

Anders Githmark Nore

# Kalksementstabilisert byggegrop i sensitiv leire - Numerisk analyse i 2D og 3D av lastopptak og deformasjoner i stabilisert jordvolum

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Yutao Pan

Medveileder: Marit Skaug Løyland og Egil Monsås

Juni 2024



Anders Githmark Nore

# **Kalksementstabilisert byggegrop i sensitiv leire - Numerisk analyse i 2D og 3D av lastopptak og deformasjoner i stabilisert jordvolum**

Masteroppgave i Bygg- og miljøteknikk

Veileder: Yutao Pan

Medveileder: Marit Skaug Løyland og Egil Monsås

Juni 2024

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap

Institutt for bygg- og miljøteknikk



Kunnskap for en bedre verden



# Sammendrag

Denne masteroppgaven undersøker bruken av kalksement-stabilisering i byggegropen på Campus Ullevål. Oppgaven er en del av CURIIOUS-prosjektet, ledet av NGI, og benytter seg av simuleringer utført i Plaxis 2D og 3D. KS-stabilisering er en utbredt metode for å forbedre eksisterende jords egenskaper i byggegropen, men det er fremdeles mange ubesvarte spørsmål rundt lastopptak i stabilisert volum, og dimensjonering med forenklete 2D-modeller.

Gjennom parametrisk modellering og simulering utforsker denne masteroppgaven hvordan lastopptaket og andre dimensjonerende verdier responderer på modellendringer der mengde KS-materiale står sentralt. Masteroppgaven gir en dypere forståelse for hvordan lastopptaket fordeles mellom stabilisert og ubehandlet volum etter fullstendig utgraving.

Resultatene fra simuleringene viser at 3D-simuleringer er mer representative for virkelige forhold sammenlignet med 2D-modeller når målt opp mot målinger fra instrumentering. 2D-modellering av KS-ribber med den konvensjonelle metoden definert av SVV viser seg å underestimere stivheten til stabilisert volum. Modellering med 2D-verktøy anses å være trygt, men i overkant konservativt. Gjennom modellering i 3D-programmer oppnås det mer virkelighetsnære resultater. Det er dog mer omfattende å modellere i 3D. Det konkluderes dermed med en anbefaling om å finjustere den konvensjonelle metoden for å gi bransjen mer representative modeller som kan bidra til å kutte ned bruken av miljøbelastende stabiliseringsmaterialer.

# Abstract

This master's thesis investigates the use of lime-cement stabilisation in the construction pit at Campus Ullevål. The thesis is part of the CURIOUS project, led by NGI, and utilises simulations performed in Plaxis 2D and 3D. LC-stabilisation is a widespread method for improving the properties of existing soil in construction pits, but there are still many unanswered questions regarding load absorption in the stabilised volume, and dimensioning with simplified 2D models.

Through parametric modelling and simulation, this thesis explores how load absorption and other design values respond to model changes where the amount of LC-material is in focus. The thesis provides a deeper understanding of how load absorption is distributed between stabilised and untreated volume after complete excavation.

The results from the simulations show that 3D simulations are more representative of real-world conditions compared to 2D models when measured with instrumentation. 2D modelling of LC-ribs using the conventional method defined by SVV is found to underestimate the stiffness of the stabilised volume. Modelling with 2D tools is considered to be safe, but excessively conservative. Through modelling in 3D programs, more realistic results are achieved. However, modelling in 3D is more extensive. It is therefore concluded with a recommendation to fine-tune the conventional method to provide the industry with more representative models that can help to reduce the use of environmentally harmful stabilisation materials.

# Forord

Denne masteroppgaven ble gjennomført våren 2024 i samarbeid med NTNU og NGI. Oppgaven er basert på NGIs utlyste masteroppgavetema «Campus Ullevål - Optimalisert prosjektering av dype byggegropen i bløt leire» (NGI, 2023c). Masteroppgaven inngår som en del av forskningsprosjektet CURIOUS, ledet av NGI.

Det overordnede temaet for avhandlingen er valgt på grunnlag av interesse og arbeid knyttet til Campus Ullevål-prosjektet i prosjektoppgaven, samt gjennom et opphold som sommervikar ved seksjonen Landfundamentering hos NGI sommeren 2023.

Jeg vil rette en takk til familie, min kjæreste og venner som alltid har stått meg nært, samt studiekamerater for gode faglige diskusjoner. Videre vil jeg takke veilederne Egil Monsås, Marit Skaug Løyland og Yutao Pan, for god faglig veiledning gjennom høst- og vårsemesteret.

Trondheim, juni 2024  
Anders Githmark Nore



# Innhold

|                                                               |             |
|---------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Sammendrag</b>                                             | <b>i</b>    |
| <b>Abstract</b>                                               | <b>ii</b>   |
| <b>Forord</b>                                                 | <b>iii</b>  |
| <b>Innhold</b>                                                | <b>vi</b>   |
| <b>Figurer</b>                                                | <b>viii</b> |
| <b>Tabeller</b>                                               | <b>ix</b>   |
| <b>Forkortelser</b>                                           | <b>x</b>    |
| <b>1 Innledning</b>                                           | <b>1</b>    |
| 1.1 Motivasjon . . . . .                                      | 1           |
| 1.2 Målsetning . . . . .                                      | 2           |
| 1.3 Begrensninger . . . . .                                   | 2           |
| <b>2 Campus Ullevål</b>                                       | <b>3</b>    |
| 2.1 Forskningsprosjektet CURIOUS . . . . .                    | 3           |
| 2.2 Grunnundersøkelser . . . . .                              | 4           |
| 2.3 Tekniske løsninger og utgravningsgeometri . . . . .       | 4           |
| 2.4 Grunnforsterkning med tørrmiksing av kalksement . . . . . | 6           |
| 2.4.1 Potensielle miljøgevinster . . . . .                    | 6           |
| 2.5 KS-stabilisering på Campus Ullevål . . . . .              | 7           |
| 2.6 Instrumentering . . . . .                                 | 8           |
| <b>3 Teori</b>                                                | <b>9</b>    |
| 3.1 Litteratursøk . . . . .                                   | 9           |
| 3.2 Elementmetoden . . . . .                                  | 12          |

|          |                                                       |           |
|----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3      | Jordmodeller . . . . .                                | 12        |
| 3.3.1    | Mohr-Coloumb . . . . .                                | 13        |
| 3.3.2    | Hardening Soil . . . . .                              | 14        |
| 3.3.3    | NGI-ADP . . . . .                                     | 15        |
| <b>4</b> | <b>Metodikk for FEM-analyser</b>                      | <b>17</b> |
| 4.1      | Beregningsfaser . . . . .                             | 17        |
| 4.2      | Python-skript . . . . .                               | 18        |
| 4.3      | Modelloppsett . . . . .                               | 19        |
| 4.3.1    | Drenert kil bak spuntveggen . . . . .                 | 20        |
| 4.3.2    | Valg av numerisk løser: Pardiso vs. Picos . . . . .   | 21        |
| 4.3.3    | Buelengdekontroll . . . . .                           | 22        |
| 4.4      | Modellkonfigurasjonene . . . . .                      | 22        |
| 4.5      | Vektet udrenert skjærstyrke og stivhet i KS . . . . . | 24        |
| 4.6      | Materialparametre . . . . .                           | 25        |
| <b>5</b> | <b>Innledende analyse</b>                             | <b>28</b> |
| 5.1      | Betydning av mesh-kvalitet i Plaxis . . . . .         | 28        |
| 5.1.1    | Elementnett mellom berg og KS-peler . . . . .         | 29        |
| 5.1.2    | Meshkalibrering - Plaxis 2D . . . . .                 | 29        |
| 5.1.3    | Meshkalibrering - Plaxis 3D . . . . .                 | 30        |
| 5.2      | Krefter i spuntvegg, fase 9 . . . . .                 | 31        |
| 5.3      | Campus Ullevål-ekvivalent simulering . . . . .        | 32        |
| 5.3.1    | Skråstivere . . . . .                                 | 32        |
| 5.3.2    | Deformasjon av spuntvegg . . . . .                    | 33        |
| 5.3.3    | Moment i spuntvegg . . . . .                          | 34        |
| 5.3.4    | Kritisk sikkerhetsfaktor . . . . .                    | 36        |
| <b>6</b> | <b>Resultater - Hovedanalyse</b>                      | <b>37</b> |
| 6.1      | Simuleringspakke 1 . . . . .                          | 37        |
| 6.1.1    | Numerisk komplikasjon . . . . .                       | 38        |
| 6.1.2    | Forskyvningforløp i fase 9 . . . . .                  | 38        |
| 6.1.3    | Spenningsfordeling i vertikale tversnitt . . . . .    | 39        |
| 6.1.4    | Hosisontalspenningsfordeling . . . . .                | 40        |
| 6.1.5    | Lastopptak i ubehandlet leire . . . . .               | 41        |
| 6.1.6    | Lastopptak i KS-ribber . . . . .                      | 42        |
| 6.1.7    | Deviatorisk spenning . . . . .                        | 42        |
| 6.1.8    | Mobiliseringsgrad i KS-ribb . . . . .                 | 43        |

|          |                                                               |           |
|----------|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.1.9    | Sidefriksjon på KS-ribbber . . . . .                          | 44        |
| 6.1.10   | Lastopptak i jordvolum innenfor KS-ribbene . . . . .          | 45        |
| 6.2      | Simuleringspakke 2 . . . . .                                  | 46        |
| 6.2.1    | Endret lengde . . . . .                                       | 46        |
| 6.2.2    | Endret dybde . . . . .                                        | 47        |
| 6.3      | Sammenligning av 2D- og 3D-simulering . . . . .               | 48        |
| 6.3.1    | Sammenligning av moment i spuntvegg . . . . .                 | 48        |
| 6.3.2    | Deformasjon av spuntvegg . . . . .                            | 49        |
| 6.3.3    | Deformasjonsmålinger i passiv sone . . . . .                  | 49        |
| 6.4      | 2D-simuleringer med justert stivhet i KS-materialet . . . . . | 51        |
| <b>7</b> | <b>Diskusjon</b>                                              | <b>52</b> |
| 7.1      | Validitet . . . . .                                           | 52        |
| 7.2      | Lastfordeling i stabilisert volum . . . . .                   | 53        |
| 7.3      | 2D simuleringer . . . . .                                     | 54        |
| 7.4      | Vurdering av vektet 2D-parametre . . . . .                    | 54        |
| 7.5      | Mulige miljøbesparelser . . . . .                             | 55        |
| <b>8</b> | <b>Konklusjon</b>                                             | <b>56</b> |
| 8.1      | Videre arbeid . . . . .                                       | 57        |
|          | <b>Referanser</b>                                             | <b>60</b> |
|          | <b>Vedlegg</b>                                                | <b>i</b>  |
| .1       | Resterende materialparametre . . . . .                        | i         |
| .2       | Tilleggsfigurer . . . . .                                     | v         |
| .3       | Skript til simuleringspakke 1 . . . . .                       | ix        |

# Figurer

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.1 Arbeidssteg etter sentral utgravning. . . . .                                                                    | 5  |
| 2.3.2 Instrumentert seksjon ved steg 2. . . . .                                                                        | 5  |
| 2.4.1 Installasjon av KS-peler (Moseley og Kirsch, 2004). . . . .                                                      | 6  |
| 2.4.2 Eksempler på konfigurasjoner av enkeltpel, enkeltribb og dobbeltribb. . . . .                                    | 6  |
| 2.5.1 KS-peler installert på CU. . . . .                                                                               | 7  |
| 2.6.1 Instrumentert seksjon. . . . .                                                                                   | 8  |
| 3.2.1 6- og 15-noders triangulærelement og 10-noders tetraederelement. . . . .                                         | 12 |
| 3.3.1 Mohr-Coloumb-kriteriet med mobilisert friksjonsvinkel $\rho$ i $\tau$ - $\sigma$ -planet (Nordal, 2020). . . . . | 13 |
| 3.3.2 Hyperbolisk spennings-tøyning-kurve for drenert triaksial lasting (Duncan og Chang, 1970). . . . .               | 14 |
| 3.3.3 Forhardning av kappe og kjegle (Grimstad, 2023). . . . .                                                         | 15 |
| 3.3.4 Retningsavhengig skjærstyrke i NGI-ADP (Grimstad, 2023). . . . .                                                 | 16 |
| 3.3.5 Anisotrop undrenert skjærstyrke for normalkonsolidert leire . . . . .                                            | 16 |
| 4.2.1 Aktivering av ekstern skripting-server. . . . .                                                                  | 19 |
| 4.3.1 Skjermdump av fase 6 og borehull fra Plaxis 3D. . . . .                                                          | 20 |
| 4.3.2 Drenert kil bak spuntveggen, fase 7. . . . .                                                                     | 20 |
| 4.3.3 Normal last-kontroll og buelengde-kontroll (Sloot, 2019). . . . .                                                | 22 |
| 5.1.1 Utvikling av elementens formkvalitet. . . . .                                                                    | 29 |
| 5.2.1 Skjærkraft $V$ [kN/m] på spuntvegg ( $Q_{13}$ ). . . . .                                                         | 31 |
| 5.2.2 Aktivt- og passivt jordtrykk. . . . .                                                                            | 31 |
| 5.3.1 Normalkraftmålinger fra lastceller og Plaxis. . . . .                                                            | 32 |
| 5.3.2 Deformasjonsmålinger fase 6 og 8. . . . .                                                                        | 33 |
| 5.3.3 Deformasjonsmålinger fase 9. . . . .                                                                             | 33 |
| 5.3.4 Momentmålinger fra FBG1+2 og Plaxis 3D, fase 6. . . . .                                                          | 34 |
| 5.3.5 Momentmålinger fra FBG1+2 og Plaxis 3D, fase 8. . . . .                                                          | 35 |
| 5.3.6 Momentmålinger fra FBG1+2 og Plaxis 3D, fase 9. . . . .                                                          | 35 |

|                                                                                                                                |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 5.3.7 Konvergens av sikkerhetsfaktor fra fase 4 i Plaxis 3D (28% KS). . . . .                                                  | 36   |
| 6.1.1 Skjærspenning i KS-ribber under spuntveggen. . . . .                                                                     | 38   |
| 6.1.2 Horisontale fase-deformasjoner, $Pu_x$ , i fase 9. . . . .                                                               | 38   |
| 6.1.3 Normalspenninger ( $\sigma_N$ ) på tverrsnittene fra $x = 5.0$ m og $x = 10.0$ m. . . . .                                | 39   |
| 6.1.4 Horisontale totalspenninger ( $\sigma_{xx}$ ) på linjenesnittene $x = 5.0$ m og $x = 10.0$ m. . . . .                    | 40   |
| 6.1.5 Horisontalspenninger ved ulike dekningsgrader av KS. . . . .                                                             | 40   |
| 6.1.6 Lastopptak i ubehandlet leire. . . . .                                                                                   | 41   |
| 6.1.7 Lastopptak i KS-ribber. . . . .                                                                                          | 42   |
| 6.1.8 Deviatorisk spenning $q$ [kPa] i KS-ribbene (28% dekningsgrad). . . . .                                                  | 42   |
| 6.1.9 Relativ skjærspenning, $\tau_{rel}$ , i KS-ribb (28% dekningsgrad). . . . .                                              | 43   |
| 6.1.10 Utvikling av skjærspenninger i KS-ribbene (venstre) og deviatorisk spenning<br>ved $z=91.3$ m (høyre) (30% KS). . . . . | 44   |
| 6.1.11 Gjennomsnittlig horisontalspenning $\sigma_{xx}$ fra $x = 15.1$ m. . . . .                                              | 45   |
| 6.3.1 Moment i spuntvegg fra Plaxis 2D og 3D. . . . .                                                                          | 48   |
| 6.3.2 Deformasjonsplot fra Plaxis 2D og 3D. . . . .                                                                            | 49   |
| 6.3.3 Deformasjon i passiv sone etter fase 9 ved $x = 1.5$ m og $x = 5$ m. . . . .                                             | 49   |
| 6.3.4 IN3, IN5 og IN2 i fase 9. . . . .                                                                                        | 50   |
| 6.4.1 Deformasjon av spuntvegg: 3D-simulering vs. 2D med variert dekningsgrad<br>med konvensjonell metode. . . . .             | 51   |
| 2.1 Endelig borplan, Campus Ullevål. . . . .                                                                                   | v    |
| 2.2 Soneinndeling av bermdimensjoner og putehøyde, (NGI, 2023d). . . . .                                                       | v    |
| 2.3 Deviatorisk spenning i ubehandlet leire fra hhv. kote 90.6, 88,9 og 87,3. . . . .                                          | vi   |
| 2.4 Målte stivhetsmoduler fra enaksiale trykkforsøk av KS-materialer fra Klett<br>(NGI, 2017). . . . .                         | vii  |
| 2.5 Målte skjærstyrker fra enaksiale trykkforsøk av KS-materialer fra Klett (NGI,<br>2017). . . . .                            | vii  |
| 2.6 Bruddsirkel fase 4, Plaxis 2D ( $a = 28\%$ ). . . . .                                                                      | viii |
| 2.7 Bruddsirkel fase 4, Plaxis 3D ( $a = 28\%$ ). . . . .                                                                      | viii |
| 2.8 Deformasjon av spuntvegg i fase 9 ( $a = 28\%$ ). . . . .                                                                  | ix   |

# Tabeller

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.3.1 Bermdimensjoner og putehøyde. . . . .                                                           | 5   |
| 4.1.1 Beregningsfaser i Plaxis 2D og 3D . . . . .                                                     | 18  |
| 4.4.1 Simuleringspakke 1. . . . .                                                                     | 23  |
| 4.4.2 Simuleringspakke 2. . . . .                                                                     | 23  |
| 4.5.1 Vektet skjærstyrke og stivhetsmodul for stabilisert jordvolum ved ulike dekningsgrader. . . . . | 25  |
| 4.6.1 Hardening soil-materialer. . . . .                                                              | 25  |
| 4.6.2 NGI-ADP-materialer. . . . .                                                                     | 26  |
| 4.6.3 KS-stabilisert volum med Mohr-Coulombs jordmodell (2D). . . . .                                 | 27  |
| 4.6.4 KS-stabilisert volum med Mohr-Coulombs jordmodell (3D). . . . .                                 | 27  |
| 5.1.1 Resultater fra ulike mesh-kvaliteter i Plaxis 2D. . . . .                                       | 30  |
| 5.1.2 Resultater fra ulike mesh-kvaliteter i Plaxis 3D. . . . .                                       | 30  |
| 6.2.1 Resultater fra Plaxis 2D-simuleringer med endret KS-lengde. . . . .                             | 46  |
| 6.2.2 Resultater fra Plaxis 2D-simuleringer med endret KS-dybde. . . . .                              | 47  |
| .1.1 Materialparametrene til arbeidsplaten. . . . .                                                   | i   |
| .1.2 Materialparametre til spuntveggen benyttet i 2D-beregningene. . . . .                            | i   |
| .1.3 Materialparametre til spuntveggen benyttet i 3D-beregningene. . . . .                            | ii  |
| .1.4 Materialparametre til skråstivere i PLAXIS 2D. . . . .                                           | ii  |
| .1.5 Materialparametre til skråstivere i PLAXIS 3D. . . . .                                           | ii  |
| .1.6 Materialparametre til putebjelke i PLAXIS 3D. . . . .                                            | iii |
| .1.7 Materialparametre for interface til leire 1, 2 og 3. . . . .                                     | iii |
| .1.8 Materialparametre for betong-interface. . . . .                                                  | iv  |

# Forkortelser

- **CU** Campus Ullevål
- **CURIOUS** Campus Ullevål: Research and Instrumentation Of Underground Structures
- **FEM** Finite Element Method
- **HS** Hardening Soil
- **KS** Kalksement
- **LC** Lime-cement
- **MC** Mohr Coulomb
- **NGI** Norges Geotekniske Institutt
- **NTNU** Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet
- **SVV** Statens Vegvesen

# Kapittel 1

## Innledning

### 1.1 Motivasjon

Grunnforsterkning med kalksement eller andre bindemidler (multicem, sement osv.) har i nyere tid blitt en utbredt teknikk for å forbedre jordens egenskaper i byggeprosjekter. Metoden har mange anvendelsesområder som stabilisering av skjæringer, fyllinger og skråninger, avstivning av byggegrop, setningsreducerende tiltak, jordavstivning osv. På Campus Ullevål blir grunnforsterkning benyttet til å forbedre stabiliteten og støtte opp spuntveggen ved installering av KS-peler i ribbemønster inntil spuntveggen. Teknikken blir ofte omtalt som *kalksementstabilisering* og blir forkortet til KS-stabilisering videre i oppgave. Imidlertid, til tross for dens utbredte bruk, er det fortsatt flere sentrale spørsmål knyttet til hvordan lasten tas opp og fordeles i stabilisert leire, og i den ubehandlede leiren mellom ribbene.

Den eksisterende forståelsen av lastopptak og deformasjonsmekanismer i KS-stabilisert leire er begrenset, noe som skaper usikkerhet i prosjekterings- og konstruksjonsfasen av byggeprosjekter. Spesifikt krever dette en dypere innsikt i hvordan lasten effektivt tas opp og fordeles i det stabiliserte materialet. Disse kunnskapshullene utgjør betydelige utfordringer i nøyaktigheten av numeriske beregninger, som er avgjørende for å forutsi strukturell atferd og sikkerhet.

Da numeriske beregninger i 3D ofte krever betydelig større ressurser både til modellering og beregning, blir det i geoteknisk prosjektering ofte benyttet 2D-verktøy som Plaxis 2D. Fra 3D til 2D gjøres det forenklinger som potensielt kan redusere nøyaktigheten på svarene og man er dermed nødt til å kartlegge konsekvensene av forenklingene. Ved å finne retningslinjer for å optimalisere konfigurasjonen av de KS-stabiliserte ribbene, vil man ikke bare kutte ned kostnadene knyttet til installering og materialer, men også spare miljøet for unødvendig påkjenninger da produksjonen av kalksement etterlater betydelige  $CO_2$ -utslipp.

## 1.2 Målsetning

Målet med oppgaven er å bidra med en dypere forståelse for KS-stabilisering av byggegropen i marin leire. Studiet tar til sikte å fylle kunnskapshull ved å utvikle en forbedret forståelse og modelleringstilnærming for lastopptak og deformasjoner i KS-stabilisert leire. Gjennom parametrisk modellering og analyse vil studiet utforske interaksjonen mellom KS-stabilisert leire og belastninger, med en spesifikk vekt på integrering av 3D-effekter i FEM-beregninger.

Med hensyn til både klima og kostnader, tilstreber studiet også gi svar på hvordan endret mengde KS-stabilisert materiale påvirker sikkerheten til byggegropen i marin leire. Med en bedre forståelse kan resultatene bidra til mer klimavennlige og kostnadseffektive løsninger ved KS-stabilisering.

## 1.3 Begrensninger

Simuleringene gjennomført i studiet er utført på totalspenningsbasis. Leirlagene som utgjør samtlige materialer under fyllmassene er definerte med drenasjekategorien *Undrained C*. Det vil si at stivhet og styrker er definert som udrenerte verdier og at det ikke eksplitt beregnes noe poretrykk eller effektivspenninger i simuleringene. Udrenert totalspenningsanalyse fungerer godt for simuleringer av byggegropen i leire da permeabiliteten til leire er veldig lav. Likevel kan det forventes noe innstrømning av grunnvann inn i byggegropen. Det er av NGI estimert en innstrømningen på 30-60 liter/døgn i detaljprosjekteringen (NGI, 2023d). I en optimal analyse bør denne innstrømningen tas hensyn til, så det settes dermed en mindre begrensning ved bruk av udrenert totalspenningsanalyse. For optimal simulering kan kalkulasjonstypen gjennomføres med *fully coupled flow-deformation*, der leirens permeabilitet og vannstrømningen tas hensyn til.

En annen sentral begrensning i oppgaven er kjøretiden til simuleringsverktøyet Plaxis 3D. Lang kjøretid begrenser antallet simuleringer med høy nøyaktighet som kan gjennomføres innenfor prosjektets tidsramme. Dette kan påvirke detaljrikdommen til resultatene fra simuleringene. I tillegg representerer kompleksiteten til byggegropen en betydelig utfordring. På grunn av beregningsmessige begrensninger er det dermed valgt å forenkle geometrien til KS-ribbene. Det kan medføre at visse aspekter ved byggegropens oppførsel ikke blir fullstendig eller nøyaktig gjengitt i de endelige resultatene fra simuleringene i Plaxis.

# Kapittel 2

## Campus Ullevål

Campus Ullevål er et nytt kontorbygg på Ullevål som inngår i Oslo Science City (NGI, 2023c). Nybygget som ferdigstilles i 2026 skal stå i et urbant landskap tett inntil nabobygget i Sognsveien 70 og med Ullevål Stadium, Ullevål Hageby, Ring 3 og gangbruen over Ring 3 som nærmeste naboer. Med utfordrende grunnforhold og en tomtegrense som sammenfaller med planlagt spuntvegg, er Campus Ullevål med på å definere de moderne løsningene av urban utbygning med dype byggegropen i sensitiv leire.

### 2.1 Forskningsprosjektet CURIOS

Prosjekthåndboken “CURIOS – Campus Ullevål: Research and Instrumentation Of Underground Structures” (NGI, 2023a) er et treårig forskningsprosjekt, initiert av NGI i januar 2023. Målet er å fremme bærekraftig design og konstruksjon av dype støttede utgravninger i urbane områder gjennom ny teknologi. Prosjektet inneholder omfattende instrumentering og overvåkning av grunnarbeidet ved Campus Ullevål. Dette inkluderer bruk av digitale tvillinger og testing av nye overvåkningsoppsett for å vurdere systematferd og sikkerhet, samt kvantifisering og evaluering av bærekraftaspekter relatert til grunnarbeidet.

Prosjektet består av fem arbeidspakker, som hver tar for seg ulike aspekter av forskningen, inkludert jordtrykk på støttestrukturer, lastfordeling i stabilisert jord, belastning på endebærende peler, digital tvilling for dype utgravninger, og bærekraft i grunnarbeider.

## 2.2 Grunnundersøkelser

Grunnundersøkelser utført av NGI på tomten og de nærliggende områdene til Campus Ullevål danner grunnlag for tolkning og fastsettelse av materialparametre. Den vedlagte borplanen (Figur 2.1) viser omfanget av grunnundersøkelsene som var nødvendig for å kartlegge dybde til berg og karakteristikken til løsmasselagene i området. Totalt ble det gjennomført følgende undersøkelser i 2021:

- 53 totalsonderinger
- 8 CPTu-sonderinger
- 2 prøveserier
- 11 trykksonderinger
- 2 poretrykkmålinger

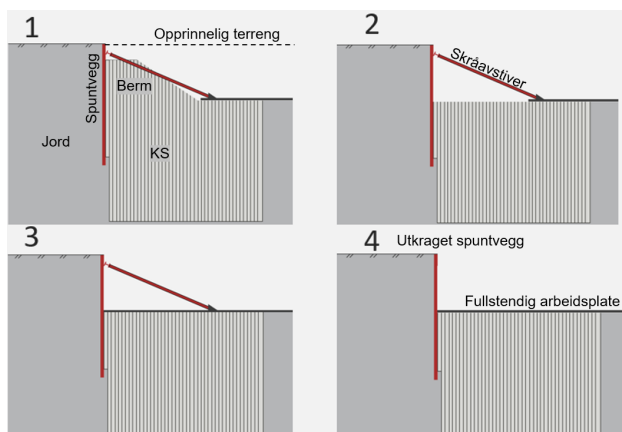
Totalsonderingene og trykksonderingene gir oversikt over dybde til faste lag og berg. På Campus Ullevål var det nødvendig med en rekke ekstra totalsonderinger da det kom frem av de første sonderingene at berget går i en skrent nord-vest i byggegropen. Det ble derfor gjennomført flere totalsonderinger rundt skrenten som kommer frem i borplanen. Av disse ble det avdekket en mindre berghylle. Videre er CPTu og prøveseriene benyttet til å tolke jordparametre og poretrykksmålingene danner bilde på grunnvannstanden.

Tolkingen og fastsettelsen av materialparametrene som ble gjennomført i forprosjektet og detaljprosjektet er presentert i et teknisk notat utarbeidet av NGI (NGI, 2023d). Materialparametrene benyttet til Plaxis-beregningene til NGI, som også er benyttet i denne oppgaven, presenteres i seksjon 4.6.

## 2.3 Tekniske løsninger og utgravningsgeometri

Bygget er planlagt fundamentert med peler til berg. I hovedsak er det HP-peler av stål som blir rammet ned for bæring av de vesentlige lastene fra bygget. Deler av kjellerkonstruksjonen uten kontorbygg over er valgt å stå på rammede betongpeler til berg da lastene her er mindre (NGI, 2023b).

Den geotekniske stabiliteten til byggegropen, der hovedfokuset i oppgaven ligger, er sikret med kalksementerte masser på innsiden av installert spuntvegg langs byggets tomt. Etter fullstendig utgraving står spuntveggen utkraget fra arbeidsplatenivå. Arbeidstegene etter sentral utgraving er illustrert i Figur 2.3.1 og steg 2 i Figur 2.3.2.



**Figur 2.3.1:** Arbeidssteg etter sentral utgraving.



**Figur 2.3.2:** Instrumentert seksjon ved steg 2.

Hele byggegropen er konstruert med en sammenhengende spuntvegg, som sikres ved hjelp av indre avstiving mot en støpt betongplate, ofte referert til som en *arbeidsplate*. Arbeidsplaten er først støpt sentralt i byggegropen, og videre forlenget inn til spuntveggen etter full utgraving av stabiliserende bermer på innsiden av spuntveggen. Utgravingen av gropen og støpingen av arbeidsplaten inn mot spunt er gjennomført i seksjoner, hver på seks meters bredde. Når arbeidsplaten er ferdig støpt og herdet tilstrekkelig, fjernes de midlertidige skråstiverne. Dermed står spunten utkraget med arbeidsplate og kalksementert materiale som støttende på passiv side.

Dimensjonene til bermene på innsiden av spuntveggen er av samme karakteristikk, men varierer noe langs spuntveggen. NGI har delt byggegropen inn i forskjellige soner illustrert i vedlegget (Figur .2.2). Sonene er kategorisert i fire nivå-grupper som står oppsummert i Tabell 2.3.1.

**Tabell 2.3.1:** Bermdimensjoner og putehøyde.

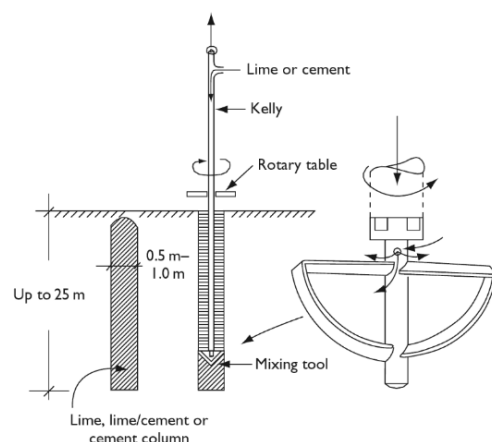
| Nivå | Putehøyde [kote] | Berm-topp [kote] | Bredde berm-topp [m] | Skråningsvinkel |
|------|------------------|------------------|----------------------|-----------------|
| 4    | +97,5            | +96,8            | 4                    | 1:1,5           |
| 3    | +96,75           | +96,0            | 4                    | 1:1,5           |
| 2    | +96              | +95,0            | 4                    | 1:1,5           |
| 1    | +95              | +94,2            | 3                    | 1:1,5           |

## 2.4 Grunnforsterkning med tørrmiksing av kalksement

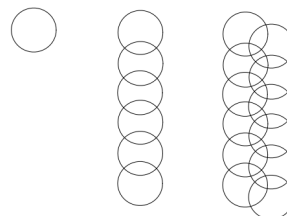
Grunnforsterkning med tørrmiksing av kalksement har ifølge Eggen (NVE, 2013) blitt utført i Norge og Sverige siden 80-tallet. På den tiden hadde maskinene svært begrenset kapasitet sammenlignet med dagens standard. Nå kan maskinene blande inn KS-peler på rundt 20 meters dybde og er utstyrt med avanserte datamaskiner for styring og dokumentasjon av installasjonen.

Dokumentasjonen omfatter viktig logging som hellingsvinkel, posisjon (GNSS), installasjonstrykk, blandemengder osv. Tørrmiksing av kalksement innebærer at en blanding av kalk og sement vispes inn med høyt trykk in-situ i jorden som vist i Figur 2.4.1. En kjemisk reaksjon mellom porevannet, eksisterende leire og bindemiddelet settes i gang. Resultatet er jord med en betydelig økning i både skjærstyrke og stivhet. Mengde, sammensetning og type bindemiddel varierer avhengig av grunnforholdene og formålet med stabiliseringen.

KS-peler kan installeres enkeltvis eller sammensatt av flere peler i ribber, gitter eller blokker. Pelene som installeres sammen i mønstre, bør overlappe hverandre med 10-20 cm (Statens Vegvesen, 2014). Overlappingen som illustrert i Figur 2.4.2, sikrer at pelene samvirker som én sammensatt struktur og forhindrer uønskede konsekvenser av installeringsfeil.



**Figur 2.4.1:** Installasjon av KS-peler (Moseley og Kirsch, 2004).



**Figur 2.4.2:** Eksempler på konfigurasjoner av enkeltpel, enkeltribb og dobbeltribb.

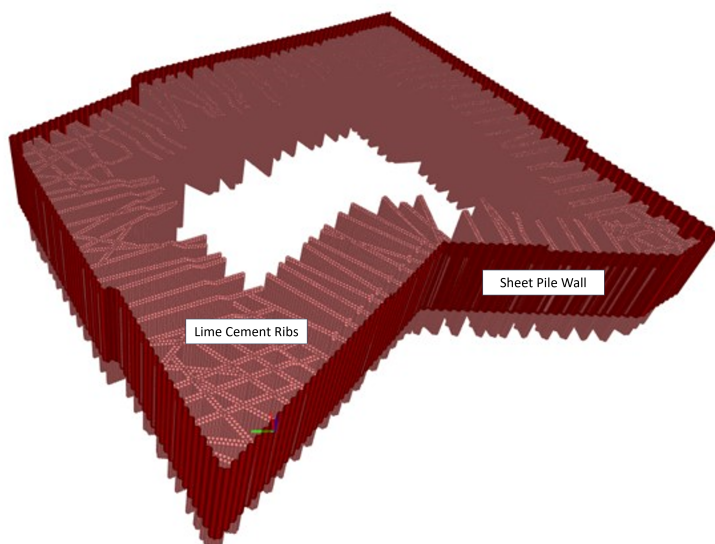
### 2.4.1 Potensielle miljøgevinster

Når man vurderer bruk av kalksement for stabilisering av grunn i områder med sensitiv leire, er det viktig å vurdere både de tekniske og miljømessige aspektene ved anvendelsen. KS-stabilisering er en velprøvd metode for å øke stabiliteten og bæreevnen til kvikkleire, men den medfører også miljøutfordringer, særlig i form av  $CO_2$ -utslipp fra sementproduksjonen. Dette er hvor Plaxis-simuleringer kan spille en vesentlig rolle ved å optimalisere volumet KS-stabilisert leire, for minimere miljøfotavtrykket uten å gå på kompromiss med stabilitet.

Simuleringene i denne oppgaven kan potensielt bidra til betydelige miljøgevinster. Ved å finjustere dimensjonene på disse ribbene, kan man redusere det totale volumet av kalksement som er nødvendig for å oppnå tilstrekkelig sikkerhet. Dette har direkte innvirkning på reduksjon av  $CO_2$ -utslipp, siden produksjon av sement er en av de største kildene til karbonutslipp i byggeindustrien. I følge Bane NOR, er “KS-peler ofte den største bidragsposten i prosjektenes klimabudsjett. Bakgrunnen er en energikrevende produksjon av kalk og sement. KS-stabilisering fører ofte til større utslipp av  $CO_2$  enn asfalt, betong og stål” (Bane NOR, 2020).

## 2.5 KS-stabilisering på Campus Ullevål

I byggegropa på Campus Ullevål er KS-pelene installert i *doble ribber*, hovedsaklig vinkelrett på spuntveggen. Ribbene er 15 m lange ut fra spuntveggen og 20 m dype ned fra opprinnelig terreng. Som vist i Figur 2.5.1, virker plasseringen av ribbene uordnet. Denne spesifikke utformingen er valgt for å omgå plasseringen av kranbasen, samt for å navigere rundt både de eksisterende pelene og pelene som blir introdusert i senere byggetrinn. Derfor er noen av ribbene installert i vinkel på spuntveggen.



Dekningsgrad for doble ribber:

$$a = \frac{1,6 \cdot d}{c/c} \quad (2.1)$$

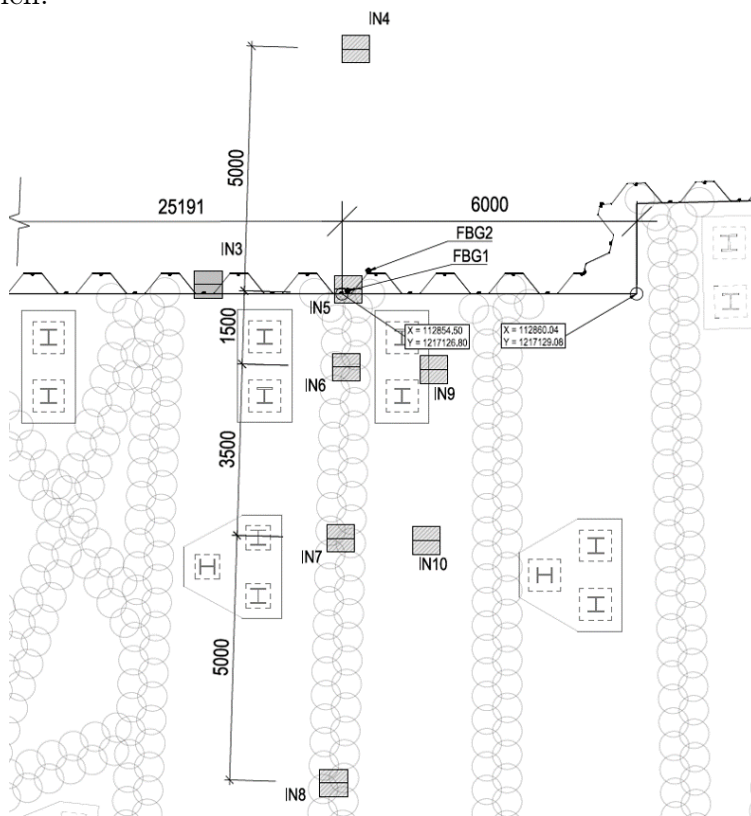
der  $d$  = peldiameter og  $c/c$  = senteravstand

**Figur 2.5.1:** KS-peler installert på CU.

Generelt ble senteravstanden mellom ribbene satt til 3,6 meter for byggegropa. Dette gir en dekningsgrad (Ligning 2.1) på omtrent  $a = 27\%$ . Merk at dekningsgraden varierer langs spuntveggen grunnet konflikt med peler i grunnen. I hjørnene oppstår det overlapping av de vinkelrette ribbene, som fører til større dekningsgrad. Det instrumenterte profilet (gjort rede for i seksjon 2.6) som er i hovedfokus i denne oppgaven har en dekninggrad på 28%.

## 2.6 Instrumentering

I forbindelse med forskningsprosjektet *CURIOUS*, er det avsatt forskningsmidler til instrumentering og overvåkning av byggegropen på Campus Ullevål. Den instrumenterte seksjonen som befinner seg nord-vest i byggegropen er illustrert i Figur 2.6.1. Denne seksjon av byggegropen er betydelig mer instrumentert enn resten av byggegropen, og inneholder 8 av 10 inklinometre (IN3-IN10) satt ned i både KS-ribber og ubehandlet leire. 2 av 4 fiberoptiske strenger (FBG1 og FBG2), montert på baksiden av spuntveggen før nedramming, er også lokalisert i seksjonen.



Figur 2.6.1: Instrumentert seksjon.

Fiberoptikkstrengene måler mikrotøyninger langs spuntveggenes dybde. Målingene benyttes til å estimere spuntveggenes krumning og lastvirkning. Inklinometerne måler kumulerte sideveise deformasjoner i jorden. Videre er det også installert prisme på spuntveggen som måles inn med en totalstasjon for presise deformasjonsmål. Lastceller er også montert på de midlertidige skråstiverne.

Samlet sett fungerer instrumenteringen som et viktig verktøy både for forskning og observasjoner av deformasjoner og krefter i spuntveggen og i jorden.

# Kapittel 3

## Teori

### 3.1 Litteratursøk

Som en del av et lengre litteratursøket er det gjennomført søk etter artikler som tar for seg dimensjonering av KS-peler med FEM-verktøy i 2D-dimensjonale snitt. Det er spesielt lagt fokus på artikler som kvalitetsjekker den konvensjonelle bruken for bestemmelse av gjennomsnittlig skjærstyrke og stivhet til stabilisert volum med KS-ribber på passiv side av en utgravning. Det er nettopp slik mengden KS-stabilisering er bestemt for utgravningen på Campus Ullevål. Dette spesifikke søket har gitt lite resultater, men det er fortsatt funnet studier av interesse.

Et studie gjennomført ved KTH i Sverige tar for seg fullskala simuleringer av en KS-stabilisert byggegrop (Ignat, Baker, Karstunen mfl., 2020). Byggegroppen er i likhet med Campus Ullevål stabilisert med KS-ribber vinkelrett på spuntveggen i passiv side. Studiet baserer seg på to fullskala feltforsøk belastet til brudd (Ignat, Baker, Liedberg mfl., 2016). Hovedformålet med disse feltforsøkene var å innhente kunnskap om oppførselen til KS-ribbene i den passive sonen og deres samspill med støttestrukturen. Byggegroppene var instrumentert godt for å avdekke oppførselen i både KS-ribbene og leiren mellom. Det kan trekkes mange likheter mellom oppsettet til feltforsøkene og byggegropen på CU, men vesentlige forskjeller skal tas i betraktning. På forsøksfeltet i Enköping er byggegropene mindre, innvendig avstivning er gjennomført med horisontale avstivere og KS-ribbene er installert som enkeltribber.

Artikkelen som oppsummerer resultatene fra feltforsøkene (Ignat, Baker, Liedberg mfl., 2016), konkluderer med at det ble påvist en vesentlig forskjell på bruddmekanismene i de forsøkene. De to forsøkene som er gjennomført med lik utgravingsgeometri er KS-stabilisert med enkeltribber med 1.5 og 3 meter senteravstand mellom ribbene. Dette tilsvarer dekningsgrader på henholdsvis 17.5% og 35%. I forsøket med 17.5% KS-dekningsgrad oppsto

det plutselig et meget sprøtt brudd i leiren mellom elementene, med små deformasjoner før bruddet. I den andre testen, med en KS-dekningsgrad på 35%, oppsto bruddet både i KS-ribbene og i leiren mellom.

Med økt dekningsgrad endres naturlig nok bruddmekanismen med et justert rotasjons-senter for bruddet. Fra den observerte oppførselen i ubehandlet leire og KS-stabilisert volum, er det større grunnlag for å karakterisere stabilisert volum på passiv side (både KS-ribber og ubehandlet leire) som ett volum med samme uniforme sviktoppførsel i bruddtilstand når senteravstanden mellom KS-ribbene holdes lav.

I studien gjennomført 4 år i etterkant (Ignat, Baker, Karstunen mfl., 2020) blir feltforsøkene sammelignet med FEM-simuleringer i 3D. Hovedfunnene indikerer at spenningsindusert styrkeanisotropi i KS-stabilisert leire må tas i betraktning når spenningsforløpet for de faktiske feltforholdene avviker fra det som ble observert ved konvensjonell laboratorietesting. Videre avdekket analysene at både styrkeparametere og deformasjonsmodulen må være i tråd med de faktiske spenningsstiene for å gi nøyaktige prediksjoner.

Et annet studie gjennomført ved KTH (Larsson mfl., 2012), undersøker bruken av *damage plasticity*-modellen i FEM-modellering av KS-søyler og KS-ribber. Modellen som i motsetning til Mohr-Coloumb har avanserte input-parametre for den plastiske oppførselen, egner seg godt til simuleringer som går til brudd. Det ble gjennomført laboratoriettester og FEM-simuleringer av sideveis lasting av KS-stabiliserte søyler og enkeltribber i skjærboks, og simuleringene viste seg å gi god overensstemmelse til laboratorietestene. Resultatene viser at KS-ribber gir høyere skjærmotstand enn enkeltsøyler under relativt små deformasjoner. Det ble presentert i studiet at en mulig årsak til at ribben har høyere skjærstyrke enn søylene er at ribben fortsatt har høyere bøyemotstand etter indusert oppsprekking i ribbens søyler. Det er dermed de overlappende sonene i ribbene som påvirker skjærmotstanden.

I tillegg har et studie fra Chalmers (Bozkurt mfl., 2023) vist at bruken av avanserte modeller som SCLAY1S og Creep-SCLAY1S er godt egnet for simuleringer av KS-leire. Simulering med modellene ga god overensstemmelse med instrumenterte verdier. Disse modellene er også mer komplekse enn MC-modellen da de tar hensyn til anisotropi, degradering av bindinger, og tidsavhengige egenskaper ved sensitiv leire. Selv om disse modellene gir mer nøyaktige resultater, krever de betydelig mer data for kalibrering og er derfor mer utfordrende å implementere i praksis.

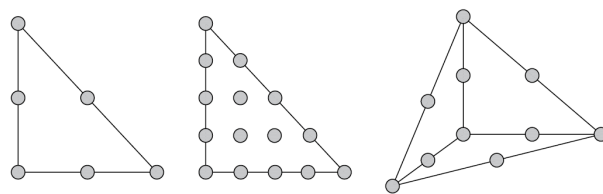
En annen viktig studie fra Chalmers fremhever varsomheten man er nødt til å utøve ved fastsettelse av materialeparametrene til KS-leiren. Studien (Wong mfl., 2024) fremhever at skjærstyrken og stivheten til KS-leire er svært heterogen, med betydelig variabilitet i felt- og laboratorieundersøkelser. I resultatene deres kommer det frem at det er ulik størrelse på fluktuasjonen i materialparameter-målene fra felt- og laboratorieundersøkelsene. Dette understreker usikkerheten som må medberegnes i FEM-simuleringer med KS-leire og dermed validiteten til beregningene.

Litteraturen i sin helhet har gitt god innsikt i oppførselen til KS-stabiliserte ribber og søyler modellert med forskjellige jordmodeller belastet til brudd. Videre er usikkerheten knyttet til KS-leirens materialparametre gjort kjent. Det er dermed spesielt viktig å evaluere validiteten til KS-leiren. Det er imidlertid avdekket manglende funn av artikler som tar for seg lastopptaksfordelingen mellom KS-stabilisert og ubehandlet volum under sideveis belastning. Det er derfor dette oppgaven har til hensikt å undersøke nærmere.

## 3.2 Elementmetoden

Elementmetoden (eng: Finite Element Method), ofte forkortet FEM er et nyttig numerisk verktøy til å løse ingeniørrelaterte problemstillinger. Metoden som baserer seg på *forskyningsmetoden* der påføring av laster og betingelser på en gitt struktur blir målt globalt ved å generalisere strukturen fra virkelig verden til en forenklet modell bygget opp av elementer og noder.

I FEM-modellering er valget av elementtype og størrelsen på elementnettet avgjørende for nøyaktigheten og effektiviteten av den numeriske løsningen. For eksempel benytter Plaxis 2D vanligvis 6- eller 15-noders triangulærelementer for å representere geotekniske materialer, mens Plaxis 3D bruker 10-noders tetraederelementer. Elementene, illustrert i Figur 3.2.1, danner grunnlaget for simuleringen, og valget avhenger av kravene til nøyaktigheten i analysen, samt den ønskede detaljnivået.



**Figur 3.2.1:** 6- og 15-noders triangulærelement og 10-noders tetraederelement.

I praksis blir FEM ofte brukt sammen med andre analytiske og eksperimentelle metoder for å validere og forbedre modellens nøyaktighet og pålitelighet. Ved å integrere FEM i komplekse prosjekter kan ingeniører og forskere oppnå dypere innsikt i materialets og strukturens oppførsel under ulike betingelser, noe som er avgjørende for sikker og effektiv dimensjonering.

## 3.3 Jordmodeller

Denne seksjonen gjør rede for de ulike jordmodellene benyttet i Plaxis-simuleringene i oppgaven. Hvilke jordmodeller som blir benyttet til de aktuelle materialene blir beskrevet i seksjon 4.6. Jordmodellene blir forklart i korte trekk. Dersom leseren ønsker et helhetlig overblikk av jordmodellen, henvises leseren videre til kompendiet tilhørende NTNU-emnet TBA4116 (Nordal, 2020) og Bentleys egen materialmodell-manual (Brinkgreve, 2023).

### 3.3.1 Mohr-Coloumb

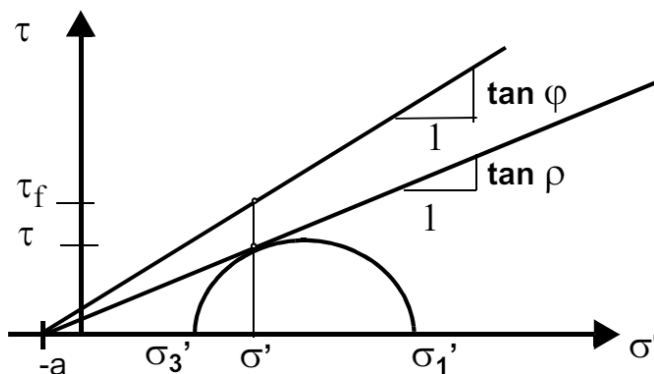
Mohr-Coulomb-modellen er en velkjent og enkel lineær elastisk-perfekt plastisk modell som benyttes som en første tilnærming til å beskrive jordens oppførsel (Brinkgreve, 2023). Den lineær-elastiske delen av spenning-tøyningskurven til Mohr-Coloumb-modellen følger Hookes lov om isotropisk elastisitet, og den perfekt plastiske delen er basert på Mohr-Coloumb's bruddkriterium. I det følgende blir kriteriet definert for drenerte tilfeller.

Kriteriet kan uttrykkes på flere måter, men den mest vanlige er med materialets bruddlinje, definert av Coloumb's lov. Kriteriet er illustrert i Ligning 3.1, der  $a$  og  $\tan\phi$  er henholdsvis materialets attraksjon og friksjonsvinkel, som begge bør anses som kurvetilpassende parametre for å tilpasse eksperimentelle resultater (Nordal, 2020).  $\tau_f$  er skjærspenningen ved brudd og  $\sigma'$  er effektiv normalspenning.

$$\tau_f = (\sigma' + a) \tan \phi \quad (3.1)$$

I mange tilfeller er det ønskelig å definere bruddkriteriet med en sikkerhetsfaktor innbakt i ligningen. Dette oppnås ved å redusere friksjonsvinkelen med en *grad av mobilisering*. Denne mobiliseringsgraden,  $f$ , er illustrert i Ligning 3.2, der den reduserte friksjonsvinkelen  $\rho$  krymper Mohr-sirkelen illustrert i Figur 3.3.1.

$$f = \frac{\tau}{\tau_f} = \frac{(\sigma' + a) \tan \rho}{(\sigma' + a) \tan \phi} = \frac{\tan \rho}{\tan \phi} \quad (3.2)$$



**Figur 3.3.1:** Mohr-Coloumb-kriteriet med mobilisert friksjonsvinkel  $\rho$  i  $\tau$ - $\sigma$ -planet (Nordal, 2020).

I udrenerte tilfeller er skjærstyrken,  $\tau - f$  konstant. Da følges Tresca-kriteriet og skjærstyrken blir vanligvis uttrykket ved  $s_u = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$  (Nordal, 2020).

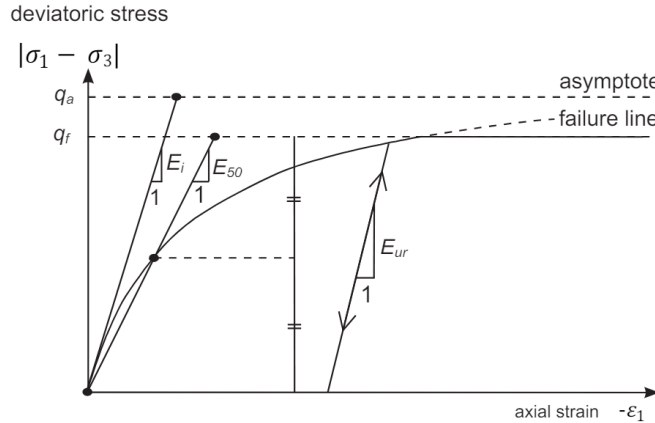
### 3.3.2 Hardening Soil

Hardening Soil-modellen (HS) er en avansert konstitutiv modell som først og fremst er designet for å simulere oppførselen til sand, men ble senere tilpasset et bredere spekter av jordarter (Nordal, 2020). Modellen er bygget på de grunnleggende geotekniske laboratorieundersøkelsene ødometer og triaksiell testing, som kommer frem av inngangsparametrene til modellen.

Modellen vurderer totale tøyninger basert på spenningsavhengige stivheter. Flere stivhetsparametre er derfor introdusert i modellen.  $E_{50}^{\text{ref}}$  er referansestivheten fra drenert triaksiell testing,  $E_{ur}^{\text{ref}}$  er referansestivhet for av-/pålasting og  $E_{oed}^{\text{ref}}$  er tangensiell referansestivhet fra ødometertest. For å gi et eksempel er stivhetsmodulen ved deviatorisk belastning vist i Ligning 3.3 og illustret i Figur 3.3.2.

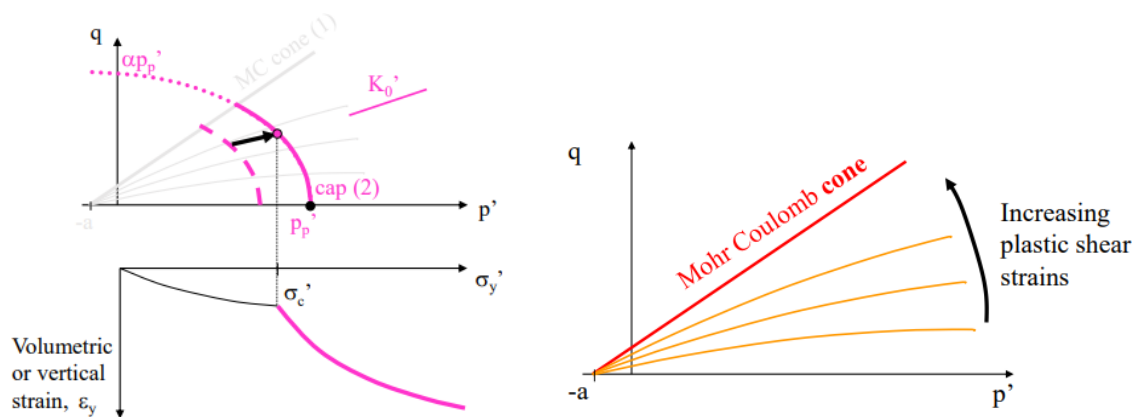
$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left( \frac{\sigma'_3 + a}{p_{\text{ref}} + a} \right)^m \quad (3.3)$$

Her er  $p_{\text{ref}} = 100 \text{ kPa}$  det atmosfæriske trykket,  $a$  er attraksjonen, og  $m$  er en eksponent som varierer mellom forskjellige jordtyper. Vanligvis er  $m = 0,5$  for sand, og  $m = 1$  for leire.  $E_{50}$  er den reelle stivheten som brukes i programmet som en funksjon av  $\sigma'_3$ .



**Figur 3.3.2:** Hyperbolisk spennings-tøyning-kurve for drenert triaksial lasting (Duncan og Chang, 1970).

HS-modellen er en elastoplastisk modell der den plastiske delen blir fullstendigjort av to plastiske bruddflater; en *kjegle* (eng: cone) og en *kappe* (eng: cap) som begge er illustrert i Figur 3.3.3. Kjeglen beskrives av Coulomb-kriteriet der mobilisert friksjonskoeffisient,  $\tan(\rho)$ , brukes i stedet for bruddverdien,  $\tan(\phi)$ . Kappen reflekterer resultatene fra ødometer-testen. Posisjonen til kappen representerer prekonsolideringen. Før materialt når kappen er den i det overkonsoliderte området. Når kappen er nådd er den i det normalkonsoliderte området og kappen utvides med økt effektiv gjennomsnittlig spenning. Denne utvidelsen resulterer i plastisk tøyning.



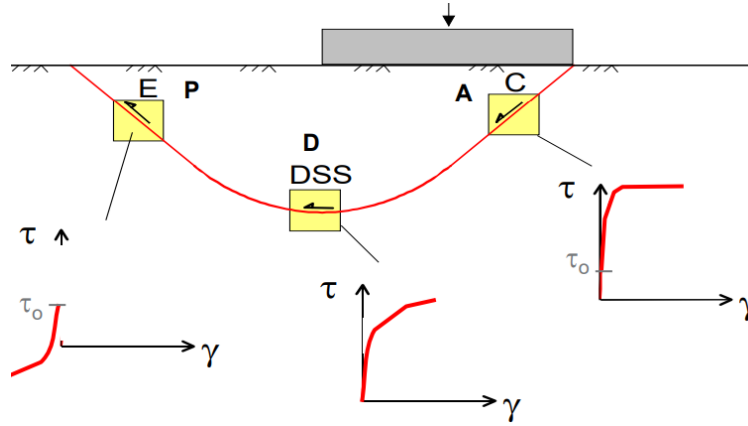
**Figur 3.3.3:** Forhardning av kappe og kjegle (Grimstad, 2023).

Under avlastning antar modellen en lineær-elastisk respons innenfor den sist utvidede konen, der avlastningsstivheten karakteriseres med konvensjonelle elastiske parametere  $E_{ur}^{ref}$  og  $\nu_{ur}$ . I de fleste tilfeller er  $E_{ur}^{ref} \approx 3-5 \cdot E_{50}$ . Styrkeparametere som også skal inkluderes i HS-modellen er effektiv kohesjon,  $c'_{ref}$ , effektiv friksjonsvinkel ved svikt,  $\phi'$ , og dilatansvinkelen,  $\psi$ .

### 3.3.3 NGI-ADP

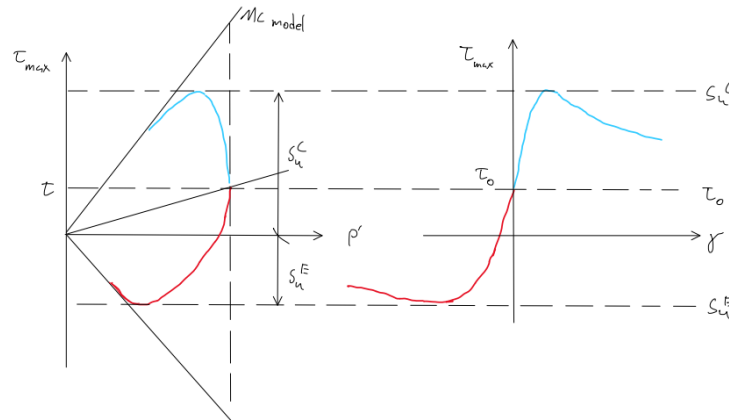
NGI-ADP er en avansert jordmodell i Plaxis som tar den anisotrope oppførselen til jorden i betraktning. Modellen er spesielt tilpasset for simulering av udrenert leire og silt i flatt terreng, og baserer seg på anisotrop udrenert skjærstyrke, i motsetning til Hardening Soil-modellen. De udrenerte skjærstyrkene er *inngangsparametere* i NGI-ADP, mens den udrenerte skjærstyrken i HS-modellen er et resultat av modellens tolkning av materialets effektive spenningstilstand.

Den udrenerte skjærstyrken er avhengig av retningen, som vist i Figur 3.3.4. Leirens spenningshistorikk påvirker skjærstyrkeverdiene i forskjellige retninger. Materialet i punkt A (aktiv) som er lokalisert under et fundament, komprimeres (C) i en sone med høyere skjærstyrke. Videre langs den resterende delen av den kritiske glideflaten i figuren, har jorden ulike skjærstyrkeverdier i sonene D (Direkte) og P (Passiv), grunnet de anisotrope egenskapene.



**Figur 3.3.4:** Retningsavhengig skjærstyrke i NGI-ADP (Grimstad, 2023).

Årsaken til større skjærstyrke i den aktive sonen er hovedsakelig grunnet et høyere pre-konsolideringstrykk. Dette illustreres i Figur 3.3.5. Den blå spenningsbanen representerer en udrenert triaksial kompresjonstest og den røde spenningsbanen representerer en udrenert triaksial strekktest, der begge starter etter konsolidering på *kompresjonssiden* (positiv  $\tau$ ).



**Figur 3.3.5:** Anisotrop undrenert skjærstyrke for normalkonsolidert leire

Normalt brukes triaksial trykktest for å definere den aktive skjærstyrken,  $s_u^A$ , triaksial strekktest for å definere den passive skjærstyrken,  $s_u^P$ , og direkte skjærttest for å definere den direkte skjærstyrken,  $s_u^{DSS}$ .

Modellen danner i korte trekk et flytekriterium som ikke herdes plastisk-isotropt, og der formen på flytekriteriet endres med økende mobilisering (Grimstad mfl., 2012). Denne mobiliseringen,  $\kappa$  (Ligning 3.4), oppdateres automatisk og danner et elastisk område med stivhet  $G_{ur}$ . I Ligning 3.4 er  $\kappa$  representert med  $\gamma_p$  og  $\gamma_{pf}$ , henholdsvis plastisk skjærtøyning og plastisk flytetøyning.

$$\kappa = 2 \cdot \frac{\sqrt{\gamma^p / \gamma_f^p}}{1 + \gamma^p / \gamma_f^p} \text{ når } \gamma_p < \gamma_{pf}, \text{ ellers er } \kappa = 1 \quad (3.4)$$

# Kapittel 4

## Metodikk for FEM-analyser

I dette kapitlet blir beregningsfasene og modelloppsettet til Plaxis-simuleringene gjennom skripting gjort rede for. Ved gjennomføring av komplekse Plaxis-simuleringer er det mange numeriske valg som må tas hensyn til. Disse vil bli gjennomgått fortløpende i kapitlet. Videre blir modellkonfigurasjonene og materialparametrene benyttet i simuleringene presentert.

### 4.1 Beregningsfaser

Rekkefølgen og beskrivelsen av fasene for samtlige simuleringer er gitt i Tabell 4.1.1. Beregningsfasene gjenspeiler den faktiske arbeidssekvensen ved etablering av byggegropen på Campus Ullevål (CU). Fordi byggegropen på CU er så godt instrumentert, kan en numerisk replika konstrueres for sammenligning med instrumentmålingene. Dette har vært tankegangen ved utviklingen av den initielle modellen før implementering av de forskjellige konfigurasjonene. Ved utvikling av en mer kompleks 3D-modell av byggegropen, kan resultatene fra instrumenteringen brukes til å finjustere modellen slik at den represterer en mer nøyaktig tvilling enn 2D-modeller fra prosjekteringsfasen.

Ved dimensjoneringen av byggegropen ble det fra NGI sin side etablert at fase 4 er den kritiske fasen for byggegropens stabilitet, da det oppnås lavest sikkerhetsfaktor mot stabilitetsvikt i denne fasen. Sikkerhetskravet det ble dimensjonert rundt var å holde sikkerhetsfaktor  $\Sigma M_{sf} \geq 1.6$  for alle faser.

**Tabell 4.1.1:** Beregningsfaser i Plaxis 2D og 3D

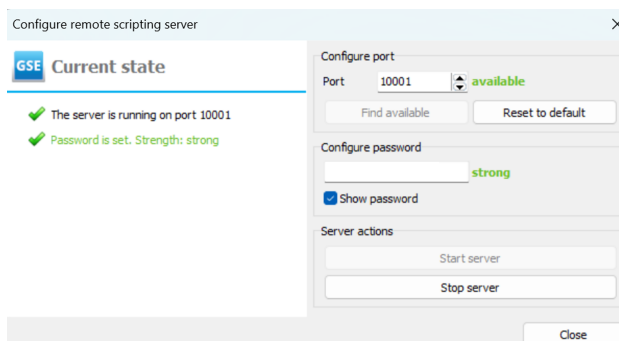
| Fase | Beskrivelse                                                   |
|------|---------------------------------------------------------------|
| 0    | Etablering av initielle effektive spenninger med K0 prosedyre |
| 1    | Installering av spuntvegg                                     |
| 2    | Installering av KS-ribber                                     |
| 3    | Toppotgraving innenfor spuntvegg til kote 96m                 |
| 4    | Skråningsutgraving til kote 91.4m                             |
| 5    | Støping av arbeidsplate sentralt i byggegropen                |
| 6    | Installering av puter og skråstivere (steg 1 i Figur 2.3.1)   |
| 7    | Fullstendig utgraving (steg 2 i Figur 2.3.1)                  |
| 8    | Støping av fullstendig arbeidsplate (steg 3 i Figur 2.3.1)    |
| 9    | Fjerning av skråstivere (steg 4 i Figur 2.3.1)                |

## 4.2 Python-skript

For å kunne gjennomføre en god kvantitativ analyse av 3D-effektene mellom ribbene i en KS-stabilisert byggegrop, er det blitt utviklet et Python-skript som genererer modeller av byggegropen på CU med forskjellige konfigurasjoner. Skriptet er skrevet i Jupyter Notebook, og kan leses i sin helhet i vedlegget (seksjon .3). Da ekstern Python-skripting med Plaxis sitt programmeringsgrensesnitt (API) (Bentley, 2020) er skreddesydd til Jupyter Notebook, ble det raskt etablert at Jupyter Notebook var å foretrekke fremfor andre programmeringsprogram som Visual Studio Code (VSC). Dersom en skulle kjørt skript gjennom VSC, må man opprette skripting-porter som krever en høyere datakraft, som resulterer i langsommere simuleringer. Dette er et av mange valg tatt for å redusere simuleringstiden til de kompliserte 3D-simuleringene som skulle gjennomføres.

For å koble Plaxis opp til Python-skripting, er man nødt til aktivere porten for ekstern skripting, som vist i Figur 4.2.1. Ved å åpne *Scripting Reference* i Plaxis 2D eller 3D åpnes Jupyter Notebook i nettleseren automatisk og brukeren kan åpne egne filer og begynne å skrive koder til både Plaxis Input og Plaxis Output.

Koding med Plaxis-skripting krever å sette seg inn i et nytt python-“språk”. Bentley sin skripting-oversikt, *Scripting Reference* (Bentley, 2019), som er tilgjengelig inne i Plaxis gir forklaringer og eksempler på hvordan man kan skrive skript til å generere simuleringer i Plaxis Input og til å hente resultater fra Plaxis Output, men referansen er dessverre ikke så omfattende som man skulle ønsket. Det oppstår tidvis scenarier der en er nødt til å gjette seg frem til hvordan man skal oversette linjer fra kommandolinjen i Plaxis til Python.



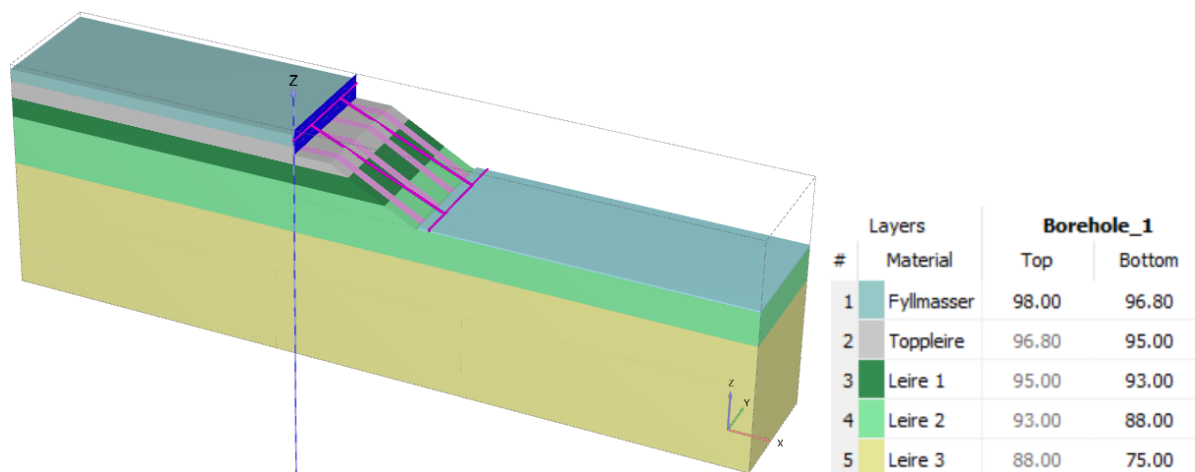
**Figur 4.2.1:** Aktivering av ekstern skripting-server.

Til å begynne med, ble det utviklet et skript til å generere en forenklet modell av et utsnitt fra byggegroppen på Campus Ullevål. Utsnittet av interesse er den instrumenterte delen av spuntveggen som har blitt gjort rede for i seksjon 2.6. Denne modellen som skriptet ble utviklet til å generere, var utgangspunkt for de kommende simuleringene. Siden denne modellen står som en replika av den faktiske byggegroppen på Campus Ullevål, blir resultatene etter kalkulasjonene sammenlignet med de målte verdiene fra instrumenteringen. På denne måten kan det vurderes hvorvidt modellen står til samsvar med det faktiske snittet fra Campus Ullevål. Dette blir gjennomgått mer i detalj i seksjon 5.3 og modellens struktur blir gjennomgått i seksjon 4.3.

Med en representativ modell som utgangspunkt, ble etterhvert skriptet klar til å brukes inn i en stor python-funksjon lagt opp til å kunne kjøres med flere variabler. Denne funksjonen blir videre i skriptet kalt opp med en liste av ordbøker (eng: dictionaries). Hver ordbok representerer en konfigurasjon der for eksempel geometrisk utforming av KS-ribber er spesifisert. De forskjellige konfigurasjonene blir forklart i detalj i seksjon 4.4, senere i dette kapitlet.

## 4.3 Modelloppsett

Modellene som skriptet generer i Plaxis 3D har som tidligere nevnt, til hensikt å reprodusere den fysiske geometrien til byggegroppen på Campus Ullevål. Illustrert i Figur 4.3.1 er en skjermdump av fase 6 for den CU-ekvivalente simuleringen med 28% stabilisert jordvolum inntil spuntveggen. Fasen gir et godt totalbilde av hvordan byggegroppen utgraves, da massene etter sentralutgraving, skråstivere, arbeidsplate og KS-peler er representert i figuren. Laginndelingen kommer også tydelig frem i Figur 4.3.1. Materialparametrene til fyllmassene og leirlagene blir presentert senere i seksjon 4.6.

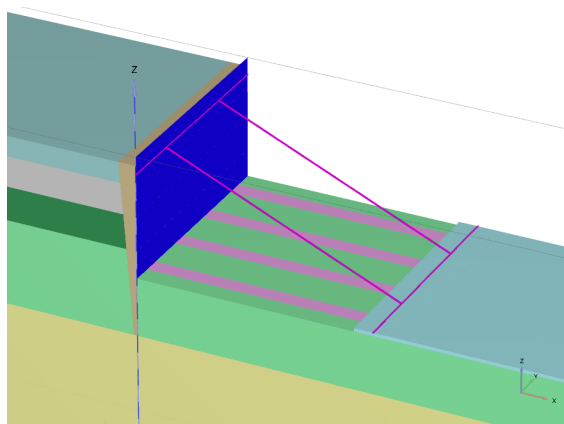


**Figur 4.3.1:** Skjermdump av fase 6 og borehull fra Plaxis 3D.

Leser bes bemerke seg den enkle geometrien til KS-ribbene. På grunn av beregningsmessige hensyn er det valgt å ikke modellere KS-ribbene som en sammensetning av sylindriske KS-volum, men som rektangulært prismeformede volum.

### 4.3.1 Drenert kil bak spuntveggen

Simuleringene i både Plaxis 2D og 3D er udrenerte totalspenningsanalyser, men likvel blir det benyttet en kil med drenert materiale utenfor spuntveggen, med Hardening Soil-jordmodellen (underseksjon 3.3.2). Grunnen til dette er for å ta hensyn til drenert oppførsel som oppstår bak spuntveggen. Dermed beregnes mer reelle jordtrykkskrefter på spuntveggen (NGI, 2023d) ved å unngå urealistisk sug i toppen av spuntveggen etter utgravingen. Med HS-modellen har man mulighet for å kutte strekkspenninger i jorda med funksjonen *tension-cutoff*. Resten av leiren i modellen er modellert med jord-modellen NGI-ADP, som ikke legger opp til *tension-cutoff* i Plaxis.



**Figur 4.3.2:** Drenert kil bak spuntveggen, fase 7.

### 4.3.2 Valg av numerisk løser: Pardiso vs. Picos

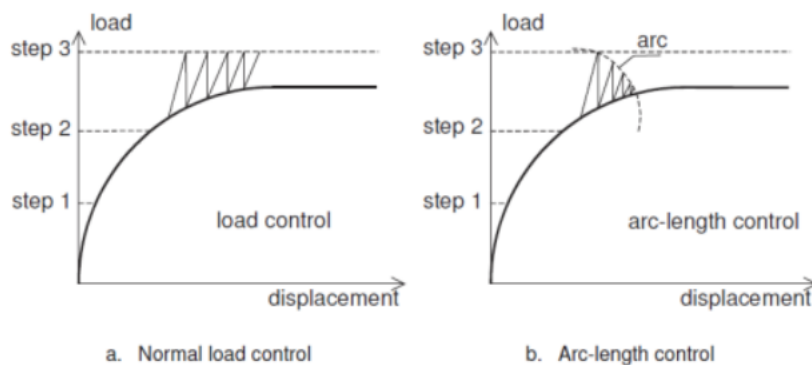
Under valget av numerisk løser for en geoteknisk modell, er det avgjørende å vurdere både prosjektets kompleksitet og de spesifikke egenskapene til de materialene som inngår i modellen. I dette tilfellet, hvor det er store stivhetsforskjeller mellom materialene, kalksementpelene og leiren, blir valget av numerisk løser enda viktigere for å sikre nøyaktige og pålitelige resultater.

I Plaxis 3D er det to aktuelle valg for numerisk løser, *pardiso* og *picos* (Brinkgreve, 2020). Pardiso (Parallel Sparse Direct Solver) er en iterativ løser som dekomponerer et system av ligninger direkte for å finne en løsning i en enkelt operasjon, eller gjennom en serie av veldefinerte trinn. Picos (Plaxis Iterative Concurrent Solver) derimot, løser systemer av ligninger ved å bruke en iterativ metode, som gradvis nærmer seg løsningen gjennom gjentatte forbedringer.

Simuleringene i denne oppgaven er gjennomført med Pardiso-løseren. Dette valget kommer av to egenskaper ved Pardiso. Første og fremst er Pardiso mer effektiv og stabil i situasjoner hvor det er store forskjeller i stivheten til materialene i modellen (Bentley, 2023). Dette skyldes Pardiso-løserens direkte tilnærming til løsning av ligningssystemer, som ikke er like følsom for slike forskjeller som iterative løser kan være. For en modell med KS-leire og ubehandlet leire kan dette bety mer nøyaktige beregninger av spenninger og deformasjoner rundt KS-pelene og i leiren. Den andre hovedgrunnen er unngåelse av konvergensproblemer. Modeller med store stivhetsforskjeller kan føre til konvergensproblemer for iterative løser som Picos, spesielt i tilfeller med dårlig mesh-kvalitet eller hvor stivhetsforholdet overskrider anbefalte grenser. Pardiso, med sin direkte løsningsmetode, reduserer risikoen for slike problemer og sikrer mer stabile beregningsresultater.

### 4.3.3 Buelengdekontroll

Et annet viktig numerisk kontrollparametervalg som har blitt tatt er buelengdekontroll (eng: arc-length control). Ved normale utregninger, hvor målet ikke er å undersøke modellens oppførsel ved brudd, kan bruk av buelengdekontroll øke beregningstiden unødvendig. Dette skyldes at buelengdekontrollen justerer laststegene for å finne nøyaktig når svikt oppstår, noe som krever flere iterasjoner og dermed øker den totale beregningstiden. Ved å holde denne funksjonen deaktivert, forenkles beregningsprosessen, og det oppstår ingen bekymringer for ekstra konfigurasjoner eller tolkning av resultater som involverer justering av laststeg basert på sviktkriteriene.



**Figur 4.3.3:** Normal last-kontroll og buelengde-kontroll (Sloot, 2019).

I prinsipp vil fraværet av buelengdekontroll ikke ha noen innvirkning på simuleringer som ikke går til brudd (Sloot, 2019). Med dette tatt i betraktning, er buelengdekontrollen skrudd av for simuleringsstegene som ikke går til brudd i denne oppgaven. Under faser der sikkerhetsfaktoren utregnes derimot, er buelengdekontrollen skrudd på. Buelengdekontrollen tillater en mer presis identifikasjon av sviktlaster ved å justere laststegene basert på modellens respons, og reduserer dermed risikoen for å overvurdere sikkerhetsfaktoren.

## 4.4 Modellkonfigurasjonene

For å gjennomføre en parametrisert studie er det nødvendig å definere en god struktur på simuleringen som skal kjøres. Det har blitt opprettet to simuleringspakker med konfigurasjoner til hver sin hensikt. Én for simuleringer i Plaxis 3D og én for simuleringer i Plaxis 2D.

I *Simuleringspakke 1* (Tabell 4.4.1) er det dekningsgraden som endres i simuleringene. Ved dekningsgrad menes mengde KS-stabilisert materiale innenfor spuntveggen i KS-ribbenes lengde. Den varierende dekningsgraden gjøres ved å justere senteravstanden ( $c/c$ ) mellom KS-ribbene ved bruk av Ligning 4.1

$$c/c = 1.6 \cdot \frac{d_{pel}}{a} \quad (4.1)$$

der  $d_{pel}$  er KS-pelenes diameter,  $a$  er dekningsgraden og 1.6 kommer av at det forutsettes 20% overlapp mellom KS-pelene.

**Tabell 4.4.1:** Simuleringspakke 1.

| Dekningsgrad [%]   | d_pel [m] | c/c KS (doble ribber) [m] | Bredde KS [m] |
|--------------------|-----------|---------------------------|---------------|
| 10                 | 0.6       | 9.60                      | 0.96          |
| 20                 | 0.6       | 4.80                      | 0.96          |
| 28 (CU-ekvivalent) | 0.6       | 3.40                      | 0.96          |
| 30                 | 0.6       | 3.20                      | 0.96          |
| 40                 | 0.6       | 2.40                      | 0.96          |
| 50                 | 0.6       | 1.92                      | 0.96          |
| 60                 | 0.6       | 1.60                      | 0.96          |

Opprinnelig ble det bestemt å kjøre simuleringer med 70%, 80% og 90% dekningsgrad også, men på 70% møtte modellen på en av ulempene med *Pardiso*-løseren. Siden Pardiso kvever mer minne, ble det den numeriske løseren automatisk byttet til Picos. Da bruk av annen numerisk løser svekker konsistensen i simuleringspakken ble disse simuleringene sløyfet.

*Simuleringspakke 2* (Tabell 4.4.2) er konstruert for å kunne gjennomføre en sensitivitetsanalyse av endret geometri på KS-ribbene.

**Tabell 4.4.2:** Simuleringspakke 2.

| Lengde [m] | Dybde [m] | KS - dekningsgrad [%] |
|------------|-----------|-----------------------|
| 10         | <b>20</b> | 28                    |
| 12.5       | <b>20</b> | 28                    |
| 15         | <b>20</b> | 28                    |
| 17.5       | <b>20</b> | 28                    |
| 20         | <b>20</b> | 28                    |
| <b>15</b>  | 12,5      | 28                    |
| <b>15</b>  | 15        | 28                    |
| <b>15</b>  | 17.5      | 28                    |
| <b>15</b>  | 20        | 28                    |

## 4.5 Vektet udrenert skjærstyrke og stivhet i KS

For å kunne kjøre representative simuleringer av byggegropen i Plaxis 2D, var det nødvendig å etablere gjennomsnittlige mål på det stabiliserte volumets stivhet og skjærstyrke. I Norge er det vanlig praksis å følge SVVs håndbok, *Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger*, også kalt V221 (Statens Vegvesen, 2014), for utregning av nevnte parametre. Ligning 4.2 og Ligning 4.3 gir henholdsvis den gjennomsnittlige skjærstyrken og stivheten til stabilisert jordvolum definert etter SVV sine retningslinjer i V221. Utregningen er også presentert i det tekniske notatet *Prosjektering av spunt og byggegrop* (NGI, 2023d).

$$\tau_m = a \cdot \tau_p + (1 - a) \cdot \tau_k \quad (4.2)$$

$$E_m = a \cdot E_p + (1 - a) \cdot M_{oc} \quad (4.3)$$

der:

$\tau_m$  er vektet skjærstyrke i stabilisert jordvolum

$\tau_p$  er skjærstyrke i stabilisert materiale

$\tau_k$  er skjærstyrke i omkringliggende jord

$a = \frac{1,6 \cdot d}{c/c}$  er dekningsgrad for doble ribber ( $d$  = peldiameter,  $c/c$  = senteravstand)

$E_m$  er vektet stivhetsmodul i stabilisert jordvolum

$E_p$  er stivhetsmodul i stabilisert materiale

$M_{oc}$  er gjennomsnittlig stivhetsmodul i omkringliggende jord

Begge nevnte formler forutsetter kalksementstabilisering i dobbeltribb-struktur med 20 % overlapp og en KS-peldiameter på 600 mm. Med KS-blandingen benyttet på Campus Ullevål er det forutsatt skjærstyrke på  $\tau = 500$  kPa etter 7 dager med herding, men taket settes til  $\tau_p = 175$  kPa i henhold til V221 (Statens Vegvesen, 2014). Stivhetsmodulen for det stabiliserte materialet er  $E_p = 75\,000$  kPa.

Fra resultatene til NGI sin tolkningsrapport (NGI, 2023e) der materialparametre blir utarbeidet, kan det settes representative parametre for stivheten og skjærstyrken til de omkringliggende materialene fra 0-21 meters dybde. Det gjennomsnittlige modultallet,  $M_{oc}$ , settes til 6 300 kPa og den direkte skjærfasteheten,  $\tau_k$ , settes til 54 kPa. Med disse inngangsverdiene blir følgende parametre fastsatt for det stabiliserte jordvolumet, presentert i Tabell 4.5.1. Den fete markeringen representerer de gjeldende verdiene for KS-dekningsgraden på Campus Ullevål, 28 %.

**Tabell 4.5.1:** Vektet skjærstyrke og stivhetsmodul for stabilisert jordvolum ved ulike dekningsgrader.

| Dekningsgrad | skjærstyrke $c_u$ [kPa] | Stivhetsmodul $E$ [kPa] | c/c [m]    |
|--------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 0 %          | 54                      | 6 300                   | -          |
| 10 %         | 66                      | 13 170                  | 9.6        |
| 20 %         | 78                      | 20 040                  | 4.8        |
| <b>28 %</b>  | <b>88</b>               | <b>25 536</b>           | <b>3.4</b> |
| 30 %         | 90                      | 26 910                  | 3.2        |
| 40 %         | 102                     | 33 780                  | 2.4        |
| 50 %         | 115                     | 40 650                  | 1.9        |
| 60 %         | 127                     | 47 520                  | 1.6        |

## 4.6 Materialparametre

Tabellene nedenfor oppsummerer samtlige materialparametrene benyttet i Plaxis-simuleringene. Materialparametrene er hentet fra *Prosjektering av spunt og byggegrop* (NGI, 2023d).

Tabell 4.6.1 gjør rede for materialparametrene til fyllmassene/tørreskorpen og den drenerte leiren i kilen inntil spunten med jordmodellen Hardening-Soil. Tabell 4.6.2 viser til materialparametrene leirelagene med NGI-ADP-jordmodellen.

**Tabell 4.6.1:** Hardening soil-materialer.

| Symbol                        | Enhet             | Fyllmasser         | Drenert Leire (drenert kil) |
|-------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------------|
| Drainage                      | -                 | Drained            | Drained                     |
| $\gamma_{\text{unsat}}$       | kN/m <sup>3</sup> | 19                 | 19.3                        |
| $\gamma_{\text{sat}}$         | kN/m <sup>3</sup> | 22                 | 19.3                        |
| $E_{50}^{\text{ref}}$         | kN/m <sup>2</sup> | 20·10 <sup>3</sup> | 10·10 <sup>3</sup>          |
| $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ | kN/m <sup>2</sup> | 20·10 <sup>3</sup> | 10·10 <sup>3</sup>          |
| $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  | kN/m <sup>2</sup> | 60·10 <sup>3</sup> | 30·10 <sup>3</sup>          |
| $\nu_{\text{ur}}$             | -                 | 0.2                | 0.3                         |
| $c'^{\text{ref}}$             | kN/m <sup>2</sup> | 5                  | 0                           |
| $\phi'$                       | °                 | 35                 | 27                          |
| Tension-cutoff                | -                 | Ja (0kPa)          | Ja (0kPa)                   |
| $R_{\text{inter}}$            | -                 | 0.5                | -                           |

**Tabell 4.6.2:** NGI-ADP-materialer.

| Symbol                                        | Enhet                | Toppire     | Leire 1     | Leire 2     | Leire 3     |
|-----------------------------------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Drainage                                      | -                    | Undrained C | Undrained C | Undrained C | Undrained C |
| $\gamma_{\text{unsat}} = \gamma_{\text{sat}}$ | kN/m <sup>3</sup>    | 19.3        | 19.3        | 19.3        | 19.3        |
| $G_{\text{ur}}/s_{\text{u}}^A$                | -                    | 700         | 700         | 700         | 700         |
| $\nu_{\text{u}}$                              | -                    | 0.495       | 0.495       | 0.495       | 0.495       |
| $s_{\text{u}}^A_{\text{ref}}$                 | kN/m <sup>2</sup>    | 70          | 42          | 42          | 42          |
| $s_{\text{u}}^A_{\text{inc}}$                 | kN/m <sup>2</sup> /m | 0           | 0           | 0           | 2.5         |
| $z_{\text{ref}}$                              | m                    | 0           | 0           | 0           | 88          |
| $s_{\text{u}}^{\text{DSS}}/s_{\text{u}}^A$    | -                    | 0.63        | 0.63        | 0.63        | 0.63        |
| $s_{\text{p}}/s_{\text{u}}^A$                 | -                    | 0.35        | 0.35        | 0.35        | 0.35        |
| $\gamma_f^{\text{C}}$                         | %                    | 0.9         | 0.9         | 1.0         | 0.9         |
| $\gamma_f^{\text{E}}$                         | %                    | 2.4         | 2.4         | 3.0         | 2.7         |
| $\gamma_f^{\text{DSS}}$                       | %                    | 1.4         | 1.4         | 2           | 1.8         |
| $\tau_0/s_{\text{u}}^A$                       | -                    | 0.7         | 0.7         | 0.7         | 0.7         |

Som forklart i seksjon 3.1 er det forsket på mange forskjellige jordmodeller å benytte til KS-materialet. Disse modellene er ofte egnet til bruddgrensetilstanden av materialet og har mange avanserte input-parametre. I denne oppgaven er det likvel valgt å benytte Mohr-Coulombs jordmodell. Grunnen til dette er at MC er en oversiktlig og enkel modell som fungerer godt til modellering av materialer som holder seg innenfor elastisk spenningstilstand. Selv om det er gjennomført en del forskning på mer avanserte modeller, er det fortsatt uklart om de vil gi mer nøyaktige fremstillinger av oppførselen til KS-materialet.

Da det kjøres to- og tredimensjonale simuleringer, er det nødvendig å skille mellom materialparametre for Plaxis 2D og Plaxis 3D. Som beskrevet i seksjon 4.5, er det gjennom formler fra SVV (Statens Vegvesen, 2014) utregnet dimensjonerende verdier for skjærstyrken og stivheten til det stabiliserte volumet for beregninger i 2D. Materialparametre for KS-leire i 2D er presentert i Tabell 4.6.3, mens materialparametre for KS-leire i 3D er presentert i Tabell 4.6.4.

**Tabell 4.6.3:** KS-stabilisert volum med Mohr-Coulombs jordmodell (2D).

| Symbol                  | Enhet                | <b>KS 28%</b>      |
|-------------------------|----------------------|--------------------|
| Drainage                | -                    | Undrained C        |
| $\gamma_{\text{unsat}}$ | kN/m <sup>3</sup>    | 19.5               |
| $E_{u,\text{ref}}$      | kN/m <sup>2</sup>    | $25.54 \cdot 10^3$ |
| $\nu_u$                 | -                    | 0.495              |
| $G_{\text{ref}}$        | kN/m <sup>2</sup>    | 8540               |
| $E_{\text{oed}}$        | kN/m <sup>2</sup>    | $862.6 \cdot 10^3$ |
| $\phi$                  | °                    | 0                  |
| $s_{u,\text{ref}}$      | kN/m <sup>2</sup>    | 88                 |
| $s_{u,\text{inc}}$      | kN/m <sup>2</sup> /m | 0                  |
| Tension-cutoff          | -                    | Nei                |
| $R_{\text{inter}}$      | -                    | 0.7                |

**Tabell 4.6.4:** KS-stabilisert volum med Mohr-Coulombs jordmodell (3D).

| Symbol                  | Enhet             | <b>KS</b>   |
|-------------------------|-------------------|-------------|
| Drainage                | -                 | Undrained C |
| $\gamma_{\text{unsat}}$ | kN/m <sup>3</sup> | 19.5        |
| $E_{u,\text{ref}}$      | kPa               | 75 000      |
| $\nu_u$                 | -                 | 0.499       |
| $s_{u,\text{ref}}$      | kPa               | 175         |
| $\phi_u$                | °                 | -           |
| $\psi$                  | °                 | -           |
| Tension-cutoff          | -                 | Nei         |
| $R_{\text{inter}}$      | -                 | 0.7         |

Resterende materialparametre til støttekonstruksjonen er vedlagt i seksjon .1. Her er materialparametre for betongen presentert i Tabell .1.1, skråstiverne er presentert i Tabell .1.4 og Tabell .1.5, spuntveggen er presentert i Tabell .1.2 og Tabell .1.3, og puten er presentert i Tabell .1.6.

Videre er materialparametre for interfascene til leiren og betongen gitt i Tabell .1.7 og Tabell .1.8. For KS-pelene er det valgt samme interface som den ubehandlede leiren. Grunnen til dette er at det ikke oppnås fullstendig kontakt mellom KS-ribbbene og spuntveggen, siden installering helt inntil spuntveggen vil ødelegge vispen. Det er dermed ubehandlet leire som er nærliggende materiale langs spuntveggen.

# Kapittel 5

## Innledende analyse

I dette kapittelet vil de innledende analysene bli gjort rede for. Validiteten til simuleringene blir gjennomgått, hvor presisjonen til simuleringene gjennom endring av elementnettets finhet er i fokus. Videre blir resultatene fra simuleringene sammenlignet med målingene fra instrumenteringen på Campus Ullevål. Sammenligningene gir indikasjon på hvor representative simuleringene i Plaxis faktisk er.

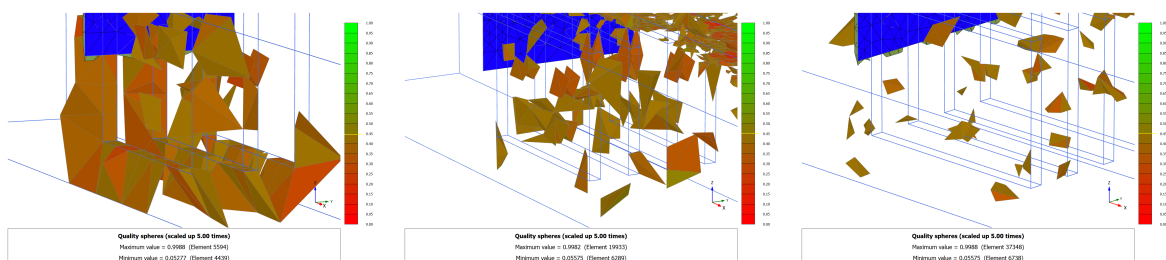
### 5.1 Betydning av mesh-kvalitet i Plaxis

For å oppnå resultater med tilstrekkelig validitet fra FEM-beregninger er det avgjørende med et godt elementnett (eng: mesh). Med et elementnett bestående av store elementer, kan resultatene være preget av stor upålitelighet. Derfor er det vanlig praksis å kjøre simuleringer av samme geometri med gradvis finere mesh. Ved å hente ut et stykke kritiske verdier fra hver simulering, som sikkerhetsfaktor, dimensjonerende krefter og deformasjoner, kan konvergensen av resultatene sammenlignes med utviklingen av mesh-kvalitet. Deretter kan det etableres et minstekrav for mesh-kvalitet for senere simuleringer. Resultatkvaliteten ønsket under hver simulering må selvfølgelig stilles opp mot den nødvendige kjøretiden. Denne prosessen er gjennomført for både Plaxis 3D- og 2D-simuleringene, og oppsummert i underseksjon 5.1.2 og underseksjon 5.1.3, men først blir elementnettet mer spesifikt undersøkt i underseksjon 5.1.1.

### 5.1.1 Elementnett mellom berg og KS-peler

Ved kjøring av de innledende simuleringene ble det fort oppdaget at det automatisk genererte elementnettet i PLAXIS 3D ikke holder tilstrekkelig kvalitet mellom berg og KS-pelene. Dette er et område der skjærspenninger og tøyninger vil oppstå etter utgraving. Som beskrevet i seksjon 3.2, vil det være nødvendig med et mesh bestående av mindre elementer i områder som blir eksponert for større bevegelser. Nodene i et finere elementnett kan mer nøyaktig representere de reelle forskyvingene, da det totale antall frihetsgrader øker i elementnettet.

Elementnettets kvalitet kan også karakteriseres av formen til elementene. I Plaxis finnes det et vurderingsverktøy, *quality spheres*, som måler elementformenens kvalitet basert på sidelengdene til tetraederene. Et rent likesidet tetraeder vil ha en kvalitet på 1, mens tetraeder bestående av ulike sidelengder, og dermed en skarpere vinkler i tetraederet, har lavere kvalitet. I Figur 5.1.1 illustreres utviklingen av form-kvaliteten til elementnettet rundt KS-pelens bunn ved oppdatering av meshet. Kun elementer med formkvalitet under 0.45 er synlige for de tre elementnettkonfigurasjonene, og det viser seg at finere mesh bidrar til høyere formkvalitet på elementene i dette området.



Figur 5.1.1: Utvikling av elementens formkvalitet.

### 5.1.2 Meshkalibrering - Plaxis 2D

For å definere minstekravet av mesh-kvaliteten til simuleringene i Plaxis 2D, er det etablert en Campus Ullevål-ekvivalent modell i Plaxis 2D, med 28% dekningsgrad av KS. Ribbene er 15 m lange og 20 m dype. Modellen er kjørt med gradvis finere mesh, og resultatene er oppsummert i Tabell 5.1.1. For alle simuleringene er det spesifikt valgt lavere *coarsness factor* (grovhetsgrad) for volumene som stiller høyere krav til elementkvalitet. Deriblant KS-ribbene, volumet under KS-ribbene, og den drenerte kilen. Mesh-typen i tabellen er altså et globalt mål for meshets grovet, men med finhetsjusteringene i de aktuelle volumene er meshet i realiteten finere enn navnet skulle tilsi.

**Tabell 5.1.1:** Resultater fra ulike mesh-kvaliteter i Plaxis 2D.

| Mesh-type    | Antall<br>elementer | Stiverkraft<br>[kN] | $M_{maks}$ i<br>spunt [kNm/m] | $U_{x,maks}$ i<br>spunt [cm] | F (fase 4)<br>[-] |
|--------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------|
| Veldig grovt | 1 496               | 411.55              | 290.4                         | 17.69                        | 1.676             |
| Grovt        | 2 345               | 404.10              | 302.6                         | 18.12                        | 1.661             |
| Medium       | 3 131               | 545.55              | 311.4                         | 18.72                        | 1.652             |
| Fint         | 4 907               | 583.32              | 318.7                         | 18.76                        | 1.649             |

Utviklingen av sikkerhetsfaktor, maksimal deformasjon og bøyningmoment i spuntveggen konvergerer godt ved finere mesh. Utviklingen av stiverkraften derimot viser seg å være varierende for hver simulering. Siden kraften i stiverene ikke er i hovedfokus i denne oppgaven og verdiene er innenfor dimensjonerende stiverkraft, er det valgt å ikke se nærmere på dette. En mindre variasjon er observert i utviklingen av sikkerhetsfaktorene, men variasjonen er vurdert til å være akseptabel. Når det kommer til kjøretid oppleves det en uønsket lang kjøretid for beregningene til simuleringspakke 2 allerede ved fint mesh. Basert på disse opplysningene er det dermed valgt å kjøre simuleringene med medium mesh i Plaxis 2D.

### 5.1.3 Meshkalibrering - Plaxis 3D

Som illustrert i Tabell 5.1.2 oppleves det god konvergens i målingen for bøyningmoment og deformasjon av spuntveggen under mesh-oppdateringene også i Plaxis 3D. Stiverkraften konvergerer bedre enn i Plaxis 2D og variasjonen i sikkerhetsfaktorene er akseptable.

Naturligvis er beregningstiden betraktelig større for simuleringene i Plaxis 3D. Dermed blir kjøretiden høyt prioritert ved sammenligning av kjøretid versus mesh-kvalitet. Med disse opplysningen er det derfor valgt å kjøre simuleringene i 3D med grovt mesh. Som for 2D-modellene har også 3D-modellene redusert *coarsness factor* i jordvolum med høyere krav til mesh-kvalitet enn resten av modellen.

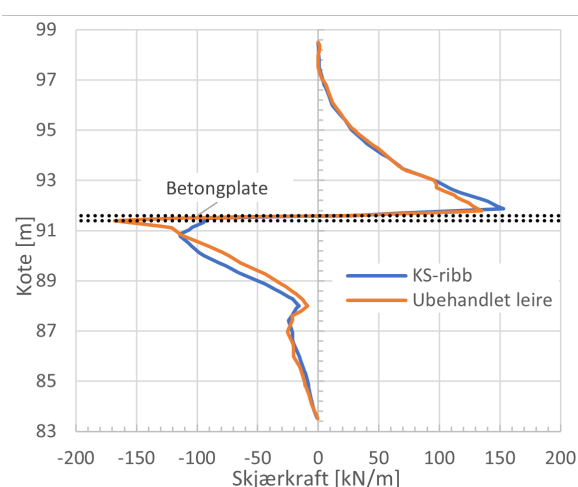
**Tabell 5.1.2:** Resultater fra ulike mesh-kvaliteter i Plaxis 3D.

| Mesh-type    | Antall<br>elementer | Stiverkraft<br>[kN] | $M_{11,maks}$ i<br>spunt [kNm/m] | $U_{x,maks}$ i<br>spunt [cm] | $\Sigma M_{sf}$ (fase 4)<br>[-] |
|--------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Veldig grovt | 74 738              | 543.6               | 329.4                            | 18.24                        | 1.843                           |
| Grovt        | 95 431              | 538.1               | 327.5                            | 17.77                        | 1.811                           |
| Medium       | 166 426             | 529.5               | 327.1                            | 17.64                        | 1.789                           |

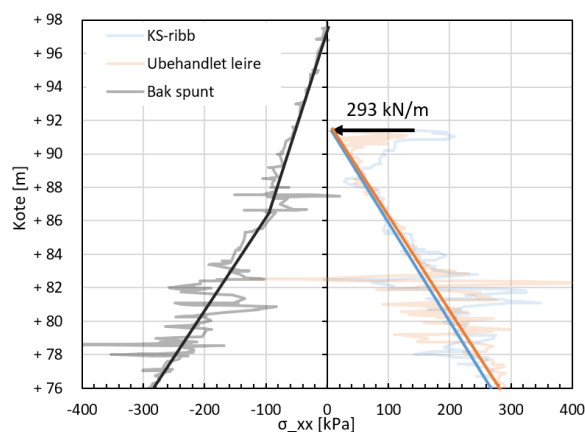
## 5.2 Krefter i spuntvegg, fase 9

Den avstivende kraften fra arbeidsplaten (betongplaten) er helt avgjørende for å kunne la spuntveggen stå utkraget med den aktuelle utgravningsdybden på Campus Ullevål. Fra skjærkraftdiagrammet regnet frem i Plaxis 3D ved den siste fasen, er det mulig å avgjøre størrelsen på horisontalkraften fra arbeidsplaten. Diagrammet er illustrert i Figur 5.2.1. Det viser seg at KS-ribbene under arbeidsplaten har en effekt på målene, da interfascene mellom betongen og grunnen påvirker skjærkraften. Ved å vekte skjærkraften som virker på spuntveggen fra betongen over KS-ribbene og betongen over den ubehandlede leiren kan et representativt mål på horisontalkraften etableres ved å ta hensyn til dekningsgraden. Med 267 kN/m fra betongen over KS-ribbene og 304 kN/m fra betongen over ubehandlet leire, blir den representative horisontalkraften 293 kN/m.

Figur 5.2.2 viser horisontalkreftene som virker på spuntveggen og videre under ved  $x = 0$  m. Det aktive og passive jordtrykket fra Plaxis er preget av mye støy, men tolkningen samsvarer godt med forventede verdier presentert i prosjekteringsrapporten utarbeidet av NGI (NGI, 2023d).



**Figur 5.2.1:** Skjærkraft  $V$  [kN/m] på spuntvegg ( $Q_{13}$ ).



**Figur 5.2.2:** Aktivt- og passivt jordtrykk.

## 5.3 Campus Ullevål-ekvivalent simulering

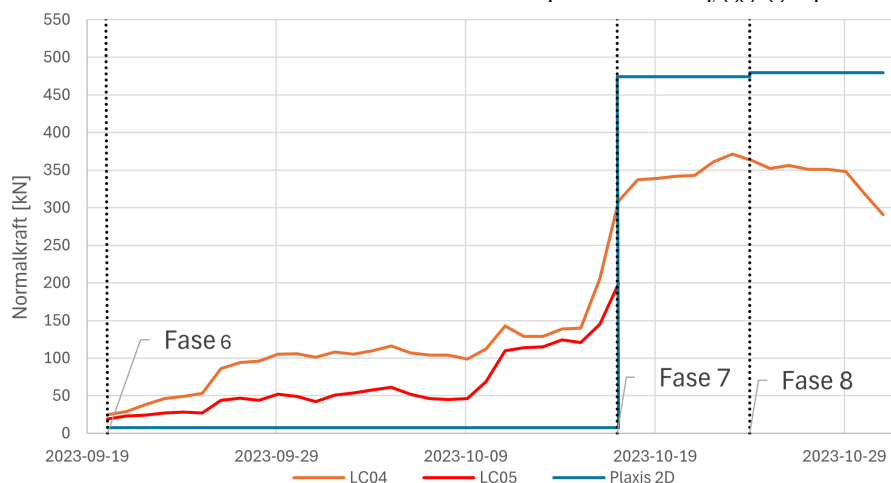
I denne seksjonen blir resultatene fra Plaxis 3D simuleringen, som etter beste evne er konstruert til å gjenspeile det instrumenterte profilet fra Campus Ullevål, sammenlignet med de målte verdiene fra instrumenteringen. Resultatene vil gi et innblikk i hvor nøyaktige modellene er sammenlignet med den virkelige oppførselen. Leser er imidlertid nødt til å ta modellforenklinger i betraktning, forklart i seksjon 4.3. Av beregningsmessige årsaker er det blitt tatt en rekke valg for å forenkle modellen i Plaxis 3D.

### 5.3.1 Skråstivere

Figur 5.3.1 illustrerer utviklingen av normalkraften i skråstiverene fra Plaxis og instrumenterte verdier fra Campus Ullevål. Lastcelle 5 (LC5) ble defekt under utgraving, dermed er kun LC4 gjeldende for de instrumenterte estimatene til normalkraften. Lastcellene måler utslag på normalkraften tidlig da det ble påbegynt utgraving på begge sider av den instrumenterte seksjonen allerede i oktober. Dette kommer ikke frem fra Plaxis-målingene i fase 6 da all utgravingen i modellen skjer momentant i fase 7.

Av grafen er det tydelig at Plaxis overestimerer maksimal normalkraft i avstiverene i fase 7 og 8. Med en oppnådd maksimalverdi på 479 kN fra Plaxis 2D og 371 kN i maksimalverdi fra lastcellemålingene overestimerer Plaxis normalkraften med 29%. Denne overestimeringen kommer mest sannsynlig av drenerte forhold i modellen som ikke oppstår like fort i virkeligheten.

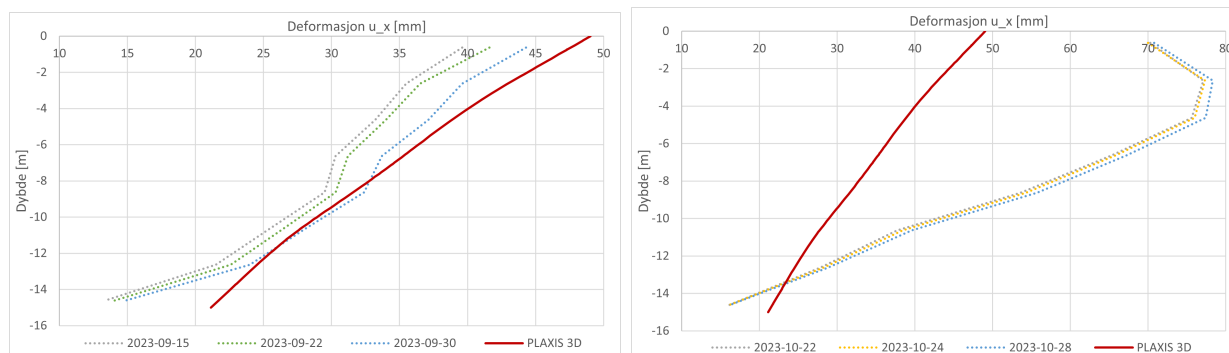
Dette er selvfølgelig en stor overestimering, men samtlige verdier er innenfor bruksgrensen til stiverene på 632 kN (NGI, 2023d). Siden kraften i skråstiverne har liten påvirkning på det aktuelle fokusområdet i denne oppgaven, blir det ikke tatt mer hensyn til avviket, men det blir brukt til å kunne forklare andre avvik i responsen til byggegropens støttestruktur.



**Figur 5.3.1:** Normalkraftmålinger fra lastceller og Plaxis.

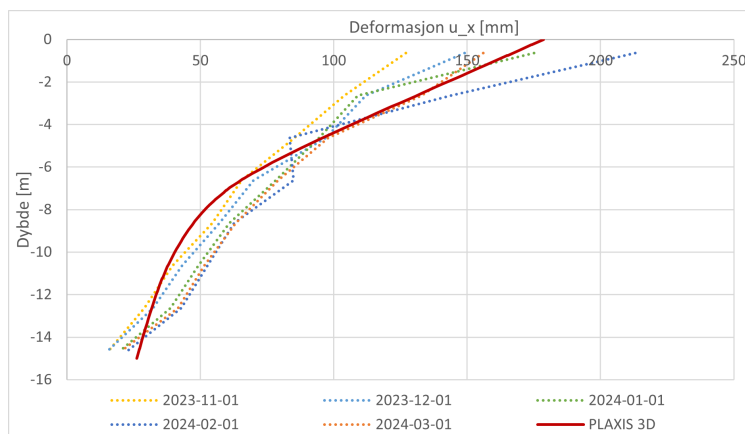
### 5.3.2 Deformasjon av spuntvegg

I Figur 5.3.2 og Figur 5.3.3 er horisontaldeformasjonene målt av inklinometer 3 (IN3) sammenlignet med horisontaldeformasjonene  $u_x$  fra Plaxis 3D i henholdsvis fase 6, 8 og 9. Som vist i Figur 2.6.1, er IN3 lokalisert inntil spuntveggen midt mellom to KS-ribber. Deformasjonsdataen fra Plaxis er derfor også hentet fra et linjesnitt i spuntveggen mellom to KS-ribber.



**Figur 5.3.2:** Deformasjonsmålinger fase 6 og 8.

I fase 6 er sentral utgraving gjennomført, arbeidsplaten er støpt inntil bermen og skråstivere er montert. Ved dette stadiet overestimerer Plaxis deformasjonene noe, men ellers korrelerer målingene veldig godt. I fase 8 derimot, er det større avvik mellom målingene fra Plaxis og målingene fra IN3. Dette forklares av avviket i normalkraften til skråstiverne, som ble gjort rede for i underseksjon 5.3.1. Da deformasjonene er små, undersøkes ikke avviket nærmere.



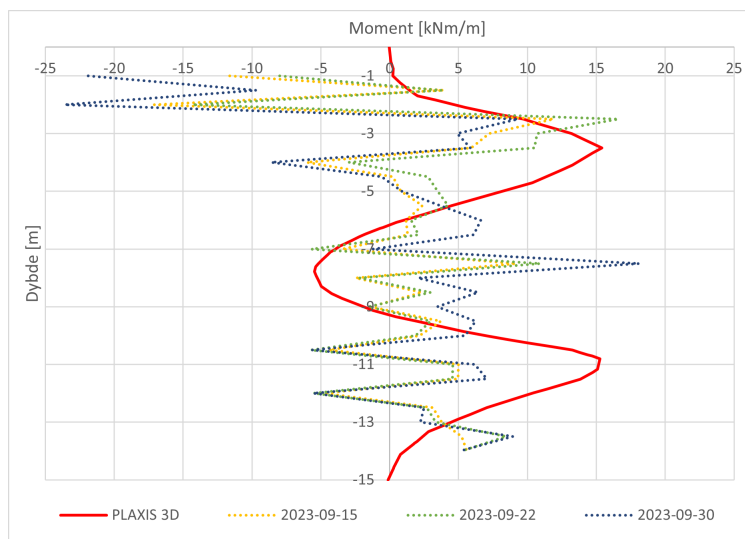
**Figur 5.3.3:** Deformasjonsmålinger fase 9.

De totale deformasjonene av hele spuntveggen fra Plaxis 3D vedlagt i Figur .2.8.

Deformasjonsmålingene fra Plaxis viser god korrelasjon med virkeligheten da de treffer godt på maksverdiene og deformasjonskruven til inklinometermålingene. Da de største deformasjonene oppstår i denne fasen, er det et veldig godt tegn med god korrelasjon. Likevel er det interessant å bemerke seg den store økningen, og etterhvert reduksjonen, av spuntveggs toppforskyvning. Økningen skyldes et ekstra frosttrykk fra leira, da januar 2024 var spesielt kald. Siden spuntveggen ikke er dimensjonert for å tåle tilleggslastene fra frosten, ble det gjennomført oppvarmingstiltak i februar. Fra deformasjonsmålene er det tydelig at tiltakene fungerte godt da målingene går tilbake til forventet deformasjonsmål ved 1. mars 2024.

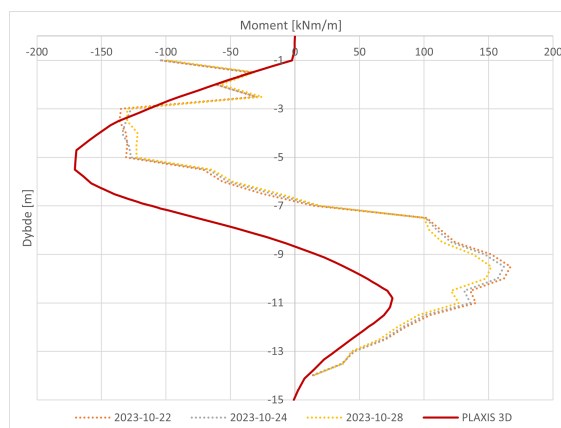
### 5.3.3 Moment i spuntvegg

I Figur 5.3.4, Figur 5.3.5 og Figur 5.3.6 er bøyningsmomentet målt av fiberoptikk FBG1 og FBG2, sammenlignet med bøyningsmomentet,  $M_{11}$  fra Plaxis 3D i henholdsvis fase 6, 8 og 9. I faser der tøyningene i spuntveggen er små, vil målingene fra fiberoptikken ha høyere usikkerhet. Denne usikkerhet kommer av et dårlig signal-til-støyforhold, og reflekteres som støy i dataen. Dette kommer tydelig frem av fiberoptikk-målingene under fase 6, men det er imidlertid god korrelasjon med størrelsesordenen til Plaxis-målingene.



**Figur 5.3.4:** Momentmålinger fra FBG1+2 og Plaxis 3D, fase 6.

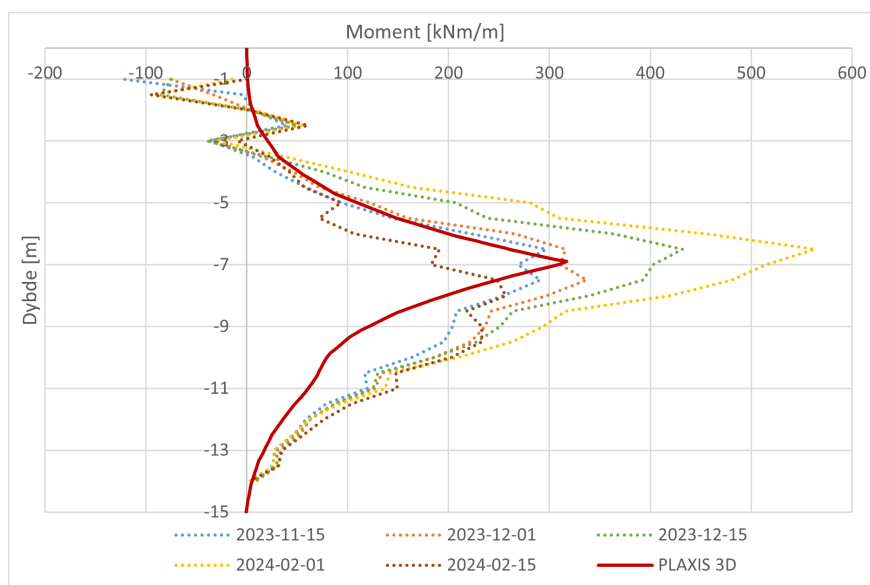
Videre er det akseptabel korrelasjon mellom Plaxis og fiberoptikken i fase 8, men vi ser en forskyvning av momentkurven fra Plaxis-simuleringene. Dette kommer av at normalkraften i skråstiverne i Plaxis er vesentlig større.



**Figur 5.3.5:** Momentmålinger fra FBG1+2 og Plaxis 3D, fase 8.

I fase 9, som på mange måter er den viktigste med tanke på spuntveggs momentkapasitet, ser vi veldig god korrelasjon mellom fiberoptikkmålene og Plaxis-målingene. Her treffer både form og størrelsesorden. Også i dette plottet ser man tydelig frostens påvirkning på bøyningmomentet. Etter et topputslag 2. februar, ser vi at bøyningmomentet reduseres ned til normalt nivå 15. februar etter at oppvarmingstiltak er iverksatt på byggeplass.

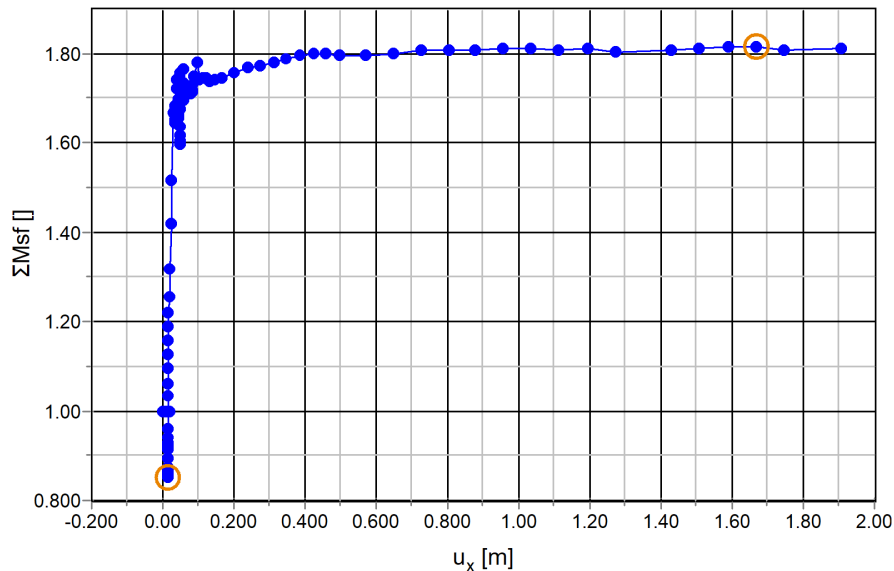
Målingene fra 15. februar og før frosten inntraff (1. des.) anses å være representative mål for simuleringenes validitet. Maksimalverdien og formen over betongplatens kote fra Plaxis treffer veldig godt med instrumenteringen. Under betongplaten underestimerer Plaxis målene noe. Det kan komme av små feiltolkninger i leirens stivheter, men avviket er ikke av høy betydning da maksimalverdien er mest kritisk.



**Figur 5.3.6:** Momentmålinger fra FBG1+2 og Plaxis 3D, fase 9.

### 5.3.4 Kritisk sikkerhetsfaktor

Som tidligere beskrevet er det fase 4 som er den mest kritiske fasen for byggegropens stabilitet gjennom utgravingen, da den gir lavest sikkerhetsfaktor mot brudd. NGI har satt 1.6 som krav til sikkerhetsfaktoren for de udrenerte simuleringene i Plaxis 2D til dimensjonering av byggegropen. Fra den CU-ekvivalente simuleringen med 28% dekningsgrad av KS i Plaxis 3D ender sikkerhetsanalysen på 1,811 som vist i Figur 5.3.7. Dette tyder på at dimensjonering med Plaxis 2D er mer konservativt enn det nødvendigvis trenger å være. Da simuleringen med Plaxis 3D har vist seg å ha høy validitet, vist i de forrige underkapitlene, og den gir høyere kritisk sikkerhetsfaktor, er det god grunn til å heller benytte Plaxis 3D under dimensjoneringfasen. Men igjen er 3D-simuleringer veldig mye mer tidskrevende både under etablering av modellen og selve beregningen.



**Figur 5.3.7:** Konvergens av sikkerhetsfaktor fra fase 4 i Plaxis 3D (28% KS).

Bruddsirkelen for fase 4 er vedlagt i Figur .2.7.

# Kapittel 6

## Resultater - Hovedanalyse

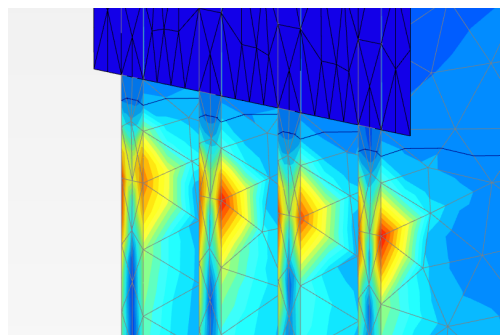
### 6.1 Simuleringspakke 1

I simuleringspakke 1 er fordelingen av kreftene som tas opp i KS-stabiliserte ribber og den ubehandlede leiren av interesse. Som beskrevet i seksjon 4.4 er det kjørt 9 simuleringer i Plaxis 3D med forskjellige dekningsgrader. I hele simuleringspakken forblir geometrien til KS-ribbene like. Samtlige ribber er 20 m dype, 15 m lange, og 96 cm brede. Det er kun dekningsgraden av det stabiliserte volumet som varierer mellom hver simulering.

Til dimensjonering av den aktuelle byggegropen på Campus Ullevål er en dekninggrad på 28 % beregnet for det instrumenterte snittet som er i fokus i denne oppgaven. Simuleringspakken er ikke konstruert for å optimalisere dekningsgraden av KS-stabilisert leire, selv om dette er en høyaktuell problemstilling. Simuleringspakken er først og fremst konstruert for å avdekke hvordan endret mengde stabilisert leire påvirker lastopptaket og den generelle oppførselen i passiv sone. Det blir dermed fokusert på å finne resultater som enten taler for at det stabiliserte volumet fungerer som ett sammenhengende volum, eller hvorvidt man er nødt til å isolere KS-ribbenes og den ubehandlede leiren for å få fullstendig forståelse av den stabiliserende effekten til KS-ribber.

### 6.1.1 Numerisk komplikasjon

Leser bes gjøres oppmerksom på en numerisk komplikasjon som oppstår under spuntveggen i simuleringene fra Plaxis 3D. Punktene er synlige i skjærspenningsfiguren illustrert i Figur 6.1.1. Slike problemer er desverre vanlig å møte på ved utvikling av avanserte modeller som nettopp denne. Feilen skyldes trolig diskontinuitet på interfacen mellom spuntten og leiren. Problemet er prøvd å bli rettet opp med forlengelse av interfascene på begge sider under spuntten, men problemet forble.

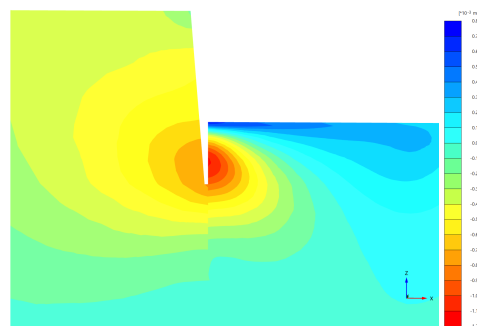


**Figur 6.1.1:** Skjærspenning i KS-ribber under spuntveggen.

Da de numeriske komplikasjonene ikke er synlige i målingene fra  $x = \pm 30$  cm, er det vurdert at resultatene fortsatt har høy verdi utenfor det aktuelle punktet. Ved innsamling av data fra simuleringene tas derfor dette punktet med i betraktning, og det tilstrebes å hente data som ikke er påvirket av de numeriske feilene som har oppstått.

### 6.1.2 Forskyvningforløp i fase 9

Hovedsakelig er tolkningen av simuleringspakke 1 basert på fase 9. Da er byggegropen fullstendig utgravet, arbeidsplaten er støpt inntil spuntveggen og skråstiverne er demontert. For å kunne danne en fullstendig forståelse av hvordan lastene fordeles i passiv sone i denne fasen er det behjelpelig å studere deformasjonsmønsteret i fasen. Figur 6.1.2 illustrer de horisontale forskyvningene i kun fase 9.



**Figur 6.1.2:** Horisontale fase-deformasjoner,  $Pu_x$ , i fase 9.

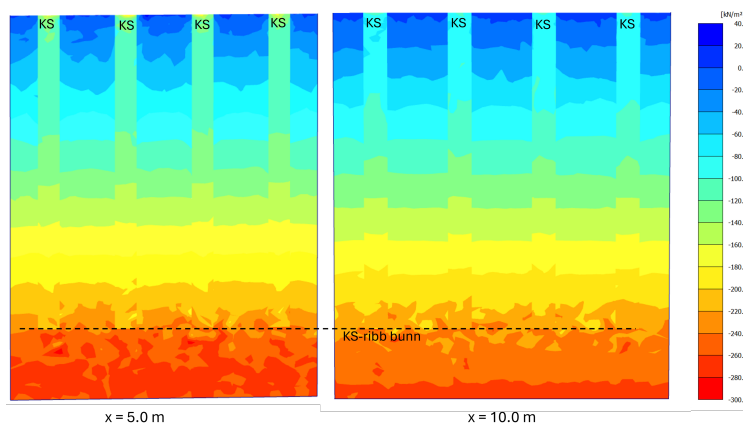
Da det oppstår store deformasjoner i den drenerte kilen, er det valgt å skru av dette materialet for visning av forskyvningene. Toppen av spuntten forskyves naturligvis inn mot byggegropen etter demontering av skråstiverne. Det kommer altså ikke med i Figur 6.1.2, og området bak spunt skal dermed egentlig være markert i sterk blåfarge da den har en positiv forskyvning, ut i byggegropa. Denne horisontale forskyvningen av spunt-toppen i fase 9 er beregnet til 14.9 cm fra Plaxis. Positive forskyvninger oppstår også i betongplaten i denne fasen, men på en betraktelig lavere størrelsesorden.

Negative forskyvninger oppstår i bunn av spuntten etter fjerning av skråstiverne. Det vi ser er altså en positiv translasjon av spuntten i fase 9, og en rotasjon med klokka rundt arbeidsplatens treffpunkt på spuntveggen.

### 6.1.3 Spenningsfordeling i vertikale tverssnitt

Innledningsvis er det hentet ut to vertikale tverssnitt (Figur 6.1.3) fra Plaxis 3D simuleringen med 28% dekningsgrad av KS-stabilisert volum. For å unngå de numeriske problemene under spuntveggen er det hentet ut snitt fra 5 og 10 meter innenfor spuntveggen. Snittene gir et godt førsteinntrykk av hvordan jordtrykket på passiv side fordeles mellom de stabiliserte ribbene og det ubehandlede jordvolumet.

Fordelingen av de normale spenningene er relativt uniforme med dybden i både de stabiliserte og ubehandlede volumene. Grunnet en høyere stivhet i det KS-stabiliserte materialet er det naturlig å anta at KS-ribbene tar opp større spenninger. Dette er også tilfellet som vist i Figur 6.1.3. Spesielt er dette fenomenet tydelig i toppen av ribbene, men desto dypere en går, er spenningsfordelingen mer jevn mellom de stabiliserte og de ubehandlede volumene.



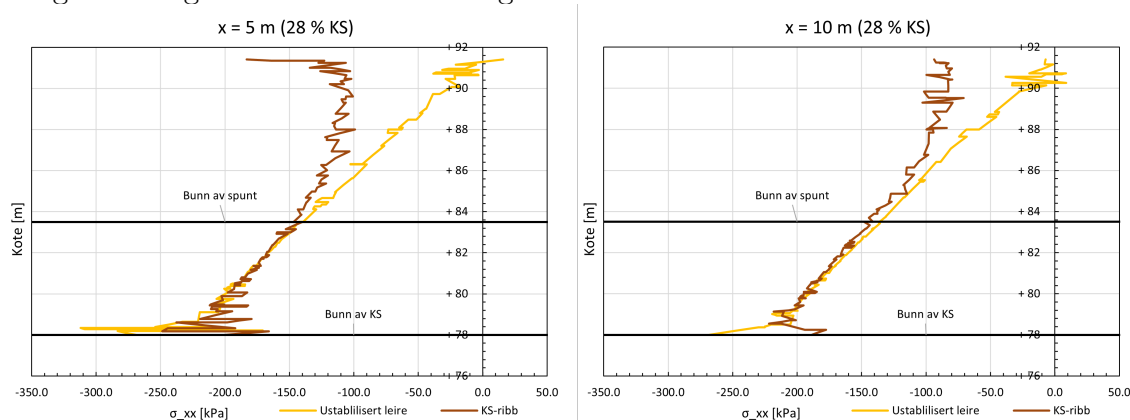
**Figur 6.1.3:** Normalspenninger ( $\sigma_N$ ) på tverssnittene fra  $x = 5.0$  m og  $x = 10.0$  m.

Med denne spenningsfordelingen som utgangspunkt er det for senere analyser naturlig å hente resultater fra vertikale linjesnitt hentet fra stabilisert og ubehandlede volum. Som det kommer frem i Figur 6.1.3, er det antydning til større spenning i overgangene mellom KS-ribbene og den ubehandlede leiren. Dette kommer av en sidefriksjon som oppstår i overgangen. Derfor blir de vertikale snittene analysert i videre kapitler hentet ut fra midten av de KS-stabiliserte volumene og de ubehandlede volumene.

For å rettferdiggjøre innhenting av data fra kun én ribb og ett volum av ubehandlet leire i de kommende analysene, er gjennomsnittlig spenningsopptak funnet for samtlige ribber og volum av ubehandlet leire hentet fra simuleringen med 30% dekningsgrad. Da ble det observert en sterk konsistens i målene fra KS-ribbene, da differansen mellom maksimalverdien og minsteverdi kun er 0,92%. For det ubehandlede volumet ble det funnet en akseptabel, men ikke like god konsistens. Differansen mellom maksimalverdi og minsterverdi er 2,3%.

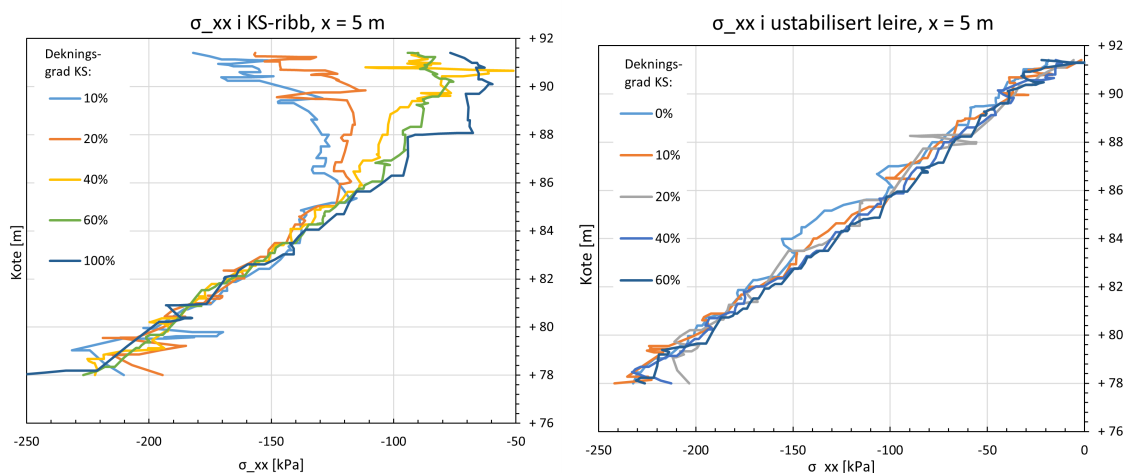
### 6.1.4 Hosizontalspenningsfordeling

Figur 6.1.4 illustrerer horisontalspenningsfordelingen i de KS-stabiliserte ribbene og i leiren mellom ribbene i fase 9. Da er fullstendig utgraving fullført, betongplaten er støpt inntil spuntveggen og står fullstendig utkraget over dette nivået. Det er som beskrevet tidligere forventet at KS-ribbene tar opp større spenninger enn den ubehandlede leiren i denne fasen. Dette illustreres godt av spenningskurvene i Figur 6.1.4. Overraskende nok, observeres ikke denne differansen gjennom hele KS-ribbenes dybde. Ned mot koten til spuntveggen bunn synker differansen i horisontalspenningene. Under denne koten observeres det tilnærmet lik spenningsfordeling mellom KS-ribbene og den ubehandlede leiren.



**Figur 6.1.4:** Horisontale totalspenninger ( $\sigma_{xx}$ ) på linjesnittene  $x = 5.0$  m og  $x = 10.0$  m.

For å kunne danne en bedre forståelse av denne effekten, er det i Figur 6.1.5 illustrert hvordan økt dekningsgrad av KS-stabilisering påvirker fordelingen av horisontalspenningen i linjesnittene fra  $x = 5$  m.

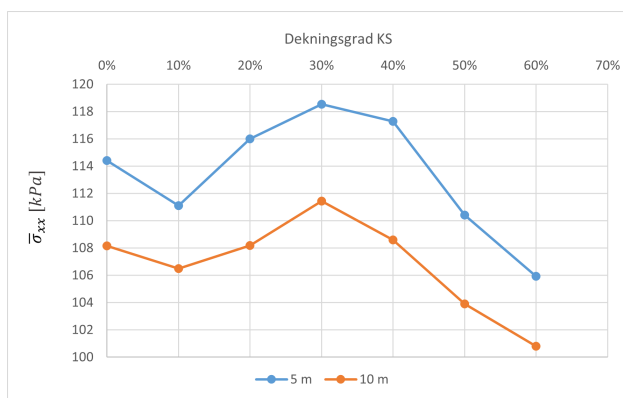


**Figur 6.1.5:** Horisontalspenninger ved ulike dekningsgrader av KS.

I Figur 6.1.5 kommer det også frem at den ubehandlede leiren påvirkes lite av endret dekningsgrad. Da plottet ikke viser forskjellene tilstrekkelig godt, blir differansen mellom lastopptakene i den ubehandlede leiren ved de ulike dekningsgradene analysert nærmere i underseksjon 6.1.5

### 6.1.5 Lastopptak i ubehandlet leire

Ved å finne de gjennomsnittlige horisontalspenningene i den ubehandlede leiren ved de forskjellige dekningsgradene, kan representative mål på det totale lastopptaket mellom KS-ribbene sammenlignes. Som tidligere nevnt i underseksjon 6.1.4 ble horisontalspenningene observert til å være tilnærmet lik for samtlige dekningsgrader, men etter nøyere analyse kommer det frem i Figur 6.1.6 at maksimalt lastopptak i de ubehandlede jordvolumene skjer ved 30% dekningsgrad.

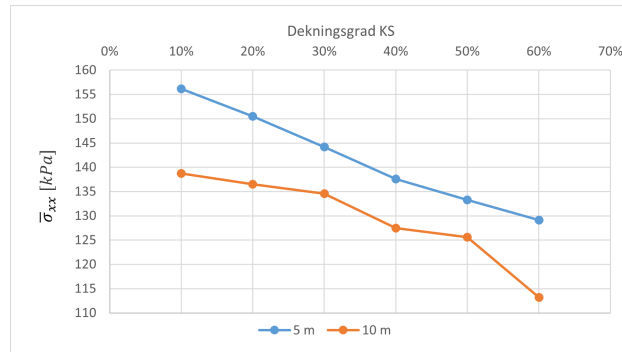


**Figur 6.1.6:** Lastopptak i ubehandlet leire.

Det bør likevel bemerkes hva slags størrelsesorden det er snakk om i denne observasjonen. Med en gjennomsnittlig horisontalspenning i den ubehandlede leiren ved  $x = 5$  m på 119 kPa og 106 kPa for simuleringene med henholdsvis 30% og 60% dekningsgrad, er det  $\frac{119}{106} - 1 = 12.3\%$  differanse mellom maksimumsverdien og minimumsverdien funnet i denne analysen.

### 6.1.6 Lastopptak i KS-ribber

For å sammenligne KS-ribbenes lastopptak fra samtlige simuleringer kjørt i Simuleringspakke 1 er det også her funnet representative horisontalspenninger for KS-ribbene ved gjennomsnittlig horisontalspenninger langs ribbenes dybde. Sammenstillingen av lastopptaket i hver KS-ribb er illustrert i Figur 6.1.7. Ved høyere dekningsgrad oppstår det, som tidligere bemerket, mindre horisontalspenninger i hver enkelt KS-ribb. Utviklingen av lastopptakene er tilnærmet lineære for resultatene hentet fra  $x = 5\text{ m}$ . Fra resultatene hentet i  $x = 10\text{ m}$  er den lineære utviklingen karakterisert med en svakere *korrelasjonskoeffisient*, men utviklingen er likvel strengt synkende.



Figur 6.1.7: Lastopptak i KS-ribber.

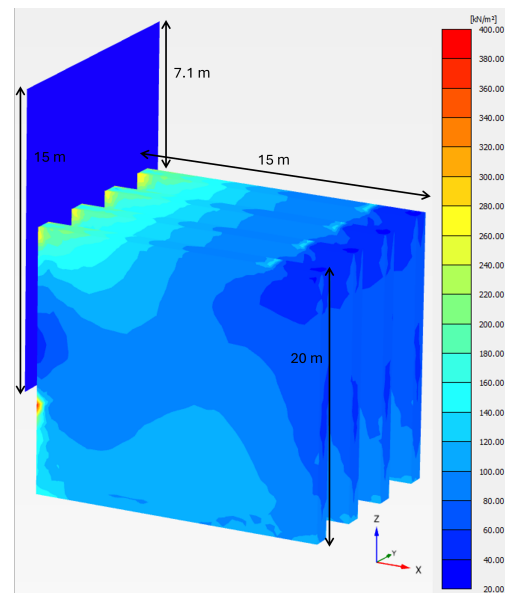
### 6.1.7 Deviatorisk spenning

For å gå videre fra retningsbestemte spenninger er det i denne udrenerte totalspenningsanalysen av byggegropen interessant å se hvordan de deviatoriske spennningene fordeles i KS-ribbene. Deviatorisk spenning er gitt ved:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (6.1)$$

der  $\sigma_1$  er største normalspenning og  $\sigma_3$  er minste normalspenning.

Siden analysene er gjort på udrenert totalspenningsbasis er den deviatoriske spenningen halvparten av den udrenerte skjærstyrken da  $s_u = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ .



Figur 6.1.8: Deviatorisk spenning  $q$  [kPa] i KS-ribbene (28% dekningsgrad).

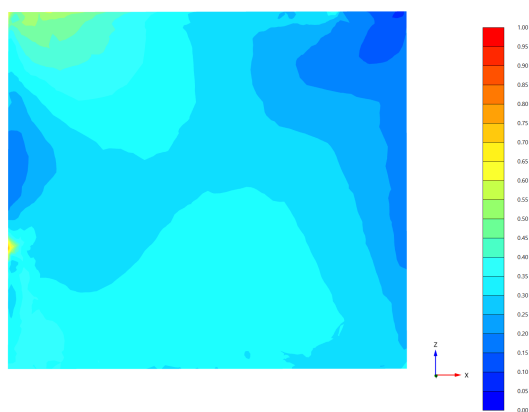
I Figur 6.1.8 er den deviatoriske spenningen i KS-ribbene fra Plaxis-simuleringen med 28% KS isolert. Resultatene er hentet ut fra den siste fasen (9) der den innvendige avstivningen er demontert og spunten står utkraget fra arbeidsplaten. Da spuntveggen roterer om betongplaten etter demontering av skråstiverne (som forklart i underseksjon 6.1.2), oppstår det naturligvis mindre deviatoriske spenninger i bunn av spuntveggen da  $\sigma_1$  har lavere verdier her. Resten av KS-ribbene er preget av større deviatoriske spenninger øverst og en reduksjon langs x-aksen.

### 6.1.8 Mobiliseringsgrad i KS-ribb

Et godt mål på utnyttelsen av kapasiteten til de KS-stabiliserte ribbene er den relative skjærspenningen,  $\tau_{rel}$ . Den relative skjærspenningen er forholdet mellom mobilisert skjærspenning og den maksimale skjærstyrken gitt ved  $\tau_{rel} = \frac{\tau_{mob}}{\tau_{max}}$ .

I Figur 6.1.9 observeres det at den relative skjærspenningen i hele KS-snittet er under 0.6, uten å inkludere punktet med parametriske forviklinger under spuntveggen. Dette vitner til god utnyttelse av skjærspenningsegenskapene til KS-ribbene. Samme forhold er observert mellom ribbene, der den relative skjærspenningen også holdes under 0.6 i det ubehandlede jordvolumet.

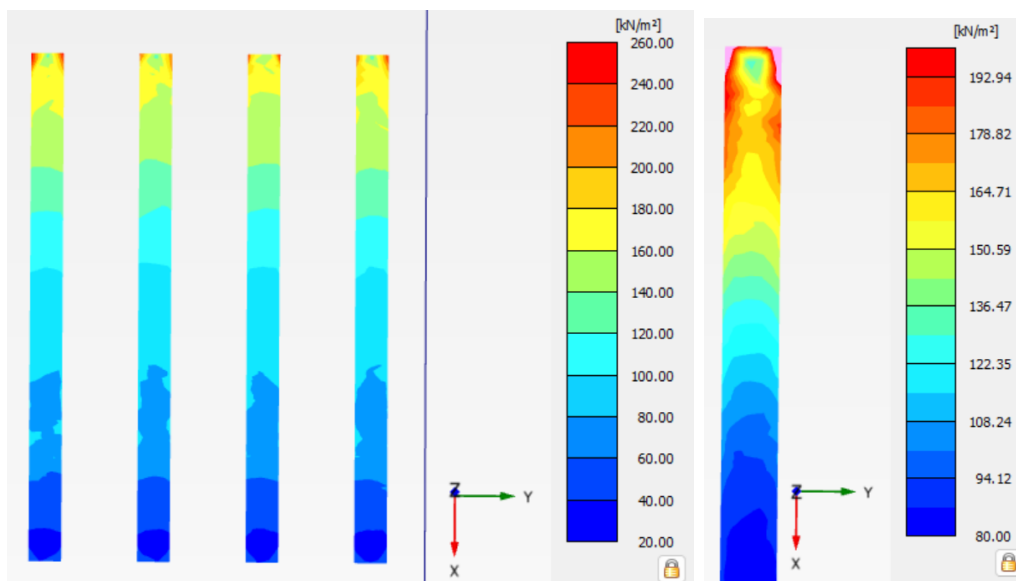
Grunnen til denne observasjonen dreier seg om selve prinsippet med KS-stabilisering. Da KS-ribbenes skjærstyrke er så høy som den er, tvinges den kritiske skjærflaten til å gå dypere og lengre. Inkrementell deviatorisk tøyning fra sikkerhetsanalysen etter fase 4, vedlagt i vedlegget (Figur .2.6) viser at den kritiske skjærflaten går under KS-ribbene.



**Figur 6.1.9:** Relativ skjærspenning,  $\tau_{rel}$ , i KS-ribb (28% dekningsgrad).

### 6.1.9 Sidefriksjon på KS-ribbber

Ved å studere reduksjonen av skjærspenninger langs KS-ribbenes lengde ble det oppdaget en interessant observasjon. Som en pel som rammes ned i bakken, oppstår det en sidefriksjon på KS-ribbene ved  $z = 91.3$  m. Med forskjellig stivhet på KS-ribbene og den ubehandlede leiren vil leiren være mer tilbøyelig for deformasjoner enn KS-ribbene. Denne forskjellen i deformasjoner på volum som ligger inntil hverandre medfører i en sidefriksjon som synliggjøres i Figur 6.1.10.



**Figur 6.1.10:** Utvikling av skjærspenninger i KS-ribbene (venstre) og deviatorisk spenning ved  $z=91.3$  m (høyre) (30% KS).

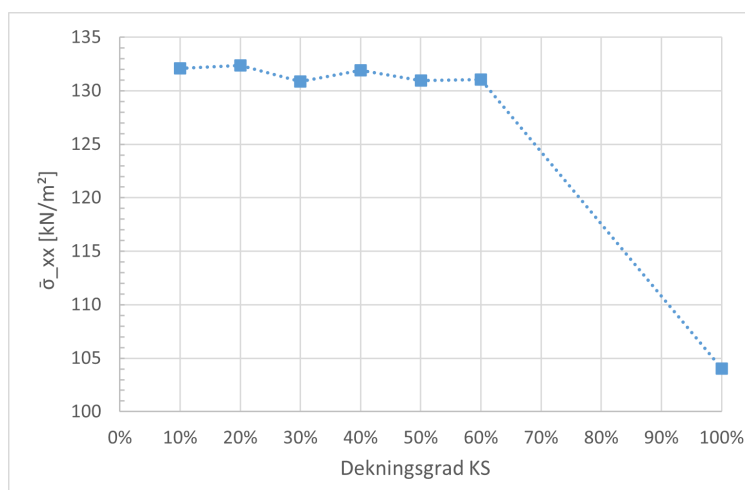
Utklippet til høyre i Figur 6.1.10 er tatt fra de 8 første løpemeterene ut fra spuntveggen til en KS-ribb fra simuleringen med 30% KS ved kote 91.3 m. Figuren synliggjør sidefriksjonen med den buede fordeling av deviatorisk spenning i ribben. Det er verdt å merke seg at det er store fasedeformasjoner (som vist i underseksjon 6.1.2) ved denne koten og at det dermed forventes at effekten av stivhetsforskjellene mellom KS-leire og ubehandlet leire har størst påvirkningen her.

Etter nærmere analyse av lagene under kote 91.3 m, ble det avdekket at sidefriksjonsobservasjonene kun er synlige i de 3 øverste meterene i KS-ribbene under betongenplaten. Utviklingen til de deviatoriske spenningene i KS-pelene går over i mer uniform reduksjon langs x-aksen for både den ubehandlede leiren og KS-ribbene fra kote 88 m og nedover. Utviklingen i ubehandlet leire er vedlagt i Figur .2.3.

### 6.1.10 Lastopptak i jordvolum innenfor KS-ribbene

For å gi et mål på hvordan jordtrykket innenfor det KS-stabiliserte volumet påvirkes av dekningsgraden i fase 9, er det naturlig å studere jordtrykket i den ubehandlede leiren etter KS-ribbenes lengde i Plaxis-simuleringene. Gjennom integrering av horisontalspenningen fra linjesnitt tatt 10 cm inn i ubehandlet leire ( $x = 15.1$  m), kan jordtrykket sammenlignes ved de forskjellige dekningsgradene. Sammenfatningen illustreres i Figur 6.1.11.

For å trekke inn analogien til pel-oppførselen med sidefriksjon fra forrige underseksjon, kan verdiene i Figur 6.1.11 sammenlignes med spissmotstanden til en nedrammet pel. Det observeres imidlertid en relativt stabil tendens i spenningsnivået i den ubehandlede leiren innenfor KS-ribbene fra 10% til 60% dekningsgrad. Det er dermed lite som tilsier at dekningsgraden av KS har en effekt på jordtrykket etter KS-ribbene.



**Figur 6.1.11:** Gjennomsnittlig horisontalspenning  $\sigma_{xx}$  fra  $x = 15.1$  m.

Det gjennomsnittlige spenningsnivået ligger naturligvis høyere enn ved statisk jordtrykk som oppnås langt inn i byggegropen ( $x = 45$  m). Verdien for gjennomsnittlig horisontalspenning ved statisk jordtrykk er 92.4 kPa. Det vil da si at ved simuleringen med 100% KS i det stabiliserte volumet, oppnås det statisk jordtrykk mye tidligere.

## 6.2 Simuleringspakke 2

Simuleringspakke 2 er en mindre analyse der effekten av endret geometri til KS-ribbene er av interesse. I sin helhet skal det gjennomføres et sensitivitetstudie der effekten av KS-ribbenes lengde fra spuntvegg og dybde blir kartlagt. Alle simuleringer tar fortsatt de samme leirlagene og samme utgravingsprosedyre som byggegropen på Campus Ullevål.

Siden det i denne simuleringspakken ikke er fokus på lastopptaket i det stabiliserte volumet, ble det valgt å kjøre simuleringspakken i Plaxis 2D for å redusere unødvendig kjøretid. Til å begynne med er det interessant å kartlegge hvordan geometriendringen i KS-ribbene påvirker de kritiske resultatene som blir tatt hensyn til under dimensjoneringsfasen av byggegropen. Resultatene med konstant dybde (20 m) er oppsummert i Tabell 6.2.1 og resultatene med konstant lengde (15 m) er oppsummert i Tabell 6.2.2.

### 6.2.1 Endret lengde

**Tabell 6.2.1:** Resultater fra Plaxis 2D-simuleringer med endret KS-lengde.

| Lengde | Dybde | $\Sigma M_{sf}$<br>(Fase 4) | $M_{max}$ [kNm/m]<br>Spuntvegg<br>(Fase 9) | $u_{x,max}$ [m]<br>Spuntvegg<br>(Fase 9) | $\bar{\sigma}_{xx}$ [kPa]<br>Ubehandlet leire<br>( $x=L_{KS}+0.1$ m) (Fase 9) |
|--------|-------|-----------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 10     | 20    | 1.585                       | 332.0                                      | 0.189                                    | 141.4                                                                         |
| 12.5   | 20    | 1.621                       | 331.7                                      | 0.189                                    | 137.5                                                                         |
| 15     | 20    | 1.652                       | 331.4                                      | 0.187                                    | 129.4                                                                         |
| 17.5   | 20    | 1.689                       | 291.1                                      | 0.170                                    | 127.4                                                                         |
| 20     | 20    | 1.769                       | 255.8                                      | 0.166                                    | 126.2                                                                         |

Naturligvis øker sikkerhetsfaktorene med forlengelsen av KS-ribbene. Da tvinges den kritiske skjærsirkelen til å gå lengre og sikkerheten mot stabilitetsbrudd øker. Videre observeres det en minimal nedgang i det maksimale bøyningmomentet og deformasjonen av spuntveggen fra 10 til 15 meter lang KS-ribb. Ved lengre KS-ribber synker bøyningmomentet og deformasjonen i større grad.

Målet for det gjennomsnittlige jordtrykket innenfor KS-ribbene viser en litt annen tendens. En mer jevn reduksjon som reflekterer KS-ribbenes lastoverføringsevne fra passiv side observeres. Her skal det også bemerkes at samtlige mål ligger betydelig over jordtrykket sentralt i byggegropen på  $\bar{\sigma}_{xx} = 92.4$  kPa. Det betyr at ved alle lengder på KS-ribbene skjer det en videre reduksjon i jordtrykket i det ubehandlede leiren til *statisk* jordtrykk sentralt i byggegropen.

### 6.2.2 Endret dybde

**Tabell 6.2.2:** Resultater fra Plaxis 2D-simuleringer med endret KS-dybde.

| Lengde | Dybde | $\Sigma M_{sf}$<br>(Fase 4) | $M_{max}$ [kNm/m]<br>Spuntvegg<br>(Fase 9) | $u_{x,max}$ [m]<br>Spuntvegg<br>(Fase 9) | $\bar{\sigma}_{xx}$ [kPa]<br>Ubehandlet leire<br>(x=15.1 m) (Fase 9) |
|--------|-------|-----------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 15     | 12.5  | 1.524                       | 360.5                                      | 0.196                                    | 130.6                                                                |
| 15     | 15    | 1.563                       | 352.7                                      | 0.193                                    | 130.5                                                                |
| 15     | 17.5  | 1.607                       | 343.9                                      | 0.189                                    | 130.1                                                                |
| 15     | 20    | 1.652                       | 331.4                                      | 0.187                                    | 129.4                                                                |

Med grunnere KS-ribber observeres det også lavere sikkerhetsfaktorer som forventet. Videre kommer det også frem relativt tydelige tendenser for utviklingen av maksimal deformasjon og bøyningmoment i spuntveggen med dypere ribber. Den maksimale deformasjonen i spuntveggenes topp øker, men ikke betydelig. Grunnere KS-ribber fører også til større maksimalmoment i spuntveggen.

Målet på jordtrykktilstanden innenfor KS-ribbene viser seg å være interessant ved endret dybde på ribbene. Det observeres tilnærmet ingen variasjon i jordtrykket da  $\bar{\sigma}_{xx}$  kun reduseres fra 130.6 kPa ved 12.5 meter dyp KS-ribb, til 129.4 kPa ved 20 meter dyp KS-ribb.

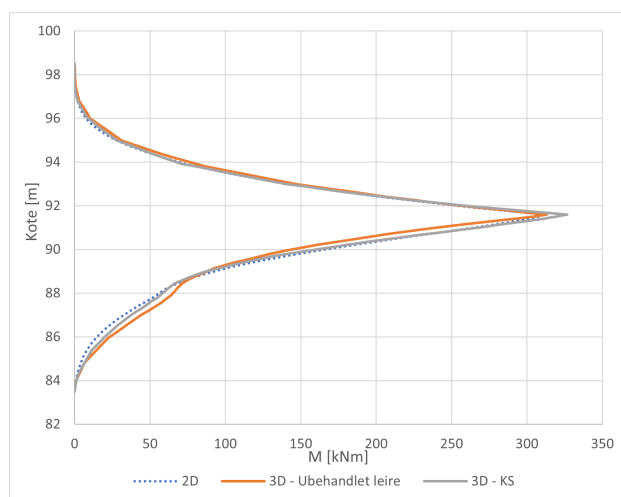
## 6.3 Sammenligning av 2D- og 3D-simulering

I seksjon 4.5 er den konvensjonelle metoden for å representere KS-ribber for plane 2D-simuleringer gjennomgått. Ved å vekte stivheten og skjærstyrken av KS-ribbene og den ubehandlede jorden sparer bransjen mye tid på å gjennomføre enklere simuleringer i Plaxis 2D for dimensjonering av KS-stabiliserte byggegrop. For å gi en indikasjon på hvor godt det stabiliserte volumet fungerer gjennom vektet materialparametre i 2D-simuleringer, blir kritiske output-resultater fra simuleringen av byggegropen med 28% KS-volum i Plaxis 2D og 3D sammenlignet med hverandre i dette kapitlet.

I seksjon 5.3 ble resultatene fra 3D-simuleringen sammenlignet med instrumenteringen. Sammenligningen viste veldig god korrelasjon mellom 3D og målinger fra instrumenteringen i den siste fasen. Det er denne fasen som blir hovedfokuset i sammenligningen av 2D og 3D også, da de største og mest kritiske deformasjonene skjer i denne fasen. Siden 3D-simuleringene ble påvist å være veldig gode estimater på målte verdier fra instrumenteringen, vil 2D-simuleringene hovedsaklig bli sammenlignet direkte med 3D-simuleringene i dette kapitlet.

### 6.3.1 Sammenligning av moment i spuntvegg

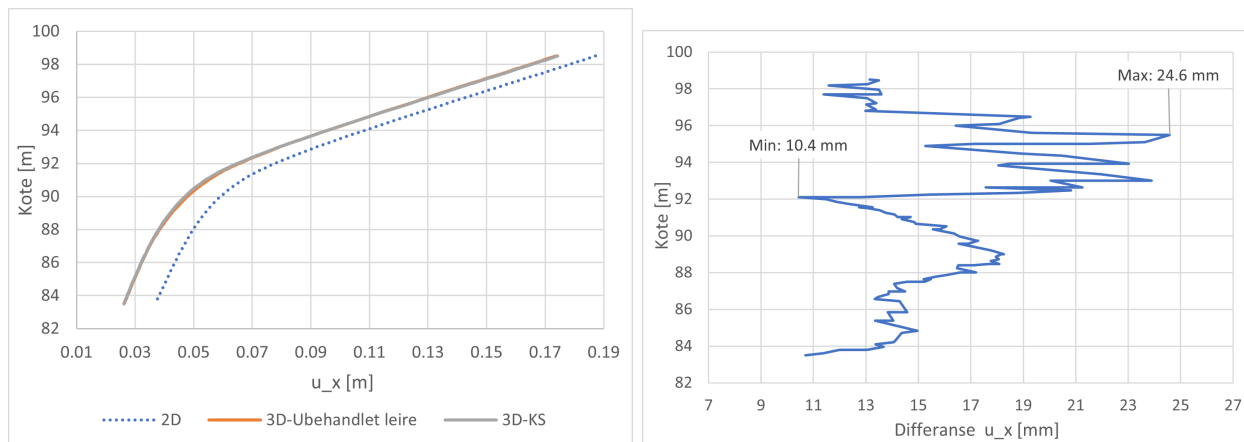
Da den eneste forskjellen mellom modellene i 2D og 3D ligger i hvordan det KS-stabiliserte volumet er representert i passiv sone, er det ikke forventet noe betydelig forskjell i momentdiagrammene fra spuntveggen. Dette illustreres tydelig og godt i Figur 6.3.1. Forskjellen mellom det momentet i spuntveggen som ligger i kontakt med KS-materialet avviker også lite fra momentet i spuntveggen som ligger i kontakt med ubehandlet leire.



**Figur 6.3.1:** Moment i spuntvegg fra Plaxis 2D og 3D.

### 6.3.2 Deformasjon av spuntvegg

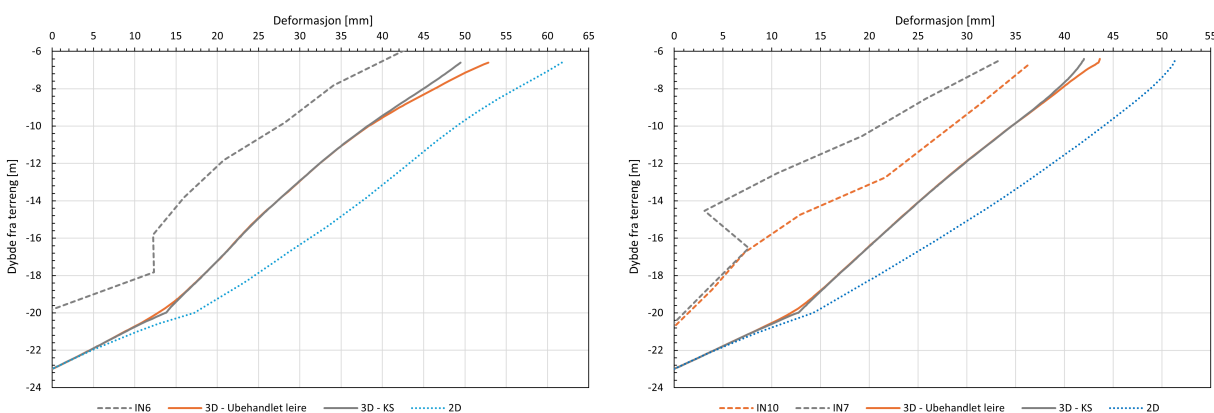
Som illustrert i Figur 6.3.2, overestimerer 2D-simuleringen de totale deformasjonene av spuntveggen etter fase 9. Overestimeringen ligger mellom 10,4 mm og 24,6 mm, og kommer trolig av at vektet stivhet i KS-volumet fra 2D-simuleringen ligger under dens reelle stivhet.



**Figur 6.3.2:** Deformasjonsplot fra Plaxis 2D og 3D.

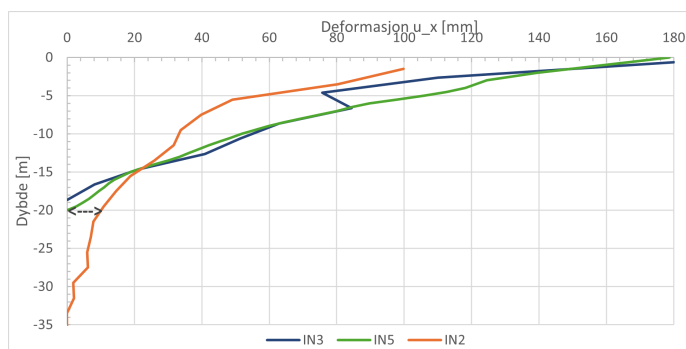
### 6.3.3 Deformasjonsmålinger i passiv sone

Overestimeringen av deformasjonene fra 2D-simuleringene kommer også frem i Figur 6.3.3. I plottene er også deformasjonsmålingene fra inklinometerene inkludert, da målingene ikke ble presentert i seksjon 5.3. Målingen viser at både 3D og 2D simuleringene overestimerer deformasjonene betraktelig i den passive sonen. Overordnet overestimerer 3D-simuleringen deformasjonen med ca 10 mm og 2D-simuleringene med ca 20 mm.



**Figur 6.3.3:** Deformasjon i passiv sone etter fase 9 ved  $x = 1.5$  m og  $x = 5$  m.

Leser bes gjøres oppmerksom på at inklinometerene ikke er perfekte målinger av deformasjonene i grunnen da inklinometermålinger forutsetter at bunnen av målehuset ligger fast. Grunnen til dette er at inklinometerene måler vinkler mellom koblingene til hver “målenode”. Da målenoden i bunn kun har én kobling, blir det uansett registrert null deformasjoner i bunn av inklinometerene. For å gi et grovt estimat av denne korrigeringen, er IN2 sammenlignet med IN3 og IN5 i Figur 6.3.4. IN2 er også installert inntil spuntveggen som IN3 og IN5, men dypere. Da IN2 er plassert et helt annet sted i byggegropen, skal sammenligningen tas med en klype salt, men visualiseringen gir fortsatt en god indikasjon på størrelsesordenen av den ukjente bunnkorrigeringen.

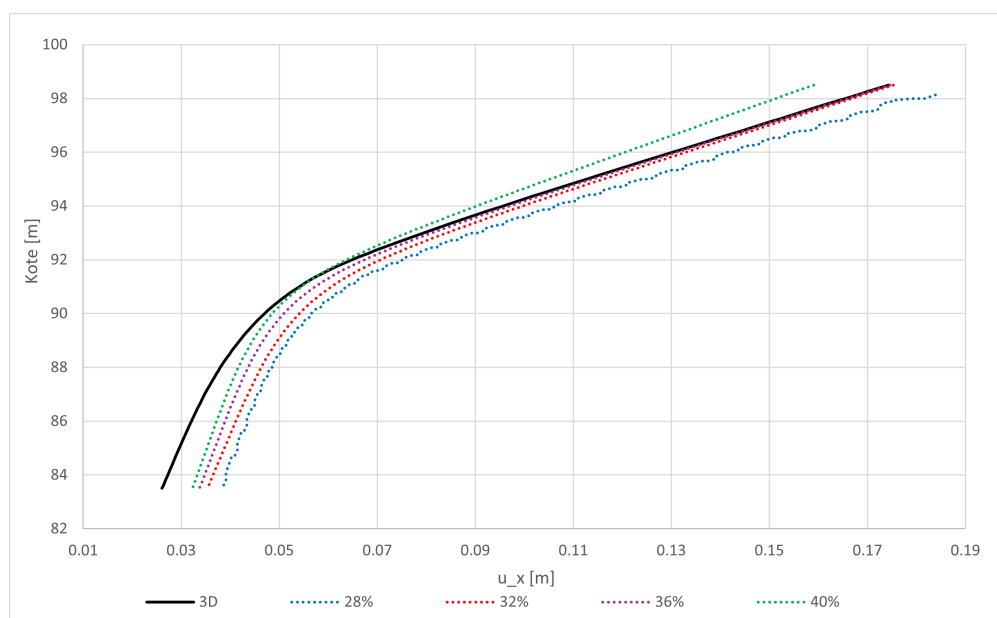


**Figur 6.3.4:** IN3, IN5 og IN2 i fase 9.

Fra Figur 6.3.4 kan det anslås en bunnkorrigering på omlag 10 mm på inklinometerene i det instrumentert profilet. Med denne bunnkorrigeringen, kan de reelle verdiene fra inklinometermålingene skaleres med omlag 10 mm i nedre del av kurven. Denne korrigeringen underbygger nøyaktigheten av målingene fra 3D-simuleringene.

## 6.4 2D-simuleringer med justert stivhet i KS-materialet

Deformasjonen av spuntveggen er et godt mål på hvor nøyaktig stivheten av den stabiliserte sonen er, da den representerer kumulert deformasjon av hele den passive sonen. I Figur 6.4.1 er spuntveggenes horisontaldeformasjon fra CU-ekvivalent 3D-simulering sammenlignet med 2D-simuleringene med justerte stivheter for den stabiliserte sonen. Stivhetsøkningen er gjort ved å øke dekningsgraden  $a$  i den konvensjonelle metoden for utregning av stivhet og skjærstyrke i KS-stabilisert sone med doble ribber. Med den økte stivheten endres rotasjonsforløpet til spuntveggen også, men resultatene viser at vi først med  $a = 40\%$  KS som inputparameter treffer nogenlunde realistisk stivhet av stabilisert sone, og dermed deformasjons av spuntveggen, sammenlignet med 3D-simuleringen.



**Figur 6.4.1:** Deformasjon av spuntvegg: 3D-simulering vs. 2D med variert dekningsgrad med konvensjonell metode.

# Kapittel 7

## Diskusjon

I dette kapittelet blir funnene i den innledende analysen (kapittel 5) og hovedanalysen (kapittel 6) diskutert. Validitet av simuleringene blir gjennomgått og vurdering av sentrale resultater blir gjort rede for.

### 7.1 Validitet

Det er vist gjennomgående god korrelasjon mellom resultatene fra Plaxis 3D-simuleringene og de instrumenterte målingene. Spesielt i fase 9, som er avgjørende for vurderingen av spuntveggs momentkapasitet, er det et sterkt samsvar mellom målingene fra fiberoptikken og Plaxis-simuleringene, både i form og størrelsesorden. Dette samsvaret understreker nøyaktigheten av 3D-modellene i å representere de faktiske forholdene i byggegroppen.

Selv om 3D-simuleringene i stor grad viser høy validitet, er det påpekt at bruken av et finere mesh kunne ha økt nøyaktigheten ytterligere. Under kalibreringen ble det valgt å benytte grovt mesh (med finere elementnett lokalt), som ikke fullstendig oppnådde konvergens ved mesh-kalibreringen, for å redusere beregningstidene. Dette kan ha påvirket simuleringenes validitet. Et finere mesh ville ha redusert usikkerheten og potensielt gitt enda mer presise resultater. Den gode korrelasjonen med de instrumenterte målingene gir likevel solid grunnlag for å stole på 3D-modellenes presisjon, og anvendelighet i fremtidige prosjekter.

Videre er det nødvendig å være observant på validiteten til materialparametrene. Feiltolket materialparametre resulterer i dårlige resultater. Tolkningen av materialeparametrene til den ubehandlede leiren på CU blir ansett å være serdeles god, da det er gjennomført såpass omfattende grunnundersøkelser (seksjon 2.2) og NGI har gjennomført grundige sidemannskontroller av tolkningen. Det er forbundet noe mer usikkerhet til materialparametrene til KS-leiren. Da dimensjonerende skjærstyrke er satt med et tak definert i henhold til V221

(Statens Vegvesen, 2014) og skjærstyrken i KS-leiren etter herding oppnår mye høyere fasthet, er det stor forskjell på reell og dimensjonert fasthet. Det er imidlertid bevist at kritisk skjærsirkel uansett går mellom KS-materialet og berget i både 2D og 3D-simuleringene (Figur .2.6 og Figur .2.7), så denne forskjellen har i realiteten liten påvirkningen på validiteten.

For stivheten til KS-leiren er det en litt annen sak. Det er generelt sett vanskelig å sette stivhetsmål på KS-materialet. Det kommer frem i NGI sin rapport som oppsummerer enaksial trykkforsøk av KS-leire fra Klett (NGI, 2017). Figur .2.4 viser at det er stor varians av oppnådd stivhet for KS-leire ved samme innblandingsforhold. I tillegg viser forskning fra Chalmers (Wong mfl., 2024) at styrken og stivheten til KS-leire er svært heterogen, med betydelig romlig variabilitet både i felt- og laboratorieundersøkelser, som gjør det utfordrende å nøyaktig karakterisere KS-leirens stivhet. Dette gir en indikasjon på at stivhetsmodulen benyttet i simuleringene av CU (75 000 kPa) ikke nødvendigvis representerer den reelle stivheten i all KS-materialet på CU, som igjen svekker validiteten til simuleringene.

## 7.2 Lastfordeling i stabilisert volum

Analysen av de vertikale tverrsnittene parallelt med spuntveggen fra Plaxis 3D-simuleringen viser at normalspenningene og deviatorisk spenning fordeles relativt uniformt fra dybde på 3 meter under betongplaten, både i stabilisert og ubehandlet volum. Ved de tre første meterne under betongplaten er KS-ribbene preget av en sidefriksjon fra den ubehandlede leiren. Sidefriksjonen kommer av at det er store deformasjoner i det øverste laget i den stabiliserte sonen under betongplaten. Dette medfører at den ubehandlede leiren med lavere stivhet tøyes mer og “drar” i overgangen til KS-ribbene. Ellers i den stabiliserte sonen skjer lastoverføringen fra den aktive sonen mer direkte i KS-ribbene.

Med en lavere dekningsgrad er det mindre volum av høyere stivhet til å ta opp kreftene innenfor spuntveggen i den passive sonen. Dette resulterer i større spenninger i ribbene for simuleringene med lav dekningsgrad, illustrert i Figur 6.1.5. For samtlige dekningsgrader observeres det at forskjellen i lastopptaket mellom KS-ribbene og den ubehandlede leiren er størst over koten til spuntveggenes bunn. At horisontalspenningskurvene fra den ubehandlede leiren og KS-ribbene treffes akkurat i dette punktet (som vist i Figur 6.1.4) er tilfeldig, men det tilsier at KS-ribben dominerer lastopptaket kun i den øverste delen av KS-ribbene. Fra denne koten og ned til KS-pelens bunn er lastopptaket fordelt helt jevnt mellom KS-ribbene og den ubehandlede leiren. Grunnen til dette er at stivheten til den ubehandlede leiren øker med dybden, og at den her er stiv nok til å ta like stort lastopptak som KS-ribbene.

I underseksjon 6.1.5 blir det observert at maksimalt lastopptak i det ubehandlede jordvolumet skjer i ved 30% dekningsgrad av KS. Da det kun er gjennomført simuleringer med 7 forskjellige dekningsgrader, og målene fra den ubehandlede leiren ikke har perfekt konsistens (presentert i underseksjon 6.1.3), er det grunn til å være kritisk til observasjonen. Likevel er det dokumentert strengt voksende spenningstilstand i den ubehandlede leiren for simuleringene med lavere dekningsgrad enn 30% og strengt synkende spenningstilstand for simuleringene med høyere dekningsgrad. Dette støtter opp hypotesen om at den ubehandlede leiren faktisk har noe større lastopptak ved 30% dekningsgrad.

Det er mangel på teoretisk grunnlag til å beskrive årsaken til observasjonen, men sidefriksjonen på KS-ribbene kan være en årsak. Ved 30% dekningsgrad er det sannsynlig at den ubehandlede leiren oppnår best heft med KS-ribbene og dermed tar opp mer av lastene.

### 7.3 2D simuleringer

Ved endret dybde og lengde på KS-ribbene gjennomført i *Simuleringspakke 2* kom det tydelig frem at det er KS-ribbenes lengde som er avgjørende for hvor godt lastopptaket er i passiv sone. Med det menes KS-ribbenes evne til å redusere spenningstilstanden i passiv sone langs x-aksen. Det ble observert en tilnærmet konstant spenningstilstand i leiren innenfor ribbene ved simuleringer kjørt med endret ribb-dybde, mens en jevn reduksjon av spenningsnivået innenfor ribbene ble observert med forlengelse av ribbene.

Simuleringspakke 2 viser også at det ved mindre KS-materiale, ved både grunnere og kortere ribber, oppstår større maksimalmoment i spuntveggen. Når det er mindre stabilisert materiale i passiv sone tar arbeidsplaten opp større krefter. Dette resulterer i en større punktlast på spuntveggen og bøyningmomentet øker.

### 7.4 Vurdering av vektet 2D-parametre

Statens Vegvesens formel for vektet materialparametre for KS-stabilisert volum (Statens Vegvesen, 2014) har vist seg å underestimere stivheten i det stabiliserte volumet i 2D-beregningen fra CU. Dette fører til at deformasjonene i 2D-beregningen blir større enn beregnet i 3D-beregningene, som tidligere vist i seksjon 6.3 og i seksjon 6.4.

Selv om en konservativ tilnærming til stivhet, som den nåværende formelen representerer, kan være fordelaktig med hensyn til sikkerhetsmarginer, har den også sine ulemper. Beregningsmåten kan lede til overdimensjonering av byggegropen gjennom unødvendig bruk av kalksement. I lys av dette er det rom for videreutvikling og forbedring av eksisterende beregningsmetoder. I bransjen benyttes oftest 2D-modeller til dimensjonering av KS-stabiliserte byggegropen på grunn av deres mindre komplekse og tidkrevende natur sammenlignet med 3D-simuleringer. Funnene i oppgaven viser at man kan redusere KS-forbruket ved å benytte 3D-simuleringer, men den omfattende tiden og ressursene som kreves for å konstruere og beregne slike modeller gjør det utfordrende å implementere dette bredt.

Derfor vil en oppdatering av den konvensjonelle formelen som brukes til dimensjonering av KS-stabiliserte volum i 2D-modeller være svært gunstig for bransjen. En mer nøyaktig formel vil ikke bare forbedre nøyaktigheten i beregningene, men også bidra til mer bærekraftige byggemetoder ved å redusere unødvendig bruk av miljøbelastende materialer.

## 7.5 Mulige miljøbesparelser

Det er viktig å bemerke seg at stabilisering med kalksement er en miljøbelastende metode på grunn av de høye  $CO_2$ -utslippene knyttet til produksjonen og transporten. Derfor er det ønskelig å minimere bruken av KS-materialer der det er mulig, for å redusere miljøpåkjenningene. For dimensjonering av mengde KS-materiale til KS-stabiliserte byggegropen er det i denne oppgaven bevist at man gjennom simuleringer med Plaxis 3D, fremfor Plaxis 2D, vil kunne klare seg med mindre kalksement for å oppnå nødvendig sikkerhetskrav til byggegropens stabilitet og deformasjoner. Den CU-ekvivalente simuleringen i Plaxis 3D som har vist god validitet opp mot instrumenterte verdier, oppnådde en sikkerhetsfaktor på  $\Sigma M_{sf} = 1,811$ . Det er betydelig mer enn simuleringen i 2D med  $\Sigma M_{sf} = 1,652$ . Dermed kan det konkluderes med at Plaxis 2D-simuleringene er litt i overkant konservative og medfører større miljøbelastninger enn nødvendig.

# Kapittel 8

## Konklusjon

Denne masteroppgaven har hatt som mål å undersøke lastopptaket i behandlet og ubehandlet leire til en byggegrop stabilisert med kalksement, med spesielt fokus på 3D-simuleringer utført i Plaxis. Gjennom grundige simuleringer og sammenligninger med målinger fra instrumenteringen har det blitt dannet en dypere innsikt i hvordan KS-stabiliserte ribber oppfører seg under belastning ved utgraving av byggegropen.

Fra 3D-simuleringene med forskjellig dekningsgrader ble det konkludert med at KS-ribbene dominerer lastopptaket i passiv sone, men kun i de øverste meterene under traubunn. Nedover i grunnen er lastfordelingen tilnærmet lik mellom den behandlede og ubehandlede leiren, da den ubehandlede leirens stivhet øker tilstrekkelig med dybden. For CU-ekvivalent modell ble det avdekket en sunn utnyttelse av skjærstyrken til KS-ribbene. Med 60% mobilisert skjærstyrke i KS-ribbene tvinges kritisk skjærsirkel mellom KS-ribbene og berget.

Funnene indikerer at 3D-simuleringene gir en mer nøyaktig representasjon av virkeligheten sammenlignet med 2D-simuleringer. Dette skyldes blant annet evnen til å fange opp komplekse 3D-effekter og lastfordelingsmønstre som ikke er mulig å modellere i 2D. 2D-simuleringene viser å være effektive, men gjeldende praksis for dimensjonering av KS-stabiliserte byggegropen er i overkant konservativ. Den konvensjonelle metoden for 2D-simuleringene representerer den stabiliserte sonen med svakere stivhet enn virkelighet, som resulterer i overestimering av deformasjonene i byggegropen. 2D-simulering blir imidlertid ansett som en trygg dimensjoneringmetode, men det blir vist at denne fremgangsmåten setter begrensninger for mulige materialbesparelser.

## 8.1 Videre arbeid

En betydelig begrensning i denne studien er simuleringstiden forbundet med 3D-modellene, som førte til bruk av et relativt grovt mesh. Dette har begrenset detaljnivået i simuleringene og kan ha påvirket nøyaktigheten av resultatene. For fremtidig arbeid anbefales det å kjøre simuleringer med mesh som når fullstendig konvergens under mesh-kalibrering. Videre bør KS-ribbene modelleres med mer korrekt geometri, da det i denne oppgaven er gjort større forenklinger. Dette vil forbedre modellens nøyaktighet og gi en mer detaljert forståelse av hvordan kreftene fordeles i KS-ribbene og den omkringliggende jorden.

En annen begrensning i denne studien var antagelsen om udrenert tilstand uten hensyn til poretrykksvariasjoner. For å adressere dette, bør fremtidige simuleringer inkludere *fully coupled flow-deformation* som tar hensyn til vannstrømningen i leiren. Dette vil gi en mer realistisk representasjon av jordens oppførsel under belastning og forbedre nøyaktigheten av resultatene.

I etterkant av simuleringene gjennomført i dette studiet kom det frem interessante resultater for stivheten til KS-volumet i 2D-simuleringer, men det bør undersøkes nærmere hvor godt vektet skjærstyrken til stabilisert volum er representert gjennom den konvensjonelle metoden definert i V221 (Statens Vegvesen, 2014). Da det ble funnet at kritisk skjærflate i samtlige modeller av CU-byggegroppen går utelukkende i ubehandlet leire (mellom berg og KS-ribbene under stabilisert sone), er det ikke grunnlag til å bedømme hvor godt den konvensjonelle metoden representerer reell skjærstyrke. Dermed anbefales det å kjøre simuleringer med dypere KS-ribber som garanterer at kritisk skjærflate går i KS-leire, for videre forskning.

Den videre forskningen på den konvensjonelle metoden for å representere skjærstyrke og stivhet til KS-stabiliserte volum med KS-ribber bør gjennomføres med nøyaktige 3D-modeller parallelt med forskningsfelt i forskjellige grunnforhold. Gjennom en slik forskningsmetode kan SVV forbedre den eksisterende metoden ved å etablere mer presise retningslinjer for prosjektering av KS-stabiliserte byggegroper med KS-ribber. Det vil potensielt spare bransjen og miljøet for unødvendig bruk av KS-stabilisering.

# Referanser

- Bane NOR (28.02.2020). *Jakter på miljøgevinster ved grunnstabilisering* / Bane NOR. URL: <https://www.banenor.no/nyheter-og-aktuelt/nyheter/2020/klimagrunn-utlysning/> (sjekket 20.03.2024).
- Bentley (18.12.2019). *Scripting reference and how to use it - GeoStudio* / PLAXIS Wiki - GeoStudio / PLAXIS - Bentley Communities. URL: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/45447/scripting-reference-and-how-to-use-it> (sjekket 12.04.2024).
- (05.03.2020). *API / Python scripting - PLAXIS - GeoStudio* / PLAXIS Wiki - GeoStudio / PLAXIS - Bentley Communities. URL: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/45393/api-python-scripting---plaxis> (sjekket 12.04.2024).
- (10.03.2023). *Solver type in PLAXIS 3D - GeoStudio* / PLAXIS Forum - GeoStudio / PLAXIS - Bentley Communities. URL: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/f/forum/242750/solver-type-in-plaxis-3d> (sjekket 06.03.2024).
- Bozkurt, Sinem, Ayman Abed og Minna Karstunen (05.05.2023). “Finite element analysis for a deep excavation in soft clay supported by lime-cement columns”. I: *Computers and Geotechnics*, s. 19. URL: [https://www.sciencedirect.com/b/s/science/article/pii/S0266352X23004445?brr=88e015f98c3056bd&ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=88e015f93eba7131](https://www.sciencedirect.com/b/s/science/article/pii/S0266352X23004445?brr=88e015f98c3056bd&ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=88e015f93eba7131) (sjekket 03.06.2024).
- Brinkgreve, Ronald (06.01.2020). *PLAXIS 3D-Reference Manual*. URL: [https://communities.bentley.com/cfs-file/\\_key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-05-58/PLAXIS3DCE\\_2D00\\_V20.03\\_2D00\\_2\\_2D00\\_Reference.pdf](https://communities.bentley.com/cfs-file/_key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-05-58/PLAXIS3DCE_2D00_V20.03_2D00_2_2D00_Reference.pdf) (sjekket 23.04.2024).
- (29.12.2023). *Material Models Manual 3D*. URL: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/46137/manuals---plaxis> (sjekket 23.04.2024).
- Duncan, James M. og Chin-Yung Chang (01.09.1970). “Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils”. I: *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JSFEAQ.0001458> (sjekket 09.11.2023).
- Grimstad, Gustav (2023). “NGI-ADP Model”. Forelesningsnotater om NGI-ADP.

- Grimstad, Gustav, Lars Andresen og Hans P. Jostad (2012). “NGI-ADP: Anisotropic shear strength model for clay”. I: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/nag.1016>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nag.1016> (sjekket 14.11.2023).
- Ignat, Razvan, Sadek Baker, Minna Karstunen, Sven Liedberg og Stefan Larsson (01.02.2020). “Numerical analyses of an experimental excavation supported by panels of lime-cement columns”. I: *Computers and Geotechnics*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266352X1930360X> (sjekket 17.04.2024).
- Ignat, Razvan, Sadek Baker, Sven Liedberg og Stefan Larsson (10.2016). “Behavior of braced excavation supported by panels of deep mixing columns”. I: *Canadian Geotechnical Journal*. Publisher: NRC Research Press. URL: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/cgj-2016-0137> (sjekket 01.05.2024).
- Larsson, Stefan, Richard Malm, Benjamin Charbit og Anders Ansell (01.06.2012). “Finite element modelling of laterally loaded lime–cement columns using a damage plasticity model”. I: *Computers and Geotechnics*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266352X12000456> (sjekket 01.05.2024).
- Moseley, Michael P. og Klaus Kirsch (03.02.2004). *Ground Improvement, Second Edition*. CRC Press. 440 s. (Sjekket 15.09.2023).
- NGI (22.12.2017). *Egenskaper av kalksementstabilisert leire*. Sluttrapport. NGI. (Sjekket 28.05.2024).
- (12.12.2023a). *CURIOUS - Campus Ullevål: Research and Instrumentation Of Underground Structures*. Prosjekthåndbok 20230200-01-R. NGI. (Sjekket 12.04.2024).
- (03.02.2023b). *Geoteknisk prosjektering av peler*. Teknisk notat 20220608-03-TN. NGI. (Sjekket 18.04.2024).
- (01.01.2023c). *NGI - Om Campus Ullevål*. NGI. URL: <https://www.ngi.no/om-ngi/campus-ullevål/om-campus-ullevål/> (sjekket 06.02.2024).
- (20.02.2023d). *Prosjektering av spunt og byggegrop*. Teknisk notat 20220608-05-TN. NGI. (Sjekket 18.04.2024).
- (27.02.2023e). *Tolkningsrapport*. Teknisk notat 20220608-02-TN. NGI. (Sjekket 18.04.2024).
- Nordal, Steinar (2020). “Geotechnical Engineering Advanced Course”. Kurskompendium.
- NVE (2013). *Skånsomme installasjonsmetoder for kalksementpeler og bruk av slurry*. Rapport. URL: <https://nve.brage.unit.no/nve-xmlui/handle/11250/2497299> (sjekket 01.11.2023).
- Sloot, Micha van der (23.12.2019). *Iterative settings: Influence of Arc length control - GeoStudio / PLAXIS Wiki - GeoStudio / PLAXIS - Bentley Communities*. URL: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/45924/iterative-settings-influence-of-arc-length-control> (sjekket 06.03.2024).

- Statens Vegvesen (2014). *Håndbok V221: Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger*.
- Wong, Dawn Yun-Cheng, Vijayshree Sadasivan, Jonatan Isaksson, Anders Karlsson og Jelke Dijkstra (23.02.2024). “Trans-scale spatial variability of lime-cement mixed columns”. I: *Construction and Building Materials*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182400535X> (sjekket 03.06.2024).

# Vedlegg

## .1 Resterende materialparametre

**Tabell .1.1:** Materialparametrene til arbeidsplaten.

| Symbol                  | Enhet             | <b>Betong</b>      |
|-------------------------|-------------------|--------------------|
| Material type           | -                 | Linear Elastic     |
| Drainage                | -                 | Non-porous         |
| $\gamma_{\text{unsat}}$ | kN/m <sup>3</sup> | 25                 |
| $E_{\text{ref}}$        | kN/m <sup>2</sup> | $30 \cdot 10^6$    |
| $v_u$                   | -                 | 0.2                |
| $G_{\text{ref}}$        | kN/m <sup>2</sup> | $12.5 \cdot 10^6$  |
| $E_{\text{oed}}$        | kN/m <sup>2</sup> | $33.33 \cdot 10^6$ |
| $R_{\text{inter}}$      | -                 | 1.0                |

**Tabell .1.2:** Materialparametre til spuntveggen benyttet i 2D-beregningene.

| Symbol          | Enhet                | <b>AZ17-700</b>   |
|-----------------|----------------------|-------------------|
| w               | kN/m/m               | 1.02              |
| EA              | kN/m                 | $2.79 \cdot 10^6$ |
| EI              | kN/m <sup>2</sup> /m | $76.1 \cdot 10^3$ |
| v (Nu)          | -                    | 0                 |
| M <sub>pl</sub> | kNm/m                | 720               |
| V <sub>pl</sub> | kNm/m                | 4220              |

**Tabell .1.3:** Materialparametre til spuntveggen benyttet i 3D-beregningene.

| Symbol     | Enhet             | <b>AZ17-700</b>    |
|------------|-------------------|--------------------|
| $\gamma$   | kN/m <sup>3</sup> | 2.489              |
| $E_1$      | kN/m <sup>2</sup> | $12.32 \cdot 10^6$ |
| $E_2$      | kN/m <sup>2</sup> | $616.2 \cdot 10^3$ |
| $\nu_{12}$ | -                 | 0.000              |
| $d$        | m                 | 0.4200             |
| $G_{12}$   | kN/m <sup>2</sup> | $616.2 \cdot 10^3$ |
| $G_{13}$   | kN/m <sup>2</sup> | $1.108 \cdot 10^6$ |
| $G_{23}$   | kN/m <sup>2</sup> | $332.5 \cdot 10^3$ |

**Tabell .1.4:** Materialparametre til skråstivere i PLAXIS 2D.

| Symbol                  | Enhet | <b>Ø 323.9 x10</b> |
|-------------------------|-------|--------------------|
| Material type           | -     | Elastoplastic      |
| $L_{\text{spacing}}$    | m     | 6.0                |
| EA                      | kN    | $2.07 \cdot 10^6$  |
| $ F_{\text{max tens}} $ | kN    | 3500               |
| $ F_{\text{max comp}} $ | kN    | 1400               |

**Tabell .1.5:** Materialparametre til skråstivere i PLAXIS 3D.

| Symbol             | Enhet             | <b>Ø 323.9 x10</b> |
|--------------------|-------------------|--------------------|
| Material type      | -                 | Elastic            |
| $\gamma$           | kN/m <sup>3</sup> | 78.50              |
| Cross section type | -                 | Circular tube      |
| Diameter           | m                 | 0.3239             |
| Thickness          | m                 | 0.01               |
| E                  | kN/m <sup>2</sup> | $210.0 \cdot 10^6$ |

**Tabell .1.6:** Materialparametre til putebjelke i PLAXIS 3D.

| Symbol        | Enhet             | <b>HEB 340</b>         |
|---------------|-------------------|------------------------|
| Material type | -                 | Elastic                |
| $\gamma$      | kN/m <sup>3</sup> | 78.50                  |
| A             | m <sup>2</sup>    | 0.01709                |
| $I_2$         | m <sup>4</sup>    | $0.3666 \cdot 10^{-3}$ |
| $I_3$         | m <sup>4</sup>    | $0.3666 \cdot 10^{-3}$ |
| E             | kN/m <sup>2</sup> | $210.0 \cdot 10^6$     |

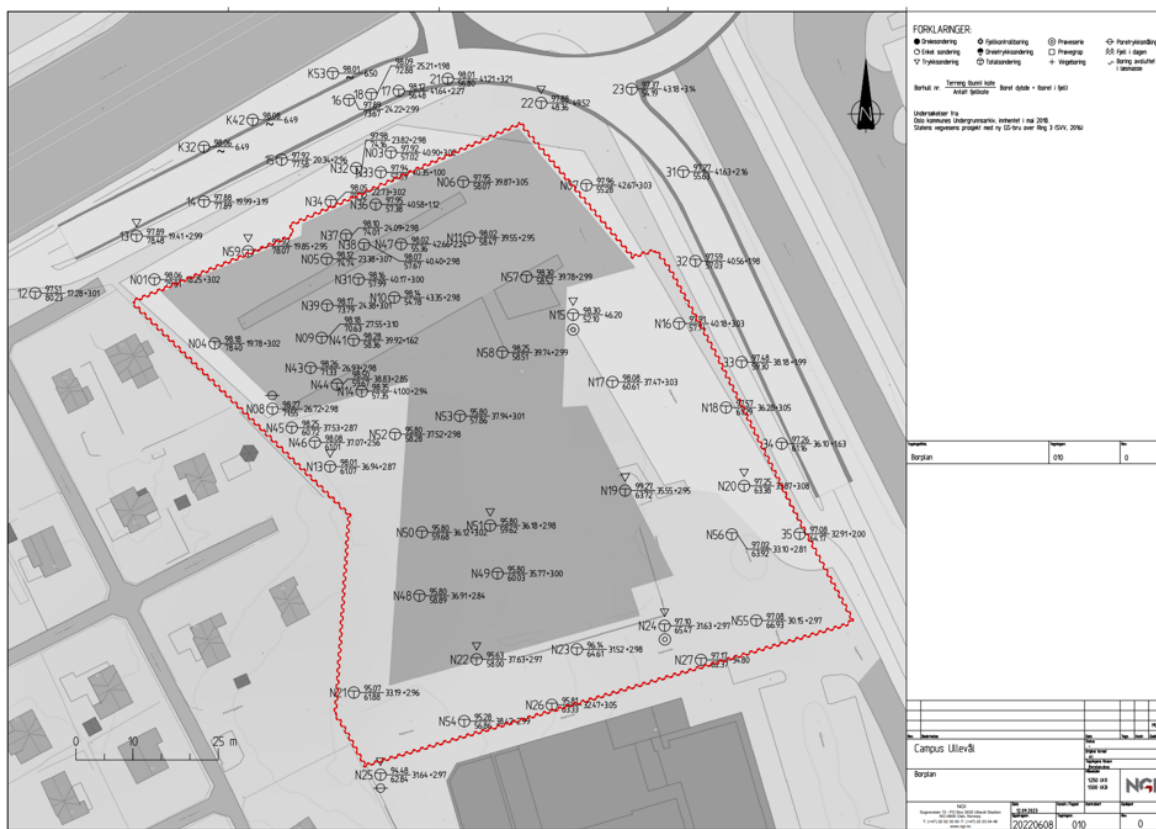
**Tabell .1.7:** Materialparametre for interface til leire 1, 2 og 3.

| Parameter                       | Interface - Leire 1 og 2 | Interface - Leire 3 | Enhet                |
|---------------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|
| Soil model                      | Mohr-coulomb             | Mohr-coulomb        | -                    |
| Drainage                        | Undrained C              | Undrained C         | -                    |
| $\gamma_{unsat} = \gamma_{sat}$ | -                        | -                   | kN/m <sup>3</sup>    |
| $E_{u,ref}$                     | 14 000                   | 14 000              | kN/m <sup>2</sup>    |
| $\nu_u$                         | 0.499                    | 0.499               | -                    |
| $s_{u,ref}$                     | 42                       | 42                  | kN/m <sup>2</sup>    |
| $z_{ref}$                       | 0                        | 87                  | m                    |
| $s_{u,inc}$                     | 0                        | 2.5                 | kN/m <sup>2</sup> /m |
| Tension cut-off                 | Benyttet                 | Benyttet            | -                    |
| Tensile strength                | 0                        | 0                   | kN/m <sup>2</sup>    |
| $R_{int}$                       | 0.5                      | 0.5                 | -                    |

**Tabell .1.8:** Materialparametre for betong-interface.

| Parameter                       | Interface - Betong | Enhet             |
|---------------------------------|--------------------|-------------------|
| Soil model                      | Mohr-Coulomb       | -                 |
| Drainage                        | Non-porous         | -                 |
| $\gamma_{sat} = \gamma_{unsat}$ | -                  | kN/m <sup>3</sup> |
| $E_{ref}$                       | $28 \cdot 10^6$    | kN/m <sup>2</sup> |
| $\nu$ (nu)                      | 0.2                | -                 |
| $c_{ref}$                       | 100                | kN/m <sup>2</sup> |
| $\phi$                          | 35                 | °                 |
| $\psi$                          | 0                  | °                 |
| Tension cut-off                 | Benyttet           | -                 |
| Tensile strength                | 100                | kN/m <sup>2</sup> |
| $R_{int}$                       | 1                  | -                 |

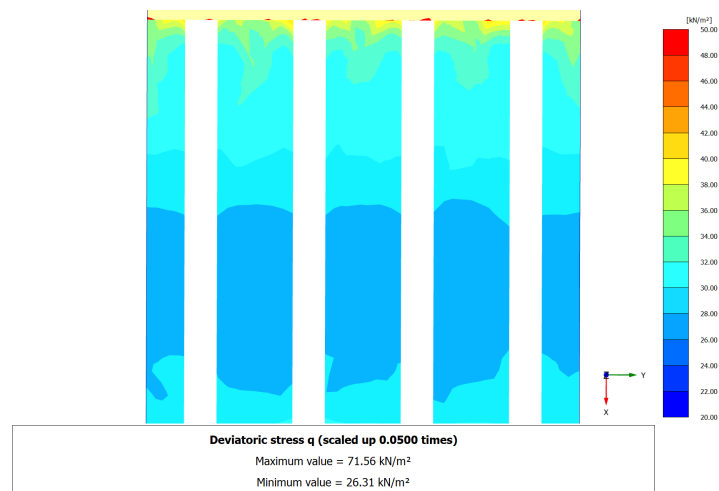
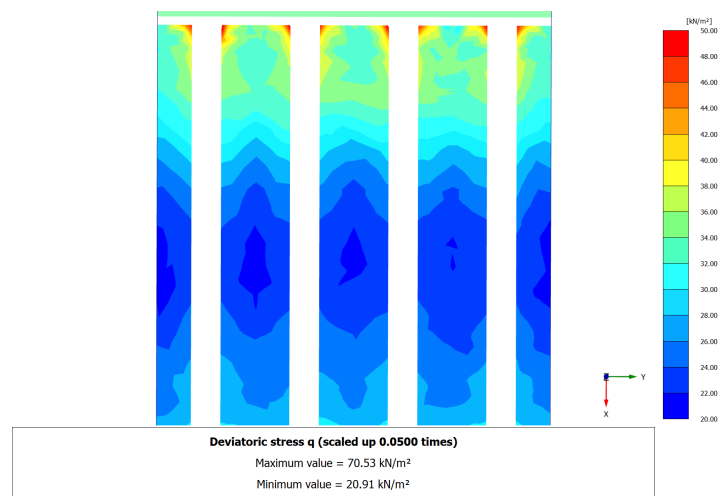
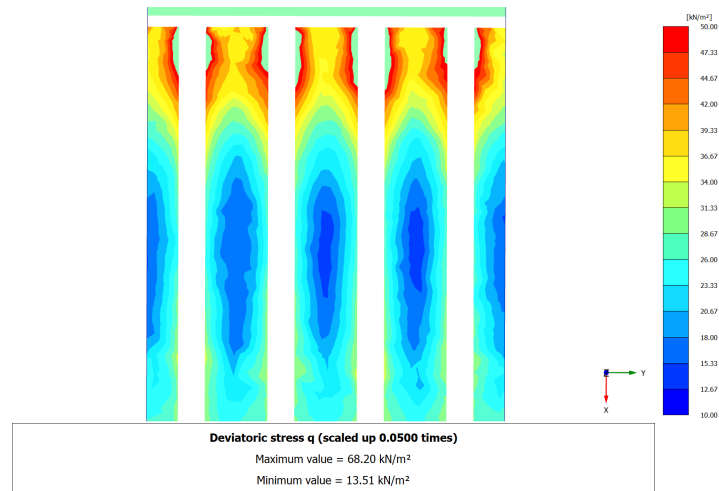
## .2 Tilleggsfigurer



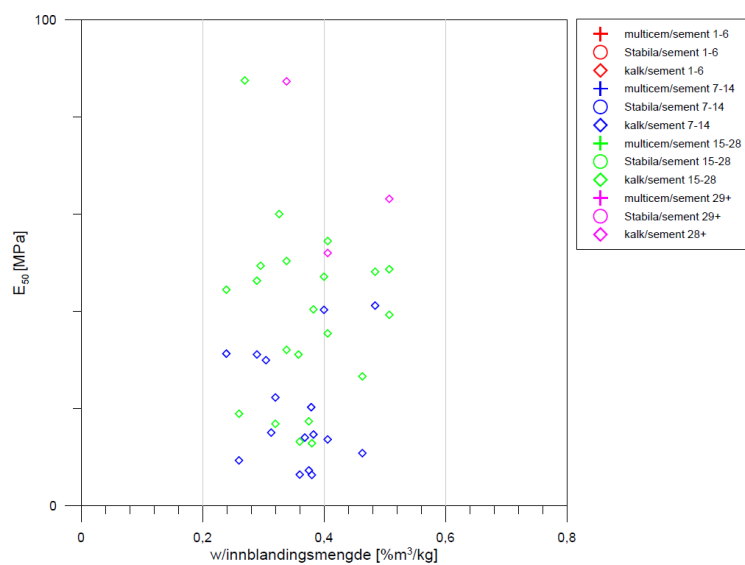
Figur .2.1: Endelig borplan, Campus Ullevål.



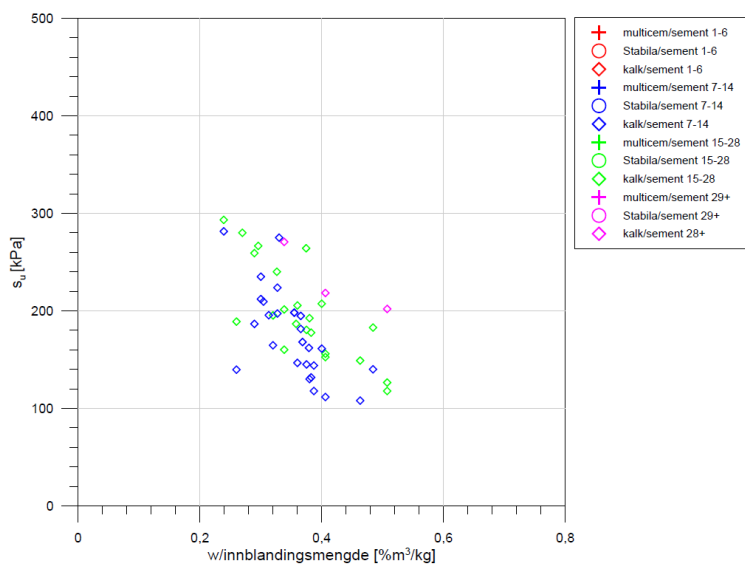
Figur .2.2: Soneinndeling av bermdimensjoner og putehøyde, (NGI, 2023d).



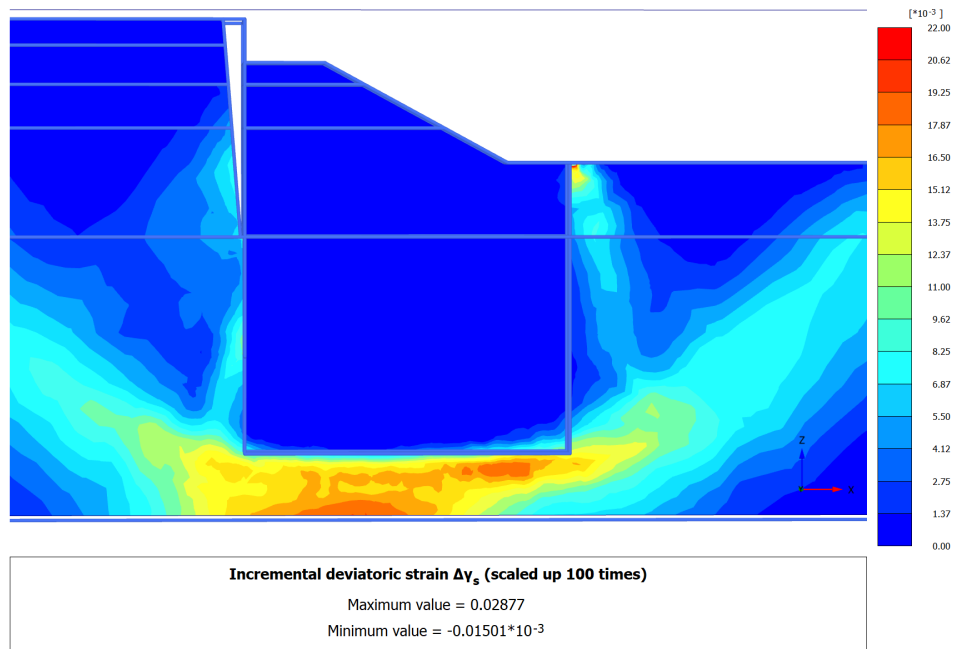
**Figur .2.3:** Deviatorisk spenning i ubehandlet leire fra hhv. kote 90.6, 88,9 og 87,3.



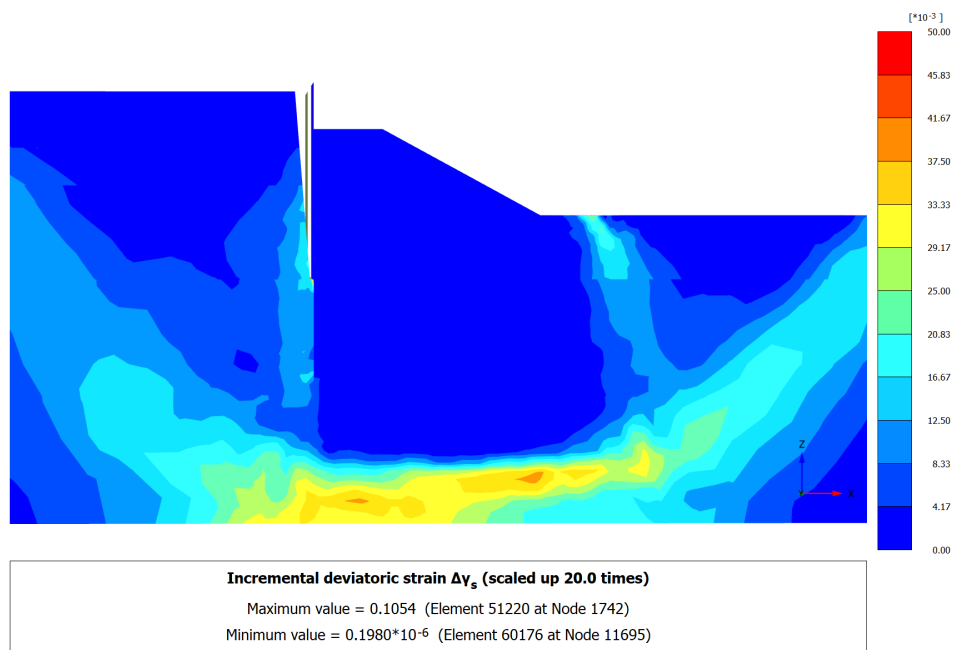
**Figur .2.4:** Målte stivhetsmoduler fra enaksiale trykkforsøk av KS-materialer fra Klett (NGI, 2017).



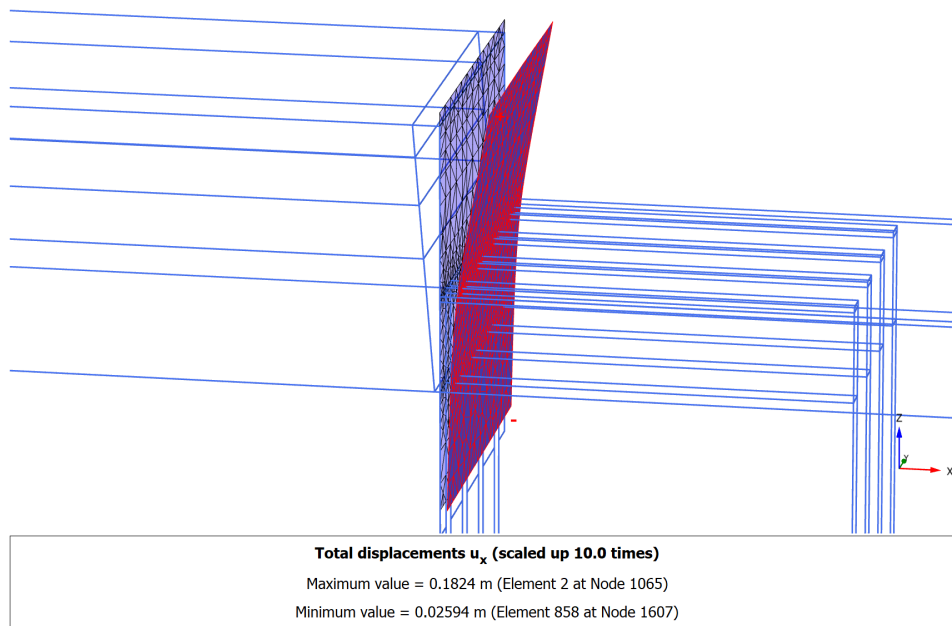
**Figur .2.5:** Målte skjærstyrker fra enaksiale trykkforsøk av KS-materialer fra Klett (NGI, 2017).



**Figur .2.6:** Bruddsirkel fase 4, Plaxis 2D ( $\alpha = 28\%$ ).



**Figur .2.7:** Bruddsirkel fase 4, Plaxis 3D ( $\alpha = 28\%$ ).



Figur .2.8: Deformasjon av spuntvegg i fase 9 ( $\alpha = 28\%$ ).

### .3 Skript til simuleringspakke 1

```

1 from plxscripting.easy import *
2 def run_simulation(config):
3     FILE_PATH = r'filsti\til\PLAXIS-filen'
4     PORT_i = 10001 #Port-nummer for PLAXIS Input
5     PORT_o = 10000 #Port-nummer for PLAXIS Output
6     PASSWORD = '!#zCWRNnxGGaeWwR' #Passord for PLAXIS remote scripting
7         server
8     #Skripting servere (til VSC)
9     #s_i, g_i = new_server('localhost', PORT_i, password=PASSWORD)
10    #s_o, g_o = new_server('localhost', PORT_o, password=PASSWORD)
11
12    # Initiering av ny PLAXIS 3D-modell
13    s_i.new()
14
15    #Mesh:
16    #mesh_kvalitet = config['coarsness']
17    mesh_kvalitet = 0.2
18
19    #KS:
20    #antall_ribber = config['num_ribs']
21    antall_ribber = 3
22    ks_bredde = .96

```

```

21 ks_cc = config['LC_CC']
22 ks_lengde = 15
23 ks_dybde = 20
24 dekningsgrad = config['Dekningsgrad']
25
26 #Spuntvegg:
27 spw_topp = 98.5
28 spw_bunn = 83.5
29
30 #Globale maal:
31 global_y = 14
32 utgravning_bunn = 91.4
33 plataa_z = 96
34 global_x = 45
35 global_x_min = -30
36 topp = 98
37 ks_bunn = topp-ks_dybde
38 #global_y = antall_ribber*ks_cc
39 antall_ribber = int(global_y/ks_cc)
40 print(f'Antall_ribber: {antall_ribber}')
41 global_y = antall_ribber*ks_bredde+antall_ribber*(ks_cc-ks_bredde)
42 extrusion_path = g_i.line((0, 0, topp), (0, 0, ks_bunn))[-1]
43 g_i.SoilContour.initializerectangular(global_x_min, 0, global_x,
    global_y)
44 vannivaa = 96.5
45 putehoeoyde = 97.5
46 betong_tykkelse = 0.2
47 betong_x = 12.5
48 utgraving_x_bunn = 12.1
49 betong_z_topp = utgravning_bunn+betong_tykkelse
50 drenert_kil_dybde = 88
51 berg_nivaa = 75
52
53 #Materialer:
54 Fyllmasser = g_i.soilmat("SoilModel", "Hardening_Soil", "cRef", 5, "
    gammaUnsat", 19, "phi", 35, "EOedRef", 20000, "gammaSat", 22, "
    E50Ref", 20000, "Colour", 13158550, "Identification", "00
    _Fyllmasser", "InterfaceStrengthDetermination", "Manual", "Rinter",
    0.5)
55 Toppleire = g_i.soilmat("SoilModel", "NGI-ADP", "DrainageType", "
    Undrained_C", "gammaUnsat", 19.3, "Colour", 13158600, "gammaFC",
    0.9, "gammaFDSS", 1.4, "gammaFE", 2.4, "GURsUARatio", 700, "sUAREf"
    , 70, "Identification", "01-Toppleire", "sUDSSsUARatio", 0.63, "
    sUPsUARatio", 0.35, "tau0sUARatio", 0.7)

```

```

56  Leire1 = g_i.soilmat("SoilModel", "NGI-ADP", "DrainageType", "
    Undrained_C", "gammaUnsat", 19.3, "Colour", 5278770, "gammaFC",
    0.9, "gammaFDSS", 1.4, "gammaFE", 2.4, "GURsUARatio", 700, "sUAREf",
    42, "Identification", "02_Leire_1", "sUDSSsUARatio", 0.63, "
    sUPsUARatio", 0.35, "tau0sUARatio", 0.7)
57  Leire2 = g_i.soilmat("SoilModel", "NGI-ADP", "DrainageType", "
    Undrained_C", "gammaUnsat", 19.3, "Colour", 10544770, "gammaFC",
    0.9, "gammaFDSS", 1.4, "gammaFE", 2.4, "GURsUARatio", 700, "sUAREf",
    42, "Identification", "03_Leire_2", "sUDSSsUARatio", 0.63, "
    sUPsUARatio", 0.35, "tau0sUARatio", 0.7)
58  Leire3 = g_i.soilmat("SoilModel", "NGI-ADP", "DrainageType", "
    Undrained_C", "VerticalRef", 88, "gammaUnsat", 19.3, "Colour",
    9889510, "gammaFC", 0.9, "gammaFDSS", 1.8, "gammaFE", 2.7, "
    GURsUARatio", 700, "sUAREf", 42, "Identification", "04_Leire_3", "
    sUDSSsUARatio", 0.63, "sUPsUARatio", 0.35, "sUAInc", 2.5, "
    tau0sUARatio", 0.7)
59  ks = g_i.soilmat("Identification", "05_KS", "SoilModel", "Mohr-Coulomb",
    "DrainageType", "Undrained_C", "Colour", 15049192, "gammaUnsat",
    19.5, "nuU", 0.499, "Vs", 112.184282703863, "sUAREf", 175, "
    TensionCutOff", False, "InterfaceStrengthDetermination", "Manual", "
    Rinter", 0.7)
60  Betong = g_i.soilmat("SoilModel", "Linear_Elastic", "DrainageType", "
    Non-porous", "gammaUnsat", 25, "Vs", 2214.72345903501, "nu", 0.2,
    "ERef", 30000000, "Identification", "06_Betong", "
    InterfaceStrengthDetermination", "Manual", "Rinter", 0.5)
61  DrenertInterface = g_i.soilmat("SoilModel", "Mohr-Coulomb", "cRef", 1,
    "gammaUnsat", 19.3, "phi", 27, "gammaSat", 19.3, "Vs",
    98.8676422372175, "nu", 0.3, "EOed", 67307.6923076923, "Colour",
    1710816, "Identification", "08_DrenertInterface", "
    InterfaceStrengthDetermination", "Manual", "Rinter", 0.5)
62  spw_mat = g_i.platemat("Identification", "AZ_17-700", "MaterialType",
    "Elastic", "Colour", 16711701, "Gamma", 2.489, "Isotropic", False,
    "E1", 12323129.2517007, "E2", 616156.462585034, "d", 0.42, "G12",
    616156.462585034, "G13", 1108333.33333333, "G23", 332500)
63  HEB_340 = g_i.beammat("Identification", "HEB_340", "MaterialType", "
    Elastic", "Colour", 15666410, "Gamma", 78.5, "CrossSectionType", "
    User-defined", "A", 0.01709, "I2", 0.0003666, "I3", 0.0003666, "E",
    210000000)
64  skraastiver = g_i.beammat("Identification", "o323.9x10", "MaterialType",
    "Elastic", "Colour", 16711935, "Gamma", 78.5, "
    PredefinedCrossSectionType", "Circular_tube", "Diameter", 0.3239,
    "Thickness", 0.01, "E", 210000000)
65  DrenertLeire_HS = g_i.soilmat("Identification", "10_DrenertLeire_HS",
    "SoilModel", "Hardening_Soil", "Colour", 9025224, "gammaUnsat",
    19.3, "gammaSat", 19.3, "E50Ref", 10000, "EOedRef", 10000, "PowerM

```

```

    ", 1, "phi" ,27, "nuUR", 0.3)
66
67 Leire12Interface = g_i.soilmat("Identification" ,"11_Leire_1/2_
    interface" ,"SoilModel", "Mohr-Coulomb", "DrainageType" ,"Undrained
    _C", "Colour", 12509878, "gammaUnsat", 19.3, "
    RayleighDampingInputMethod", "Direct", "nuU" ,0.499, "Vs",
    48.719638006389 ,"sURef", 42, "InterfaceStrengthDetermination", "
    Manual", "Rinter", 0.5)
68 Leire3Interface = g_i.soilmat("Identification" ,"12_Leire_3_
    interface"
    , "SoilModel", "Mohr-Coulomb", "DrainageType", "Undrained_C", "
    Colour" ,8697318, "gammaUnsat", 19.3 ,"RayleighDampingInputMethod",
    "Direct", "nuU", 0.499 ,"VerticalRef", 87, "Vs", 48.719638006389,
    "sURef" ,42, "sUInc" ,2.5, "InterfaceStrengthDetermination" ,"
    Manual" ,"Rinter", 0.5)
69 BetongInterface = g_i.soilmat("Identification" ,"13_Betong_
    interface",
    "SoilModel", "Mohr-Coulomb", "DrainageType" ,"Non-porous", "Colour
    ", 16180465 ,"gammaUnsat", 25 ,"ERef" ,28000000, "nu", 0.2, "Vs"
    ,2139.62613556668, "cRef", 100 ,"phi" ,35, "TensileStrength", 100)
70
71 #Lagdeling
72 g_i.borehole(0,0)
73 g_i.boreholes[0].Head = vannivaa
74 g_i.soillayer(0)
75 g_i.Soillayers[0].Soil.Material = g_i.Fyllmasser
76 g_i.Soillayers[0].Zones[0].Top = topp
77 g_i.Soillayers[0].Zones[0].Bottom = 96.8
78 g_i.soillayer(1)
79 g_i.Soillayers[1].Soil.Material = g_i.Toppleire
80 g_i.Soillayers[1].Zones[0].Bottom = 95
81 g_i.soillayer(2)
82 g_i.Soillayers[2].Soil.Material = g_i.Leire1
83 g_i.Soillayers[2].Zones[0].Bottom = 93
84 g_i.soillayer(3)
85 g_i.Soillayers[3].Soil.Material = g_i.Leire2
86 g_i.Soillayers[3].Zones[0].Bottom = 88
87 g_i.soillayer(4)
88 g_i.Soillayers[4].Soil.Material = g_i.Leire3
89 g_i.Soillayers[4].Zones[0].Bottom = berg_nivaa
90
91 #Laster:
92 polygon = g_i.surface((0,0,topp),(0,global_y,topp),(global_x_min,
    global_y,topp),(global_x_min,0,topp))
93 surfaceload = g_i.surfload(polygon)
94 #polygon.SurfaceLoad.sigz.set(-50)
95

```

```

96  #Spuntvegg: AZ 17-700
97  polygon_1 = g_i.surface((0,0,spw_toppp),(0,global_y,spw_toppp),(0,
    global_y,spw_bunn),(0,0,spw_bunn))
98  spw_plate = g_i.plate(polygon_1, "Material", spw_mat)
99  surface_gw_flow_bc = g_i.surfgwfbfbc(polygon_1)
100 surface_gw_flow_bc.Behaviour = 'Closed'
101 z_inter_bunn = spw_bunn-1
102 inter_poloygon = g_i.surface((0,global_y,spw_bunn),(0,0,spw_bunn)
    ,(0,0,z_inter_bunn),(0,global_y,z_inter_bunn))
103
104 #Interfaces:
105 interface = g_i.posinterface(polygon_1)
106 interface = g_i.neginterface(polygon_1)
107 interface = g_i.posinterface(inter_poloygon)
108 interface = g_i.neginterface(inter_poloygon)
109 #posinterface.MaterialMode = "Custom"
110 #posinterface.Material = DrenertInterface_ModifiedStiffness
111 polygon_1.AxisFunction.set("Manual")
112 polygon_1.AxisVectorZ.set(-1)
113
114 #Puter: HEB_340
115 #Betongpute
116 line_g = g_i.line((13.6,0,betong_z_toppp),(13.6,global_y,betong_z_toppp)
    )[-1]
117 beam_g = g_i.beam(line_g)
118 g_i.setmaterial(beam_g, HEB_340)
119
120 #Spuntpute
121 line_g = g_i.line((0,0,putehoejde),(0,global_y,putehoejde))[-1]
122 beam_g = g_i.beam(line_g)
123 g_i.setmaterial(beam_g, HEB_340)
124
125 #Volum av KS:
126 for i in range(int(antall_ribber)):
127     start_y = ks_cc*i + ks_cc*0.5-ks_bredde*0.5
128     #start = float((global_y-antall_ribber*ks_bredde-(antall_ribber-1)
        *(ks_cc-ks_bredde))/2)
129     #start_y = start+ks_cc*i
130     ende_y = start_y + ks_bredde
131     surface_g = g_i.surface((0,start_y,topp),(0,ende_y,topp),(
        ks_lengde,ende_y,topp),(ks_lengde,start_y,topp))
132     volume_g = g_i.extrude(surface_g, extrusion_path)
133     g_i.delete(surface_g)
134     g_i.volumes[i].Soil.Material = g_i.ks
135

```

```

136     #Surfaces til bedre mesh under KS:
137     surface_g = g_i.surface((0,start_y,ks_bunn),(0,ende_y,ks_bunn),(0,
138         ende_y,berg_nivaa),(0,start_y,berg_nivaa))
139     surface_g = g_i.surface((ks_lengde,start_y,ks_bunn),(ks_lengde,
140         ende_y,ks_bunn),(ks_lengde,ende_y,berg_nivaa),(ks_lengde,
141         start_y,berg_nivaa))
142     surface_g = g_i.surface((0,start_y,ks_bunn),(0,start_y,berg_nivaa)
143         ,(ks_lengde,start_y,berg_nivaa),(ks_lengde,start_y,ks_bunn))
144     surface_g = g_i.surface((0,ende_y,ks_bunn),(0,ende_y,berg_nivaa),(
145         ks_lengde,ende_y,berg_nivaa),(ks_lengde,ende_y,ks_bunn))
146
147     #Interfaces paa KS:
148     side1 = g_i.surface((0,start_y,topp),(ks_lengde,start_y,topp),(
149         ks_lengde,start_y,topp-ks_dybd),(0,start_y,topp-ks_dybd))
150     side2 = g_i.surface((0,ende_y,topp),(ks_lengde,ende_y,topp),(
151         ks_lengde,ende_y,topp-ks_dybd),(0,ende_y,topp-ks_dybd))
152     bunn = g_i.surface((0,start_y,topp-ks_dybd),(0,ende_y,topp-
153         ks_dybd),(ks_lengde,ende_y,topp-ks_dybd),(ks_lengde,start_y,
154         topp-ks_dybd))
155     kortside1 = g_i.surface((0,start_y,topp),(0,ende_y,topp),(0,ende_y
156         ,topp-ks_dybd),(0,start_y,topp-ks_dybd))
157     kortside2 = g_i.surface((ks_lengde,start_y,topp),(ks_lengde,ende_y
158         ,topp),(ks_lengde,ende_y,topp-ks_dybd),(ks_lengde,start_y,topp
159         -ks_dybd))
160     interfaces_g = g_i.neginterface(side1,kortside2)
161     interfaces_g = g_i.posinterface(side2,bunn,kortside1)
162     g_i.delete(extrusion_path)
163
164     #surface_g = g_i.surface((global_x_min,0,ks_bunn),(global_x_min,
165         global_y,ks_bunn),(global_x,global_y,ks_bunn),(global_x,0,ks_bunn))
166     surface_g = g_i.surface((global_x_min,0,spw_bunn),(global_x_min,
167         global_y,spw_bunn),(global_x,global_y,spw_bunn),(global_x,0,
168         spw_bunn))
169
170     surface_g = g_i.surface((-2,0,berg_nivaa),(-2,global_y,berg_nivaa)
171         ,(-2,global_y,spw_bunn),(-2,0,spw_bunn))
172     mesh_x = ks_lengde + 2
173     surface_g = g_i.surface((mesh_x,0,berg_nivaa),(mesh_x,global_y,
174         berg_nivaa),(mesh_x,global_y,spw_bunn),(mesh_x,0,spw_bunn))
175
176     #Betongplate/Arbeidsplate:
177     extrusion_path_betong = g_i.line((0, 0, utgravning_bunn), (0, 0,
178         betong_z_topp))[-1]
179     surface_g = g_i.surface((betong_x,0,utgravning_bunn),(betong_x,
180         global_y,utgravning_bunn),(global_x,global_y,utgravning_bunn),(

```

```

        global_x,0,utgravning_bunn))
162 volume_g = g_i.extrude(surface_g, extrusion_path_betong)
163 g_i.delete(surface_g)
164 surface_g = g_i.surface((betong_x,0,utgravning_bunn),(betong_x,
        global_y,utgravning_bunn),(0,global_y,utgravning_bunn),(0,0,
        utgravning_bunn))
165 volume_g = g_i.extrude(surface_g, extrusion_path_betong)
166 g_i.delete(surface_g)
167 g_i.volumes[antall_ribber].Soil.Material = g_i.Betong
168 g_i.volumes[antall_ribber+1].Soil.Material = g_i.Betong
169
170 #Skraastivere:
171 cc_skraastiver = 6
172 antall_stiver = int(global_y/cc_skraastiver)
173 print(f'Antall_stivere: {antall_stiver}')
174 senter = global_y/2
175 if antall_stiver % 2 == 0: #partall
176     print('Partall')
177     for i in range (0,int(antall_stiver/2)):
178         line_g = g_i.line((0,senter+cc_skraastiver/2+cc_skraastiver*i,
            putehoeoyde), (13.6, senter+cc_skraastiver/2+cc_skraastiver*
            i, betong_z_topp))[-1]
179         beam_g = g_i.beam(line_g)
180         g_i.setmaterial(beam_g, skraastiver)
181         line_g = g_i.line((0,senter-cc_skraastiver/2-cc_skraastiver*i,
            putehoeoyde), (13.6, senter-cc_skraastiver/2-cc_skraastiver*
            i, betong_z_topp))[-1]
182         beam_g = g_i.beam(line_g)
183         g_i.setmaterial(beam_g, skraastiver) #oddetall
184 else: #oddetall
185     print('Oddetall')
186     line_g = g_i.line((0,senter,putehoeoyde), (13.6, senter,
        betong_z_topp))[-1]
187     beam_g = g_i.beam(line_g)
188     g_i.setmaterial(beam_g, skraastiver)
189     if antall_stiver > 1.5:
190         for i in range (1,int(antall_stiver/2)+1):
191             line_g = g_i.line((0,senter+cc_skraastiver*i,putehoeoyde),
                (13.6, senter+cc_skraastiver*i, betong_z_topp))[-1]
192             beam_g = g_i.beam(line_g)
193             g_i.setmaterial(beam_g, skraastiver)
194             line_g = g_i.line((0,senter-cc_skraastiver*i,putehoeoyde),
                (13.6, senter-cc_skraastiver*i, betong_z_topp))[-1]
195             beam_g = g_i.beam(line_g)
196             g_i.setmaterial(beam_g, skraastiver)

```

```

197
198 #lag til utgraving:
199 polygon_2 = g_i.surface((0,0,topp),(0,global_y,topp),(utgraving_x_bunn
    ,global_y,utgravning_bunn),(utgraving_x_bunn,0,utgravning_bunn))
200 polygon_3 = g_i.surface((0,0,utgravning_bunn),(0,global_y,
    utgravning_bunn),(global_x,global_y,utgravning_bunn),(global_x,0,
    utgravning_bunn))
201 polygon_5 = g_i.surface((0,0,plataa_z),(0,global_y,plataa_z),(global_x
    ,global_y,plataa_z),(global_x,0,plataa_z))
202 #Polygon til drenert sone:
203 polygon_4 = g_i.surface((-1,0,topp),(-1,global_y,topp),(-0.2,global_y,
    drenert_kil_dybde),(-0.2,0,drenert_kil_dybde))
204 polygon_6 = g_i.surface((0,0,drenert_kil_dybde),(0,global_y,
    drenert_kil_dybde),(-0.2,global_y,drenert_kil_dybde),(-0.2,0,
    drenert_kil_dybde))
205
206 #####Generate mesh#####
207 def generate_mesh():
208     g_i.gotomesh()
209     g_i.mesh("Coarseness", mesh_kvalitet, "UseEnhancedRefinements",
        True, "EMRGlobalScale", 1.2, "EMRMinElementSize", 0.005, "
        UseSweptMeshing", False)
210     for ribber in range(1, antall_ribber + 1):
211         for i in range(1, 5):
212             borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_{i}_Volume_{ribber
                }_1"
213             borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
214             g_i.refine(borehole_volume)
215             borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_{i}_Volume_{ribber
                }_2"
216             borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
217             g_i.refine(borehole_volume)
218         for i in range(antall_ribber+1,antall_ribber+3):
219             borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_4_Volume_{ribber}
                _Volume_{i}_1"
220             borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
221             g_i.refine(borehole_volume)
222             borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_4_Volume_{ribber}
                _Volume_{antall_ribber+2}_2"
223             borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
224             g_i.refine(borehole_volume)
225             borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_4_Volume_{ribber}_3"
226             borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
227             g_i.refine(borehole_volume)
228             borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_5_Volume_{ribber}_1"

```

```

229         borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
230         g_i.refine(borehole_volume)
231     borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_2_{antall_ribber+3}"
232     borehole_volume_s = getattr(g_i, borehole_volume_name)
233     g_i.refine(borehole_volume_s)
234     borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_3_1
235     g_i.refine(borehole_volume_s)
236     borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_4_{antall_ribber+3}"
237     borehole_volume_s = getattr(g_i, borehole_volume_name)
238     g_i.refine(borehole_volume_s)
239     borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_1_1
240     g_i.refine(borehole_volume_s)
241     borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_5_4 #volum rundt bunn av ks
        -ribber
242     g_i.refine(borehole_volume_s)
243     g_i.refine(borehole_volume_s)
244     g_i.refine(borehole_volume_s)
245     g_i.refine(borehole_volume_s)
246     for i in range(6,6+antall_ribber):
247         borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_5_{i}"
248         borehole_volume_s = getattr(g_i, borehole_volume_name)
249         g_i.refine(borehole_volume_s)
250         g_i.refine(borehole_volume_s)
251         g_i.refine(borehole_volume_s)
252     borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_4_Volume_{antall_ribber+1}"
        _1" #betongplate
253     borehole_volume_s = getattr(g_i, borehole_volume_name)
254     g_i.refine(borehole_volume_s)
255
256     #surfaces = g_i.Surfaces
257     #g_i.refine(surfaces)
258
259     g_i.mesh("Coarseness", 0.05, "UseEnhancedRefinements", True, "
        EMRGlobalScale", 1.2, "EMRMinElementSize", 0.005, "
        UseSweptMeshing", False)
260 generate_mesh()
261
262     #####FLOW CONDITIONS#####
263     g_i.gotoflow()
264     waterlevel_s = g_i.waterlevel((0, 0, vannivaa))
265
266     #####STAGED CONSTRUCTION#####
267     g_i.gotostages()
268     phase0_s = g_i.InitialPhase
269

```

```

270 #1 INSTALLERE SPUNT
271 phase1_s = g_i.phase(phase0_s)
272 g_i.setcurrentphase(phase1_s)
273 plate_s = g_i.Plate_1
274 plate_s.activate(phase1_s)
275 name = "Polygon_3" #forlenget interface under spunt
276 surface = getattr(g_i, name)
277 surface.activate(phase1_s)
278 name = f"SurfaceGWFlowBC_1"
279 surface = getattr(g_i, name)
280 surface.activate(phase1_s)
281 name = f"PositiveInterface_1"
282 interface = getattr(g_i, name)
283 g_i.setmaterial(interface, phase1_s, DrenertInterface)
284 interface.activate(phase1_s)
285
286 #2 INSTALLERE KS
287 phase2_s = g_i.phase(phase1_s)
288 g_i.setcurrentphase(phase2_s)
289 for i in range(1, antall_ribber + 1):
290     volume_name = f"Volume_{i}"
291     volume = getattr(g_i, volume_name)
292     volume.activate(phase2_s)
293     g_i.setmaterial(volume, phase2_s, ks)
294 #Aktivere interfaces:
295 #plates_s = g_i.Surfaces
296 #plates_s.activate(phase2_s)
297
298 #3 Topputgraving
299 phase3_s = g_i.phase(phase2_s)
300 g_i.setcurrentphase(phase3_s)
301
302 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_1_2
303 borehole_volume_s.deactivate(phase3_s)
304 borehole_volume_s.setwaterdry(phase3_s)
305 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_2_1
306 borehole_volume_s.deactivate(phase3_s)
307 borehole_volume_s.setwaterdry(phase3_s)
308
309 for ribber in range(4, 5+antall_ribber):
310     borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_1_{ribber}"
311     borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
312     borehole_volume.deactivate(phase3_s)
313     borehole_volume.setwaterdry(phase3_s)
314 for ribber in range(2, 3+antall_ribber):

```

```

315     borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_2_{ribber}"
316     borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
317     borehole_volume.deactivate(phase3_s)
318     borehole_volume.setwaterdry(phase3_s)
319 for ribber in range(1,antall_ribber+1):
320     for lag in range(1,3):
321         for i in range(1,3):
322             borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_{lag}_Volume_{
323                 ribber}_{i}"
324             borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
325             borehole_volume.deactivate(phase3_s)
326             borehole_volume.setwaterdry(phase3_s)
327
328 #4 SKRaaNINGSUTGRAVING
329 phase4_s = g_i.phase(phase3_s)
330 g_i.setcurrentphase(phase4_s)
331
332 #DRENERT SONE
333 borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_2_{antall_ribber+3}"
334 borehole_volume_s = getattr(g_i, borehole_volume_name)
335 #g_i.setmaterial(borehole_volume_s, phase4_s, DrenertLeire_2)
336 g_i.setmaterial(borehole_volume_s, phase4_s, DrenertLeire_HS)
337
338 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_3_1
339 #g_i.setmaterial(borehole_volume_s, phase4_s, DrenertLeire_2)
340 g_i.setmaterial(borehole_volume_s, phase4_s, DrenertLeire_HS)
341
342 borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_4_{antall_ribber+3}"
343 borehole_volume_s = getattr(g_i, borehole_volume_name)
344 #g_i.setmaterial(borehole_volume_s, phase4_s, DrenertLeire_2)
345 g_i.setmaterial(borehole_volume_s, phase4_s, DrenertLeire_HS)
346
347 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_1_1
348 #g_i.setmaterial(borehole_volume_s, phase4_s, DrenertLeire_2)
349 g_i.setmaterial(borehole_volume_s, phase4_s, DrenertLeire_HS)
350
351 #Deaktiverer borehullvolum:
352 borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_2_{antall_ribber+5}"
353 borehole_volume_s = getattr(g_i, borehole_volume_name)
354 borehole_volume_s.deactivate(phase4_s)
355 borehole_volume_s.setwaterdry(phase4_s)
356
357 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_3_2
358 borehole_volume_s.deactivate(phase4_s)
359 borehole_volume_s.setwaterdry(phase4_s)

```

```

359
360 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_4_1
361 borehole_volume_s.deactivate(phase4_s)
362 borehole_volume_s.setwaterdry(phase4_s)
363
364 #Deaktiverer ks-skraaning:
365 for ribber in range(1, antall_ribber + 1):
366     for i in range(3, 5):
367         borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_{i}_Volume_{ribber}_1"
368         borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
369         borehole_volume.deactivate(phase4_s)
370         borehole_volume.setwaterdry(phase4_s)
371 for ribber in range(1, antall_ribber + 1):
372     borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_2_Volume_{ribber}_3"
373     borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
374     borehole_volume.deactivate(phase4_s)
375     borehole_volume.setwaterdry(phase4_s)
376
377 volume_name = f"Volume_{antall_ribber+1}"
378 volume = getattr(g_i, volume_name)
379 volume.deactivate(phase4_s)
380 volume.setwaterdry(phase4_s)
381
382 for ribber in range(1, antall_ribber+2):
383     borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_4_Volume_{antall_ribber+2}
384         _{ribber}"
385     borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
386     borehole_volume.deactivate(phase4_s)
387     borehole_volume.setwaterdry(phase4_s)
388 for ribber in range(1, antall_ribber+1):
389     borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_4_Volume_{ribber}_Volume_{
390         antall_ribber+2}_1"
391     borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
392     borehole_volume.deactivate(phase4_s)
393     borehole_volume.setwaterdry(phase4_s)
394
395 #5 SToPE BETONGPLATE
396 phase5_s = g_i.phase(phase4_s)
397 g_i.setcurrentphase(phase5_s)
398 volume_name = f"Volume_{antall_ribber+1}"
399 volume = getattr(g_i, volume_name)
400 volume.activate(phase5_s)
401 g_i.setmaterial(volume, phase5_s, Betong)

```

```

402 phase6_s = g_i.phase(phase5_s)
403 g_i.setcurrentphase(phase6_s)
404 beam_s = g_i.Beams
405 beam_s.activate(phase6_s)
406
407 #7 FULL UTGRAVING
408 #phase6_s.rename("FULL UTGRAVING")
409 phase7_s = g_i.phase(phase6_s)
410 #g_i.setcurrentphase(phase7_s)
411
412 #Deaktiver alt av volum:
413 volume_s = g_i.Volumes
414 volume_s.deactivate(phase7_s)
415 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_1
416 borehole_volume_s.deactivate(phase7_s)
417 borehole_volume_s.setwaterdry(phase7_s)
418 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_2
419 borehole_volume_s.deactivate(phase7_s)
420 borehole_volume_s.setwaterdry(phase7_s)
421 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_3
422 borehole_volume_s.deactivate(phase7_s)
423 borehole_volume_s.setwaterdry(phase7_s)
424 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_4
425 borehole_volume_s.deactivate(phase7_s)
426 borehole_volume_s.setwaterdry(phase7_s)
427 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_5
428 borehole_volume_s.deactivate(phase7_s)
429 #borehole_volume_s.setwaterdry(phase7_s)
430
431 waterlevel_name = f"BoreHoleWaterLevel_1"
432 waterlevel = getattr(g_i, waterlevel_name)
433
434 #Aktiverer ikke-utgravde BoreholeVolume:
435 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_1_1
436 borehole_volume_s.activate(phase7_s)
437 borehole_volume_s.setwaterlevel(phase7_s, waterlevel)
438 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_1_3
439 borehole_volume_s.activate(phase7_s)
440 borehole_volume_s.setwaterlevel(phase7_s, waterlevel)
441 borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_2_{antall_ribber+4}"
442 borehole_volume_s = getattr(g_i, borehole_volume_name)
443 borehole_volume_s.activate(phase7_s)
444 borehole_volume_s.setwaterlevel(phase7_s, waterlevel)
445 borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_2_{antall_ribber+3}"
446 borehole_volume_s = getattr(g_i, borehole_volume_name)

```

```

447 borehole_volume_s.activate(phase7_s)
448 borehole_volume_s.setwaterlevel(phase7_s, waterlevel)
449 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_3_1
450 borehole_volume_s.activate(phase7_s)
451 borehole_volume_s.setwaterlevel(phase7_s, waterlevel)
452 borehole_volume_s = g_i.BoreholeVolume_3_3
453 borehole_volume_s.activate(phase7_s)
454 borehole_volume_s.setwaterlevel(phase7_s, waterlevel)
455 borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_4_{antall_ribber+3}"
456 borehole_volume_s = getattr(g_i, borehole_volume_name)
457 borehole_volume_s.activate(phase7_s)
458 borehole_volume_s.setwaterlevel(phase7_s, waterlevel)
459 s = 4 + antall_ribber
460 borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_4_{s}"
461 borehole_volume_s = getattr(g_i, borehole_volume_name)
462 borehole_volume_s.activate(phase7_s)
463 borehole_volume_s.setwaterlevel(phase7_s, waterlevel)
464 borehole_volume_s = g_i.Soil_5
465 borehole_volume_s.activate(phase7_s)
466 #borehole_volume_s.setwaterlevel(phase7_s, waterlevel)
467 s = 5 + antall_ribber
468 borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_4_{s}"
469 borehole_volume_s = getattr(g_i, borehole_volume_name)
470 borehole_volume_s.activate(phase7_s)
471 borehole_volume_s.setwaterlevel(phase7_s, waterlevel)
472 #Aktiverer ks- under utgravn nivåa igjen
473 for ribber in range(1, antall_ribber + 1):
474     for i in range(4,5):
475         borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_{i}_Volume_{ribber}_3"
476         borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
477         borehole_volume.activate(phase7_s)
478         borehole_volume.setwaterlevel(phase7_s, waterlevel)
479 for ribber in range(1, antall_ribber + 1):
480     for i in range(5,6):
481         borehole_volume_name = f"BoreholeVolume_{i}_Volume_{ribber}_1"
482         borehole_volume = getattr(g_i, borehole_volume_name)
483         borehole_volume.activate(phase7_s)
484         borehole_volume.setwaterlevel(phase7_s, waterlevel)
485 volume.activate(phase7_s)
486 volume.setwaterlevel(phase7_s, waterlevel)
487 g_i.setcurrentphase(phase7_s)
488
489 #8 FULL ARBEIDSPLATE
490 phase8_s = g_i.phase(phase7_s)
491 g_i.setcurrentphase(phase8_s)

```

```

492 volume_name = f"Volume_{antall_ribber+2}"
493 volume = getattr(g_i, volume_name)
494 volume.activate(phase8_s)
495 g_i.setmaterial(volume, phase8_s, Betong)
496 g_i.setcurrentphase(phase8_s)
497 #9 FJERNE STIVERE
498 phase9_s = g_i.phase(phase8_s)
499 g_i.setcurrentphase(phase9_s)
500 beam_s.deactivate(phase9_s)
501
502 ####NUMERICAL CONTROL PARAMETRES
503 phases = g_i.Phases
504 for phase in phases[1:]:
505     phase.Solver = "Pardiso_(multicore_(direct))"
506     phase.Deform.UseDefaultIterationParams = False
507     phase.Deform.ToleratedError = 0.02
508     phase.Deform.ArcLengthControl = "Off"
509
510 """
511 #SIKKERTHETSANALYSER:
512 phaseSF3 = g_i.phase(phase4_s)
513 phaseSF3.DeformCalcType = 'Safety'
514 phaseSF6 = g_i.phase(phase7_s)
515 phaseSF6.DeformCalcType = 'Safety'
516 phaseSF8 = g_i.phase(phase9_s)
517 phaseSF8.DeformCalcType = 'Safety'
518 phaseSF9 = g_i.phase(phase10_s)
519 phaseSF9.DeformCalcType = 'Safety'
520 """
521
522 #Nodes and stress points:
523 """
524 g_i.gotostages()
525 g_i.selectmeshpoints()
526 g_o.addcurvepoint("node", (0, 0, 90))
527 g_o.addcurvepoint("stress point", (0, 0, 90))
528 g_o.update()
529 """
530
531 s, g = new_server('localhost', port=PORT_o, password=PASSWORD)
532 return s, g
533
534 configurations = [
535     {'config_nr':1,'Dekningsgrad': 10, 'LC_CC': 9.60},
536     {'config_nr':2,'Dekningsgrad': 20, 'LC_CC': 4.8},

```

```

537     {'config_nr':3,'Dekningsgrad': 28, 'LC_CC': 3.4},
538     {'config_nr':4,'Dekningsgrad': 30, 'LC_CC': 3.2},
539     {'config_nr':5,'Dekningsgrad': 40, 'LC_CC': 2.4},
540     {'config_nr':6,'Dekningsgrad': 50, 'LC_CC': 1.92},
541     {'config_nr':7,'Dekningsgrad': 60, 'LC_CC': 1.6},
542     {'config_nr':8,'Dekningsgrad': 70, 'LC_CC': 1.37},
543     {'config_nr':9,'Dekningsgrad': 80, 'LC_CC': 1.2},
544 ]
545
546 for config in configurations:
547     #run_simulation(config)
548     s_o, g_o = run_simulation(config)
549     g_i.calculate()
550     g_i.save(rf"C:\Users\AGN\OneDrive\NGI\Masteroppgave\3D\tester\
        Simuleringer\Simuleringsspakke1\konfigurasjonsnr_{config['
            config_nr']}.p3d")

```

