1/012073>

Piciullo, L., Ritter, S, Lysdahl, A.O.K., von der Tann, L., Langford, J. & Nadim, F. (2022). The use of the GIBV method for monitoring the effects of urban excavations on built heritage. *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III – Lancellotta, Viggiani, Flora, de Silva & Mele (Eds)*. DOI: 10.1201/9781003308867-78 <https://www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.1201/9781003308867-78/use-gibv-method-monitoring-effects-urban-excavations-built-heritage-piciullo-ritter-lysdahl-von-der-tann-langford-nadim>

Ritter, S., Piciullo, L., Kydland Lysdahl, A.O., Kahlström, M., Langford, J. & Nadim, F. (2021). Mapping the risk of building damage due to excavation-induced displacements. *Proc. 10th Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Cambridge, 28-30 June 2021*, Chapter in book: *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, CRC Press. DOI: 10.1201/9780429321559-83

Sandene, T., Ritter, S. & Lande, E.J. (2021). A case study on the effects of anchor drilling in soft, low sensitive clay and sandy, silty soils. *Proc. 10th Int. Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Cambridge, 28-30 June 2021*, Chapter in book: *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, CRC Press. DOI: 10.1201/9780429321559-85

Sandene, T., Langford, J., Long, M., Kahlström, M, Ritter, S. (2023). A Norwegian database for deep excavations in soft clay with focus on installation effects and groundwater drainage (sendt inn til review). *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

PROSJEKTRAPPORTER

WP3.1 State of the art rapport
WP3.3 Hydrogeological modelling of Campus Ullevål
WP3.4 Hydrogeological modelling case studies summary

WP4.1 SOA report
WP4.2 Blast tests
WP4.3 Effect of vibration on slope stability

WP5.1 A literature review of risk matrices applied for risk assessment in geotechnical engineering. 2018.
Sintef (2022). Risk analysis of geotechnical groundwork: Case study.
WP5.2 Verktøy for risikohåndtering – Manual norsk
WP5.3 GIBV Risikoverktøy – Brukermanual og dokumentasjon

MASTEROPPGAVER

Fromreide, R. (2020). Effect of strain-softening behaviour on slope stability during pile driving. Master thesis NTNU Department of civil and environmental engineering.

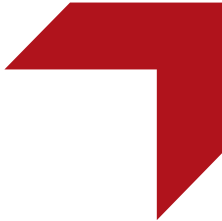
Stav, H. (2020). Grunnvannsmøllering som et verktøy for å estimere setninger rundt byggeproper. Masteroppgave NMBU Fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning.

Tyvold H. F. (2020). Small-scale model for pile drilling under realistic stress conditions. Master thesis NTNU Department of civil and environmental engineering.

VERKTØY

Xls-verktøy med manual <https://www.ngi.no/prosjekter/remedy/>

ArcGIS verktøy med manual https://github.com/norwegian-geotechnical-institute/REMEDY_GIS_RiskTool



NGI – Norges Geotekniske Institutt - er et uavhengig forskningsinstitutt innen geoteknikk og andre ingeniørrettede geofag. NGI ble formelt opprettet som et forskningsinstitutt 1. januar 1953.

NGI kombinerer geokunnskap og teknologi for å utvikle smarte og bærekraftige løsninger innen infrastruktur på land og til havs, innen miljøteknologi, forurenset grunn og naturfarer som jord- og snøskred. Forskningen vår leverer kunnskap som bidrar til å løse noen av de viktigste utfordringene verden står overfor innenfor klima, miljø, energi og samfunnsikkerhet.

Hos oss går forskning og rådgivning hånd i hånd og vi ønsker å være en brobygger mellom akademia, næringsliv og det offentlige.

Vi har kontorer i Norge, Houston og Perth, som til sammen utgjør en åpen og delende organisasjon som brenner for å utvikle fagene våre.