IC SMS: PROSJEKTERING AV TILTAK I SKRÅNING MED LAV STABILITET

IC SMS: Design of ground improvement in slopes with low calculated stability

Daniel Ryghseter, NGI / OsloMet
Christian Strømme Ofstad, NGI
Einar John Lande, NGI
Ørjan Nerland, NGI
Petter Fornes, NGI

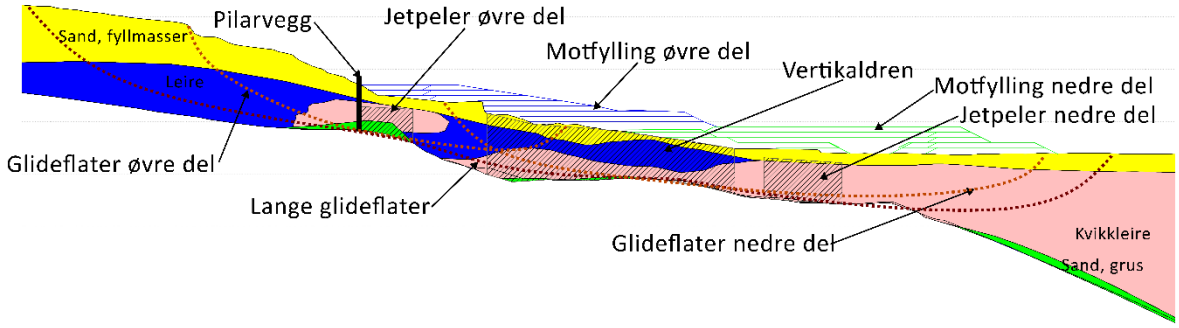
Sammendrag
Denne artikkelen beskriver prosjektering og oppfølging under utførelse for et områdestabilitetstiltak i forbindelse med InterCity Sandbukta-Moss-Såstad. Skråningen er ca. 30 meter høy, inneholder kvikkleire, og har flere snitt og glidesirkler med beregnet stabilitet under 1,2. Tiltakene inneholder vertikaldren, motfylling, jetpeler og en pilarvegg. Det er lagt vekt på å beskrive arbeidsmetodikk, prosjektering og oppfølging av arbeidene overordnet, med eksempler og fokus på risikoreduserende tiltak. Arbeidsmetodikken beskriver hvordan stabiliteten gradvis øker gjennom prosjektet, og hvordan forberedende arbeider prosjekteres før sikkerheten i skråningen økes. Bruken av modeller med strain-softening knyttes mot observerte deformasjoner fra vertikaldren og motfyllingen, og det gjøres rede for erfaringer fra jetpeler som grunnstabilisering i skråningen. Det er også beskrevet hvordan instrumenteringen er benyttet under oppfølging av utførelsen, og noen av begrensningene med slik oppfølging.

Summary
This article describes the design and construction follow-up of an area stability measure carried out as part of the InterCity Sandbukta–Moss–Såstad project. The slope is approximately 30 meters high, contains quick clay, and includes several sections and slip circles with calculated stability factors below 1.2. The stabilization measures include vertical drains, a counterfill, jet grouting columns, and a bored pile wall. Emphasis is placed on describing the overall working methodology, design process, and construction follow-up, with examples and a focus on risk-reducing measures. The working methodology illustrates how the slope stability gradually increases throughout the project and how preparatory works are designed before the slope safety is improved. The use of strain-softening models is linked to observed deformations from the vertical drains and counterfill, and experiences from using jet grouting as ground stabilization in the slope are presented. The article also describes how instrumentation has been used to monitor the construction process, along with some of the limitations associated with such monitoring.

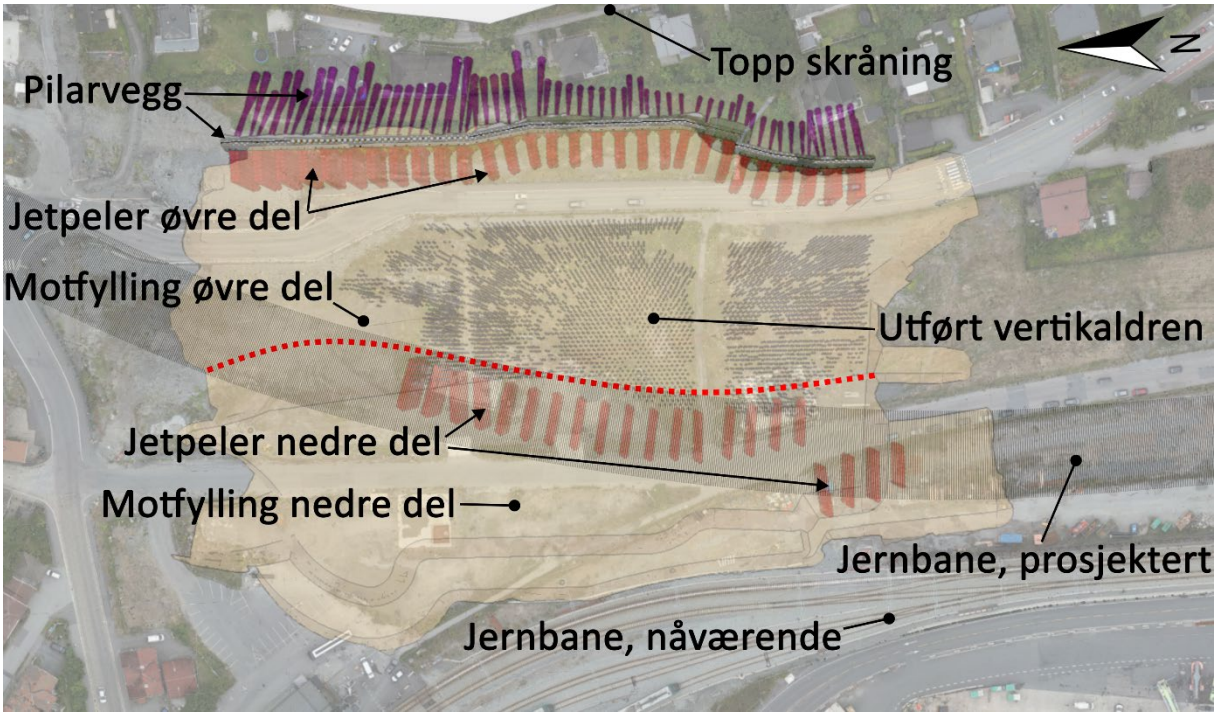
Innledning
I forbindelse med InterCity-prosjektet Sandbukta-Moss-Såstad, er det utført områdestabilitetstiltak langs traseen i Moss sentrum før hovedarbeidene starter. Denne artikkelen går gjennom de ulike stegene av arbeidene med å forbedre skråningsstabiliteten langs en strekning på ca. 250 meter, som omtales som «Kransen Syd». Formålet med artikkelen er å belyse prinsipper, metodikk og erfaringer fra gjennomførte stabilitetstiltak i Kransen Syd, samt å presentere sentrale læringspunkter for prosjektering og utførelse i områder med lav stabilitet, sensitiv leire og stor variasjon i grunnforhold.

Skråningen har en høydeforskjell på omtrent 30 m og er preget av lav beregnet sikkerhetsfaktor (typisk FS < 1,2) for flere potensielle glidesirkler som slår ut i skråningen. Figur 1 er et typisk snitt som illustrerer problematikken med flere potensielle glidesirkler med lav beregnet sikkerhet. Beregnet sikkerhet for glidesirkler ut i sjøen er berget, men ikke inkludert her da beregnet sikkerhet for disse er høyere og ikke vurdert å være kritisk. Lagdelingen består i hovedsak av et lag friksjonsmasser over leire. Nærheten til raet medfører store variasjoner i grunnforhold over korte distanser, og leirlaget består av både sammenhengende og usammenhengende områder med sensitiv leire. Grunnundersøkelsene viser også lommer med friksjonsmateriale og droppstein, samt stedvis et morenelag over berg. Figuren viser også planlagt jernbanekulvert i grått, og det permanente sikringstiltaket støttevegg ovenfor Fjordveien i grått.

Tiltakene i Kransen Syd består av vertikaldren, midlertidig motfylling, jetpeler og en pilarvegg som vist på Figur 2. Kort oppsummert er rekkefølgen på arbeidene slik: 1) Vertikaldren under motfylling. 2) Nedre del av motfyllingen legges ut. 3) Jetpeler i ribber installeres under nedre del av motfyllingen. 4) Øvre del av motfyllingen legges ut. 5) Jetpeler i ribber installeres under øvre del av motfyllingen. 6) Pilarvegg installeres i overkant av motfyllingen. 7) Jetpeler (kontaktpeler) etableres mellom jetpelribber og pilarvegg.



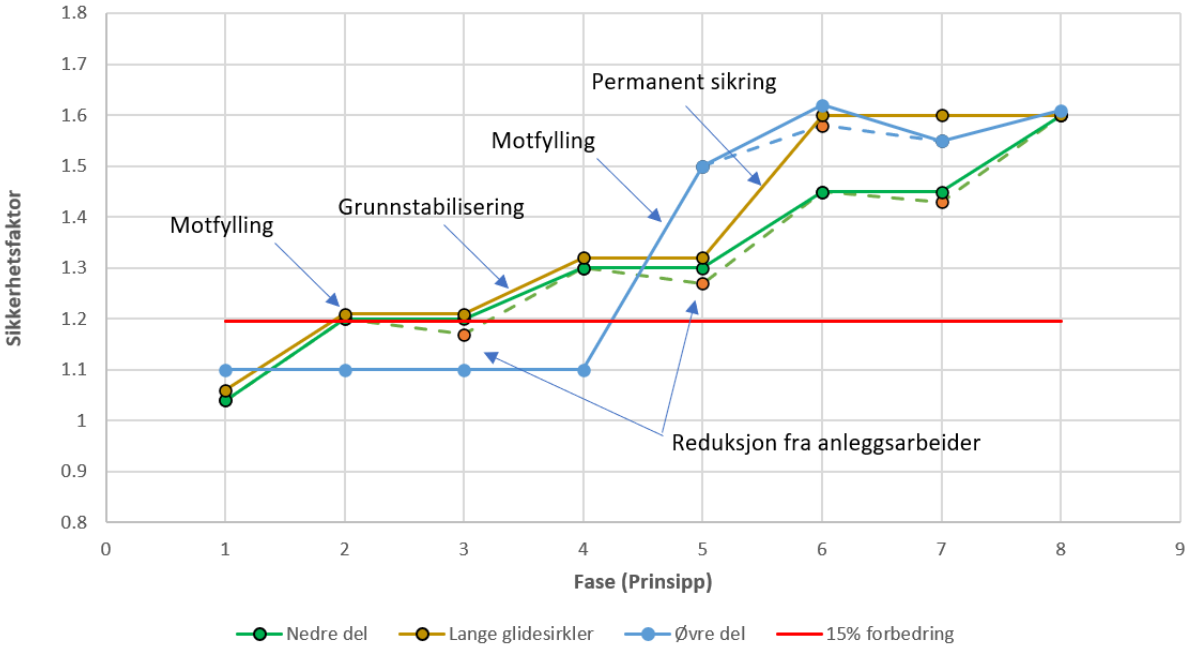
Figur 1: Snitt Kransen syd



Figur 2: Planoversikt Kransen Syd

Arbeidsmetodikk

Det var tidlig klart at en permanent konstruksjon (Pilarveggen) i øvre del av skråningen for å ivareta krav til skråningsstabiliteten ikke alene kunne etableres uten inngrep som midlertidig ville forverre stabilitet. Dette inkluderte blant annet arbeidsfyllinger for maskiner, fyllinger for omlegging av veier og de midlertidige lokale påvirkningene fra anleggsarbeidene i grunnen som følge av installasjon av en pilarvegg. Prosjektets hovedprinsipp har vært at permanent forsterkning ikke skal igangsettes uten at området først er forbedret med minimum 15 % i beregnet sikkerhet gjennom midlertidige tiltak og motfylling. Figur 3 er en prinsippskisse som viser 1) Kontinuerlig forbedring av sikkerheten gjennom prosjektet, 2) Hvordan sikkerheten for ulike glidesirkler utvikles på ulike tidspunkt, 3) Hvordan sikkerheten økes med 15 % før grunnstabilisering og 4) Hvordan prosjektet oppnår tilstrekkelig sikkerhet i siste fase.



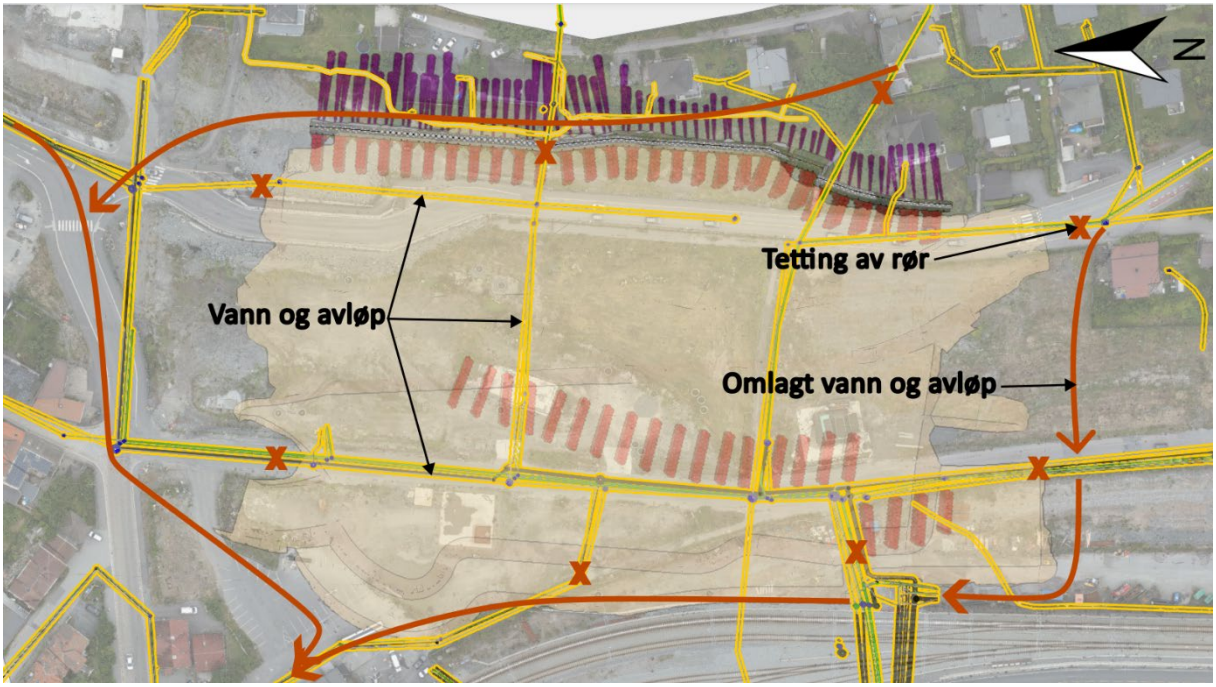
Figur 3: Utvikling av sikkerhetsfaktor Kransen Syd. Se typiske glideflater på figur 1.

Alle kritiske beregninger skulle verifiseres og utførelsen justeres basert på målinger i felt, med faseavhengige varslingsverdier og mulighet for umiddelbare tiltak eller stans av arbeider ved uventede utslag. Prosjekteringsarbeidet ble underlagt dobbel uavhengig kontroll, samt at valgte løsninger som hadde betydning for stabiliteten ble forelagt et uavhengig Fagråd for diskusjoner og innspill. Den strenge utførelses- og prosjekteringskontrollen skyldes behov for å redusere risikoen for en uheldig hendelse som i verste fall kan føre til at det oppstår et kvikkleireskred i Moss.

Forberedende arbeider

Under den prosjekterte motfyllingen lå det blant annet vann- og avløpsrør av ulik størrelse, deriblant hovedvannforsyningen til Jeløya. Deler av systemet ble etablert i 1930-årene, og er derfor svært sårbart for skader under bygging. Figur 4 viser prinsippet for omlegging av VA rundt Kransen Syd**.** På grunn av høy risiko, både for stabiliteten og brukere på Jeløya ved ledningsbrudd, var det ikke akseptabelt å starte hovedarbeidene før VA var lagt om. Dette innebar grave- og fyllingsarbeider i og nært bunnen av skråningen før sikkerheten var hevet, som i prinsippet er motstridende med arbeidsmetodikken. Det var derfor nødvendig å innføre risikoreduserende tiltak og tilpasse prosjekteringen, slik at forverringen av stabiliteten ble neglisjerbar.

Et viktig tiltak var å utføre prosjekteringen og omleggingen i tett samarbeid med VA-ingeniørene, slik at arbeidene i de mest kritiske områdene ble minst mulig inngripende. Sekundært ble det benyttet spunt og seksjonsvis utgraving for å redusere belastningen. I de mest kritiske områdene ble det satt krav om små lokale motfyllinger og/eller massebalanse under utførelse, slik at lastebilene fraktet inn og ut tilsvarende mengde masser. Rør som ikke måtte fjernes umiddelbart ble plugget, og er ved behov planlagt fjernet senere når stabiliteten er forbedret. For å redusere risiko for feil lagring av masser, er all mellomlagring regulert med arealbegrensing for hver gravemodell.



Figur 4: Prinsippskisse omlagt VA

Vertikaldren og motfylling

Prosjektert motfylling er i overkant av 80 000 m^3, med prosjekterte vertikaldren under deler av motfyllingen for å øke robustheten gjennom raskere dissipasjon av poreovertrykk og tilhørende økning i effektivspenningene under utfylling. Tilsvarende vil også eventuelle skjærtøyningsinduserte poretrykk dissipere raskere. Før arbeidene med vertikaldren kunne begynne, måtte det etableres anleggsveier og arbeidsplattformer som anleggsmaskinen kunne benytte. Som for de øvrige forberedende arbeidene, ble dette utført før sikkerheten var økt. Det var derfor viktig å prosjektere geometrien av anleggsveier tilpasset terrenget for å redusere volumet av fyllingen. For å unngå gravearbeider som potensielt kunne redusert stabiliteten i skråningen, ble det benyttet forboring fremfor forgraving gjennom toppmassene. Figur 5 viser et dronebilde under installasjon av vertikaldren.

Installasjon av vertikaldren har vært blant det mest utfordrende arbeidet å følge opp, fordi disse arbeidene har gitt mer deformasjoner enn forventet, og arbeidene måtte utføres før sikkerheten var økt med motfylling. På grunn av risiko for strain-softening i denne fasen, ble arbeidene med vertikaldren avsluttet med omtrent 75 prosent av drenene utført. På grunn av noe høyere poretrykk ved berg, medførte installasjonen av vertikaldrenene en liten permanent økning i poretrykk i leirlaget med tilhørende reduksjon i effektivspenninger. Det var også en midlertitid poretrykksøkning som følge av installasjonseffekter av vertikaldren.

Etablering av motfyllingen vil medføre store endringer i spenninger, poretrykk og deformasjoner/setninger under og omkring de utlagte massene. Motfyllingen ble derfor inndelt i fire etapper, hvor hver etappe vurderes før neste etappe kan begynne. Et kritisk moment ved utførelsen, har vært å sikre at utfyllingen utføres jevnt, uten store lokale forskjeller som kan føre til lokale grunnbrudd. Det er derfor generert stikningsdata og mengdeberegninger for hvert lag (1 meter) av fyllingen, slik at dette kan kontrolleres med både vekt fra pukkverk og terrengscan fra drone. På Figur

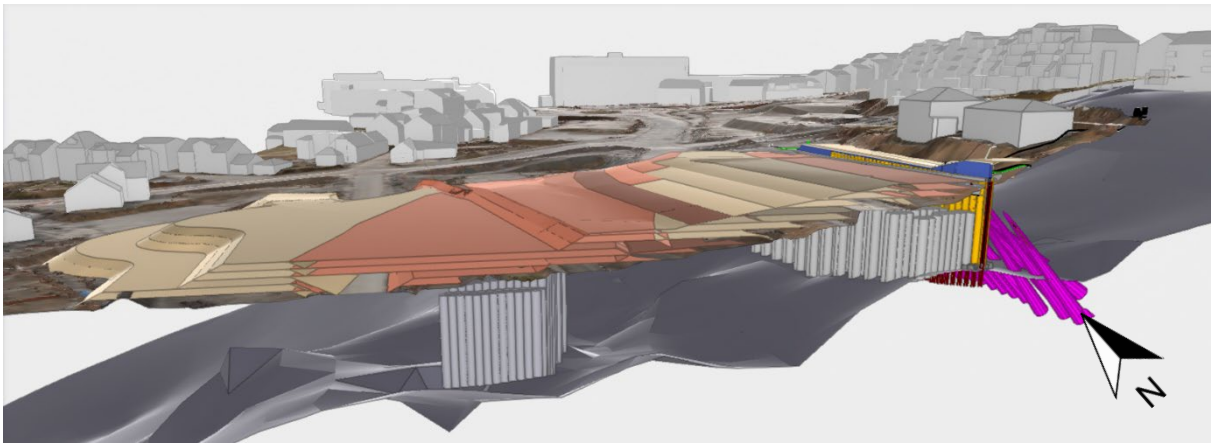
6 vises en 3D-modell med alle de prosjekterte lagene i motfyllingen. Prosjekteringen av skråningen har vært spesielt krevende, fordi glidesirkler som kommer opp midt i skråningen har omtrent like lav sikkerhet som de lange som slår ut i bunnen. Det har derfor vært spesielt fokus på beregning og oppfølging av områdene ovenfor fyllingsarbeidene, siden deformasjoner i skråningen kan føre til strain-softening i dette området.

Beregning av stabilitet i Kransen Syd krevde mer kompliserte vurderinger enn bransjen er vant til. Dette er spesielt fordi det er glidesirkler med lav sikkerhetsfaktor høyt i skråningen, hvor det var nødvendig å utføre flere tidkrevende tiltak før en kunne begynne å forbedre. Det har derfor vært viktig å kontrollere at planlagte aktiviteter ikke medfører økte lokale tøyninger som kan gi strain-softening. Grenselikevektsmetoden eller de standard jordmodellene som er inkludert i Plaxis tar ikke høyde for dette. Det er benyttet egne jordmodeller utviklet på NGI, og spesielt bør NGI-ADPsoft nevnes, og som tar hensyn til strain-softening. Med bruk av slike modeller er det viktig at resultatene sammenliknes med tradisjonelle modeller, og at den gir tilsvarende resultater i de områdene hvor modellene forventes å gi tilsvarende resultater. Modellene oppdateres også underveis, ved å kalibrere parametere så de beregnede deformasjonene samsvarer med de målte deformasjonene. Dette for å være mer sikker på at de beregnede skjærtøyningene er representative for tilstanden i skråningen. De kalibrerte modellene ble videre brukt til å vurdere forventet deformasjon av nye tiltak, og dette til å sette grenseverdier for inklinometerkanalene. For beregninger med dette nivået av forventet nøyaktighet er det viktig å se på alle parametere som benyttes i beregningen. Det ble blant annet tatt blokkprøver og utført treaksiale tester og skjærforsøk for å redusere usikkerhet rundt anisotropi.

Et aspekt med motfyllingen som har vært svært tidkrevende, er tilpasninger og omlegging av veiene under byggeprosessen. Gjennom anleggsområdet går både Fjordveien med en ÅDT >11 000 og Værlegata som er eneste tilkomst for lastebiler til Rockwool-fabrikken. Dette medførte strenge krav til både horisontal- og vertikalkurvatur, som har medført at det har vært krevende å tilpasse veien etter terrenget. Dette har blant annet medført at det har vært nødvendig å prosjektere påkjøringsramper opp på motfyllingen med lette masser og motvekt i form av motfylling lengre ned i skråningen.



Figur 5: Vertikaldren og anleggsveier



Figur 6: 3D-snitt med motfylling, grunnstabilisering og borede pilarer.

Grunnstabilisering

Arealet av motfyllingen begrenses i bunnen mot jernbanen, og samtidig er helningen på fyllingsskråningen begrenses av stabilitet under fyllingsfoten. Motfyllingen alene er derfor ikke tilstrekkelig til å øke sikkerheten for alle glidesirkler tilstrekkelig. Dette omfatter også glidesirkler i nedre del av skråningen, slik at andre tiltak må utføres før motfyllingen i øvre del legges ut. Løsningen ble grunnstabilisering i traseen til prosjektert jernbane, slik at det kan fylles til nødvendig høyde i øvre del av skråningen. Plasseringen i traseen er valgt med tanke på gjenbruk senere i prosjektet.

Ca. ¾ opp i skråningen er det prosjektert et permanent sikringstiltak med en forankret pilarvegg som skal ivareta krav til sikkerhet i en permanent fase. Ved prosjektering med c-φ reduksjon blir lastene, i en slik konstruksjon i en skråning med lav sikkerhet, svært store. Det er derfor prosjektert grunnstabilisering for å avlaste pilarveggen.

Basert på grunnforhold og konstruksjonens virkemåte, er det viktig at grunnstabiliseringen: 1) Har god gjennomførbarhet selv gjennom fyllinger og i områder med droppstein og bygningsrester 2) Har god kontakt med bergoverflaten, uten å skape en omrørt sone i bunnen 3) Påvirker jorden rundt minimalt under installasjon. Jetpeler ble valgt som foretrukket løsning. Det er imidlertid et begrenset antall prosjekter hvor jetpeler er brukt som skråningsstabilisering i kvikkleireskråninger. For å redusere risikoen ved bruk av jetpeler, ble det gjennomført et fullskalaforsøk for å verifisere at entreprenøren kunne levere på behovene nevnt over. Bergkontakten er inspisert med kjerneboringer, og påvirkning fra installasjonen ble fulgt opp med poretrykksensorer, inklinometerkanaler, jordtrykksplate og setningsmålinger på terreng.



Figur 7: Eksempel på overgang mellom jetpel og berg

Det har tidvis vært krevende å dokumentere overgangen mellom jetpeler og berg, se eksempel i Figur 7 som viser denne overgangen. Grunnet helningsavvik på både jetpel og kjerneboring, er det usikkerhet i hvorvidt prøvene er innenfor eller utenfor pelen i de dypere pelene. Erfaringen fra prosjektet, er at denne problematikken gradvis øker rundt 15-25 meters dybde. I tillegg er det forventet og tatt høyde for skyggeeffekter i forbindelse med helningsavvik, droppstein eller morenelag ved berg. Som et tiltak mot dette ble det etter hvert innført helningsmålinger i kjernehullene. Til tross for noen utfordringer med selve kjerneboringen, viser 35 av 43 kjerneprøver fra ribbene i dette området god kontakt med berg.

Erfaringene med deformasjoner av jetpeler i Kransen Syd viser at det rundt enkeltpeler er generelt lite deformasjoner. Den største driveren/årsaken til deformasjoner under utførelse har vist seg å være knyttet til blokkasje av returstrømmen. Det har derfor fra starten av vært satt krav om 100 % oppfølging av returstrøm under utførelse, og umiddelbare tiltak dersom blokkasje inntreffer. En har etter hvert innført logging av trykket i grouten i bakken under installasjon, som en ekstra sikkerhet. Dette har muliggjort en mer objektiv tolkning av blokkasje, men det er også utfordringer knyttet til målingene, som for eksempel at grouten kan tette dysene og føre til falske målinger av blokkasje. Det har underveis i prosjektet vært flere tilfeller av tap av returstrøm, uten at dette skyldes blokkasje. Dette skyldes lekkasjer til hulrom i grunnen, for eksempel gamle kjellere eller gammel VA. I slike tilfeller er det svært nyttig å kontrollere loggen for blokkasjer.

Erfaringen fra oppfølging viser at det er vanskelig å beskrive hvor omfattende en blokkasje er, basert på maskinloggen. Dette er i veldig stor grad avhengig av responsen til maskinføreren, reaksjonstid, dybde, og i hvor stor grad returmassene er blokkert. I områder tett på instrumentering (0-20 meter),

er det som regel mulig å vurdere omfanget av blokkasjen basert på instrumentering. I slike områder er det enklere å vurdere behovet for pause i grunnstabiliseringen, sammenliknet med områder uten instrumentering. I områder uten instrumentering nær jetpeler under utførelse blir man nødt til å anta at alle mulige blokkasjer er betydelige, som muligens har gitt unødvendige pauser i grunnstabiliseringen.

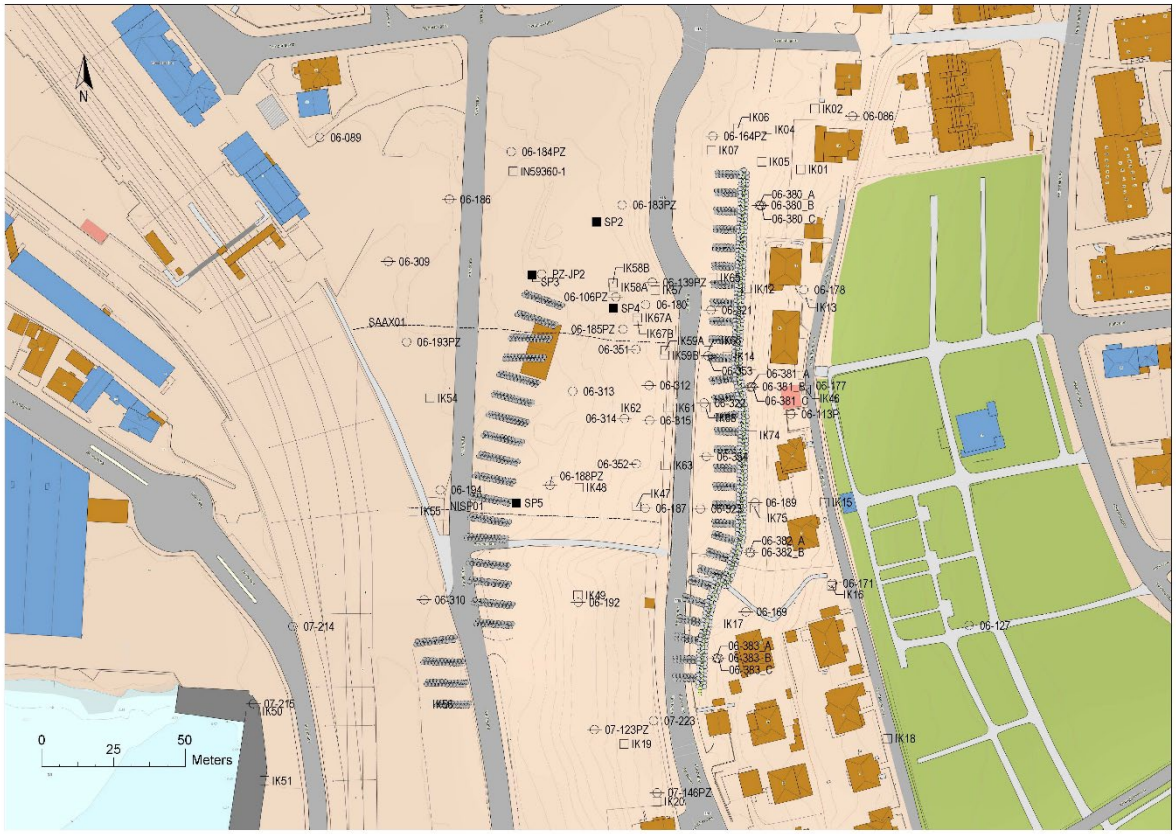
Et eksempel på justering av prosedyre etter observasjoner på instrumentering, er forboring for jetpeler. I et område ble det, på grunn av grunnforhold, forboret i full lengde av alle hull med vannhammer før installasjon. Flere hull ble boret før hammeren ble byttet og installasjon av jetpeler begynte. Samtidig ble det observert deformasjoner i dette området. Kombinasjonen av installasjonsprotokoller og instrumentering gjorde det mulig å spore årsaken, og endre utførelsen. Flere tiltak ble iverksatt, og det viktigste var å installere pelen rett etter forboringen.

Generelt om instrumentering

Sammenliknet med samferdselsprosjekter generelt, er det svært mye instrumentering og overvåkning av grunnen i Moss. Det fleste målinger logges i sanntid, med unntak av setningsbolter. Generelt består overvåkningen i Kransen Syd av inklinometerkanaler, poretrykksmålinger, setningsslanger, helningsmålinger på skinner og kontaktledningsmaster, setningsbolter samt automatiske totalstasjoner med prismer på bygninger, skinnegang og frittstående setningsplater. I tillegg benyttes høyoppløselig InSAR, men dette leveres ikke i sanntid.

Som beskrevet, er arbeidsmetodikken prosjektering med verifikasjon av denne ved bruk av instrumentering. Prosjektet har betydelig mer instrumentering enn normalt for infrastrukturprosjekter, men det er ikke slik at alle arbeider i alle områder har dedikerte sensorer og grenseverdier. Prosjekteringen utføres som «Geoteknisk prosjektering ved beregning» iht. NS-EN 1997, med strategisk plassert instrumentering for å bekrefte at beregningene i tilstrekkelig grad representerer det som måles i felt.

Arbeidsmetodikken med instrumentering er velkjent, men omfanget og hyppighet av verifiseringene er ikke utført på samme nivå i Norge før. Generelt kontrolleres instrumenteringssytemet daglig av byggherren når det er produksjon i området, i tillegg til de automatiske varslingsgrensene. I de mest kritiske fasene av prosjektet, er det daglige eller ukentlige gjennomganger hvor prosjekterende i tillegg kontroller målte verdier mot beregnede verdier. Ved så tett oppfølging er det viktig å ha spesifisert krav til instrumenteringens oppetid og redundans på forhånd. Som et eksempel, har prosjektet opplevd stans i alle arbeider i opp til en arbeidsdag grunnet nedetid i mobilnettet. Noe nedetid i forbindelse med mobilnettet, bytte av defekte sensorer, batteribytte, vedlikehold på servere og så videre må påregnes, men forventinger bør avklares på forhånd.



Figur 8: Oversikt over instrumentering (poretrykk, inklinometer og setningsslanger) i Kransen Syd

Læringspunkter og status høsten 2025

Arbeidene med etablering av ny VA, motfylling og grunnstabilisering er i all hovedsak fullført. Det medfører at beregnet sikkerhet, og følgelig robustheten til skråningen er økt, slik at de permanente arbeidene kan starte. Nå gjenstår arbeidene med den permanente pilarveggen som markerer avslutningen på arbeidene med å forbedre områdestabiliteten i Kransen Syd, og en kan deretter begynne med å bygge jernbane og vei.

Som en oppsummering, er det satt sammen en liste med de viktigste erfaringene fra arbeidene som er beskrevet.

- Instrumentering er viktig for å kunne stanse grunnarbeider i god tid før en kritisk situasjon ev. oppstår, samtidig som det bidrar til å sikre fremdrift ved å avkrefte mulige blokkasjer som normalt ville ført til stans.
- Potensielle negative installasjonseffekter av grunnarbeider må vurderes og følges opp nøye når arbeidene skal foretas i eller i nærheten av kvikkleireskråninger som har lav stabilitet. Dersom det er fare for at grunnarbeider kan ha en negativ effekt på stabiliteten må det på forhånd utføres tiltak som forbedrer stabiliteten før grunnarbeidene kan starte. De potensielle negative effektene som følge av de planlagte grunnarbeidene mår aldri være større enn effekten av de stabilitetsforbedrende tiltakene som utføres på forhånd.
- Instrumentering har vært helt nødvendig for å kunne utføre grunnarbeidene i kvikkleireskråningen med lav stabilitet på en trygg måte.

- I skråninger med lav stabilitet og flere potensielle kritiske glidesirkler, er det viktig å kontrollere hvorvidt skråningsstabiliteten reduseres med de planlagte tiltakene. I denne type skråninger bør stabiliteten også kontrolleres med modeller som tar høyde for strain-softening.
- Den høye mobiliseringen i skråningen kan ha bidratt til å skape større deformasjoner enn normalt ved installasjon av vertikaldren. Installasjon av vertikaldren i kvikkleireskråninger med lav stabilitet bør vurderes nøye.
- Verifisering med instrumentering gir en trygghet i de prosjekterte løsningene. Samtidig kan oppfølging av store mengder instrumentering tidvis være utfordrende, med plutselig behov for ressurser med høy teknisk kompetanse dersom instrumenteringen avviker fra det som er forventet.
- Verifisering med instrumentering er en teknisk krevende løsning. Det krever høy kompetanse på beregningssiden, de fysiske prosessene ved arbeidene (grunnstabilsiering / vertikaldren) og god kjennskap til instrumentene som benyttes. I tillegg kreves et godt samarbeid med byggherre som sikrer at fremdrift i prosjektet sammenfaller med beregninger, og at endringer eller hendelser kommuniseres godt med rådgiveren.
- Ved etablering av nye samferdselsprosjekter i bysentrum må det settes av tilstrekkelig tid til å prosjektere og utføre forberedende arbeider i form av omlegging av eksisterende infrastruktur og faseplanlegging av veiomlegginger gjennom prosjektets utførelsesfase.