

ARCGIS-VERKTØY FOR Å VURDERE INNLEKKASJEKRAV OG KONSEKVENSER AV TUNNEL I URBANE OMRÅDER

Assessing limits for water ingress to urban tunnels and impact on built environment - using an ArcGIS tool

Jenny Langford, Asgeir Lysdahl, Stefan Ritter og Eivind Ånes, NGI

SAMMENDRAG

I FoU-prosjektet BegrensSkade/Remedy er det utviklet et ArcGIS-verktøy for å vurdere fare for bygningsskade ved drenering som følge av tunneldriving. Verktøyet er godt egnet til å brukes i tidlig planlegging for å vurdere innlekkasjekrav, identifisere ømfintlige områder og vurdere behov for tettetiltak, refundamentering, vanninfiltrasjon og omfang av måleprogram.

Verktøyet tar utgangspunkt i eksisterende bransjestandard og erfaringskurver for å vurdere innlekkasjekrav og konsekvenser av innlekkasje til tunneler (SVV Publikasjon 103, fra prosjektet "Miljø- og samfunnstjenlige tunneler"). Basert på forventet poretrykksreduksjon beregnes det i ArcGIS resulterende setning for alle bygninger som ligger innenfor influensområdet til tunnelen.

Verktøyet er brukt i forbindelse med planlegging av Ny Majorstuen T-baneknutepunkt. Vurderingene illustrerer hvordan verktøyet kan brukes og hvordan det kan gjennomføres følsomhetsanalyser mht. fundamentering av eksisterende bebyggelse, ulike scenarier for innlekkasje /poretrykksreduksjon samt variasjon i geotekniske parametere.

Verktøyet er åpent tilgjengelig på delingsplattformen GitHub, hvor det også ligger en brukerveiledning. https://github.com/norwegian-geotechnical-institute/REMEDY_GIS_RiskTool

SUMMARY

In the R&D project "LimitDamage/Remedy," an ArcGIS tool has been developed to assess the risk of building damage due to drainage caused by from tunnel excavation. The tool is well-suited for use in early planning to assess leakage requirements, identify sensitive areas, and evaluate the need for grouting, re-foundation of buildings, water infiltration, and the scope of monitoring.

The tool is based on existing industry standards and empirical curves to assess leakage requirements and pore pressure reduction (SVV Publication 103, from the project "Tunnels for citizens"). Based on expected pore pressure reduction, resulting settlement is calculated for all buildings within the influence area of the tunnel using ArcGIS.

The tool has been used in the planning of the New Majorstuen Metro Hub. The assessments illustrate how the tool can be utilized and how sensitivity analyses can be conducted regarding the foundation of existing buildings, various scenarios for leakage/pore pressure reduction, and variation in geotechnical parameters.

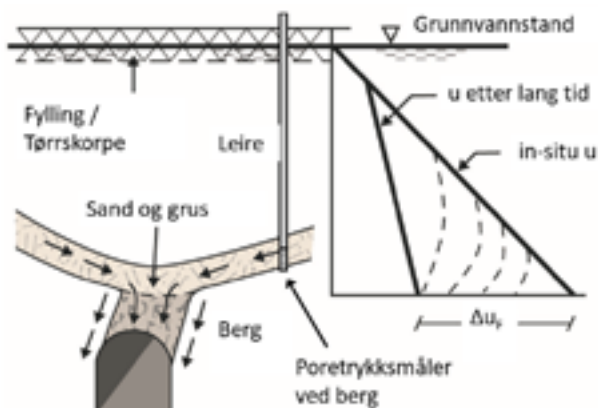
The tool is openly available on the sharing platform GitHub, where a user guide is also provided. https://github.com/norwegian-geotechnical-institute/REMEDY_GIS_RiskTool

INTRODUKSJON

Det er vel kjent at tunneldriving i berg i områder med leirfylte dyprenner over tunnelen kan føre til reduksjon av poretrykk og omfattende setninger (Karlsrud et al., 2003). En viktig del i planleggingen av tunnelprosjekter i urbane områder er å vurdere potensiell påvirkning på bebyggelse og infrastruktur. Vurderingen omfatter å identifisere de mest kritiske områdene, sette grenser for mengde innlekkasje til tunnelen, planlegge tiltak som for eksempel forinjeksjon, behov for vanntett utstøping og vanninfiltrasjon, samt å foreslå en plan for overvåking under driving. Denne artikkelen presenterer hvordan den såkalte Ground Impact and Building Vulnerability (GIBV)-metoden (Piciullo et al., 2020) implementert i ArcGIS kan brukes for disse vurderingene.

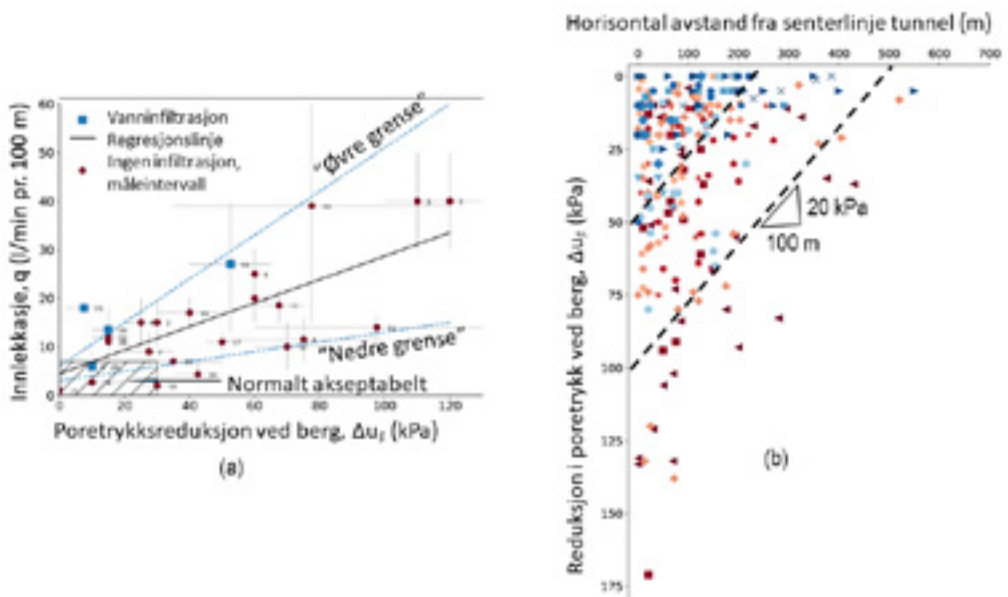
PORETRYKKSREDUKSJON SOM FØLGE AV INNLEKKKAJSE TIL TUNNEL

Innlekkasje av vann til tunneler kan føre til uakseptable setninger i urbane områder med bløt leire, hvor det over tid vil kunne oppstå terrengsetninger. Figur 1 illustrerer problemet, med drenering til en tunnel som medfører reduksjon av poretrykk på bergnivå. Med tiden sprer reduksjonen av poretrykket seg oppover i leirelaget, og konsolideringssetninger utvikler seg. Størrelsen på setningene avhenger av størrelsen av poretrykksfallet ved berg, Δu_F , tykkelsen på leirelaget og konsolideringsparameterne til leiren (fremfor alt OCR, leirens overkonsolideringsgrad).



Figur 1. Problemstilling med drenering av grunnvann til bergtunnel, poretrykksreduksjon ved berg som over tid sprer seg oppover i leirlaget.

For å unngå uakseptable setninger, settes det grenser for innlekkasjerater til tunnelen, vanligvis ved hjelp av den norske bransjestandarden, Statens vegvesen publikasjon 103 fra prosjektet «Miljø- og samfunnstjenlige tunneler» (Karlsruud et al., 2003). Databasen som ligger til grunn er basert på målinger av innlekkasje og poretrykksreduksjon fra fullførte tunnelprosjekter. Databasen ble oppdatert i 2022 (Langford et al., 2022). De viktigste relasjonene er vist i Figur 2. Figur 2a viser forholdet mellom innlekkasjerate, q , og reduksjon av poretrykk ved berg (rett over berg eller installert i vannførende lag over berg), Δu_F , over senterlinje tunnel. Dataene har stor spredning (Langford et al., 2022), og det er indikert "øvre" og "nedre" grenser. Figur 2b viser reduksjon av poretrykk ved berg med avstand fra senterlinje tunnel. Disse dataene indikerer at influensavstanden for reduksjon av poretrykk kan overstige 500 m. Uansett størrelse på poretrykksreduksjon ved berg, er anbefalt praksis for å estimere størrelsen på influensavstanden å anta at Δu_F reduseres med 20 kPa per 100 m avstand (stiplede linjer i Figur 2b).



Figur 2. Sammenstilling av data fra utførte tunnelprosjekter (a) sammenheng mellom målt innlekkasje i tunnel og registrert poretrykksreduksjon ved berg rett over tunnelen, med skissert «typisk», «øvre» og «nedre» grense (b) sammenheng mellom målt poretrykksreduksjon ved berg med avstand fra senterlinje tunnel (Langford et al., 2022).

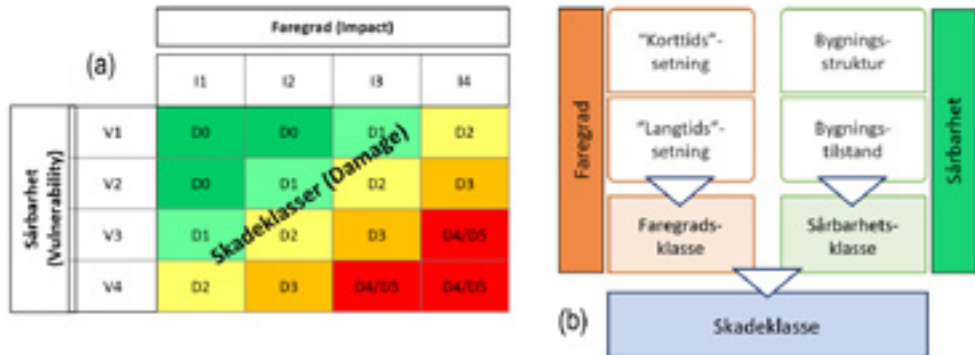
VERKTØY IMPLEMENTERT I ARCGIS

I forskningsprosjektet BegrensSkade/Remedy er det utviklet en metode (GIBV-metoden) for å vurdere bygningsskader som følge av setninger i tilknytting til dype byggegrøper. Metoden er grundig beskrevet i egne publikasjoner (Piciullo et al. 2020, Piciullo et al., 2022), inkludert validering på to utførte byggegrøper. Det gis derfor kun en kort introduksjon til metoden her, med fokus på utvidelsen av metoden til bergtunneler.

Metodikk

Metoden har blitt implementert i ArcGIS ved hjelp av et Python-skript. Skriptet for verktøyet kan lastes ned fra den åpne kildeplattformen GitHub (<https://github.com>). Kort oppsummert kan metoden brukes for å vurdere en bygningsskadeklasse, D1 til D4/D5, basert på

evalueringen av faregradsklasser I1 til I4, og sårbarhetsklasser V1 til V4, som illustrert i Figur 3a. Faregradsklassen bestemmes ved å vurdere forventede momentane («korttids») setninger på grunn av uttak av et bergvolum og konsolideringssetninger («langtids») forårsaket av drenering, og poretrykksreduksjon (Figur 3b).



Figur 3. (a) Matrise for vurdering av skadeklasse for bygninger basert på faregradsklasse og sårbarhetsklasse (b) Metodikk for vurdering av skadeklasse (etter Piciullo et al., 2020)

Deformasjoner ved tunneldriving i hardt berg, med løsmasser av marin, bløt leire, med lav hydraulisk konduktivitet over tunnelen, vil hovedsakelig bli dominert av konsolideringssetninger i leiren (dvs. «langtids»-setninger). Disse setningene beregnes i Norge med Janbus metode (Janbu, 1970). Metoden beskriver den resulterende terrengsetningen, forårsaket av en endring i effektiv vertikal belastning (her: poretrykksreduksjon), og tar hensyn til forkonsolideringstrykket i leiren. Korttidssetninger kan inkluderes i vurderingen ved empiriske metoder basert på en Gaussisk fordeling (Peck, 1969 og Schmidt 1969).

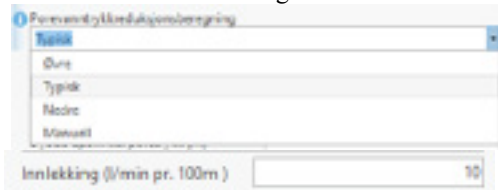
Nødvendige grunnlagsdata

Følgende inndata kreves i ArcGIS-verktøyet for å muliggjøre setningsanalyser til skadeklassevurdering:

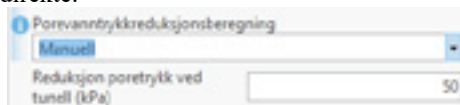
- En georeferert bergmodell (løsmassmektighet, dybde til berg) over området som skal vurderes.
- Et kart med alle omkringliggende bygninger, fra hvilke bygningshjørnepunkter genereres.
- Inndata for setningsparametere for Janbu-modellen.
- Forventet innlekkasje til tunnelen, eller forventet reduksjon av poretrykk ved berg rett over tunnelen.

I verktøyet velger brukeren selv hvordan man ønsker å angi påvirkningen av tunnelen ved «porevantrykksreduksjonsberegning»:

- Gi en innlekkasjerate (l/min/100m) og forventet poretrykksreduksjon basert på *typisk, øvre* eller *nedre* kurve i Figur 2:

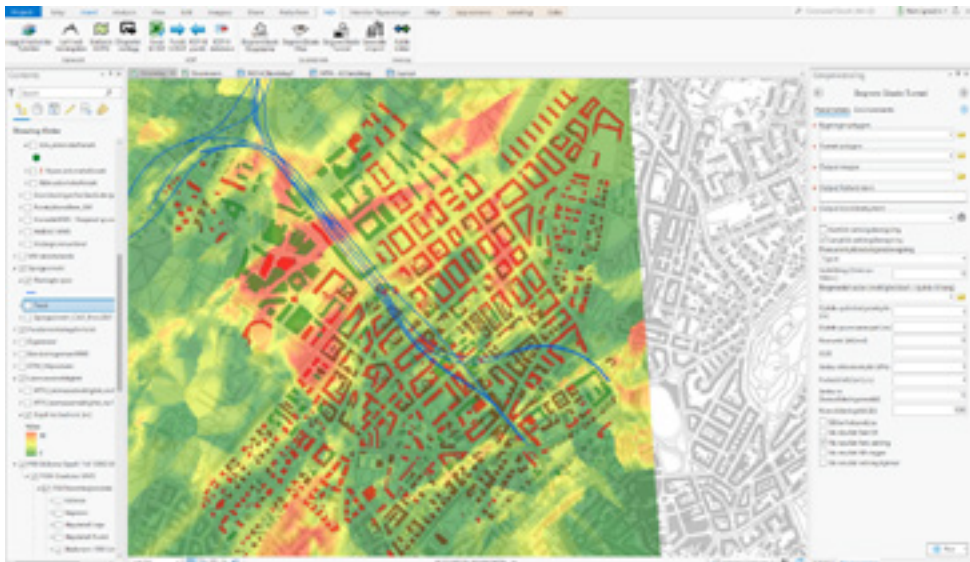


- Hvis brukeren isteden velger *manuell*, kan forventet poretrykksreduksjon ved berg gis direkte:



For begge alternativene vil avsenkingstrakten avta med 2 m poretrykksreduksjon per 100 m.

Figur 4 viser et skjermbilde fra verktøyet i ArcGIS, hvor alle inndata til analysen ligger i vinduet til høyre. Dette er forstørret opp og forklart i Figur 5. Det vises også til brukerveiledningen som kan lastes ned fra GitHub.



Figur 4. Skjermbilde fra ArcGIS verktøyet, med kart over området samt inndatavindu til høyre.

Ved å kjøre verktøyet genereres beregningspunkter i alle hjørnepunkter på bygningene innenfor området. I disse punktene beregnes setninger, basert på interpolert dybde til berggrunn, gitt poretrykk på bergnivå og influenssone, i henhold til Figur 2. Faregradsklassen for hver bygning blir deretter vurdert med tanke på den maksimale beregnede setningen på hjørnepunktene. Når modellen er etablert er det meget raskt å utføre sensitivitetsanalyser, ved å variere for eksempel setningsparametere eller scenarier for innlekkasjemengde eller antatt poretrykksreduksjon.

Geoprocessing

Begrens Skade Tunnel

Parameters Environments

- Bygninger polygon
- Tunnel polygon
- Output mappe
- Output feature navn
- Output koordinatsystem
- Korttids setningsberegning
- Langtids setningsberegning
- Porevanntrykkreduksjonsberegning
- Typisk
- Innlekking (l/min pr. 100m) 10
- Bergmodell raster (mekktighetskart / dybde til berg)
- Dybde upåvirket poretrykk (m) 5
- Dybde grunnvannspeil (m) 3
- Romvekt (kN/m³) 18
- OCR 1
- Janbu referansetrykk (kPa) 0
- Forhold $M0/(m^2 \cdot p \cdot c)$ 4
- Janbu m (konsolideringsmodul) 15
- Konsolideringstid (år) 1000
- Sårbarhetsanalyse
- Vis resultat fare tilt
- Vis resultat fare setning
- Vis resultat tilt vegger
- Vis resultat setning hjørner

Run

Polygoner for bygninger (shapefil)

Polygon for tunnel (shapefil)

Mappe for lagring av resultater

Lagringsnavn på ArcGIS-prosjektet

Valg av koordinatsystem

Huke av for å beregne konsolideringssetninger

Valg av kurve for forhold mellom $q-\Delta u$ (Figur 1), alternativt velg Δu direkte

Georeferert bergkotekart (tykkelse leire)

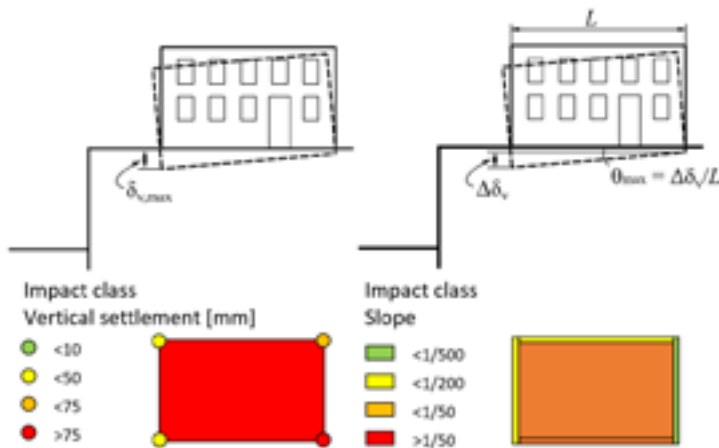
Janbu setningsparametere, samt informasjon om **in-situ poretrykk** (dybde grunnvannspeil) og **dybden hvor poretrykket forventes å ikke bli påvirket av tunneldrenering** (bestemmer hvor stor del av leiren som bidrar til setninger).

Antatt varighet for dreneringen: lang tid (permanent, forinjisert tunnel), kortere tid (midlertidig, anleggsfase evt. før vannrettet lining er på plass).

Figur 5. Inndatavindu med forklaringer til parametere, det vises også til brukerveiledning.

Faregradsklassifisering

Faregradsklassen for hvert bygg vurderes så basert på beregnet maksimal totalsetning i et hjørnepunkt på bygget (Figur 6a), eller maksimal beregnet helning på et veggelement (Figur 6b). Klasser for faregradsnivå (grønn, gul, oransje og rød) er basert på skadekriterier foreslått av Rankin (1988), som vist i Tabell 1. De fire faregradsklassene spenner fra totalsetning <10 mm (ubetydelig) til >75 mm (høy). Brukeren av verktøyet velger selv om klassifiseringen skal baseres på beregnet totalsetning eller helning.



Figur 6. Faregradsklassifisering basert på (a) beregnet setning i hjørnepunkter på bygning (b) beregnet helning på veggelementer på bygning (etter Piciullo et al., 2020)

Tabell 1. Inndeling i skadeklasser for bygninger, etter Rankin (1988).

Skade-klasse	Maksimal helning vegg	Maksimal setning [mm]	Vurdert risiko	Beskrivelse av mulig skade
1	Mindre enn 1/500	Mindre enn 10	Ubetydelig	Estetisk skade lite sannsynlig
2	1/500 til 1/200	10 til 50	Lav	Mulig estetisk skade, som sannsynligvis ikke har strukturell betydning
3	1/200 til 1/50	50 til 75	Moderat	Forventet estetisk skade og mulig strukturell skade, skade på rørføringer mulig.
4	Større enn 1/50	Større enn 75	Høy	Forventet strukturell skade på bygninger. Forventet skade på rørføringer.

Sårbarhetsklassifisering

I verktøyet vil sårbarheten for hvert enkelt bygg kunne vurderes etter foreslått poeng og vektning i Tabell 2 basert på ulike bygningskarakteristikk etter metode foreslått av Dzegniuk et al. (1997). I vektningssystemet legges det mest vekt på fundamenteringstype og bygningsstruktur, andre faktorer som kan veies inn er geometri (beregnes automatisk utfra bygningspolygonene i GIS-modellen) og generell bygningstilstand. Brukeren av verktøyet

velger selv hvilke faktorer som vil vektlegges, og kan for eksempel velge og kun bruke fundamenteringstype i sårbarhetsklassifisering. For eksemplet som presenteres i denne artikkelen, vurderes kun fundamenttypen ved å neglisjere bygninger fundamentert på berg.

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

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, pelert	Flåte (raft)	Direkte-fundamentering (strip)	Trepeler, isolert	1.5	75	
Tilstand	Status (visuell skade)	Utmerket	God	Medium	Dårlig	1	50	20 %

CASE MAJORSTUEN NY T-BANETUNNEL

Prosjektoversikt

Det er planlagt en ny T-banetunnel og oppgradering av den eksisterende Majorstuen stasjon sentralt i Oslo for å øke kapasiteten til T-banesystemet. Figur 7 viser en oversikt over prosjektområdet, plasseringen av den nye tunnelen og den eksisterende tunnelen, de omkringliggende bygningene og registrert dybde til berggrunn. I 2021 igangsatte Sporveien forberedende planleggingsarbeid i forkant av detalj- og reguleringsplan. Konsortiet Team Major (Aas-Jakobsen, Norconsult, Geovita, NGI mfl.) hadde ansvar for arbeidene, som hadde fokus på å verifisere konsept fra tidligere prosjektfase.

En av de største utfordringene med prosjektet er nærheten til bygninger og infrastruktur. Geovita har sammenstilt grunnundersøkelser og kartlagt fundamentering av bebyggelse. Bygningene i området består av historiske tre til fem etasjers bygninger, datert fra 1880-1950,

samt moderne leilighets- og kontorbygninger.



Figur 7. Oversikt over området på Majorstuen, med ny tunnel i blått, eksisterende tunnel i rosa, kartlagt fundamentering delt inn i fundamentering på berg/til berg på peler, på leire/peler i leire samt delvis fundamentert på berg/leire.

Grunnforhold og bygningsforhold

Berggrunnen består av kambro-silurske sedimentære bergarter, hovedsakelig kalkstein og skifer, med hyppig forekomst av gangbergarter, der overgangssonen mellom bergartstypene ofte er vannførende (Holmøy, 2008, Lindstrøm & Kveen, 2005). Løsmasseforholdene er typiske for Oslo, med forekomster av bløte leire, med en maksimal registrert dybde på omtrent 40 m. Det øverste laget er fyllmasser og tørrskorpeleire, over tilnærmet normalkonsolidert leire, med en overkonsolideringsgrad (OCR) på omtrent 1.2. Grunnvannstanden er registrert 1-2 m under terreng, med en poretrykkfordeling som er lavere enn hydrostatisk på grunn av drenering til den eksisterende tunnelen og Veas avløpstunnel. I denne fasen av prosjektet har sårbarheten til bygningene ikke blitt vurdert i detalj. Bygningene er delt inn i tre kategorier som vist i Figur 7; bygninger fundamentert på berg (peler til berg eller fundament direkte på berg, markert i grønt), bygninger fundamentert på eller i leire (grunne fundament, tre-fundament og friksjonspeler, markert i gult), eller bygninger som sannsynlig er fundamentert delvis på berg/leire.

I analysen som skal presenteres er det valgt ut en seksjon av tunnelen, markert med sort omriss i Figur 8. I dette området var det spesielt utfordrende forhold for forinjeksjon med liten overdekning (4-6 m) og tre parallelle tunnellop, skissert i Figur 8. Den relativt komplekse tunnelgeometrien i området for analysen, har blitt forenklet med et tunnellop med bredde tilsvarende omrisset av de tre tunnellopene.



Figur 8. Illustrasjon av tverrsjeksjon med parallelle nye tunneler, ved Jacob Aalls gate (Figur 7).

Sårbarhetsanalyse med ArcGIS-verktøy

Inndata ble hentet fra sammenstilling av undersøkelser i området fra tidligere prosjekter. Berggrunnskartet er generert basert på en database fra Undergrunnsarkivet (Plan- og bygningsetaten i Oslo kommune). Følgende parametere ble lagt til grunn for setningsberegningene:

- ↳ Leire romvekt: $18,5 \text{ kN/m}^3$.
- ↳ Dybde til grunnvannsspeil under bakkenivå: 2 m.
- ↳ Janbu-setningsparametere (konstante verdier): $\text{OCR}=1.2$; referansetrykk $p_r=5 \text{ kPa}$; modultall $m=30$; stivhetskonstant $M_{OC}/(p'_c \cdot m)=4$, der M_{OC} =ødometermodul i det overkonsoliderte spenningsområdet, p'_c = forkonsolideringstrykket.

Setningsparametere er evaluert fra laboratorie- og feltforsøk (CRS-forsøk og CPTU-sonderinger). Det er valgt parametere som ansees mest representative for området.

For å vurdere potensialet for bygningsskader for den planlagte tunneldelen, ble to forskjellige scenarier valgt som vist i Tabell 3, med antatt poretrykksreduksjon ved berg over tunnelen på henholdsvis $\Delta u_F = 10 \text{ m}$ og 5 m . Det er sannsynlig at man vil få reduksjon på 10 m (helt ned til sålen på planlagt tunnel) hvis forinjeksjonen ikke blir vellykket. Scenario for 5 m poretrykksreduksjon er lagt til grunn for et scenario hvor man får etablert god forinjeksjon i tunnelsålen, opp til tunnelhenget. Poretrykksreduksjonen er antatt å minke med 2 m per 100 m avstand fra tunnelen (Figur 2), det vil si at influensavstanden er 250 for scenario med 5 m poretrykksreduksjon og 500 m for scenario med 10 m poretrykksreduksjon.

Tabell 3. Scenario for poretrykksreduksjon som brukt i vurderingene.

Scenario	Δu_F [kPa]	OCR [-]	Influensavstand [m]	Beskrivelse
A	100	1.2	250	Begrenset effekt av forinjeksjon, poretrykksreduksjon til nivå for utsprengt tunnelsåle
B	50	1.2	500	High quality pre-grouting achieved, limiting pore pressure reduction

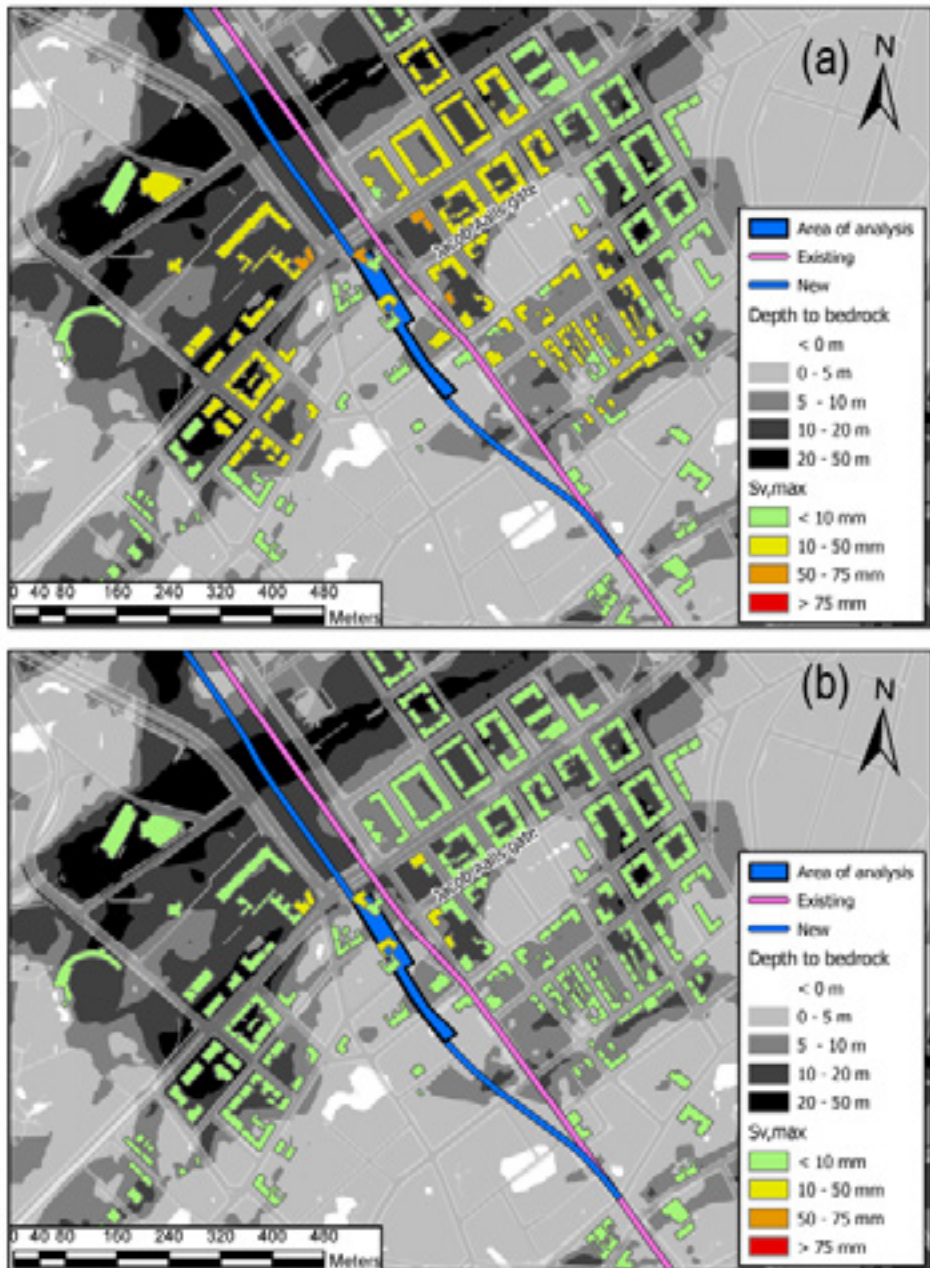
Setningene er beregnet for full konsolideringstid, det vil si at det antas en varig reduksjon av poretrykket, som vil være tilfellet for en forinjisert tunnel uten vanntett utstøping. For begge tilfellene vurderes alle bygninger i området som ikke er fundamentert på berg, totalt 284 bygninger. De vurderte faregradskartene for de to scenarioene vises i Figur 9. En oppsummering av resultatene er gitt i Tabell 4. Som referanse vil 80% av setningene oppstå etter omtrent 10-20 års konsolidering. Tabellen viser at det er vesentlig færre bygg som er vurdert innenfor lav faregradsklasse, og ingen bygninger innenfor moderat faregradsklasse hvis man klarer å begrense poretrykksreduksjonen til 5 m, sammenlignet med 10 m.

Tabell 4. Oppsummering av resultater med fordeling av bygninger i de fire ulike faregradsklassene.

Scenario	Antall bygninger fordelt på skadeklasse			
	Ubetydelig < 10 mm	Lav 10 - 50 mm	Moderat 50 - 75 mm	Høy > 75 mm
Scenario A ($\Delta u = 10$ m)	137	141	6	0
Scenario B ($\Delta u = 5$ m)	277	7	0	0

Resultatet for scenario A vises i Figur 9a, der antatt reduksjon av poretrykk med 10 m vil føre til setninger på 10-50 mm for en stor del av bygningene i områdene med leire. Noen bygninger nærmere tunnelen forventes å få setninger over 50 mm. Som figuren illustrerer, er influensområdet større enn 400 m.

Resultatet for scenario B med 5 m reduksjon av poretrykk ved berg vises i Figur 9b. Antallet bygninger med moderat påvirkning (10-50 mm setning) reduseres betydelig til bare 7 bygninger. Det er tydelig at kvaliteten på forinjeksjon og dermed reduksjonen av poretrykket har stor innvirkning på risikoen for bygningsskader i området. En større reduksjon av poretrykk medfører betydelig økt fare for setninger på bygg og økt skadepotensiale.



Figur 9. Resultater av faregradsvurdering for bygninger i området, øverst: scenario med 10 m poretrykksreduksjon, nederst: scenario med 5 m poretrykksreduksjon.

KONKLUSJON OG AVSLUTTENDE KOMMENTARER

Denne artikkelen presenterer en case-studie der sårbarhetsverktøy fra BegrensSkade-prosjektet er blitt tatt i bruk for planlegging av en fremtidig tunnel. Vurderingene har gitt innsikt i effektene av ulike scenarier for reduksjon av poretrykk, og viser, som forventet, viktigheten av å begrense reduksjonen av poretrykk for å redusere potensialet for bygningsskader. Konkret viser resultatene:

- Hvilke bygninger som krever ytterligere undersøkelser og mer detaljerte vurderinger.
- Vellykket forinjeksjonen av tunnelen er essensiell for å begrense setninger. Basert på dette kan man legge fokus på kartlegging av bergforhold, vurdere valg av injeksjonsutførelse og -materiale, samt kontrakt for utførelse.
- Resultatene gir et godt grunnlag for å utarbeide plan for overvåking og omfang og plassering av vanninfiltrasjonsbrønner.
- I tillegg har analysen bidratt til tverrfaglig forståelse mellom fagområdene ingeniørgeologi, geoteknikk og hydrogeologi, samt god kommunikasjon med byggherren knyttet til problemstillingen.

For å forbedre verktøyet bør det utføres videre arbeid for å kunne velge ulike parameter-sett for ulike delområder for å ta hensyn til variasjoner i grunnforholdene (spesielt OCR). I tillegg bør GIBV-verktøyet for dype utgravninger integreres med tunnelverktøyet, slik at man kan vurdere den samlede påvirkningen fra prosjekter med både åpne utgravninger og bergtunneler.

TAKK

Forfatterne takker Sporveien for tillatelse til å dele analyser fra prosjektet Majorstuen T-baneknutepunkt.

Utviklingen av GIBV-verktøyet ble gitt fra Forskningsrådet i bransjeprojektet BegrensSkade II /Remedy (bevilgning 267674), med partnere: Veidekke, Skanska, Statens vegvesen, Bane NOR, Jetgrunn, Huth & Wien engineering, Geo fundamentering, Entreprenørservice, Keller, Geovita, Norconsult, Multiconsult, Rambøll, Finans Norge, Sintef, og NTNU.

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

GIBV tool. https://github.com/norwegian-geotechnical-institute/REMEDY_GIS_RiskTool

Holmøy, K.H. (2008). Significance of geological parameters for predicting water leakage in hard rock tunnels. Norwegian University of Science and Technology. Dissertation

Janbu, N. (1970). Grunnlag i geoteknikk. Tapir forlag, Trondheim.

Karlsrud, K.; Erikstad, L; Snilsberg, P. (2003) *Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø*. Vegdirektoratet, Publikasjon Nr. 103.

Langford, J.; Holmøy, K.; Hansen, T. F.; Holter, K. G.; Stein, E. (2022) *Analysis of water ingress, grouting effort, and pore pressure reduction caused by hard rock tunnels in the Oslo region*. Tunnelling and Underground Space Technology, 130. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104762>

Lindstrøm, M., Kveen, A. (2005). Samfunnstjenlige vegtunneler 1998-2001. Sluttrapport. Vegdirektoratet Publikasjon Nr. 97., Report No. 105.

Peck, R.B. (1969). Deep excavation and tunnelling in soft ground. State-of-the-art-report, Mexico City, State of the Art Volume, Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. Found. Eng., 225-290.

Piciullo, L; Ritter, S; Lysdahl, A. O.; Langford, J; Nadim, F (2020) Assessment of building damage due to excavation-induced displacements: The GIBV method, Tunnelling and Underground Space Technology, 108. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103673>

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 II. CRC Press.

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>

Schmidt B., 1969. *Settlements and ground movements associated with tunneling in soil*. University of Illinois at Urbana-Champaign.