

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige
universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for bygg - og miljøteknikk

Marit Rønning Skoglund

Poretrykksrespons ved kalk- /sementstabilisering

Juni 2019





Kunnskap for en bedre verden

Poretrykksrespons ved kalk- /sementstabilisering

Marit Rønning Skoglund

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2019

Hovedveileder: Vikas Thakur

Medveileder: Arnstein Watn

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg - og miljøteknikk

Forord

Denne rapporten er skrevet i forbindelse med arbeid gjort i min masteroppgave (TBA4900) som avsluttende arbeid av mastergrad i Bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Oppgaven er levert ved Faggruppe for geoteknikk, ved institutt for Bygg- og miljøteknikk og er skrevet i samarbeid med Multiconsult.

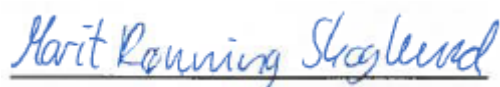
Arbeidet har dreid seg om poretrykksrespons ved kalk-/sementstabilisering av bløt leire, og er en fortsettelse av arbeid som startet med prosjektoppgaven høsten 2018.

Geoteknikkproblem er alltid både spennende og frustrerende. Dette arbeidet var intet unntak. Det har vært inspirerende å jobbe med et tema som er nyttig. Det er gøy å lære nye ting. Prosjektet har vært særlig spennende å følge fordi det er "like borti høgget" og har pågått underveis i semesteret. Vi har derfor kunnet følge med på framgangen. Jeg blir stadig fasinert over geoteknikkens kompleksitet og muligheter. Når det gjelder dette prosjektet lot jeg meg særlig imponere over et stort volum kalk-/sementstabilisering, gravemaskinmenn som sitter under trykk i et rør 10m under E6 og svære overvannsrør som plutselig titter ut i lufta fra en skråning på joggestien langs elva.

Takk til veilederne på NTNU, Vikas Thakur og Arnstein Watn, som har gitt meg gode (og kanskje noen dårlige?) råd om teori og praksis, og ikke minst om hvordan en ikke skal bli stressa. Jeg har holdt stressnivået i sjakk helt til de tok ferie. Det rettes også en takk til andre professorer i faggruppa, i tillegg til Mia Bek og andre i Multiconsult.

Også takk til mamma og pappa for tips og triks, optimisme, komma, kaffe og jordbær. Til sist, takk til mine kontorkamerater for å ha holdt stemninga oppe helt til det siste.

Trondheim 11. juni 2019



Marit Rønning Skoglund

Sammendrag

I Norge finnes bløt og sensitiv leire som det kan være behov for å stabilisere. Da kan det benyttes kalk-/sementstabilisering. Det er en vanlig stabiliseringsmetode hvor bindemiddel blåses inn i leira ved hjelp av lufttrykk. Lufttrykket, blant flere ting, kan føre til at poretrykket øker, og dette kan være negativt for stabiliteten. I områder med lav initiell sikkerhet kan dette bli et problem. Det er nyttig å kjenne størrelsen og influensområde på poreovertrykk på forhånd, og derfor er poretrykksrespons ved installasjon av kalk-/sementpeler analysert i denne rapporten.

Målet har vært å vurdere størrelsen på poreovertrykk, influensområde og konsolideringstid. Med hovedfokus på felldata fra et prosjekt på Sluppen i Trondheim, er poretrykksresponsen analysert. I tillegg er det brukt andre metoder for å vurdere poretrykksrespons ved kalk-/sementstabilisering. Dette gjelder endelig elementmetode (FEM), i form av programvaren Plaxis 2D, hvor installasjon av én KS-pel er modellert. I tillegg er det benyttet ulike analytiske og empiriske metoder for å vurdere poreovertrykk.

Utførte analyser av felldata viser at poreovertrykk kan komme opp mot 95kPa i avstand 0,2m fra kanten av kalk-/sementpelene. Analysene viser også at poreovertrykket reduseres med avstand fra installerte peler, og at poreovertrykk av betydning ikke oppstår lengre unna KS-pelene enn ca. 10m. I tillegg viser det seg at poreovertrykket når 10kPa (ca. 80% reduksjon av overtrykket) etter omtrent 1,5 døgn med opphold av KS-stabilisering, og at poreovertrykket går under 0 grunnet økt permeabilitet. Det er også en sammenheng mellom antall kalk-/sementpeler som er installert og størrelsen på poreovertrykket, noe som betyr at det er en kumulativ effekt på poreovertrykk ved installasjon av flere KS-peler.

Plaxis 2D fungerer for å simulere poretrykk ved KS-stabilisering med bruk av volumtøyning for å modellere installasjonen av KS-peler. Jordmodellen *Hardening Soil* er bedre til å simulere poreovertrykk enn *Mohr-Coulomb*. En analytisk løsning for poreovertrykk ved KS-stabilisering fungerer om parameterne er godt tilpasset. En empirisk løsning ikke ga like god overensstemmelse.

Det er mange forhold som påvirker poretrykksrespons ved kalk-/sementstabilisering. Det påpekes at det er viktig å vurdere poretrykk i hvert tilfelle, på grunn av at det varierer mye ut fra grunnforhold, og at andre faktorer som varierer i de ulike prosjektene spiller inn.

Abstract

There exists soft and sensitive clay in Norway, which in some cases will be necessary to stabilize. A possible method is lime/cement stabilization. This is a common stabilization method, which adds the binders to the soil with an air pressure. The air pressure, among other things, can lead to a rise in the pore pressure, which could affect the stability in a negative way. This could be a crucial problem for slopes with low initial safety. It is useful to have knowledge about the size of the pore pressure rise and the influence zone beforehand. This is why this subject is investigated in this thesis.

The objective was to assess the size of pore pressure rise, the influence zone and the time of consolidation due to lime/cement stabilization. Pore pressure response was analysed with emphasis to the field data from a project at Sluppen in Trondheim. In addition, also other methods have been used to analyse the pore pressure response. First, the finite element method was used in the software Plaxis 2D, where installation of one lime/cement column was modelled. Moreover, several analytical and empirical methods have been used in the assessments.

The performed analysis of the field measurements shows that the excess pore pressure can reach about 95kPa approximately 0,2m from the lime/cement column. The analysis also reveal that the excess pore pressure does abate with increasing distance to the installed piles and that significant excess pore pressure do not appear further away from the pile than approximately 10m. Also, it turns out that the excess pore pressure has reached 10kPa (80% reduction of the peak value) after about 1,5 days after the last column installation, and that the excess pore pressure reaches values under 0 due to increased permeability.

Plaxis 2D works well for simulating excess pore pressure due to lime/cement stabilization, with the use of volume strain to model the pile. The soil model *Hardening Soil* simulates the excess pore pressure better than *Mohr-Coulomb*. An analytical solution of excess pore pressure due to lime/cement stabilization also works well if the parameters are well fitted, while the tested empirical solution did not give good compliance with field data.

There are many factors that will affect the pore pressure response when executing lime/cement stabilization. Therefore, it is of big importance that the pore pressure is carefully evaluated in each case, so that the specific soil conditions and other circumstances related to the project are considered.

Innholdsfortegnelse

| | |
|---|-----|
| Forord | i |
| Sammendrag | iii |
| Abstract | v |
| Innholdsfortegnelse | vii |
| Forkortelser | ix |
| Symboler..... | ix |
| Definisjon | ix |
| 1. Introduksjon | 1 |
| 1.1. Bakgrunn – generelt | 1 |
| 1.2. Bakgrunn – prosjektspesifikt..... | 1 |
| 1.3. Problemstilling, mål og metode | 1 |
| 1.4. Omfang og begrensninger | 2 |
| 1.5. Struktur | 2 |
| 2. Litteraturstudie | 3 |
| 2.1. Kalk-/sementstabilisering | 3 |
| 2.1.1. Poreovertrykk ved KS-stabilisering | 4 |
| 2.2. Poretrykk og udrenerte lastsituasjoner..... | 8 |
| 2.2.1. Poretrykkligninger og poretrykksparetere | 9 |
| 2.3. Klassisk konsolideringsteori | 11 |
| 2.4. Analytiske løsninger for tilleggsporetrykk | 14 |
| 2.4.1. <i>Cavity Expansion Method</i> | 14 |
| 2.4.2. <i>Shearing Expanding Method</i> | 14 |
| 2.5. Empirisk løsning..... | 17 |
| 2.6. Plaxis og jordmodeller..... | 18 |
| 2.6.1. Elementmetoden og Plaxis..... | 18 |
| 2.6.2. Mohr-Coulomb | 18 |
| 2.6.3. Hardening Soil Model | 20 |
| 2.7. Poretrykksmåling – om piezometre..... | 22 |
| 3. Prosjektspesifikt – VA-Sluppenvegen | 25 |
| 3.1. Innledende | 25 |
| 3.2. Grunnforhold | 26 |
| 3.2.1. Generelt..... | 26 |
| 3.2.2. Jordegenskaper og parametere | 27 |
| 3.2.3. Poretrykkssituasjon | 30 |
| 3.3. Kalk-/sementstabilisering | 32 |
| 4. FEM-modellering | 35 |
| 4.1. Modell og metode..... | 35 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.2. | Tolkning og valg av inputparametere | 39 |
| 4.3. | Resultat | 40 |
| 4.3.1. | Mohr-Coulomb | 41 |
| 4.3.2. | Hardening Soil | 49 |
| 5. | Analytiske- og empiriske løsninger | 57 |
| 5.1. | <i>Cavity Expansion Method</i> | 57 |
| 5.2. | <i>Shearing Expanding Method</i> | 57 |
| 5.2.1. | Valg av parametere | 58 |
| 5.2.2. | Resultater | 59 |
| 5.3. | Empirisk løsning | 60 |
| 6. | Feltmålinger | 63 |
| 6.1. | PZ-17 og PZ-18..... | 63 |
| 6.1.1. | Avstand til KS-peler mens økning | 63 |
| 6.1.2. | Antall KS-peler mens økning..... | 65 |
| 6.1.3. | Reduksjon i poretrykk | 66 |
| 6.1.4. | Konsolidering..... | 67 |
| 6.2. | PZ-19 | 69 |
| 7. | Tolkninger og diskusjoner..... | 71 |
| 7.1. | Feltmålinger | 71 |
| 7.2. | FEM-analyse | 75 |
| 7.3. | Analytiske metoder..... | 82 |
| 7.3.1. | <i>Cavity Expansion Method</i> | 82 |
| 7.3.2. | <i>Shearing-Expanding Method</i> | 83 |
| 7.4. | Empirisk løsning | 87 |
| 7.5. | Oppsummert | 87 |
| 8. | Konklusjoner og anbefalinger | 91 |
| 9. | Videre arbeid | 93 |
| | Referanseliste | 95 |

Vedlegg

- A VA Sluppenvegen
- B Plaxis - beregningsforutsetninger og resultater
- C Utrekninger
- D Poretrykksmålinger
- E Feltresultater

Forkortelser

| | |
|-----|--|
| FEM | Finite Element Method (Endelig elementmetode) |
| KS | Kalk-/sement (Som brukt i f.eks. KS-stabilisering og KS-pel) |
| VA | Vann- og avløp |

Symboler

| | |
|------------|---|
| a | attraksjon |
| c | kohesjon |
| c_u | udrenert skjærstyrke |
| c_{ur} | omrørt skjærstyrke |
| c_v | konsolideringskoeffisient |
| E | Youngs modul |
| G | skjærmodul |
| k | permeabilitetskoeffisient |
| M | ødometermodul |
| p | middelspenning |
| S_t | sensitivitet |
| u | poretrykk |
| σ | totalspenning |
| σ_m | middelspenning |
| σ' | effektivspenning |
| ψ | dilatansvinkel |
| φ | friksjonsvinkel |
| γ | tyngdetetthet |
| ϵ | tøyning – her stort sett brukt som volumtøyning |
| v | tverrkontraksjonstallet |

Definisjon

Poreovertykk=tilleggsporetrykk → Størrelsen av poretrykksøkningen fra initial tilstand

1. Introduksjon

1.1. Bakgrunn – generelt

Grunnforholdene i Norge er varierte og blant annet i Trøndelag eksisterer det mye leire med lav styrke. Noen steder finnes kvikkleire. Kvikkleire er definert som leire med omrørt skjærstyrke $c_{ur} < 0,5 \text{ kPa}$. Det snakkes også i denne sammenhengen om sprøbruddsmaterialer og sensitive masser. Sensitivitet, S_t , er definert som forholdet mellom udrenert skjærstyrke og omrørt skjærstyrke. Om et materiale har $S_t > 30$ karakteriseres det som meget sensitivt. Sprøbruddsmaterialer har lav omrørt skjærstyrke og er sensitive. Kvikkleire har ofte stort vanninnhold og høy sensitivitet slik at et brudd kan føre til flyteskred. Konsekvensene ved brudd kan derfor bli store. Dette er et problem, både ved arealbruk i forbindelse med sensitive masser, og særlig under anleggsperioder (NTNU Faggruppe for geoteknikk, 2018).

Når bløte og sensitive masser skal brukes som byggemateriale, kan det være nødvendig å stabilisere jordmassene. Stabilisering kan gjøres på forskjellige måter. For eksempel kan motfyllinger og avlastning være alternativ. Kalk-/sementstabilisering er et annet alternativ. Da stabiliseres leira med et bindemiddel, gjerne kalk og/eller sement, som blåses inn ved hjelp av et lufttrykk og røres rundt med en visp. Slik dannes det peler med økt styrke. Installasjon av kalk-/sementpeler kan gi forhøyet poretrykk, blant annet på grunn av lufttrykket. Poreovertrykk i sensitiv leire kan være negativt for stabiliteten, men behov for stabilisering forekommer gjerne i områder med lav initiell sikkerhet. Derfor er det viktig å vite hvor høyt poreovertrykk jorda tåler, hvor mye poretrykk som vil initieres og å ha kontroll på poretrykket under installasjonen av kalk-/sementpelene.

1.2. Bakgrunn – prosjektspesifikt

På Sluppen i Trondheim er det i 2019 startet et vann- og avløpsprosjekt der det skal installeres flere rør for håndtering av spillvann og overvann. Arbeidet inkluderer rør av forskjellige diametere som installeres med forskjellige metoder, og tre groper hvorav to spuntgroper fungerer som press- og mottaksgroper for rørpressing. Grunnforholdene er utfordrende, da løsmassene blant annet består av bløte og sensitive masser. Derfor har det vært behov for kalk-/sementstabilisering ved pressgropen og mottaksgropen. Det er installert omtrent 740 kalk-/sementpeler over en periode på 20 dager i og rundt pressgropen. Det ble målt poretrykk med flere poretrykksmålere i området i anleggsperioden, og disse er brukt som felldata.

1.3. Problemstilling, mål og metode

Hovedproblemstillingen for denne oppgaven har vært å vurdere poretrykksrespons ved kalk-/sementstabilisering av leire. Det er fokusert på tre hovedområder hvor målet har vært å beskrive følgende størrelser for kalk-/sementstabiliseringsprosjekt i områder med lignende grunnforhold som på Sluppen:

- Størrelsen på tilleggsporetrykket
- Influensområdet av poretrykksendringer
- Konsolideringstid

Til dette skal det brukes felldata fra prosjektet på Sluppen i Trondheim. Poretrykksrespons skal også undersøkes med endelig elementmetode (FEM) i programvaren Plaxis 2D, i tillegg til analytiske og empiriske metoder. Dette er for å undersøke hvilke metoder som egner seg får å vurdere poreovertrykk ved installasjon av kalk-/sementpeler. Dessuten er det presentert en litteraturstudie for å ha oversikt over dagens kunnskapsnivå, både når det gjelder praktiske erfaringer og relevant teori.

1.4. Omfang og begrensninger

Masteroppgaven inkluderer analyser av felldata, endelig elementmetode-analyse (FEM-analyse), analytiske metoder og en empirisk metode. Felldata er fra et spesifikt prosjekt i Trøndelag. Dette innebærer at analyse og funn ikke nødvendigvis er relevant for alle steder hvor det kalk-/sementstabiliseres. Grunnforhold kan variere mye og resultatene avhenger av stedsspesifikke jordegenskaper.

Det ble lagt stor vekt på FEM-analyse med Plaxis 2D. Modelleringen besto av installasjon av kun én pel, og både grunnforhold og KS-pel var idealisert. I praksis er det imidlertid vanlig å installere mange kalk-/sementpeler nær hverandre innenfor et relativt kort tidsrom. Den samme begrensningen gjelder de analytiske metodene som er anvendt.

Deler av erfarings- og analysegrunnlaget er fra ulike land i Asia. Her er grunnforhold og forutsetninger annerledes. Blant annet er det vanlig å bruke *våt* dypstabilisering, mens det i Norge vanligvis er snakk om *tørr* dypstabilisering.

1.5. Struktur

Rapporten er bygd opp med hovedkapitler og underkapitler. Første kapittel etter innledningen er en litteraturstudie hvor bakgrunn, tidligere erfaring og teori som har betydning for emnet er fremstilt. Deretter følger et kapittel som presenterer VA-prosjektet på Sluppen, så tre resultatkapitler som presenterer resultater fra FEM-analyse, analytiske og empiriske løsninger og feltmålinger. Etter resultatene følger et diskusjonskapittel som diskuterer resultatene hver for seg og i sammenheng. Til sist finnes kapitlet for konklusjon og kapitlet for forslag til videre arbeid om samme tema.

I kapittel 2.2 om kalk-/sementstabilisering og erfaringer med poreovertrykk, er store deler av innholdet hentet fra forfatters prosjektoppgave høsten 2018. Andre deler av teoribakgrunnen har også hentet inspirasjon fra denne.

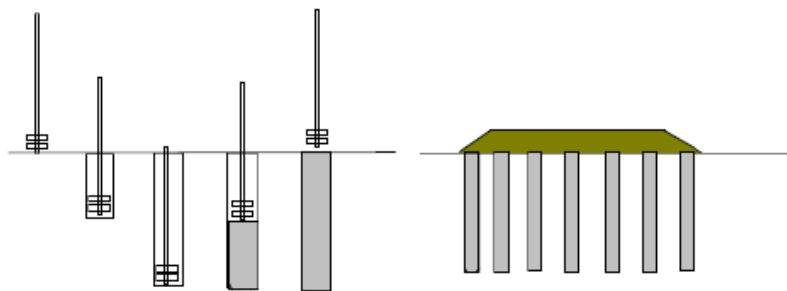
2. Litteraturstudie

Dette kapittelet inneholder bakgrunnsinformasjon om kalk-/sementstabilisering og relevant teori. I tillegg presenteres tidligere erfaringer om poreovertrykk ved kalk-/sementstabilisering.

2.1. Kalk-/sementstabilisering

Ved behov for å bedre stabilitet og bæreevne, og for å redusere setninger i bløt og sensitiv leire, kan det brukes kalk-/sementstabilisering (KS-stabilisering). Det er den mest brukte grunnforsterkningsmetoden i Skandinavia. Metoden kalles ofte *dry soil mixing* på engelsk (Karstunen, 2014). KS-stabilisering har flere bruksområder. Blant annet kan det brukes til å stabilisere naturlige skrånninger, fyllinger og skjæringer. Det brukes også til stabilisering mellom spunter i avstivede byggegroper og stabilisering av grøfter. I tillegg brukes det som setningsreducerende lastbæring og vibrasjonsdemping ved for eksempel jernbanekonstruksjoner (Norges geotekniske forening, 2012)

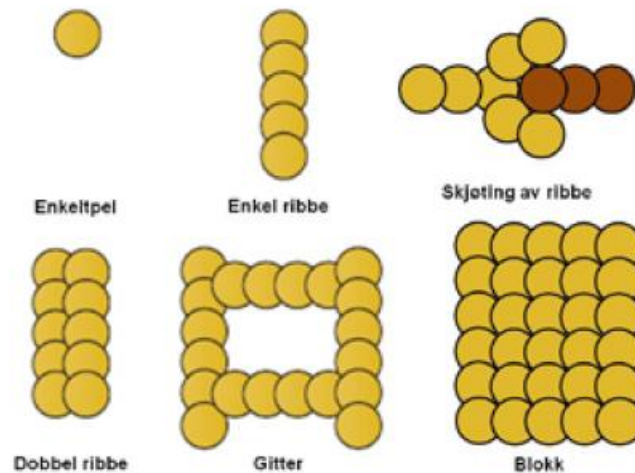
Hovedprinsippet ved KS-stabilisering er at et bindemiddel, gjerne kalk og sement, blandes inn i leira ved hjelp av et påsatt lufttrykk, installasjonstrykket, og en roterende visp. Vispen roteres og presses først ned til nederste nivå av kalk-/sementpelen (KS-pelen). Deretter blåses bindemiddelet inn samtidig som vispen roteres opp til overflaten. Innblåsing av bindemiddel avsluttes gjerne noe under overflaten (Norges geotekniske forening, 2012). Installasjonsprinsippet er illustrert i Figur 1. Bindemiddelet inngår i forskjellige kjemiske reaksjoner med leira som over tid fører til en fasthetsutvikling i jordvolumet (Statens vegvesen, 2014).



Figur 1 Prinsippskisse KS-stabilisering (Andersson og Karlström, 2010)

Det vanligste er å bruke kalk og sement som bindemidler, og et blandingsforhold på 50/50 er ofte gunstig. Det er også mulig med andre bindemidler, for eksempel Multicem i tillegg til sement. Pelene kan settes i ulike mønstre, alt etter ønsket virkemåte og behov. Det kan installeres enkeltpeler, enkle- eller doble ribber, gitter eller blokker. Mønstrene er illustrert i Figur 2. Ribber brukes ofte for stabilisering av skrånninger, skredgroper og byggegroper. Enkeltpeler kan bli brukt som setningsreducerende tiltak, mens blokker kan bli brukt som fundamentering av for eksempel broer (Norges geotekniske forening, 2012)

KS-stabilisert leire får økt skjærfasthet og stivhet. KS-pelene samvirker med leira, slik at de forbedrede egenskapene vil gjelde for hele jordvolumet (Andersson og Karlström, 2010; Norges geotekniske forening, 2012). Om en eventuell bruddflate i en skråning skjæres over av en KS-pel eller -ribbe, kan det hindre at skråningen går til brudd ved denne bruddflaten (Karstunen, 2014).



Figur 2 Installasjonsmønstre

En kan benytte både tørr og våt stabilisering. Ved tørr KS-stabilisering blåses bindemiddelet inn med lufttrykk. Dette er mest brukt i Skandinavia, fordi vanninnholdet i leira er høyt nok til at dette vannet kan nyttiggjøres i nødvendige kjemiske reaksjoner. Andre ganger kan det være nødvendig å benytte våt dypstabilisering. Da blåses en "slurry" med både vann og bindemiddel inn i jordvolumet. Dette er for eksempel mye brukt i Japan og Polen (Karstunen, 2014).

2.1.1. Poreovertrykk ved KS-stabilisering

På grunn av at bindemiddel blåses inn med et høyt trykk (lufttrykk eller *slurrytrykk*), samtidig som en visp rører om jorda, er poretrykksøkning en mulig installasjonseffekt ved KS-stabilisering (Andersson og Karlström, 2010). Økt poretrykk påvirker stabiliteten negativt, grunnet at kontaktkreftene mellom kornene blir redusert, effektivspenningene minker. Når poretrykket øker, vil derfor sikkerheten til skråninger reduseres. I skråninger med lav sikkerhet vil dette derfor være viktig å ta hensyn til, da svekking av stabilitet kan gi utrasing (Norges geotekniske forening, 2012). Tilleggsporetrykk vil spre seg ut til siden. Det er svært ulik erfaring med hvor lang tid det tar før et økt poretrykk eventuelt har dissipert tilbake til utgangsnivå. Dette kan ta lang tid (flere år) eller kort tid (få timer), alt etter dreneringsegenskapene til jordartene og hvor stort tilleggsporetrykk som bygges opp. Hvor stort influensområdet for økt poretrykk er, vil også variere. KS-peler vil på sikt virke drenerende og øke konsolideringsegenskapene. Ofte benyttes tiltak for å redusere tilleggsporetrykket ved KS-stabilisering, som for eksempel vertikaldren (Eggen, 2012).

Hvor stort poreovertrykk som aksepteres vil variere fra sted til sted og kommer an på initiell sikkerhet og konsekvens ved brudd. Poretrykket kan maksimalt bli lik den vertikale overlagingen, da vil effektivspenningen, σ' , bli 0. Effektivspenning er definert i ligning (2-1) (Terzaghi (1923, som sitert i Janbu 1997)).

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2-1)$$

hvor: σ (kPa) er totalspenning

u (kPa) er poretrykket

Erfaring med poretrykksøkning ved tørr KS-stabilisering

Ifølge Eggen (2012), har de fleste prosjekter med KS-stabilisering og måling av poretrykk under installasjon, registrert en økning i poretrykket. Det aller første prosjektet med grunnforsterkning i Norge, i Rissa på 1970-tallet, viste poretrykksøkninger i omliggende leire. Her var det kun brukt kalk som stabiliseringsmiddel. Det ble ikke registrert markante poretrykksøkninger da det var pause mellom installasjon av grupper av peler. Her tok det flere måneder før poretrykket var tilbake til utgangsnivået. Giske forklarer poretrykksøkningen med kjemiske reaksjoner mellom leira og stabiliseringsmiddelet (Giske, 1978).

Også mange av Statens vegvesens nyere prosjekter med KS-stabilisering viser poretrykksøkninger. Dette gjelder for eksempel grunnforsterkning på E18 i Kristiansand i 2001, KS-peling på E6 i Østfold mellom Solberg og Årum rundt 2008 og på Frescoveien i Østfold i 1995 (Statens vegvesen, 2001, 1995, 2008). Det første eksempelet ble det registrert "markant økning av poretrykk i forbindelse med peleinstallasjon" (Statens vegvesen, 2001, s. 8). Her økte poretrykksnivået med inntil 30kPa, men gikk raskt tilbake til opprinnelig nivå. Dette kunne også observeres for E6 Solberg-Årum.

I forbindelse med KS-stabilisering i Sverige i 2009 gjorde Andersson og Karlström (2010) studier som innebar målinger av poretrykk i dagene før, under og etter installasjon av KS-peler. Poretrykket er logget én gang om dagen og det er registrert poretrykksøkning på 0-7kPa de dagene det er gjort peleinstallasjoner.

På grunn av erfaring med poretrykksøkning ved KS-stabilisering, er det i mange prosjekter utvist stor forsiktighet ved installasjon av KS-peler. Ofte installeres for eksempel hver femte rad før det fortettes med KS-peler imellom. Dette ble gjort ved utbygging av E18 Bommestad-Sky i Vestfold (Dahl, Bodholt og Oset, 2016). Det samme ble også gjort i forbindelse med utbygging av E6 på Klett sør for Trondheim. Dette prosjektet er beskrevet senere i kapittelet. En kan også installere vertikaldren for å redusere poretrykket. Dette ble gjort for E18-prosjektet i Kristiansand. Her ble det ikke registrert økt poretrykk lengre unna enn 5m-6m fra installasjon av KS-peler. Poreovertrykksverdier opp mot det kritiske, som i dette tilfellet var 20kPa, ble først oppnådd i avstand 1m-2m. Poreovertrykket var dissipert til normal verdi etter 4-5 døgn (Dahl, Bodholt og Oset, 2016).

Johansson (1998) rapporterer om blant annet poretrykksforandringer for et kalksement-stabiliseringsprosjekt i Bohus i Sverige på 1990-tallet. Her er poretrykk målt både manuelt og automatisk under installasjon av KS-peler og i ettertid. Det konstateres blant annet at:

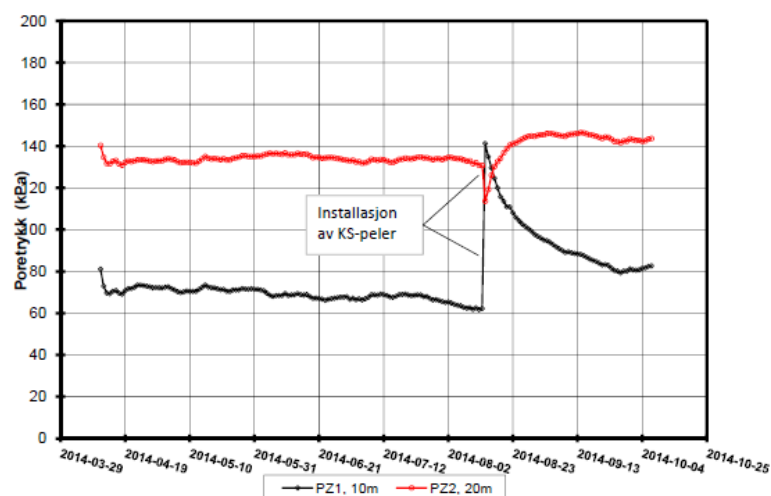
- Poretrykket øker kraftig og umiddelbart ved installasjon av KS-peler
- Det måles størst poretrykk nært installerte KS-peler og tilleggsporetrykket reduseres med avstand til installerte KS-peler
- Det kan ikke finnes noen tidsforsinkning med avstand fra installerte KS-peler
- Poretrykket går sakte ned igjen, men det skjer raskest i begynnelsen
- Ved installasjon av flere KS-peler etter hverandre øker poretrykket på nytt i tillegg til at influensområdet øker i størrelse.
- Etter omtrent ett år var poretrykket utjevnet på grunne dybder (ned til ca. 10m), men ikke i dypet (15-20 meters dybde). Her var fremdeles poreovertrykket på 1-1,5 meter.

I dette prosjektet var det brukt konvensjonelt utstyr, og pelene var satt med et lufttrykk på 420-450kPa i dypet og med lavere trykk lengre oppe (Johansson, 1998).

Det må også nevnes at det finnes KS-stabiliseringsprosjekter uten registrert økning i poretrykket. Som eksempel kan nevnes en utglidning som ble forsiktig stabilisert i Bærum (årstall ukjent), hvor poretrykk ble logget, men ingen økning registrert (Eggen, 2012).

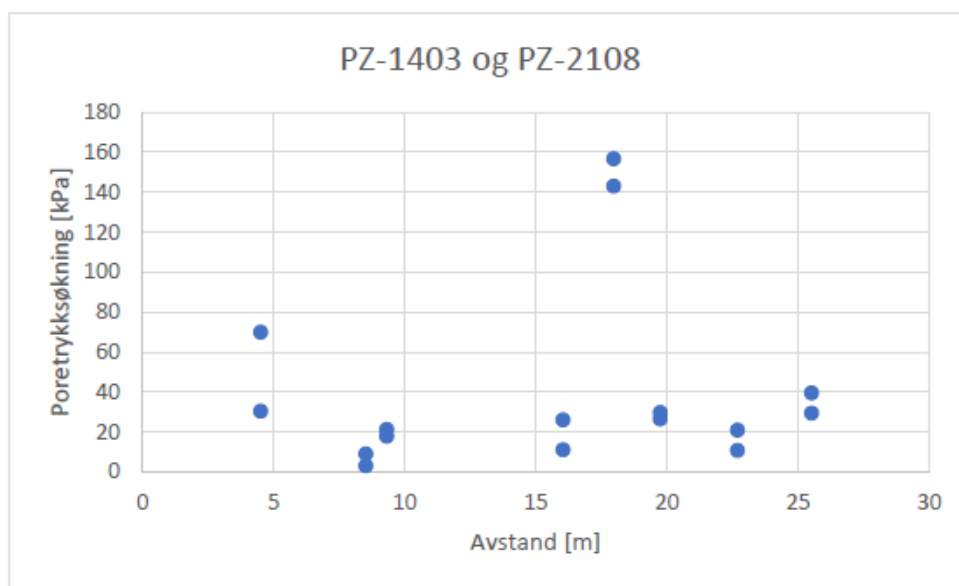
Erfaring fra E6-prosjekt på Klett

I forbindelse med utbygging av E6 sørover fra Trondheim som åpnet 19. desember 2018 (Miljøpakken, 2018), ble det gjort et omfattende stabiliseringsarbeid med KS-peler. På forhånd ble det anlagt et forsøksfelt hvor KS-peler ble installert og poretrykket målt under installasjon og en stund etter. KS-peler ble installert 13. og 14. august 2014. Pellengden var 15m med 0,5m blindboringsdybde. To poretrykksmålere i 10m og 20m dybde var installert omtrent 4m unna nærmeste testpel (Norges geotekniske institutt, 2014b). Poretrykksmålerne viste markante poretrykksøkninger i forbindelse med installering av KS-pelene. Måleren på -10m hadde en poretrykksøkning på ca. 80kPa og måleren på -20m hadde en økning på ca. 10kPa etter først å ha registrert et poretrykksfall. Poretrykksmåleren på -20m ligger 5m under underkant pel. Det er uvisst hvilket lufttrykk pelene er satt med, men det er sannsynlig at poretrykksøkningen 13. august delvis skyldes installasjon av KS-peler. Poretrykket var ikke redusert til opprinnelig nivå før etter omtrent to måneder (Norges geotekniske institutt, 2014a). Poretrykksutviklingen er vist i Figur 3.



Figur 3 Målt poretrykk fra forsøksfelt på Klett. Tilpasset fra (Norges geotekniske institutt, 2014b)

Forfatters prosjektoppgave fra høsten 2018 omhandlet poreovertrykk fra KS-stabilisering på Klett i forbindelse med E6-prosjektet. Tilgjengelig poretrykksdata og data fra KS-stabilisering ble analysert og relevante peler ble valgt. Det ble konkludert med at installasjon av KS-peler kan gi tilleggsporetrykk, og antydnet at tilleggsporetrykket er minkende med avstanden til de peler som er installert. I tillegg fant en at poretrykket ikke ble påvirket i en avstand større enn 20m unna pelene, og at en må ha en avstand mindre enn 5m for å få tilleggsporetrykk som påvirker stabiliteten i dette området. Tilleggsporetrykk for to av poretrykksmålerne (PZ-1403 og PZ-2108) er plottet mot gjennomsnittsavstand til relevante peler i Figur 4. Sannsynligvis er de to største verdiene for tilleggsporetrykk her grunnet noe annet enn KS-stabilisering, fordi det ikke var installert KS-peler nærmere enn 70m fra aktuell poretrykksmåler i denne perioden. Største poretrykksøkning som sannsynligvis er på grunn av KS-stabilisering, er på omtrent 70kPa.



Figur 4 Tilleggsporetrykk mot gjennomsnittsavstand til relevante peler.

Erfaring oppsummert

Det er velkjent og tas nesten alltid hensyn til at poretrykket kan øke ved KS-stabilisering. SVVs håndbok sier at kontroll bør inneholde poretrykkskontroll hvis det er relevant. Årsaken til dette er at poretrykket i grunnen kan øke, og det kan redusere stabiliteten (Statens vegvesen, 2014). Engeset (2018) nevner poretrykk i omliggende leire som et problem ved KS-stabilisering, uten å gå ytterligere inn på det. Det er imidlertid sjelden sagt noe om størrelser på poretrykksøkninger en kan forvente på forhånd, særlig når det gjelder tørr dypstabilisering. I erfaringsbanken for kalksementpeler fra Svensk Dypstabilisering på 1990-tallet, omhandler ingen av rapportene poretrykk spesifikt (Edstam, 1997). På grunn av erfaringen med at poretrykket ofte øker under installasjon, blir det for en del prosjekter installert poretrykksmålere for å overvåke poretrykket i anleggsfasen. Dette ble også gjort i prosjektet på Sluppen, se kapittel 3, og det er disse dataene som er brukt videre i denne oppgaven.

2.2. Poretrykk og udrenerte lastsituasjoner

Poretrykksfordeling i jorda avhenger av mange faktorer, blant annet dreneringsegenskapene og lastsituasjonen. Om poretrykket tilsvarer vekten av ovenforliggende vann, har poretrykket en *hydrostatisk* fordeling, men dette er ikke alltid tilfellet. Grunnvannstanden er definert til den dybden hvor poretrykket er 0 (NTNU Geotechnical division, 2015).

Permeabilitet er en jordarts evne for vannstrømning og er blant annet bestemt av materialets porøsitet og kornfordeling. Permeabilitet uttrykkes ofte med permeabilitetskoeffisienten, k . Leire og silt har ofte lav permeabilitet, med k i intervallet 10^{-11}m/s - 10^{-5}m/s (NTNU Faggruppe for geoteknikk, 2018). For jordarter med lav permeabilitet, vil lastendringer over kort tid kunne være *udrenerte*. For slik "korttidsoppførsel" tar poretrykket det meste av lastendringen og jorda oppfører seg stivere enn ved drenert lastning.

$$\Delta p' = K \Delta \epsilon_v \quad (2-2)$$

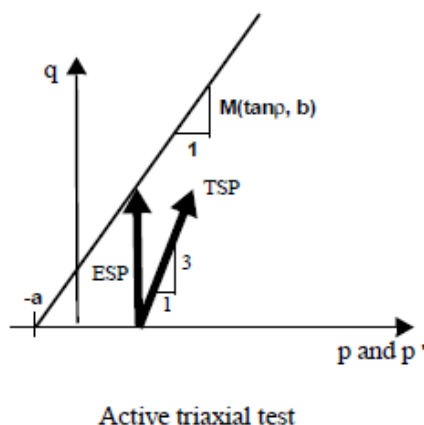
hvor: $\Delta p'$ (kPa) er effektiv middelspenning

ϵ_v er volumtøyning

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}. \nu \text{ er tverrkontraksjonstallet.}$$

Hooks lov for tre dimensjoner gir en sammenhengen mellom effektiv middelspenning og volumtøyning gitt i ligning (2-2). Med antagelse om fullt mettet jordart og inkompressibelt vann, vil en udrenert lastendring ha null volumendring. Det vil si at $\Delta \sigma' = 0$ når $\Delta \epsilon_v = 0$ etter Hooks lov. Volumendringer er alltid knyttet til endring i effektivspenninger. Dermed er endring i total middelspenning, Δp , lik endring i poretrykk, Δu , for udrenerte spenningsendringer. I et p - q -plott vil effektivspenningsstien for en udrenert lastendring for et elastisk materiale være vertikal inntil den når Mohr-Coulomb-linjen, se Figur 5. Totalspenningsstien vil ha en helning 1:3 og poretrykket er etter definisjonen av effektivspenning i ligning (2-1) differansen mellom spenningsstiene. Udrenert analyse ble tradisjonelt gjort med totalspenningsanalyse, men nå er det også vanlig å bruke effektivspenningsparametere.

Informasjon og ligninger i avsnittene over er hentet fra (Nordal, 2015).



Figur 5 Effektiv- og total spenningssti p - q -plott. Tilpasset fra (Nordal, 2015).

2.2.1. Poretrykkligninger og poretrykksparametere

Skemptions poretrykkligning

Skempton (1954) utrykte samlet poretrykksendring for udrenerte situasjoner som i ligning (2-3).

$$\Delta u = B(\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)) \quad (2-3)$$

hvor: $\Delta\sigma_3$ er aksialspenningen

$\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$ er deviatorspenningen.

Parameterne B og A er gitt av ligning (2-4) og (2-5)

$$B = \frac{\Delta u_a}{\Delta\sigma_a} \quad (2-4)$$

$$A = \frac{\Delta u_d}{\Delta\sigma_d} \quad (2-5)$$

For mettet aksiallast blir B=1 for en udrenert lastsituasjon, fordi poretrykket tar all spenningsendring. For elastiske jordarter er $A = \frac{1}{3}$. Da er poretrykksendringen kun gitt av middelspenningen. Når $A \neq \frac{1}{3}$, har skjærspenningen også påvirkning på poretrykket. For kontraktante materialer, hvor poretrykket stiger når materialet går mot brudd, øker A. Dette er vanlig for jordarter som kvikkleire og andre flyteskredmaterialer. Dilatante materialer vil på den andre siden få redusert poretrykk når det går mot brudd og dertil en redusert A (Janbu, 1970). Skempton (1954) foreslår omtrentlige intervaller for A for forskjellige typer leire. Disse er gjengitt i Tabell 1.

Tabell 1 Verdier for poretrykksparameteren A, etter (Skempton, 1954)

| Type leire | A |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Høysensitive leirer | $\frac{3}{4} - 1 \frac{1}{2}$ |
| Normalkonsoliderte leirer | $\frac{1}{2} - 1$ |
| Kompakterte sandige leirer | $\frac{1}{4} - \frac{3}{4}$ |
| Lett overkonsoliderte leirer | $0 - \frac{1}{2}$ |
| Kompakterte leire-grus | $-\frac{1}{4} - \frac{1}{4}$ |
| Sterkt overkonsoliderte leirer | $-\frac{1}{2} - 0$ |

Janbus poretrykkligning

Både endring i middelspenning og endring i skjærspenning kan gi endring i poretrykket. Janbu skrev om Skemptions poretrykkligning, slik at det er middelspenningen som har

betydning for poretrykket. Poretrykksendring, Δu , er gitt i Janbus poretrykksligning er gitt i ligning (2-6) (Janbu, 1976).

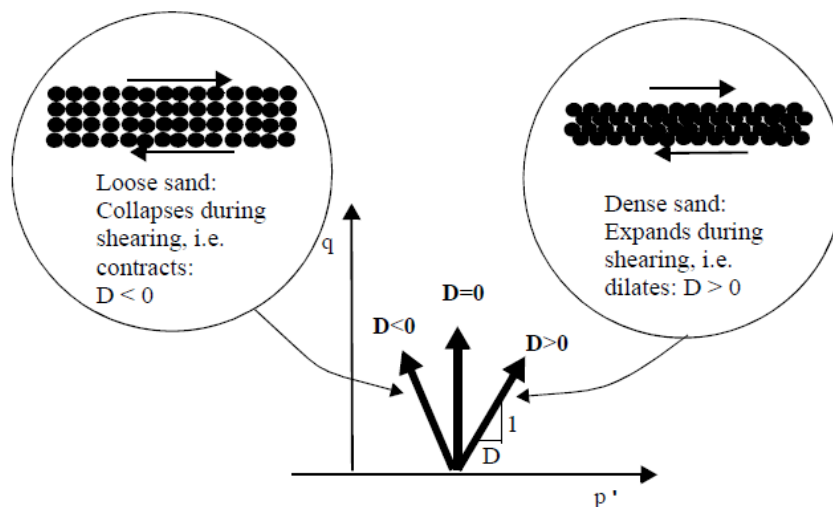
$$\Delta u = \Delta p - D\Delta q \quad (2-6)$$

hvor: Δp er endring i middelspenning

D er Janbus poretrykksparameter

Δq er endring i skjærspenning

Middelspenningsendring gir økt, eller redusert, poretrykk, uavhengig av materialet forøvrig. Når det gjelder endring i skjærspenning, vil poretrykksreaksjonen avhenge av om materialet har kontraktant eller dilatant oppførsel, det vil si materialets tendens til å redusere eller øke volumet når det går mot brudd. Dette påvirker poretrykket. Et kontraktant materiale ($D < 0$), vil ha en poretrykksøkning ved endring i skjærspenning på grunn av at kornene vil søke å være tettere sammen. For et dilatant materiale ($D > 0$), som vil søke å få en løsere struktur, vil endring i skjærspenning gi redusert poretrykk. Fortegnet på Janbus D -parameter tilsvarer fortegnetet til A i Skemptions poretrykksligning. Normalkonsoliderte leirer har ofte $D < 0$ og overkonsoliderte leirer har ofte $D > 0$ (Nordal, 2015). Fenomenet er illustrert i Figur 6 hvor helningen i p' - q -diagrammet er dilatansparameteren, D . Hvis $D = 0$ har man et rent elastisk materiale og all poretrykksendring er på grunn av endring i middelspenning.



Figur 6 Illustrasjon av dilatans og kontraktans (Nordal, 2015).

Dilatansvinkel

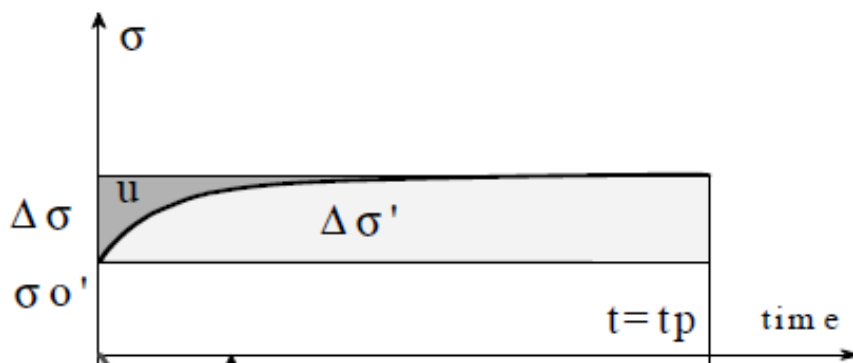
I endelig elementmetodeprogrammer er det dilatansvinkelen ψ ($^\circ$) som blir brukt til å uttrykke dilatansen til et materiale. Det er ikke generell sammenheng mellom dilatansvinkelen ψ og poretrykksparameteren D , selv om fortegnet er det samme og det får samme betydning for materialoppførselen. Dilatansvinkelen ψ er knyttet til plastisk brudd (Nordal, 2015). Generelt sett er dilatansvinkelen mye lavere enn friksjonsvinkelen og for mange jordarter tilnærmet lik null. Sterkt overkonsoliderte jordarter kan ha

dilatansvinkel forskjellig fra null. Dilatansvinkelen er blant annet avhengig av densiteten og friksjonsvinkelen (Brinkgreve, Swolfs og Kumarswamy, 2017).

2.3. Klassisk konsolideringsteori

Det er ifølge Janbu (1970) to måter å forklare konsolidering på. Først den klassiske, hvor konsolidering er forårsaket av poreovertrykk som gir utpressing av porevann. I tillegg finnes den reviderte måten hvor restdeformasjonsgradienten bidrar til å drive ut porevann. For et udrenert lasttilfelle, vil en lastendring i all hovedsak bæres av økt poretrykk i starten. Et positivt tilleggsporetrykk i jorda vil i løpet av en tid dissipere på grunn av poretrykksgradienten. Konsolideringen varer til alt poreovertrykk er dissipert, og poretrykket er tilbake til initialtilstand. Da er primær konsolideringstid over, og det er ingen poretrykksgradient. Konsolidering er illustrert Figur 7. Tiden det tar for poreovertrykk å dissipere er avhengig av hvor lang drenasjeveien, H (m), er i tillegg til jordas evne til å drenere vann, permeabiliteten, gitt blant annet av konsolideringskoeffisienten c_v ($m^2/\text{år}$). c_v avhenger både av fastheten og stivheten til jorda og er gitt ved (2-7) hvor k ($m/\text{år}$) er permeabiliteten, M (kPa) er ødometerstivheten og γ_w (kN/m^2) er tyngdetettheten til vann.

$$c_v = \frac{k \cdot M}{\gamma_w} \quad (2-7)$$



Figur 7 Konsolideringsforløp (Tilpasset fra Nordal, 2015)

En overslagsformel for tiden for primærkonsolideringen, t_p (år) er gitt i ligning (2-8).

$$t_p = T_p \frac{c_v}{H^2} \quad (2-8)$$

hvor: $T_p = \frac{t}{t_p} = 1$ ved endt primærkonsolidering (Janbu, 1970).

Konsolidering kan beskrives med differensialligninger og de ble utledet av Terzaghi. Ligning (2-9)-(2-11) er hentet fra (Nordal, 2015). Differensialligningen for endimensjonal konsolidering er gitt i ligning (2-9) og for tredimensjonal konsolidering i ligning (2-10).

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2-9)$$

$$c_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + c_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2-10)$$

hvor: u er poretrykk,

t er tid og

x,y og z er koordinater.

Differensialligningene er basert på kontinuitetsligningen for strømning, Darcys lov, definisjonen av jords stivhet og effektivspenningsprinsippet.

En konsolideringssituasjon rundt en installert KS-pel vil ideelt sett være aksesymmetrisk og det vil være mer hensiktsmessig å bruke differensialligning med polarkoordinater slik som gitt i ligning (2-11).

$$c_h \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right] + c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2-11)$$

hvor: u er poretrykk,

r og z er koordinater (polart) og

t er tid.

Konsolideringskoeffisienten er antatt å være konstant for jordvolumet i differensialligningene, men avhenger av spenningsnivået. Det er mulig å finne konsolideringskoeffisienten c_v fra konsolideringskurver. Om en videre antar endimensjonal konsolidering, finnes noen metoder for å finne konsolideringskoeffisienten. Taylors metode (Taylor (1948, sitert i (Janbu, 1970)) er en av disse metodene. Her brukes t_{90} (90% konsolidert) som mål for konsolideringstiden og c_v er dermed gitt i ligning (2-12).

$$c_v = T_{90} \frac{H^2}{t_{90}} \quad (2-12)$$

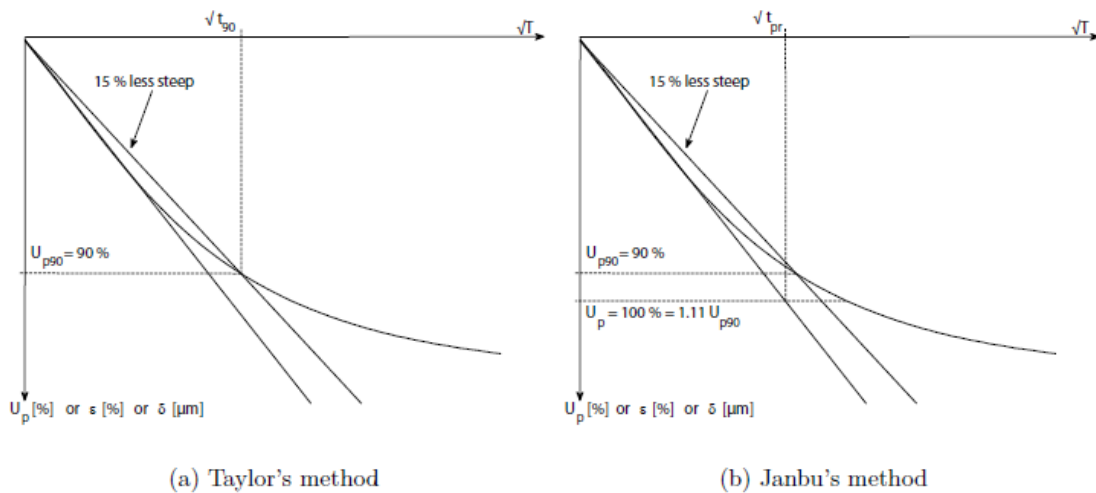
hvor: $T_{90}=0,848$. Janbu foreslår selv en metode for å finne c_v basert på konsolideringsgrad lik 1. Janbus metode for c_v er gitt i ligning (2-13).

$$c_v = \frac{\pi H^2}{4 t_{pr}} \quad (2-13)$$

Janbu (1970) skriver selv dette om hvordan en skal gå frem for å finne t_{90} og t_{pr} :

En konstruksjon foreslått av D.W. Taylor (1948), med helning 1:1,15 fra nullpunktet bestemmer 90% av primærkonsolideringen ved kurveskjæringen. Herav kan 100% primærkonsolidering fastlegges. Forlenger man den rette linje til skjæring med 100%-linjen avleses tiden t_{pr} , og (...) da er $U_p=1$, d.v.s. $T=\pi/4$ (Janbu, 1970, s. 206)

Metodikken for å finne t_{90} og t_{pr} er illustrert i Figur 8.



Figur 8 Illustrasjon til hjelp for å finne t_{90} (Taylors metode) og t_{pr} (Janbus metode) (NTNU Geotechnical division, 2015).

I Tabell 2 er det vist erfaringsverdier for c_v . Norske leirer har ofte c_v mellom $2 \text{ m}^2/\text{år}$ og $25 \text{ m}^2/\text{år}$. Bløt leire har lavest c_v . I Statens vegvesens erfaringsverdier står det at $c_v=0,5-15 \text{ m}^2/\text{år}$ for bløt leire (Statens vegvesen, 2018).

Tabell 2 Erfaringsverdier c_v (NTNU Faggruppe for geoteknikk, 2018)

| Beskrivelse | $c_v [m^2/\text{år}]$ |
|------------------------|-----------------------|
| Bløt leire | < 5 |
| Middels fast leire | 5-15 |
| Fast leire (OC-leirer) | 15-25 (-50) |
| Silt | opp mot 100 |
| Sand | flere 100 |

Merk: Tallene i denne tabell er ikke en å betrakte som en klassifisering men viser grovt hvilke områder man har å gjøre med.

2.4. Analytiske løsninger for tilleggsporetrykk

2.4.1. Cavity Expansion Method

Peleramming kan ifølge Bergset (2015) bli modellert som et sylindrisk hulrom (cavity) som utvider (expands) seg radielt, hvor all massefortregning skjer sirkulært utover fra pelen og fortregnt masse tilsvarer volumet av hulrommet. Dette kalles *Cavity Expansion Method*. Dette vil ifølge Randolph, Carter og Wroth (1979, som sitert i Bergset 2015) gi et tilleggsporetrykk som gitt i ligning

$$\Delta u = c_u \left[\ln \left(\frac{G}{c_u} \right) - 2 \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) \right] \quad (2-14)$$

hvor: c_u er udrenert skjærstyrke,

G er skjærmodulen,

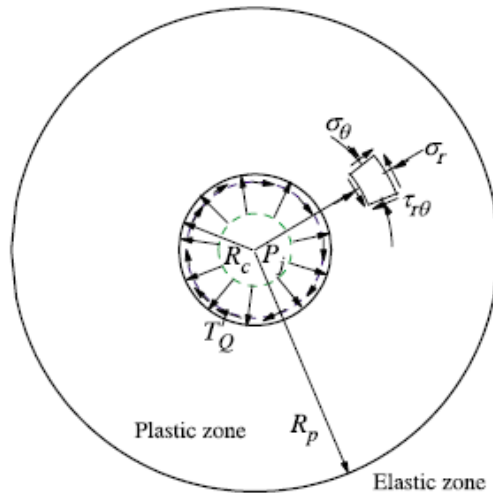
r_0 er radius til pelen og

r er avstanden fra senter av pelen.

Ligning (2-14) er gyldig innenfor plastisk sone ($r < r_p$). $r_p = r_0 \sqrt{\frac{G}{c_u}}$. For denne verdien av r vil Δu bli 0.

2.4.2. Shearing Expanding Method

Ved installasjon av en KS-pel skjer også det meste av trykk- og volumøkning radielt utover fra pelen. Samtidig er KS-pelens virkemåte er annerledes og det er derfor gjort forsøk på å modellere installasjon av KS-peler på en annen måte. Shen, Miura og Koga (2003) har modellert installasjon av våt dypstabilisering, og de utrykte poretrykksøkningen ved installasjon av «dry mixed columns» (KS-peler), basert på at det er to typer krefter som påvirker porevolumet – skjærkraften, T_Q , fra rotasjon av vispen og trykket, P_j , grunnet slurrytrykket (installasjonstrykket) bindemiddelet er blåst inn med. T_Q er maksimalt lik c_u , men er lavere når sensitiviteten er høy, og trykket virker i en sirkel fra dysen hvor det er blåst inn. Virkemåten til de ulike kreftene er illustrert i Figur 9 hvor likevekt av et element i et hulrom som utvides også er tegnet inn.



Figur 9 Prinsippskisse "shearing-expanding process" (Shen, Miura og Koga, 2003).

Poretrykksendringen er forskjellig i elastisk og plastisk sone. Påvirkningen fra installasjonen av KS-pelen vil være høyere i den plastiske sonen nært pelen. Den plastiske sonen vil bli større når det installeres flere peler på grunn av kumulativ effekt. Det er antatt at materialet oppfører seg elastisk-perfekt plastisk etter Mohr-Coulombkriteriet, at det er homogent og at det har isotropisk spenningstilstand. Installasjonen er også antatt å være en udrenert lastsituasjon, fordi installasjonen av pelene går relativt raskt (Shen, Miura og Koga, 2003). Poretrykksendringen for plastisk sone er gitt i ligning (2-15) og for elastisk sone i ligning (2-16).

$$\frac{\Delta u}{c_u} = \frac{\Delta p_c}{c_u} - 2 \ln\left(\frac{r}{R_c}\right) - \ln\left(\frac{1 + B_{rl}}{1 + B_{rt}}\right) - B_{rt} + 0,816 \alpha_f \quad (2-15)$$

$$\frac{\Delta u}{c_u} = 0,816 \alpha \left(\frac{R_p}{r}\right)^2 \quad (2-16)$$

hvor: Δu poretrykksøkningen,

c_u er den udrenerte skjærstyrken,

Δp_c gitt i (2-17) er forskjellen i trykk som hulromsveggen utsettes for,

r er radiell distanse fra midten av pelen,

R_c radiusen til det sylindriske hulrommet (KS-pelen),

R_p er radius til den elastiske sonen,

α_f er Henkels poretrykksparemete ved brudd og er gitt av ligning (2-18) og

α er Henkels poretrykksparameter for gitt spenningsnivå.

Det vises for øvrig til artikkelen for uttrykk for B_{rl} og B_{rt} .

$$\Delta p'_c = P_j - p_0 \quad (2-17)$$

hvor: p_0 er horisontalt jordtrykk.

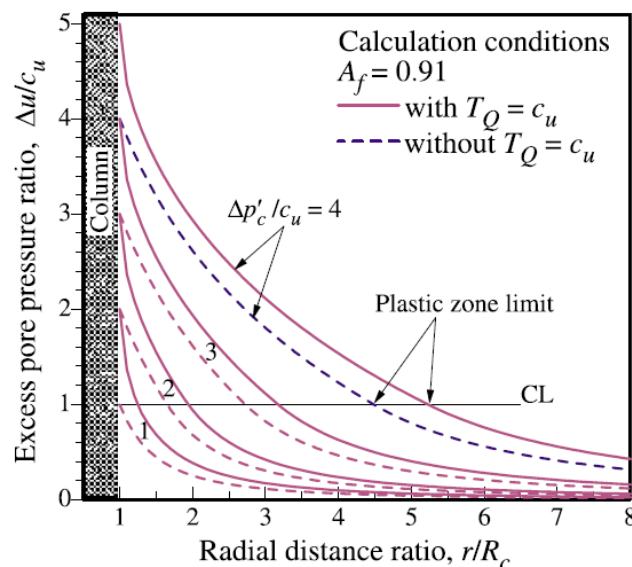
$$\alpha_f = 0,707(3A_f - 1) \quad (2-18)$$

A_f er Skemptions poretrykksparameter og tilsvarer A i kapittel 2.2.1. Shen, Miura og Koga (2003) gir en ligning for A_f som kan brukes om en ikke har data for A_f fra treaksialtester. Ligningen er gitt i ligning (2-19).

$$A_f = \frac{c_u}{p_0'} + \frac{1 - \sin \phi}{2 \sin \phi} \quad (2-19)$$

hvor: ϕ er friksjonsvinkelen.

Shen, Miura og Koga (2003) fant at både installasjonstrykket og skjærkraften påvirker hvor stort poretrykk som initieres i jorda. Poretrykket minker med avstand til den installerte KS-pelen. Dette er vist i Figur 10. Ved høyere installasjonstrykk, er det større poretrykksøkning i omliggende leire. Samtidig har skjærkraften også betydelig innvirkning på poretrykksendringen. I følge Shen, Miura og Koga (2003) stemmer denne analytiske metoden ganske godt overens med målte felt- og laboratedata for leire fra to forskjellige steder. Laboratorietestene viste noe bedre sammenheng enn felttestene. Det kommer frem av artikkelen at det oppnås tilleggsporetrykk på omtrent 95kPa ved feltforsøk på installasjon av våt dypstabilisering som høyeste verdi.



Figur 10 Poretrykksøkning vs. distanse fra pel (Shen, Miura og Koga, 2003).

I kapittel 5 er denne analytiske løsningen testet for feltdata fra Sluppen i Trondheim hvor det ble gjort KS-stabilisering.

Andersson og Karlström (2010) har sammenlignet den analytiske løsningen i ligning (2-15) med sin egen Plaxis-simulering. (Se mer om endelig elementmetodeprogrammet Paxis i kapittel 2.6). De oppnår dårlig overensstemmelse, men de har skrevet opp uttrykket for tilleggsporetrykket feil. Dette gjør at det er usikkert om de har brukt riktig eller gal ligning i utregningene.

2.5. Empirisk løsning

Zhang, Chen og Wang (2012) presenterte en empirisk metode for å simulere tilleggsporetrykk grunnet DSM-stabilisering (KS-stabilisering). Den empiriske løsningen er gitt i ligning (2-20) og den er utarbeidet ved matematisk tilpasning fra feltdata. I artikkelen *Simulation of Excess Pore Water Pressure During Deep Soil Mixing Column Installing* hevder de at poretrykkets utvikling (oppbygning og dissipasjon) grunnet installasjon av DSM-peler er komplisert når det installeres mange peler innenfor et tidsrom. Derfor er dette vanskeligere å simulere enn installasjon av kun én pel. I artikkelen påpekes viktigheten av å ha kunnskap om poretrykksøkningen ved KS-stabilisering, da det tidligere er målt høye poretrykk ved stabilisering.

$$p_i = \exp(2,99 - 0,499d_i + 0,004d_i^2) + 66,415 \exp\left(-\frac{d_i}{3,090}\right) - 3,68 + p_{i-1,t} \quad (2-20)$$

hvor: $p_{i-1,t} = p_{i-1} \left(0,73 + 0,27 \exp\left(-\frac{t_i 60}{282}\right)\right)$,

d_i (m) er distansen fra senter av KS-pelen til målepunkt,

i er totalt antall KS-peler installert,

t_i (min) er tiden mellom installasjonene,

$p_{i-1,t}$ (kPa) er tilleggsporetrykket for tiden t_i etter pel 1- i er installert og

p_i (kPa) er tilleggsporetrykket etter at pel i er installert.

Det er gjort in-situtester for å kunne si noe om utvikling av poretrykk. Resultatene viser god overensstemmelse med målte data. Testene ble gjort i bløt leire med laveste udrenerte skjærstyrke lik 11kPa, sensitivitet mellom 2,5 og 4 og lav permeabilitet. Poretrykket ble målt kontinuerlig mens peler ble installert. DSM-pelene for dette prosjektet er installert med våt metode. Det ble installert totalt 56 peler i sju rader og de var 24 meter dype med diameter på 0,85 meter. Installasjonen var kontinuerlig, men med pause mellom hver rad, slik at poretrykket her fikk tid til å dissipere. Masse ble tilført på nedadgående boring. Dette til forskjell fra normal metode i Skandinavia og dermed også feltdata fra prosjekter på Sluppen.

Det ble funnet at poretrykket økte når peler ble installert nærmere og nærmere. Og motsatt – når peler ble installert lengre og lengre unna, sank poretrykket. Dette tyder på at installasjon med kortere avstand til poretrykksmåler ga høyere poretrykk enn installasjoner med lengre avstand. I ligning (2-20) tas det hensyn til at det installeres

flere peler i forskjellige avstander med forskjellig tidsdifferanse. Det konkluderes blant annet med at poretrykksutviklingen er nært knyttet til installasjon av KS-peler. I kapittel 5.2 er ligningen testet for data fra prosjekt på Sluppen, selv om det her er brukt tørr dypstabilisering.

2.6. Plaxis og jordmodeller

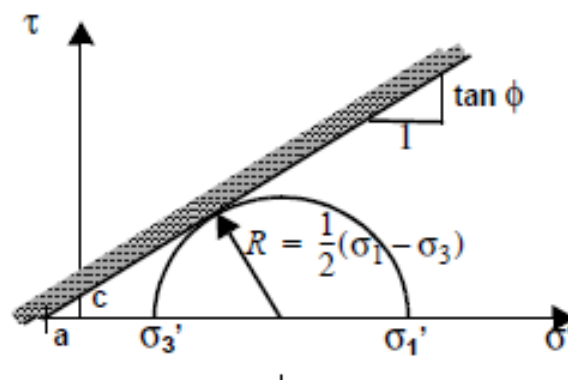
2.6.1. Elementmetoden og Plaxis

For ingeniørmessige problemstillinger blir ofte tilnæringsmetoden endelig elementmetode (FEM) brukt i beregninger, også i geoteknikk. Jordvolumet blir delt i et visst antall elementer med et gitt antall noder. Oppførselen til hvert element blir summert ved numerisk og matematisk integrasjon og slik finner en tilnærmede svar på respons fra laster. Oppførselen til hvert element blir beskrevet med oppførselen til hver av nodene. Elementene kan ha forskjellig form og er gjerne firkantede eller trekantede (Nordal, 2015).

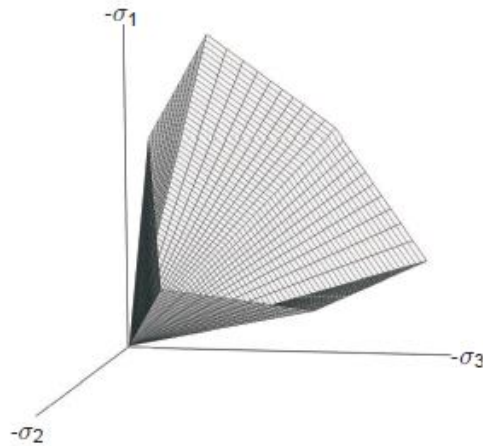
For geotekniske problemer som for eksempel stabilitets-, deformasjons- og strømningsanalyse kan det todimensjonale endelige elementmetodeprogrammet Plaxis 2D brukes (Brinkgreve, Swolfs og Kumarswamy, 2017). Problemene kan modelleres som plan tøyning eller aksesymmetriske situasjoner, og det er flere ulike jordmodeller tilgjengelig. Brukeren definerer et tverrsnitt, tilpasset problemet, i tillegg til inngangsdata (*inputparametere*) for løsmasser og ytre laster. Dette gjøres i programmet Plaxis Input. Plaxis genererer et nett med trekantede elementer (*mesh*) som brukes til å tilnærme en numerisk løsning på problemet. Elementene kan velges til 6-noders eller 15-noders. Det er å foretrekke å bruke 15-noders-elementer for de fleste geotekniske problemer. I Plaxis Input bestemmes også de ulike *byggefase*ne der hvert byggetrinn modelleres. Resultatene kan bli presentert og analysert på forskjellige måter i programmet Plaxis Output. En må også velge hvilke jordmodeller som skal benyttes.

Informasjon i kapittel 2.6.2 og 2.6.3 er i stor grad hentet fra Plaxis 2Ds brukermanual (Brinkgreve, Swolfs og Kumarswamy, 2017).

2.6.2. Mohr-Coulomb



Figur 11 Mohr-Coulombkriteriet i τ - σ' -diagram (Nordal, 2015).



Figur 12 Yield surface i hovedspenningsrom (Brinkgreve, Swolfs og Kumarswamy, 2017).

Styrkekriteriet som vanligvis er brukt i geotekniske beregninger er Mohr-Coulombkriteriet. Det er gitt i ligning (2-21) og baserer seg på effektivspenninger. a (c) og $\tan\phi$ er kurvetilpasningsparametere og også input i Plaxis 2D. Mohr-Coulomb-modellen er en lineært elastisk perfekt plastisk modell. Den lineært elastiske delen er basert på Hooks lov og den perfekt plastiske delen er Mohr-Coulombs bruddkriterium. Jord oppfører seg sjelden lineært, men Mohr-Coulomb-modellen fungerer ofte bra, særlig for en førstehåndstilnærming. Bruddkriteriet er også illustrert i Figur 11.

$$\tau_f = c + \sigma' \tan\phi = (a + \sigma') \tan\phi \quad (2-21)$$

hvor: τ_f er skjærspenning ved brudd,

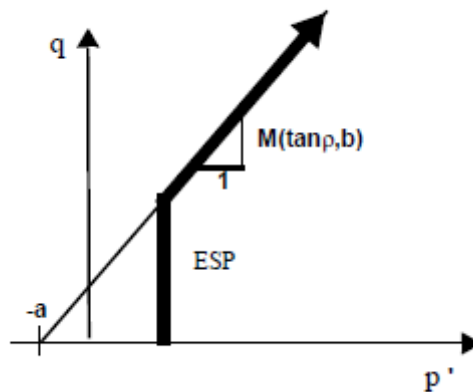
c er kohesjonen,

σ' er effektivspenning,

ϕ er friksjonsvinkelen og

a er attraksjonen

Coulomb-linjen kan også plottes i et p' - q -plot hvor effektiv middelspenning $p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$ og deviatorspenning $q = \sigma'_1 - \sigma'_3$. Et slikt plott kan være nyttig for å studere poretrykk og effektivspenningsstier. Blant annet kan en se at hvis effektivspenningsstien fra et treaksialforsøk går nedover etter å ha truffet Coulomblinjen, er $\psi < 0$ og materialet er kontraktant. Motsatt – hvis spenningsstien går oppover langs Coulomblinjen etter å ha truffet den, er $\psi > 0$ og materialet er dilatant. Effektivspenningsstien til et dilatant materiale er vist i Figur 13. Slik kan en ut fra en treaksialtest vite om materialet har positiv eller negativ dilatans og dermed få kunnskap om forventet poretrykk (Nordal, 2015).



Figur 13 Effektivspenningssti for dilatant materiale (Nordal, 2015). Effektivspenningen ville gått nedover langs Coulomblinjen for kontraktant materiale

Input for Mohr-Coulombmodellen i Plaxis 2D inkluderer Youngs modulus (E), Poissons tallet (ν), kohesjon (c), friksjonsvinkel (ϕ) og dilatansvinkelen (ψ). Dette er parametere som vanligvis finnes med vanlige grunnundersøkelser i forbindelse med prosjekter (Brinkgreve, Swolfs og Kumarswamy, 2017).

Thakur (2007) viser en sammenheng mellom poretrykksvariasjoner på grunn av endring i skjærtøyning for jord som oppfører seg etter Mohr-Coulombkriteriet. Poretrykksvariasjonen er blant annet avhengig av dilatansvinkelen. Sammenhengen er gitt i ligning (2-22)

$$M_{pw} = \frac{dp_w}{d\gamma} = \frac{G}{(\sin\phi + \frac{1}{\alpha \cdot \sin\psi})} \quad (2-22)$$

hvor: dp_w er poreovertrykk,

$d\gamma$ er endring i skjærtøyning,

G er skjærmodulen,

ϕ er friksjonsvinkelen,

ψ er dilatansvinkelen og

α er en elastisk modul som varierer mellom 1 og 5.

Ifølge Thakur (2007) blir variasjonen av poretrykk mer betydelig ved negative verdier for dilatansvinkelen, og at innenfor -5° er variasjonen stort sett lineær.

2.6.3. Hardening Soil Model

Jordmodellen Hardening Soil er også en elastoplastisk modell, men ikke lineært plastisk. Modellen ble fremlagt av Schanz, Vermeer og Bonnier (1998) og bygger på klassisk plastisitetsteori, men med *yield surface* som utvider seg på grunn av plastiske tøyninger.

Bruddkriteriet er gitt av Mohr-Coulomb beskrevet i kapittel 2.6.2. Stivheten, gitt i ligning (2-23), som er noe forenklet og hentet fra (Nordal, 2015), er avhengig av effektivspenningen. Dette gir økt stivhet med dybden. En får økende plastiske tøyninger både ved trykklastning og deviatorisk lastning ved at *cone* og *cap* utvides. Cap og cone er illustrert i et p'q-plot i Figur 14 og *yield surface* er illustrert i hovedspenningsrom Figur 15. Ved avlastning og rebelastning er oppførselen elastisk. Totale tøyninger er summen av elastiske og plastiske tøyninger. Plastiske volumtøyninger er knyttet til dilatansvinkelen, ψ , og denne øker med mobiliseringsgraden i *Hardening Soil*. Det er anbefalt å ikke bruke $\psi < 0$, da dette kan gi numeriske problemer (Brinkgreve, Swolfs og Kumarswamy, 2017). Dette vil imidlertid ikke ha noe å si når modellen ikke går til brudd.

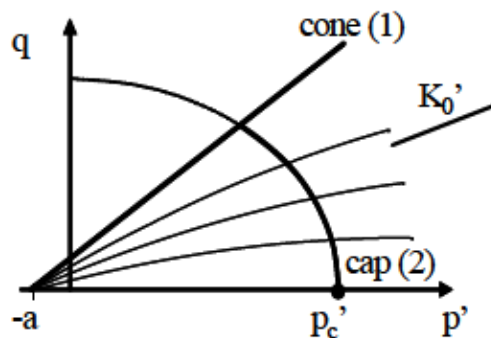
$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{\sigma_3' + a}{p_{ref} + a} \right)^m \quad (2-23)$$

hvor: $p_{ref}=100\text{kPa}$ er referansetrykket,

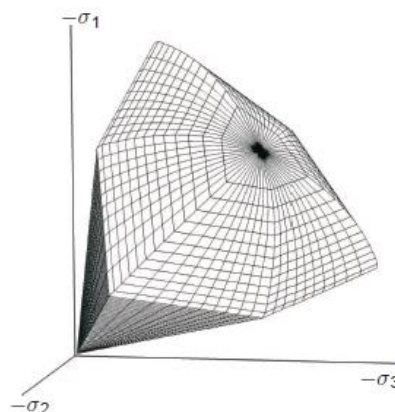
a er attraksjon og

σ_3' er minste effektive hovedspenning (vanligvis negativ, da trykk er negativt i Plaxis).

Eksponenten m er vanligvis 1 for leire. E_{50}^{ref} er referansestivheten og er *input* i Plaxis i tillegg til stivhetsparameterne E_{oed}^{ref} og E_{ur}^{ref} . Av parameterne i *Hardening Soil* er bruddparameterne kohesjon, c , friksjonsvinkel, ϕ , og dilatansvinkel, ψ , tilsvarende som for Mohr Coulomb-modellen.



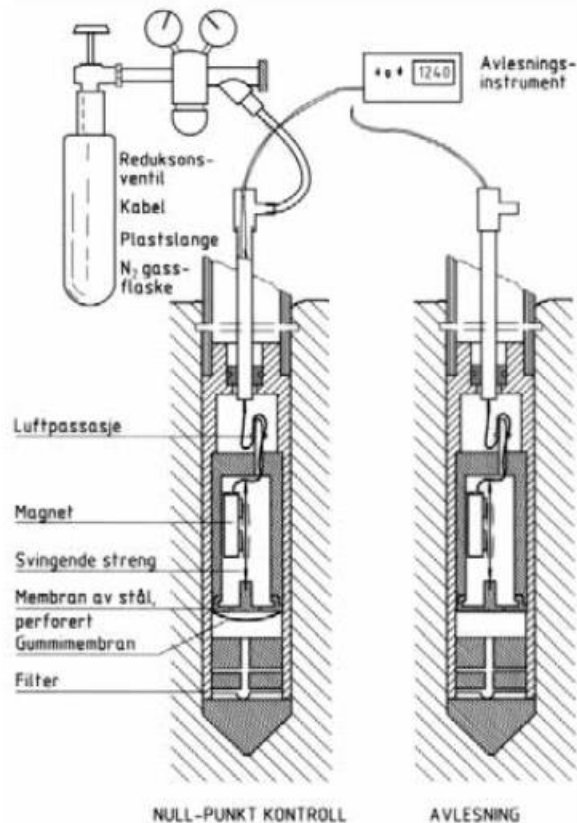
Figur 14 Yield surfaces (*cap* og *cone*) for *Hardening Soil* Model i p'q-plot. Tilpasset fra (Nordal, 2015).



Figur 15 Yield surface i hovedspenningsrom (Brinkgreve, Swolfs og Kumarswamy, 2017)

2.7. Poretrykksmåling – om piezometre

I KS-stabiliseringsprosjekter måles ofte poretrykk for å kontrollere stabiliteten. Poretrykksmålinger kan utføres med forskjellige måleinstrumenter, for eksempel hydrauliske eller elektriske piezometere. Statens vegvesen anbefaler å bruke elektriske piezometere når en vil fange opp hurtige endringer i poretrykket (Statens vegvesen, 2018). Et elektrisk piezometer fungerer ved at det presses ned i bakken hvor det måler potensialet og det genereres elektriske signaler. I Figur 16 er det skissert et elektrisk piezometer. I piezometeret er det et trykkammer med en stålmembran som deformeres når trykket i porevannet endres. En vibrerende ledning er koblet til membranen, slik at frekvensen i ledningen endres ved poretrykksendringer. Dette blir overført til en verdi for poretrykket. Det går en ledning med signaler til overflaten hvor det enten kan leses av manuelt eller logges elektronisk. Før målinger starter, og minst én gang i året, er det viktig at piezometerne blir kalibrert. (NTNU Geotechnical division, 2015).



Figur 16 Skisse av elektrisk piezometer (Statens vegvesen, 2018).

For prosjektet omtalt i denne rapporten ble det brukt piezometere med elektronisk logging fra firmaet Geosafe (Personlig kommunikasjon (e-post), Per Arne Farstad i Multiconsult 26.03.2019). PVT-måleren av merket Geotech trykkes ned i bakken og har to ledninger som går opp til overflaten. Nøyaktigheten er 0,08% for dybder 0m-20m og 0,25% for dybder 20m-40m (Geosafe, 2019). I Figur 17 er typen som er brukt i prosjekt VA - Sluppenvegen vist.



Figur 17 Elektrisk poretrykksmåler med minne (Geosafe, 2019).

3. Prosjektspesifikt – VA-Sluppenvegen

3.1. Innledende

Prosjektet VA – *Sluppenvegen* er et vann- og avløpsprosjekt som omfatter installasjon av spillvanns- og overvannsrør ved rørpressing og tunnelering. Området ligger på Sluppen, sør i Trondheim, på høyde mellom 24moh. og 34 moh. (Multiconsult, 2018b), se Figur 18. Arbeidet inkluderer tre byggegrop – én pressgrop og to mottaksgrop for rørene. I tillegg er det et utløp for et rør i skråningen mot Nidelva. Traseen til rørene og spuntgropene er vist i Figur 19. S15 og S20 er mottaksgroper og S9 er pressgrop hvor rørpressingen starter. Sistnevnte er en spuntgrop. Rørtraseen er planlagt å ligge mellom 7m og 11m dybde under terrengoverflaten. Rørene er planlagt med forskjellige diametere, hvor de minste skal installeres med pilotrørsboring og styrt boring, og den største med tunnelering. Det største røret skal rørpresses og har en ytre diameter på 2,5m (Multiconsult, 2019b).



Figur 18 Oversiktskart (Tilpasset fra www.google.com/maps)

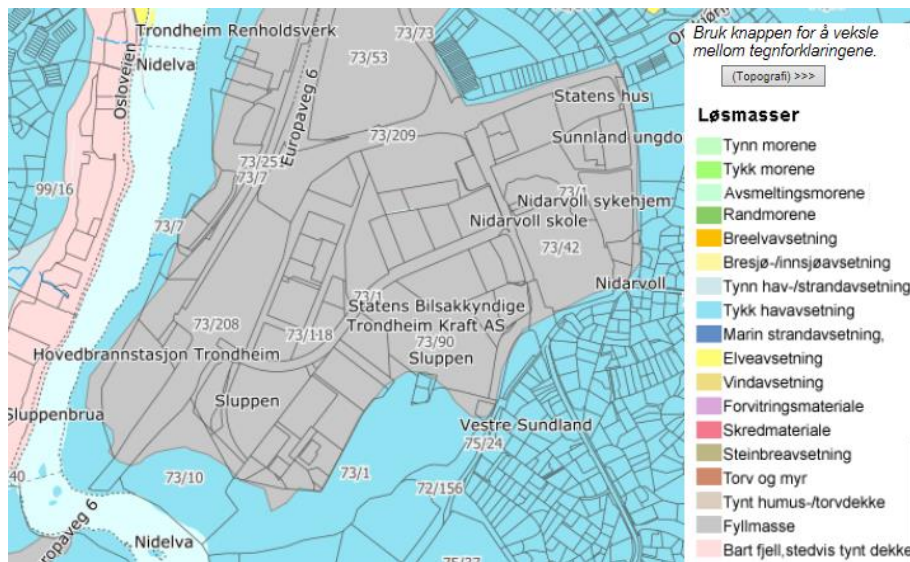


Figur 19 Rørtrase og spuntgrop (Multiconsult, 2019b)

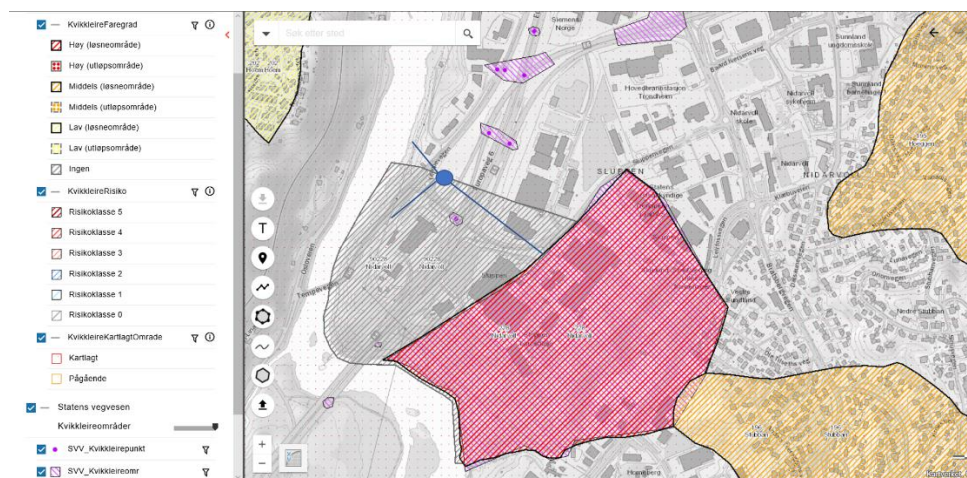
3.2. Grunnforhold

3.2.1. Generelt

Det kvartærgeologiske kartet fra NGU (Figur 20) viser at løsmassene i overflaten ved prosjektområdet består av fyllmasser omringet av havavsetninger. Området ligger under marin grense som her er i underkant av 180moh. Dette kan tyde på at det er havavsetninger under fyllmassene og dermed mulighet for kvikkleire. NVEs atlas viser en kvikkleire fare- og risikosone, *Nidarvoll*, rett i overkant av området. I tillegg finnes en gammel faresone (som nå er fjernet) i aktuelt område. Den strekker seg fra eksisterende sone og ned til Nidelva. Statens Vegvesen har påvist kvikkleire i punkter nært rørtraseen (Norges vassdrags- og energidirektorat, 2019; Norges geologiske undersøkelse, 2019). Kvikkleiresoner og -punkter er vist i Figur 21. Multiconsults grunnundersøkelser i forbindelse med prosjektet viser sprøbruddsmateriale og kvikkleire i borpunkt 2 og 3 (Multiconsult, 2018b). Borpunktene sammen med rørtraseen er tegnet inn i borplanen i vedlegg A.1.

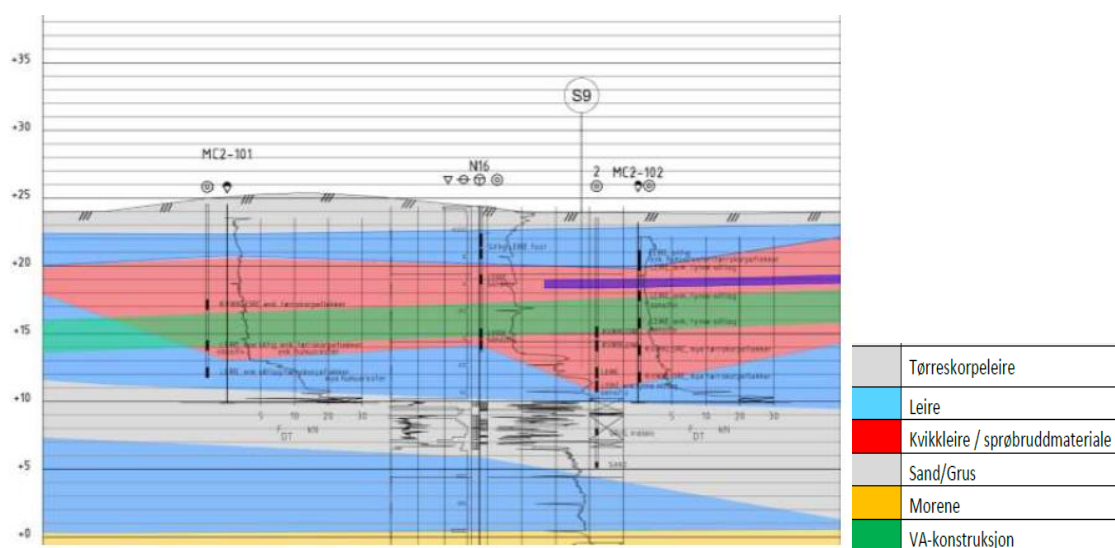


Figur 20 Kvartærgeologisk kart (<http://geo.ngu.no/kart/losmasse/>)



Figur 21 Kvikkleiresoner (<https://temakart.nve.no/link/?link=kvikkleire>). Rød: eksisterende faresone. Grå: gammel faresone. Lilla: SVVs kvikkleirepunkter. Med omtrentlig inntegnet rørtrase og KS-stabilisert område i blått.

Tidligere nevnte observasjoner, i tillegg til andre boringer og undersøkelser beskrevet i (Multiconsult, 2018b), danner grunnlag for antatt lagdeling i prosjektområdet. I området består løsmassene av et tørrskorpelag over siltig leire. Leiras mektighet er opptil 10m og under finnes et lag med grovere friksjonsmaterialer. Sprøbruddsmateriale og sensitive masser er påvist i flere punkter. Det antas at kvikkleire finnes som en «lomme» i løsmassene. Både mottaksgrop S20, pressgrop S9 og rørtraseen berører sensitive masser, men dette er ikke registrert ut mot elvebredden eller ved grop S15 (Multiconsult, 2019b). I Figur 22 er antatt lagdeling ved pressgrop S9 vist, og en kan se at antatt kvikkleirelag (sprøbruddsmateriale) har en dybde på opptil 10m.



Figur 22 Lagdeling ved S9 (Multiconsult, 2019b)

Om løsmassene ved pressgrop S9, som er den som behandles i denne oppgaven, står det følgende i Multiconsults rapport *Geotekniske prosjekteringsforutsetninger*:

Ved pressgrop S9 er det et topplag av tørrskorpeleire ned til 1-2 meters dybde. Deretter et lag med bløt siltig leire med antatt overgang til fastere masser ved 13 meters dybde (ca. kote +11). I henhold til utførte sonderinger antas det kvikkleire/sprøbruddmateriale fra 4 meters dybde (Multiconsult, 2019b, s. 10).

Lagdelingen i Figur 22 er brukt som utgangspunkt ved modellering av området i denne oppgaven.

3.2.2. Jordegenskaper og parametere

For informasjon i dette kapitlet er Multiconsults data- og parameterrapport brukt, i tillegg til forskjellige beregningshefter og -notater laget i forbindelse med VA-prosjektet. Bare jordparametere ved pressgrop S9 er behandlet, og de er hentet fra Borhull 2 og MC2-102. Poretrykksmålerne for prosjektet er på dybde 7m. Samme dybde blir derfor brukt som utgangspunkt for videre vurderinger og analyser i rapporten. På grunn av dette er det lagt vekt på materialparametere for kvikkleirelaget i dybde 7m. Det vises til

borplan i vedlegg A.1 for plassering av borhullene, og det vises til kapittel 4.2 og 5.1.1 for beskrivelse av hvilke materialparametere som er brukt som input i beregninger og vurderinger.

Udrenert skjærstyrke, c_u

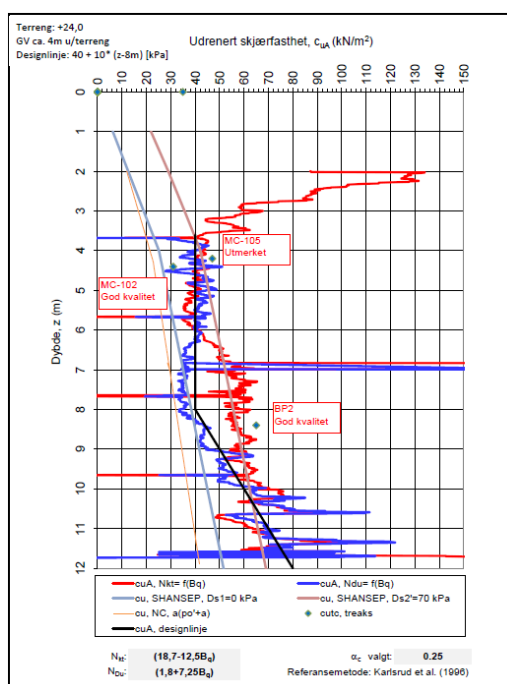
For hele området viser verdiene for udrenert skjærstyrke svært stor spredning (omtrent 20kPa-120kPa) (Multiconsult, 2019c). Konusforsøk og enaksielt trykkforsøk fra Borhull 2 viser udrenert skjærstyrke ved på ca. 8,5m på 35kPa, 42kPa og 44kPa. Treaksialforsøk i borpunkt MC2-102 viser tolkede verdier for c_u ved, 4,4m og 8,4m ved 0,5% (s_{u1}), 1% (s_{u2}) og 2% (s_{u3}) tøyning. For å finne antatt verdi av disse i dybde 7m, er det brukt lineær interpolasjon etter ligning (3-1). Disse er oppsummert i Tabell 3.

$$f(x) \approx f(x_1) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} (f(x_2) - f(x_1)) \quad (3-1)$$

Tabell 3 Verdier for udrenert skjærstyrke, c_u , ved S9 (MC2-102)

| Dybde (8m) | s_{u1} (kPa) | s_{u2} (kPa) | s_{u3} (kPa) |
|------------|----------------|----------------|----------------|
| 4,4 | 31 | 30 | 28 |
| 7,0 | 53,1 | 56,7 | 58,6 |
| 8,4 | 65 | 71 | 75 |

Ifølge parameterrapporten, er CPTU 20B relevant for pressgrup S9. Denne er vist i Figur 23 og i vedlegg A.2. CPTU 20B viser tolket designlinje for c_u^A . I dybde 7m er $c_u^A=40$ kPa. Reduksjonsfaktoren for kvikke masser er satt til 0,85 (Multiconsult, 2019c), slik at udrenert skjærfasthet for design blir 34kPa.



Figur 23 Verdi for udrenert skjærstyrke fra CPTU. Designlinje i svart (Multiconsult, 2019c).

Sensitivitet, S_t

I borhull 2 er det funnet fire verdier for sensitivitet i leira som er karakterisert som kvikkleire. S_t er 147, 117, 78 og 124. Alle disse målepunktene er på mellom omtrent 8m og 10m dybde. Dette karakteriseres som *meget* sensitivt. Leira som ligger dypere (ikke kvikkeleire), har lavere verdier for sensitivitet (1-32), og dette karakteriseres som lite-meget sensitivt. Kvikkleire har ofte sensitivitet $S_t > 50$ (Multiconsult, 2018b; NTNU Faggruppe for geoteknikk, 2018).

Stivhet

Det er gjennomført både treaksial og ødometerforsøk blant annet for å si noe om stivheten til jordlagene. Treaksforsøkene gir verdi for sekant skjærmodul ved 0,5% tøyning, G_{50} , og skjærmodul for av- og pålastning, G_{ur} (Multiconsult, 2019c). Relevante verdier for stivheten er vist i Tabell 4.

Tabell 4 Relevante verdier for stivhet i form av G_{50} , G_{ur} og M

| Type forsøk | Borhull | Dybde (m) | G_{50} (kPa) | G_{ur} (kPa) | $M = E_{oed}$ (kPa) |
|-------------|---------|-----------|----------------|----------------|---------------------|
| Treaks | MC2-102 | 4,4 | 1966 | 7771 | - |
| Treaks | MC2-102 | 8,4 | 6064 | 14013 | - |
| Treaks | 2 | 11,2 | 3958 | 9966 | - |
| Treaks | 2 | 12,6 | 4103 | 10444 | - |
| Ødometer | MC2-102 | 4,35 | - | - | 4000 |

Poissons tall

Tverrkontraksjonstallet, ν , er funnet med treaksialforsøk. $\nu = 0,5$ (Multiconsult, 2019c).

Friksjon og attraksjon

I parameterrapporten er det gitt effektivspenningsparametere for hvert av lagene. De relevante verdiene er vist i Tabell 5.

Tabell 5 Drenerte jordparametere. Etter (Multiconsult, 2019c).

| Lag | Friksjonsvinkel, $\tan\phi$ | Friksjonsvinkel, ϕ (°) | Attraksjon, a (kPa) |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Tørrskorpeleire | 0,58 | 30 | 5 |
| Leire øvre lag | 0,53 | 28 | 5 |
| Kvikkleire | 0,36 | 20 | 5 |
| Leire nedre lag | 0,60 | 31 | 5 |
| Sand og grus | 0,70 | 35 | 0 |

B-parameter

Treksialforsøkene har gitt en verdi for B-parameteren som finnes igjen i Skemptions poretrykkligning gitt i ligning (2-3). For prøvene ved S9 ligger B mellom 0,74 og 0,99. Det vil si at prøvene ikke var mettet.

Konsolideringskoeffisient, c_v

Permeabiliteten er funnet med ødometerforsøk. Fra MC2-102 er det tatt en prøve ved 4,35 meters dybde. Her ble det funnet $c_{v-OC}=38\text{m}^2/\text{år}$ og $c_{v-NC}=1,4\cdot M$.

Tyngdetetthet, γ

Parameterrapporten gir tolkede verdier av tyngdetetthet for hvert av de ulike lagene i antatt lagdeling. Verdiene er gitt i Tabell 6 og er hentet fra (Multiconsult, 2019c).

Tabell 6 Tyngdetetthet

| Materiale | Tyngdetetthet (kN/m³) |
|----------------------|---|
| Tørrskorpe | 19 |
| Siltig leire | 21 |
| Kvikkleire | 21 |
| Sand/grus | 18 |
| KC-stabilisert leire | 22 |

Hviletrykkskoeffisient, K_0' :

Hviletrykkskoeffisienten, K_0' , er funnet med trekasialforsøk. For de relevante borpunktene varierer K_0' mellom 0,65 og 0,69.

Dilatans

Fra treksialforsøkene i relevante borhull er det funnet tre punkter med dilatant materiale og ett punkt med kontraktant materiale. Alle disse punktene ligger innenfor det som er karakterisert som kvikkleire eller sensitivt materiale (Multiconsult, 2019c).

3.2.3. Poretrykkssituasjon

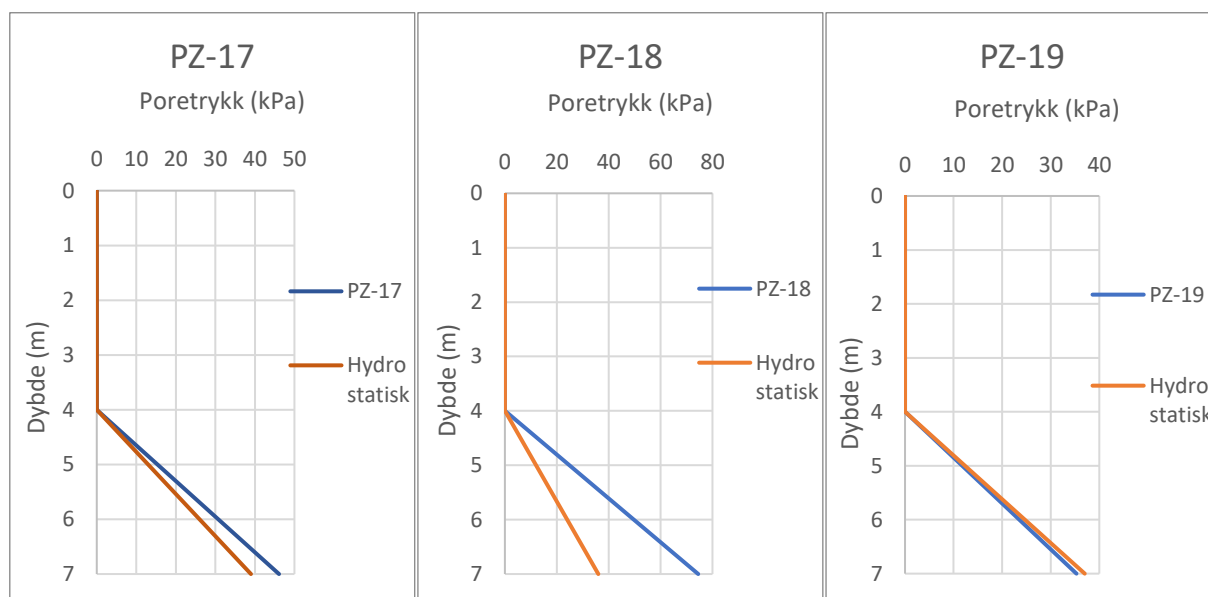
Det er gjort en rekke poretrykksmålinger i prosjektområdet over et tidsrom på flere år. Grunnvannet er normalt ca. 4m under terreng ved pressgrop S9 som ligger på toppen av en skråning som heller ned mot Nidelva. Tabell 7 viser poretrykksmålinger i januar 2018 ved pressgrop S9. Plasseringen av disse piezometerne er vist på tegningen i vedlegg A.3 og på borplanen i vedlegg A.1. Det er antatt hydrostatisk poretrykkfordeling med dybden (Multiconsult, 2019b), men om en ser på målinger fra januar 2019, er ikke dette helt korrekt om grunnvannet fortsatt er i 4m dyp. Det kan være flere årsaker til dette. Blant annet kan kraftig regnvær gjøre at grunnvannstanden har steget når målingen er gjort.

Tabell 7 Poretrykksmålinger fra januar 2018 (og 2019) (Multiconsult, 2019b).

| Borpunkt (kote) | Piezometer | Dybde (m) | In situ poretrykk for dagens tilstand (kPa) | GV ved kote |
|-----------------|------------|-----------|---|-------------|
| 4 (+21,8) | 13482 | 6,5 | 21 | +17,0 |
| 15 (+23,8) | 13726 | 7,0 | 34 | +19,5 |
| 15 (+23,8)* | 11968 | 20,0 | 66 | +10,5 |
| 16 (+24,0) | 6069 | 7,0 | 30 | +20,0 |
| 17 (+23,3) | 13725 | 7,0 | 35 | +20,0 |
| 18 (+23,4) | 13723 | 7,0 | 35 | +20,0 |
| 19 (+23,3) | 13724 | 7,0 | 36- | +20,0 |

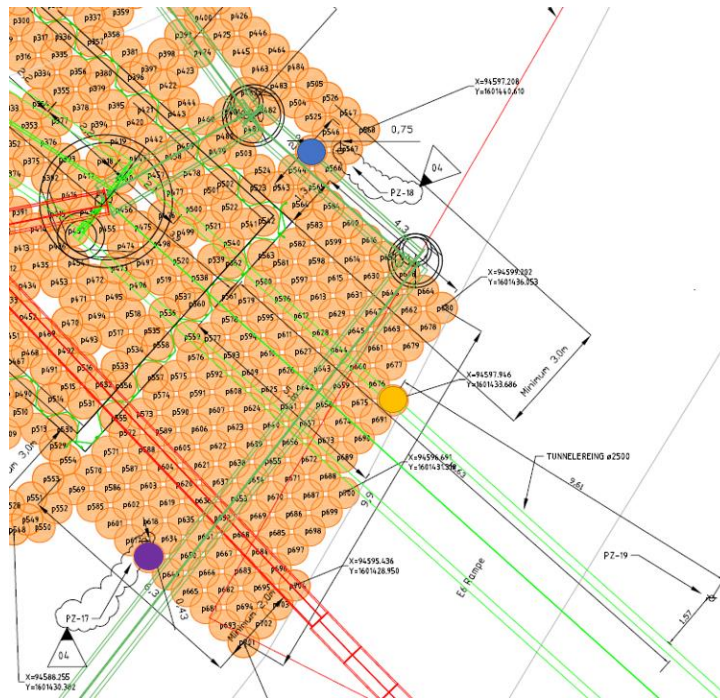
*Installert 03.01.19

I Figur 24 er målt poretrykk i januar 2019 i dybde 7m vist. I tillegg ses hydrostatisk poretrykksituasjon ved grunnvannstand 4m under terreng. Poretrykket er vist for piezometer 17, 18 og 19 (PZ-17, PZ-18 og PZ-19) i januar 2019. For PZ-17 og PZ-18 er det overhydrostatisk poretrykk, mens det for PZ-19 så vidt er underhydrostatisk poretrykk. Dette er situasjonen to dager før kalk-/sementstabiliseringen starter.



Figur 24 Poretrykksituasjon januar 2019 for PZ-17, PZ-18 og PZ-19.

De omtalte poretrykksmålerne er vist på Figur 25. PZ-17 og PZ-18 ligger inne i det KS-stabiliserte området. Den nærmeste KS-pelen til hvert piezometer er avmerket i Figur 25. Nærmeste pel for PZ-17 er pel 633 (lilla) og avstanden mellom senter av pelen og piezometeret er 0,58m. Pel 545 (blå) er nærmeste pel for PZ-18 og det er 0,73m mellom senter av pelen og piezometeret. PZ-19 ligger noe lengre unna, på østsiden av feltet. Nærmeste pel til PZ-19 er pel 692 (gul), 9,58m unna.



Figur 25 KS-stabilisert område rundt poretrykksmålere med de nærmeste pelene til hvert piezometer avmerket

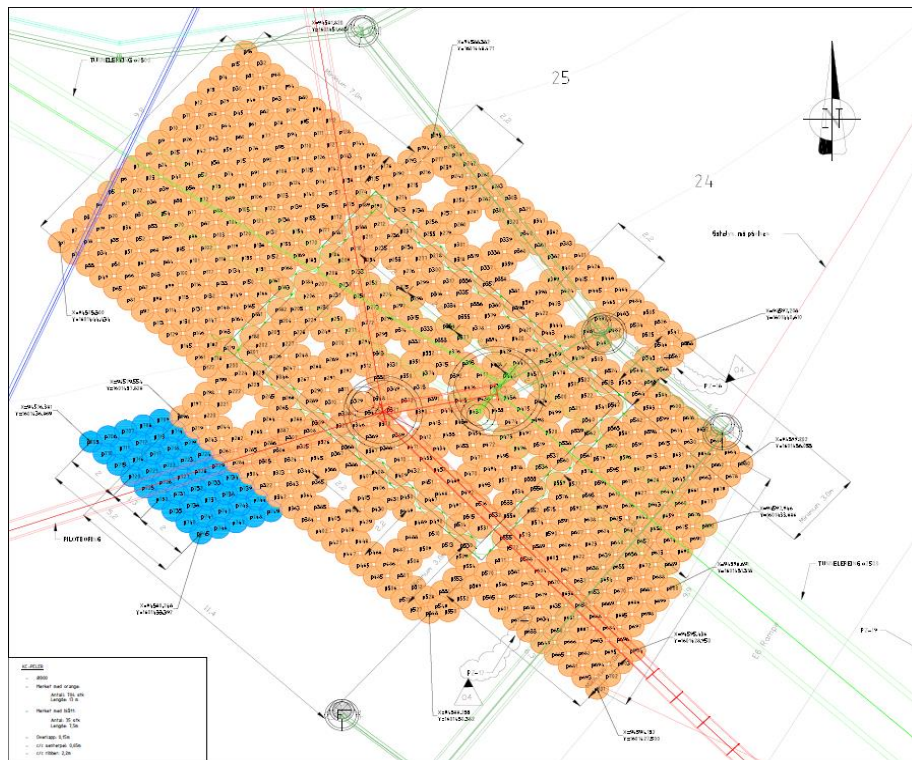
I dybde 7m under terreng er totalspenningene omtrent 145kPa. Det vil si at kritisk verdi av poretrykket er 145kPa, fordi effektivspenningene da blir null etter effektivspenningsprinsippet i ligning (2-1). Det vil si at ved PZ-17 kan poretrykket stige omtrent 100kPa, mens ved PZ-18 kan poretrykket bare stige omtrent 70kPa før det blir kritisk.

3.3. Kalk-/sementstabilisering

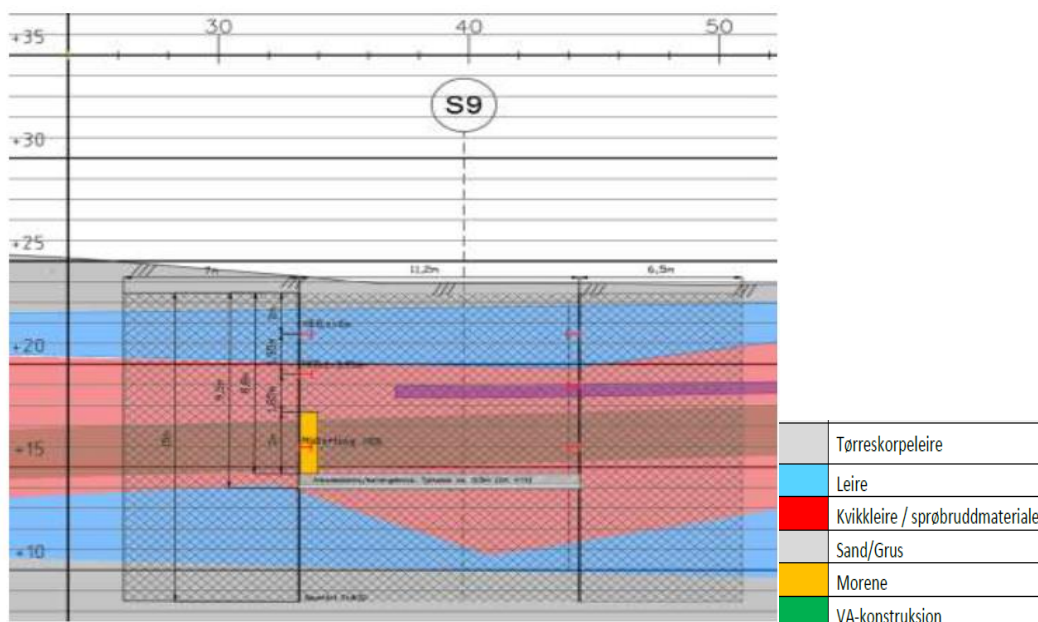
På grunn av grunnforhold og stabilitet i prosjektområdet, må grunnen ved pressgrop S9 og mottaksgrop S20 stabiliseres. Gropene er ca. 10m dype og skal stives av med spunter (Multiconsult, 2018a). Massene er sensitive og derfor er det fare for at leira blir omrørt og flytende ved arbeider i området. Det er flere årsaker til at KS-stabilisering er nødvendig i forbindelse med dette prosjektet. For det første vil en forhindre at omrørt og flytende leire strømmer inn i press- og mottaksgrop ved utføring av rørpresingen. Dette kan skje fordi rørfrenten ikke kan trykksettes før omtrent 3m fra spunten. Ved rørpresing trengs et mothold i pressgropen og kapasiteten for presskraften økes når leira er stabilisert. I tillegg er gravingen av spuntgropene sikrere og mer gjennomførbar etter stabilisering grunnet at massene er mindre flytende (Multiconsult, 2019b).

Det brukes tørr metode med rundt 740 KS-peler. KS-stabiliseringen utføres etter spunttramming av gropene. Diameter for KS-pelen er 800mm (med unntak av peler inntil spunt hvis mindre diameter er nødvendig), og har overlapp på 150mm. Pelene installeres i gittermønster med doble ribber og blokker. Installasjonsmønstrene er illustrert i Figur 2. Planlagt KS-stabilisering for pressgrop S9 er vist i Figur 26 og i vedlegg A.3 inkludert en del opplysninger om KS-stabiliseringen. De fleste pelene er 13m lange (oransje), mens noen er 7,5m lange (blå). KS-pelene skal stabilisere hele dybden med leire og toppnivået av pelene vil derfor variere noe. Ved pressgrop S9 avsluttes pelene i fastere lag under

leira (Multiconsult, 2018a). I Figur 27 ses et tversnitt av KS-stabilisert område ved S9, hvor både lagdelingen og KS-stabilisert område kommer frem.



Figur 26 KS-stabilisering pressgrup S9



Figur 27 KS-stabilisert område ved S9 (skravert) (Multiconsult, 2018a)

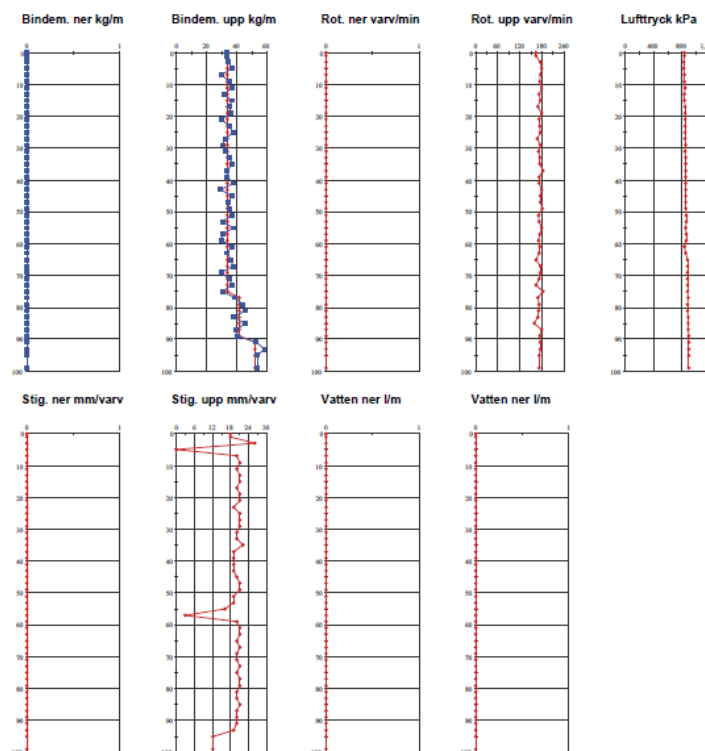
For grunnforsterkningen benyttes Multicem og sement i et blandingsforhold 50/50. Multicem brukes i stedet for kalk og har like egenskaper. «Multicem består hovedsakelig av brent kalk og andre kalsinerte mineraler» (Norcem, 2014). Mengde bindemiddel

varierer etter hvor høy styrke en ønsker å oppnå. Inne i spuntgropene skal det benyttes lavere innblandingsmengder enn utenfor. Dette på grunn av at en ønsker at det skal være mulig å grave ut gropene etter stabilisering. (Multiconsult, 2018a) foreslår følgende innblandingsforhold:

- Innvendig spunt:
 - Under graveplanum: 100 kg/m³, 50/50 % multicem/sement
 - Over graveplanum: 30 kg/m³, 50/50 % multicem/sement
- Utvendig spunt:
 - Hele spuntlengden: 60 kg/m³, 50/50 % multicem/sement

I løpet av anleggsperioden ble det gjort tester av fasthet som førte til at innblandingsforholdet for utvendig spunt ble redusert til 30kg/m³ (Personlig kommunikasjon, e-post 21.05.2019, Mia Bek).

Ifølge instruksen (Multiconsult, 2018a) skal KS-pelene installeres til 13m dybde og avsluttes i grovere friksjonsmasser. Boringen må avsluttes 2m under terreng. Grunnet de to siste kravene vil lengden til KS-pelene variere noe. KS-pelene skal installeres med en stigningshastighet på 20mm/omdreining og med en rotasjonshastighet på 175 omdreininger/min. Alle KS-pelene er installert med et lufttrykk på omtrent 800kPa. Se Figur 28 som er et eksempel på en peleprotokoll fra prosjektet med målte data fra installasjon av én KS-pel.



Figur 28 Peleprotokoll fra én KS-pel. Dybden er vist i dm

Treksialforsøk av pelene etter 4 og 21 dager viser at fastheten til den stabiliserte leira øker betraktelig. For KS-pel 253 har friksjonsvinkelen økt til 47,4° og 49,7° etter henholdsvis 4 og 21 dager.

4. FEM-modellering

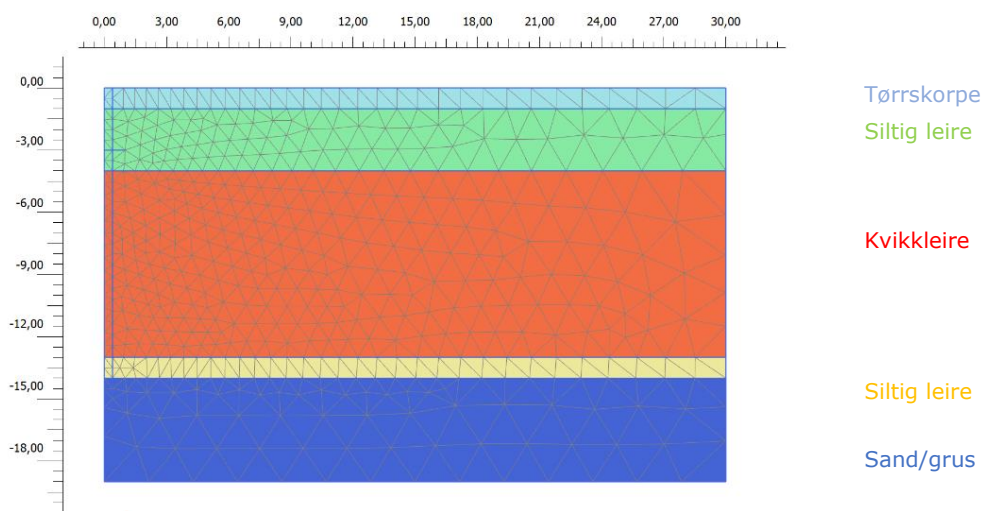
Programvaren Plaxis 2D 2017 er brukt for å simulere installasjon av én KS-pel med endelig elementmetode (FEM). Målet er å se på poretrykksresponsen ved simulert installasjon av én KS-pel, både i form av størrelse, influensområde og konsolideringsforløp. I kapittel 4 er modelleringen og valg av parametere presentert før resultatene for de to brukte jordmodellene, Mohr-Coulomb og Hardening Soil, presenteres.

4.1. Modell og metode

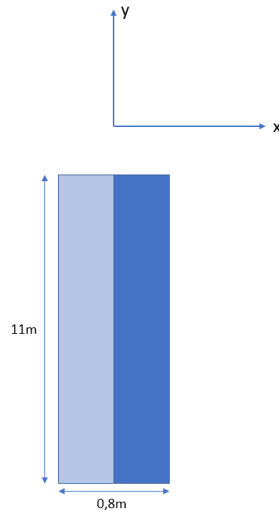
Grunnforhold og KS-pel ble modellert med jordparametere og dimensjoner tilnærmet som for prosjekt VA Sluppenvegen omtalt i kapittel 3. Det ble brukt udrenert analyse for leira i form av Plaxis' *Undrained A*, som vil si at input er effektivspenningsparametere. Det er benyttet aksesymmetrisk modell hvor halve KS-pelen er modellert. 15-noders trekantner med medium inndeling ble anvendt som elementer. Det vises til Plaxis' brukermanual (Brinkgreve, Swolfs og Kumarswamy, 2017) for nærmere forklaring av virkemåte til ulike funksjoner i Plaxis. Modellen er 30 meter lang og 10 meter dyp. Disse grensebetingelsene anses som tilstrekkelig til ikke å påvirke resultatet fordi poretrykket ikke påvirkes i ytterkantene av modellen, basert på beregningene.

Valgt lagdeling er skissert i

Figur 29, og valget er basert på boringer og antagelser i Multiconsults parameterrapport, beskrevet i kapittel 3. Grunnvannstanden er satt til 4 meter under terreng (Multiconsult, 2019c).

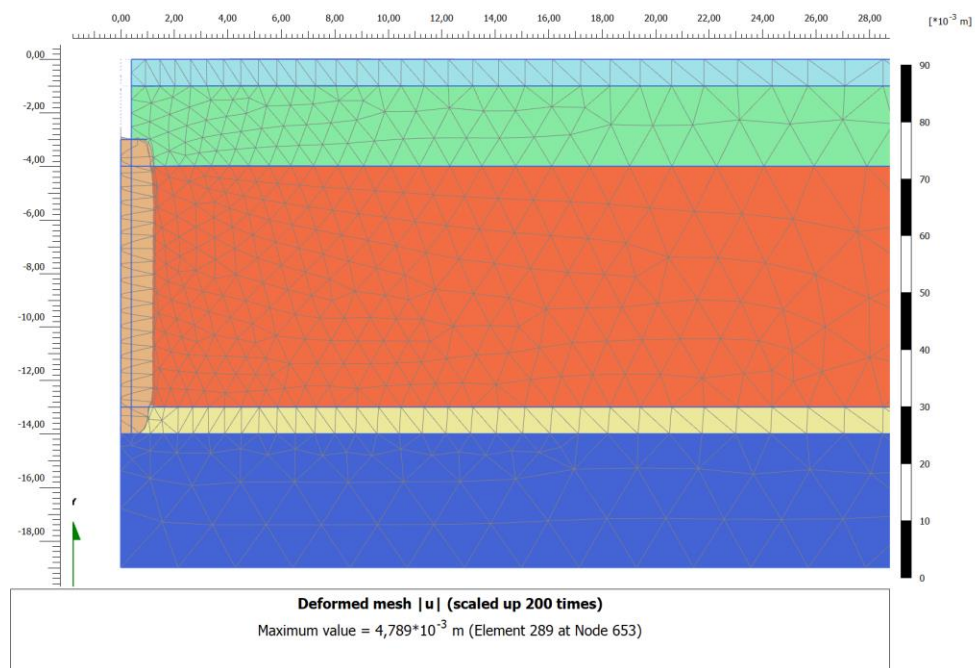


Figur 29 Lagdeling med betegnelser brukt i FEM-analysen



Figur 30 KS-pel vist i koordinatsystem. Lys blå del av KS-pelen er ikke med i modellen grunnet aksesymmetrisk modell. Dimensjonen i x-retning er overdrevet i forhold til dimensjonen i y-retning. Avstand fra KS-pel til origo er vilkårlig

KS-pelen ble modellert med senter av pelen langs y-aksen ($x=0$) og med terrengoverflaten i $y=0$. Ytterkant av pel er i $x=0,4\text{m}$, topp av pel i $y=-3\text{m}$ og bunn av pel i $y=-14\text{m}$. Dette er illustrert i Figur 30. Installasjon av KS-pelen ble simulert med volumtøyning innenfor et volum. Det ble påsatt volumtøyning i hele volumet av pelen, i x-retning. I Figur 31 er det vist figur av deformert elementnett ved påføring av volumtøyning for å illustrere virkemåten. Det ble også forsøkt å modellere installasjon av KS-pelen med linjelast i forskjellig geometri, men dette ga lokalt høye poretrykk og dermed lokalt brudd. Denne metoden er ikke undersøkt videre.



Figur 31 Deformert elementnett med $\epsilon=3\%$ i x-retning. (Eksempel fra Mohr-Coulomb med $\psi=0$)

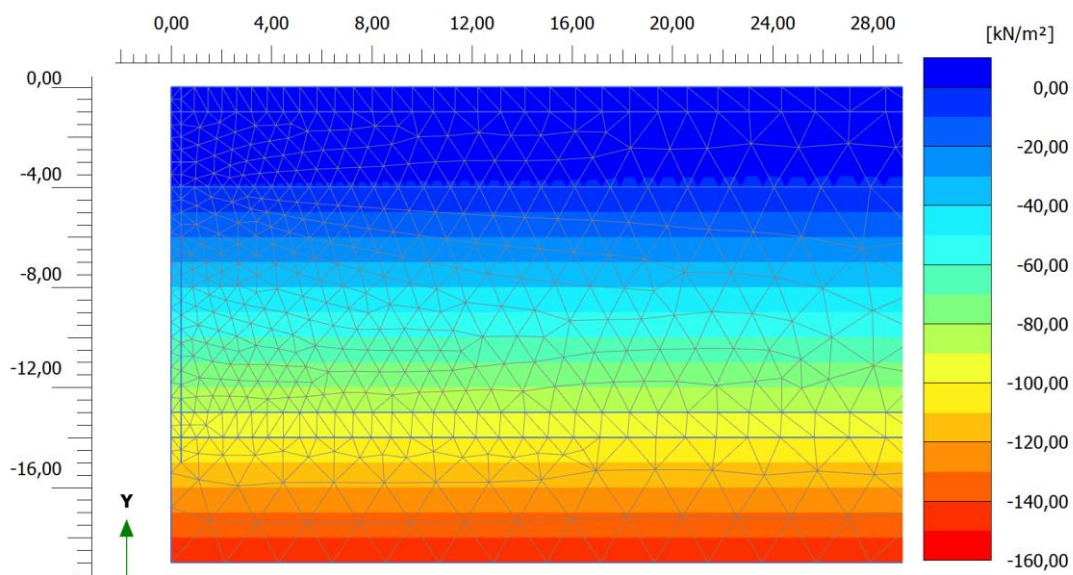
Forskyvning er holdt fast i y-retning i bunnen av modellen og i x-retning i enden av modellen. De samme stedene er det også stengt for grunnvannsstrømning. I overkant og underkant av KS-pelen er forskyvning i y-retning låst, for å sørge for at all forskyvning går ut i kvikkleirelaget og for å forhindre at det blir heving av jordlaget over pelen. Dette forhindrer også lokalt svært høyt poretrykk i hjørnet i overkant av pelen. Det er poretrykket i kvikkleirelaget, horisontalt ut fra KS-pelen, som er av interesse, og det er konservativt å tenke seg at alt trykk og all deformasjon går i x-retning. Videre deaktiveres jordvolumet i overkant av KS-pelen helt opp til terreng, samtidig som volumtøyningen påføres. Dette forhindrer at det oppstår lokalt svært lave verdier av poretrykk (sug) i hjørnet i overkant av pelen. Poretrykket påvirkes uansett ikke i stor grad over KS-pelene grunnet tomboring. Langs den nye kanten av jordvolumet i overkant av pelen, holdes deformasjonen fast i både x- og y-retning. Det er brukt *interfaces* i overkant av pelen for å redusere lokalt høye poretrykksverdier, uten at dette eliminerer problemet helt. *Interfaces* hadde ingen virkning i underkant av pelen.

Simuleringen er utført i forskjellige faser. Fasene er sammenfattet i tabell Tabell 8. Her er fasenummer, kalkuleringsprosedyre og utførte steg beskrevet. Stegene er nærmere beskrevet i senere avsnitt.

Tabell 8 Beregningsfaser i Plaxis

| Fase | Beregningsmetode | Utførte steg |
|--------|------------------------|--|
| Fase 0 | K_0 -prosedyre | - |
| Fase 1 | Plastisk | På satt volumtøyning og utbytte av materiale i KS-pel, fastholding av forskyvninger, deaktivert jordvolum, aktiverte interface |
| Fase 2 | Konsolidering dag 0-1 | Konsolidering |
| Fase 3 | Konsolidering dag 2-5 | Konsolidering |
| Fase 4 | Konsolidering dag 6-10 | Konsolidering |
| Fase 5 | Konsolidering 11-50 | Konsolidering |

Initialfasen (Fase 0) beskriver initialsituasjonen og beregnes med K_0 -prosedyre. Prosedyren beregner de initielle spenningsforholdene basert på spenningslikevekt og gitt verdi av hviletrykkskoeffisienten, K_0 . Når terrengflaten er horisontal sikrer K_0 -prosedyren likevekt for hele spenningsfeltet (Brinkgreve, Swolfs og Kumarswamy, 2017). Initielt poretrykk er vist i Figur 32.



Figur 32 Initiellt poretrykk.

Fase 1 består av installasjon av KS-pelen (påført volumtøyning), samt deaktivering av jordvolumet over pelen. Beregningen er gjort med plastisk analyse som ikke tar tiden med i beregningen og brukes til å beregne elastisk-plastiske deformasjoner.

Beregningsmetoden fungerer for de fleste geotekniske problemer (Brinkgreve, Swolfs og Kumarswamy, 2017). Udrenert analyse med påsatt volumtøyning i et jordvolum er en type problem som denne beregningsmetoden fungerer for. Grunnet problemer med 15-noders elementer ved bruk av aksesymmetrisk modell, er poretrykket ved installasjon vist $1 \cdot 10^{-9}$ dag etter påføring av volumtøyningen. Det er altså kjørt en kort (kortest mulig) konsolideringsfase. Dette hindrer fluktuering av verdier innad i elementene. (Selv om denne korte konsolideringsfasen i Plaxis er en egen fase, er den i det videre sett bort fra og omtalt som fase 1. Dette gjør at første konsolideringsfase varer 1 døgn og denne omtales i det følgende som fase 2).

De resterende fasene – fase 2-5, er konsolideringsfaser. Dette er gjort med beregningsmetoden *Consolidation* i Plaxis, med formål å analysere poretrykksutvikling over tid. Det er en elastisk-plastisk analyse som krever grensebetingelser for poretrykk (Brinkgreve, Swolfs og Kumarswamy, 2017). *Interfacene* er deaktivert, mens vannstrømning er stengt i endene av modellen for å sørge for oppbygning av poretrykk.

Simuleringen ble gjort for både Mohr-Coulomb og Hardening Soil. Jordmodellene er beskrevet i kapittel 2.6.

4.2. Tolkning og valg av inputparametere

Data fra boringer og prøvetaking i forbindelse med prosjekt VA Sluppenvegen, er primært benyttet som inngangsdata (input i Plaxis). I tillegg er det benyttet erfaringsverdier og antagelser. Jordparametere og egenskaper er beskrevet i kapittel 3.2.2. I vedlegg B.1 (for Mohr-Coulomb) og B.3 (for Hardening Soil) er inputparameterne vist i tabellform. Det er i første omgang forsøkt å finne parametere som tilsvarer virkeligheten så godt som mulig, for å ha godt sammenligningsgrunnlag med feltdata. I de neste avsnittene er det forklart bakgrunn for valg av noen av parameterne for kvikkleirelaget. Tolkning og begrunnelse for parametere for alle lagene finnes i vedlegg B.5 i notatform.

Leirlagene (kvikkleirelaget og to lag med siltig leire) er de eneste lagene som modelleres med både Mohr-Coulomb og Hardening Soil. Eneste forskjell i input er stivhet som for Mohr-Coulomb bruker G som input, mens Hardening Soil bruker E^{50} som input, i tillegg til eksponenten m .

Tyngdetetthet: $\gamma=21\text{kN/m}^3$.

Verdien er hentet fra (Multiconsult, 2019c). I følge (NTNU Fagruppe for geoteknikk, 2018) ligger tyngdetettheten til norske sedimenter mellom 17kN/m^3 og 21kN/m^3 , så verdien kan anses som innenfor normalområdet.

Styrke og friksjon: $c_u=40\text{kPa}$ og $\varphi=20^\circ$ ($\tan\varphi=0,36$).

I designlinjen for udrenert skjærstyrke, c_u , i tolket CPTU-profil (Multiconsult, 2019c) er verdien for c_u øverst i kvikkleirelaget 40kPa . For å finne friksjonsvinkel er det tenkt at c_u øker jevnt med dybden, med middelerverdi 40kPa . Om en har $c_u=38,4\text{kPa}$ i toppen av kvikkleirelaget og $c_u=41,6\text{kPa}$ i bunnen av kvikkleirelaget, blir friksjonsvinkelen $\varphi=20^\circ$. Det er også denne verdien av friksjon som er gitt i (Multiconsult, 2019c). Verdien for friksjonsvinkelen er noe lavere enn hva Nordal (2015) karakteriserer som typiske verdier for norsk leire (Nordal, 2015, s. 10, kap. 3).

CPTU-profilet er vist i vedlegg A.2.

Stivhet: $G=4000\text{kN/m}^2$. $E^{50}=12000\text{kN/m}^2$.

For Mohr-Coulomb er G brukt som input. Verdien er et gjennomsnitt av alle verdier for G^{50} fra treaksialforsøk fra kvikkleira ved pressgrop S9 og hentet fra (Multiconsult, 2019c). Om linjen som defineres av G^{50} når brudd ved 1% tøyning, vil udrenert stivhet $G^{50}=100 \cdot c_u$. Dette gir $G=4000\text{kN/m}^2$ og bekrefter at input av stivhet er korrekt tolket.

For Hardening Soil er E^{50} brukt som input. $E_u^{50}=3 \cdot G_u^{50}$. Dette er begrunnet med at volumendringen er 0 for udrenerte situasjoner. Om linjen definert ved E^{50} når brudd ved 1% tøyning, vil $E^{50}=300 \cdot c_u$. Dette gir $E^{50}=12000\text{kN/m}^2$ og bekrefter at stivhetsverdien kan være korrekt.

Overslagsformelene for stivhet er hentet fra (Nordal, 2015).

Kohesjon: $c=1,82$.

Verdien kommer av sammenhengen $c=a \cdot \tan\varphi$. $a=5\text{kPa}$ og $\varphi=20^\circ$ fra (Multiconsult, 2019c). I Statens vegvesens erfaringsverdier er a mellom 0 og 20kPa for middels bløt leire og $a=0$ for bløt leire. Det vil si at om det stemmer at det er bløt leire, er verdien for kvikkleirelaget kanskje er noe høy i forhold til erfaringsverdier (Statens vegvesen, 2018).

Poissons tall: $v'=0,3$.

For udrenert lastsituasjon er vanligvis $v=0,5$ (0,495 i Plaxis). For *Undrained A* er dette imidlertid ikke mulig, da det skilles på oppførselen til kornskjellettet og oppførselen til vannet. Det er derfor satt $v'=0,3$ som brukes for drenerte situasjoner (Nordal, 2015, s. 5, kap. 7).

Hviletrykkskoeffisient: $K_0=0,7$.

Verdien er fra treaksialforsøk fra relevant område (Multiconsult, 2019c). I standarden for geoteknisk prosjektering (Standard Norge, 1997) anbefales det å bruke en verdi for K_0 gitt av $K_0 = (1 - \sin\phi)\sqrt{OCR}$ som gir $K_0=0,8$ om $OCR=1,5$ benyttes. Designlinjen for OCR for kvikkleirelaget ser ut til å variere mellom 1,5 og 1,8 og er vist i vedlegg A.2. Det vil si at hviletrykkskoeffisienten er litt lavere enn om en benytter ligningen anbefalt i standarden.

Permeabilitet: antar $k_x = k_y = \frac{0,000026m}{\text{år}}$ med bruk av ligning (2-7) og konsolideringskoeffisient $c_{v,OC}=38m^2/\text{år}$ og ødometermodul $M=4000kPa$ fra (Multiconsult, 2019c). Det er brukt $c_{v,OC}$ fordi spenningsnivået for kvikkleirelaget ser ut til å være under overkonsolideringsspenningen p_c' og designlinjen for p_c' er vist i vedlegg A.2. Ifølge Statens vegvesens håndbok er erfaringsverdien for leire mellom 10^{-5} og 10^{-2} . Brukt verdi for permeabilitet er altså i nedre sjikt av erfaringsområdet (Statens vegvesen, 2018). Det er i Plaxis-simuleringen ikke tatt hensyn til at permeabiliteten ofte vil øke i et KS-stabilisert område.

Indeks m: $m=1$.

Input m gjelder bare for Hardening Soil. m er vanligvis lik 1 for leire (Nordal, 2015).

Dilatans: 3 av treaksforsøkene fra dybder som er antatt kvikkleire viser at leira er dilatant og én prøve viser kontraktant. Kvikkleire oppfører seg vanligvis kontraktant (Janbu, 1970) og derfor er FEM-analysene gjort for nøytralt og dilatant materiale.

4.3. Resultat

Resultatene fra beregningene i elementmetodeprogrammet Plaxis, er fremstilt i vedlegg B.2 (Mohr-Coulomb) og B.4 (Hardening Soil). Det er valgt å fremstille resultater for $\epsilon=3\%$ og $\psi=0^\circ$ i figurer i kapittel 4.3.1 og kapittel 4.3.2 for henholdsvis Mohr-Coulomb og Hardening Soil. Disse verdiene for ϵ og ψ er i første omgang antatt å ha størst likhet med feltverdier fra Sluppen.

Det er sjekket at størrelsen på elementnettet ikke betyr noe for størrelsen på oppnådde poretryksverdier i omliggende leire.

Negative verdier betyr poretrykk, mens positive verdier betyr sug i figurene. I tabeller og tekst er imidlertid trykk omtalt med positive verdier som er vanlig notasjon i geoteknikk. Det er ikke lagt vekt på vurderinger av sug. Merk at verdiene for poretrykk etter ulikt antall dager kan ha forskjellig størrelsesorden, selv om fargene på skalaen er lik. Fargene vil også variere i de ulike plottene.

Simuleringen fikk problemer med lokalt høye eller lave poretrykk i hjørner av elementene ved hjørnene av KS-pelen. De lokalt høye verdiene ble redusert med metoder som er

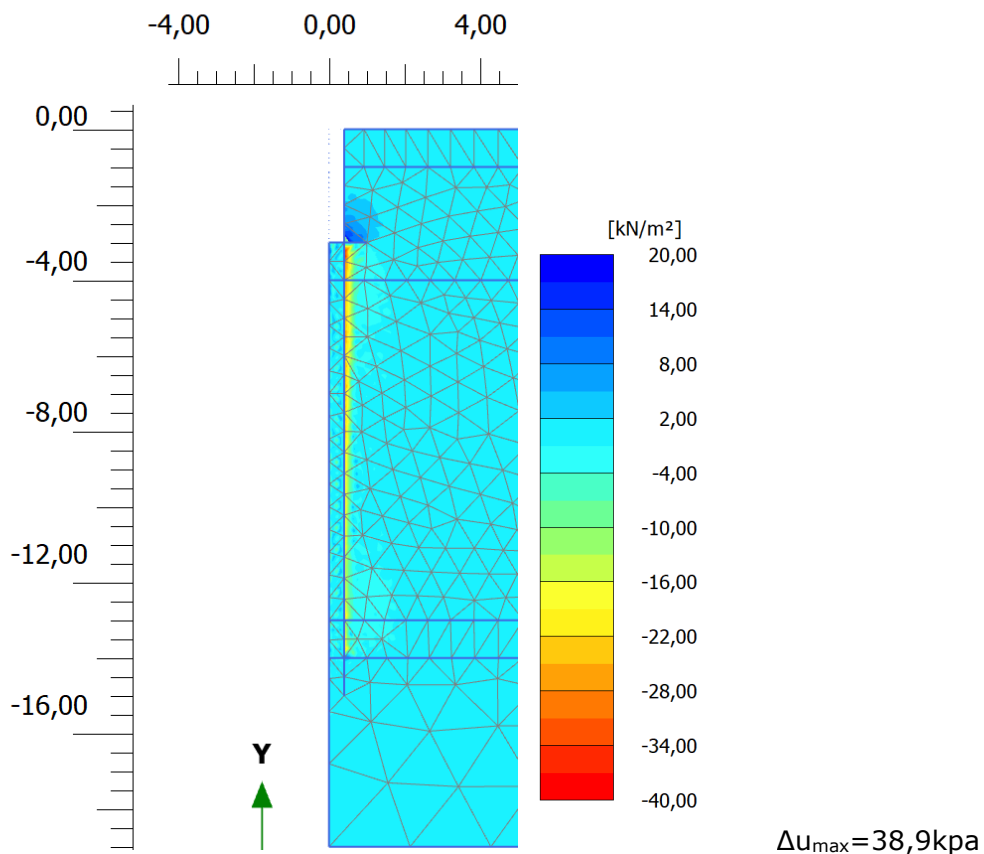
beskrevet tidligere. Fargeplottet for poretrykk umiddelbart etter KS-stabilisering, er vist etter en svært kort konsolideringsfase (i stedet for $t=0$). Dette gjør at de lokalt høye verdiene er borte og det er derfor ikke et problem med fremvisning av skalaen.

4.3.1. Mohr-Coulomb

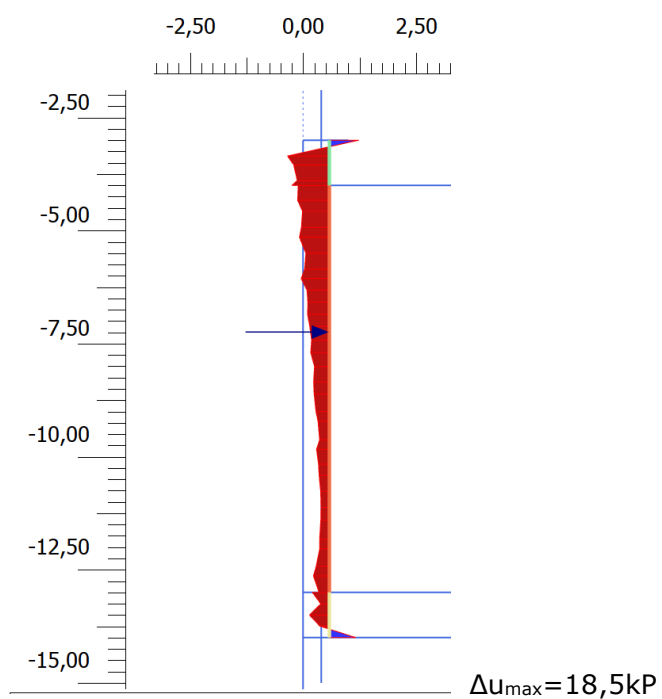
I Figur 33 til Figur 35 er situasjonen ved installasjon av én KS-pel (påført volumtøyning) ved bruk av Mohr-Coulombmodellen vist. Figur 33, Figur 34 og Figur 35 viser henholdsvis fargeplott av poretrykket, vertikalsnitt av poretrykket 0,58m fra senter av pel og horisontalsnitt av poretrykket i dybde 7m. Figur 36 til Figur 39 viser poretrykksfordelingen etter 1, 5, 10 og 50 dager med konsolidering.

I vedlegg B.2 er resultater for andre kombinasjoner av ϵ og ψ presentert. ϵ er variert mellom 1% og 5% og ψ er variert mellom 0° og -5° .

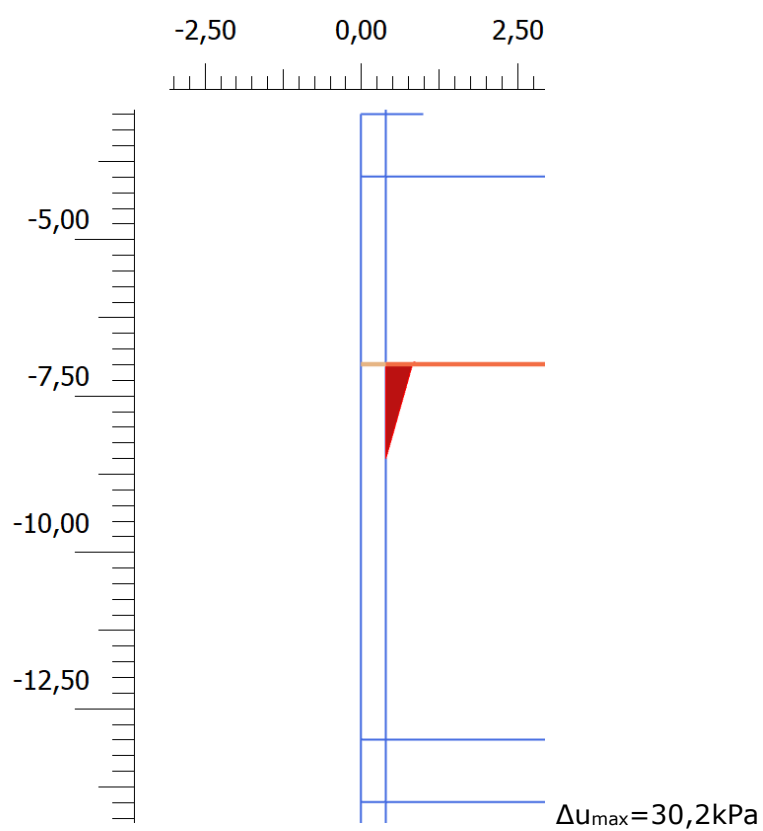
OBS! FIGURENE ER VIST MED FORSKJELLIG SKALA. HVER FIGUR MÅ DERFOR LESES SAMMEN MED TILHØRENDE SKALA. Dette er gjort for å få frem poretrykkene også etter 5-50 dager.



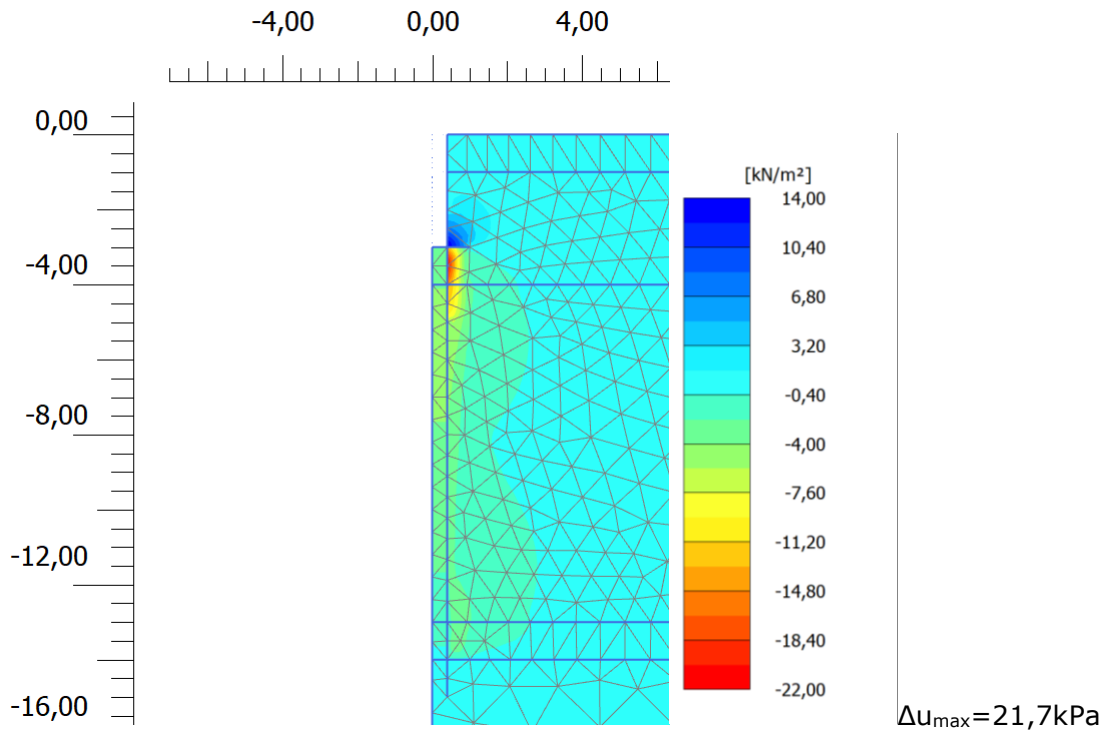
Figur 33 Poretrykksfordeling ved påført volumtøyning



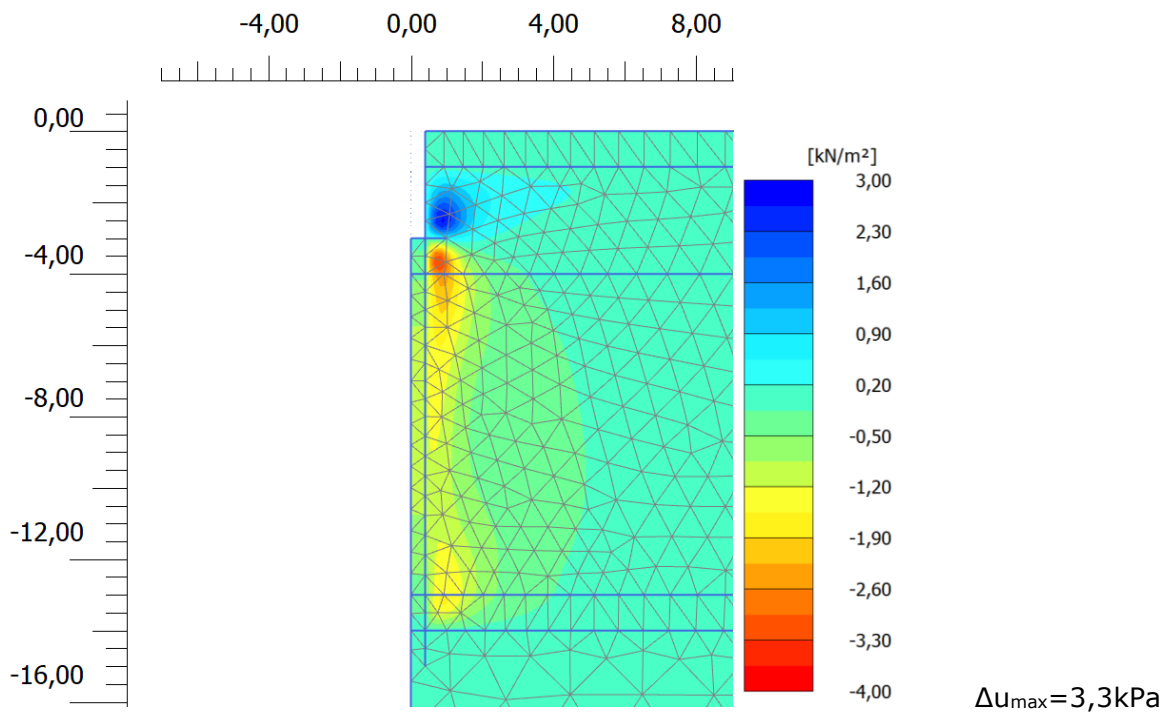
Figur 34 Vertikalsnitt av poretrykk 0,58m fra senter av KS-pel ved påført volumtøyning



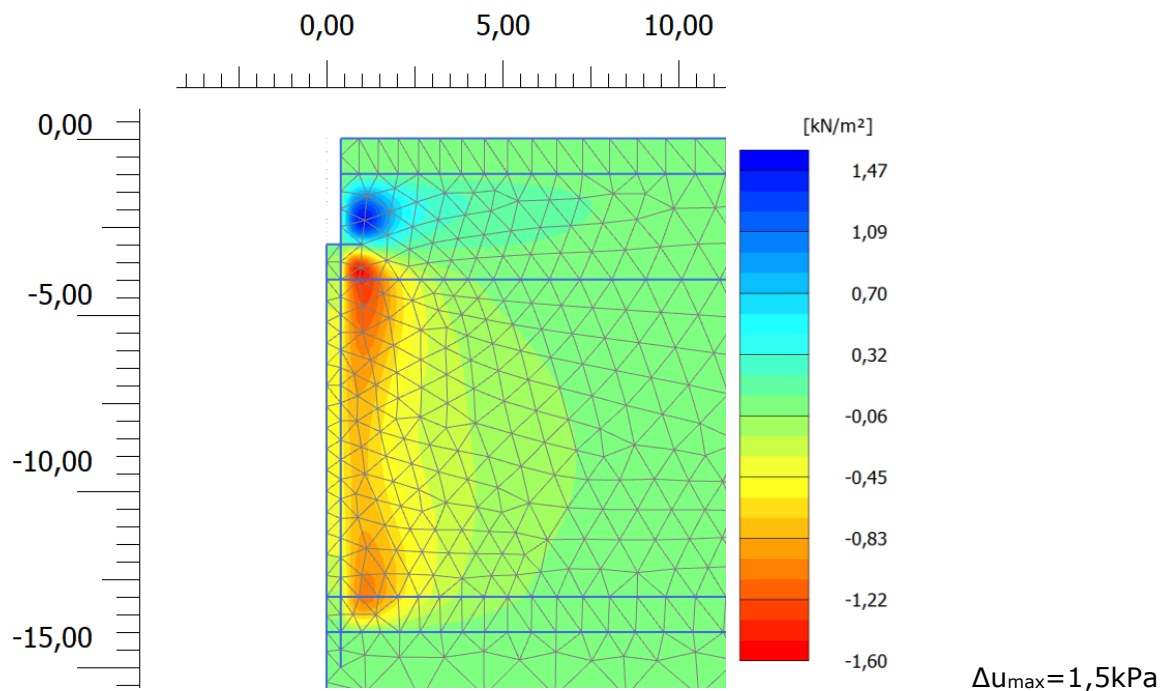
Figur 35 Horisontaltrykk av poretrykk i dybde 7m ved påført volumtøyning



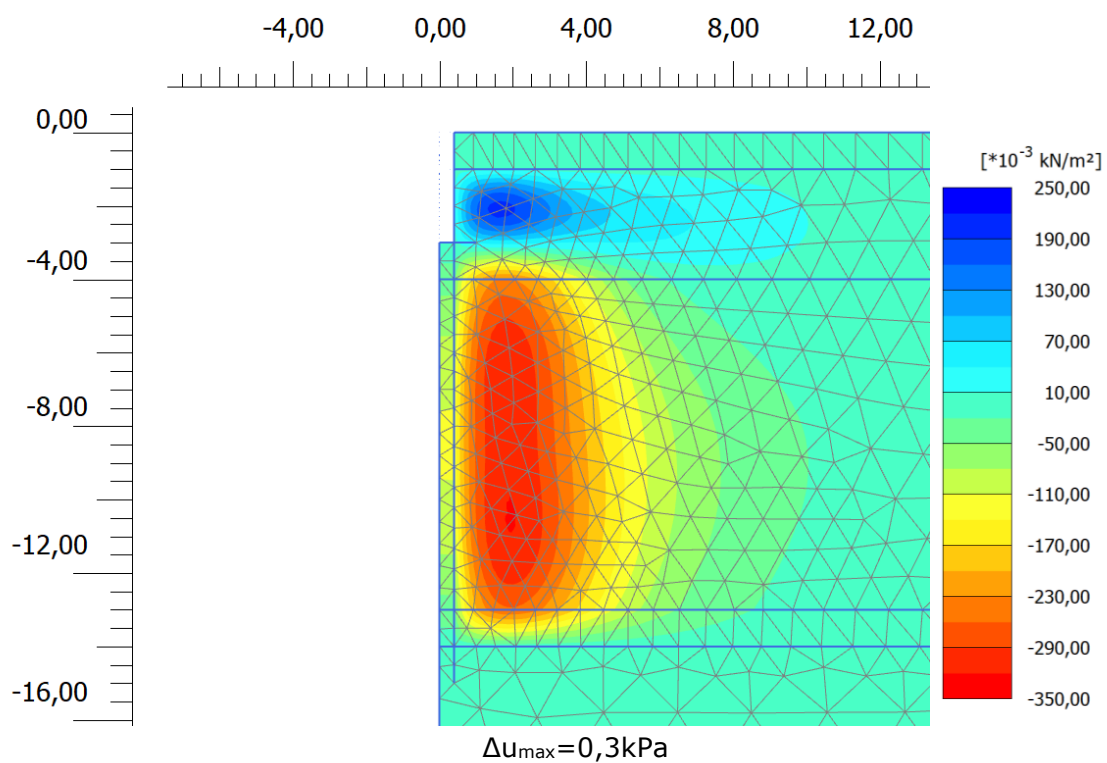
Figur 36 Poretrykksituasjon 1 dag etter påført volumtøyning



Figur 37 Poretrykksituasjon 5 dager etter påført volumtøyning



Figur 38 Poretrykkssituasjon 10 dager etter påført volumtøyning



Figur 39 Poretrykkssituasjon 50 dager etter påført volumtøyning

I det følgende er resultatene fra modellering av installasjon av KS-pel med Mohr-Coulomb oppsummert.

Størrelse av tilleggsporetrykk

Tabell 9 viser største oppnådde verdi av tilleggsporetrykket ved installasjon av KS-pel for hver kombinasjon av volumtøyning, ϵ , og dilatansvinkel, ψ . Plassering av høyeste verdi av poretrykket langs KS-pelen er gitt av fargeplottene.

Tabell 9 Maksimalt poreovertrykk (kPa) ved variasjon av ϵ og ψ

| $\psi \backslash \epsilon$ | 0° | -3° | -5° |
|----------------------------|------|------|------|
| 1% | 6,7 | 6,7 | 6,7 |
| 3% | 38,9 | 41,2 | 47,0 |
| 5% | 63,4 | 66,7 | 78,3 |

Fra resultatene kan en blant annet observere at:

- Oppnådd poretrykk ved påført volumtøyning er høyere jo større volumtøyning som påføres.
- Virkningen av økt volumtøyning er større ved lavere verdier for dilatansvinkel. For en økning av ϵ fra 1% til 5% vil poreovertrykket øke med henholdsvis 56,7kPa, 60kPa og 71,6kPa for dilatansvinkler 0°, -3° og -5°.
- For $\epsilon=1\%$ har ikke endring i dilatansvinkelen noe å si for maksimal verdi av oppnådd poretrykk
- For $\epsilon=3\%$ påvirker dilatansvinkelen maksimalverdi av poretrykket noe. For en endring av ψ fra 0 til -5° er forskjellen i oppnådd poretrykk på rundt 8kPa.
- For $\epsilon=5\%$ påvirker dilatansvinkelen maksimalverdi av poretrykket noe. For en endring av ψ fra 0 til -5° er forskjellen i oppnådd poretrykk på rundt 15kPa

Influensområde av tilleggsporetrykk

Om en studerer horisontalsnittene av poretrykket, som i Figur 35, kan en se at poreovertrykk av betydning ikke initieres lengre enn 0,4m fra ytterkant av pel ($x=0,9m$), når volumtøyning blir påsatt. Dette gjelder for $\epsilon=3\%$ og $\epsilon=5\%$, mens for $\epsilon=1\%$ er poreovertrykket så lavt at det kan sies å være neglisjerbart også helt inne ved KS-pelen. Utbredelsen på momentant poreovertrykk ved påsatt volumtøyning blir ikke påvirket av dilatansvinkelen i særlig grad.

Som det kan observeres av fargeplottene av forskjellig tid etter installasjon av KS-pelen, brer tilleggsporetrykket seg utover i x-retning med tiden, samtidig som verdien av tilleggsporetrykket minker. Dette gjelder alle tilfeller. For de fleste tilfeller går maksimalverdien av tilleggsporetrykket lengre ut i leirlaget (positiv x-retning) og mot midten av kvikkeleirelaget med tiden, men dette er ikke tilfellet for alle kombinasjonene av ϵ og ψ . Maksimalverdien av poretrykk etter 1, 5, 10 og 50 dager i tillegg til

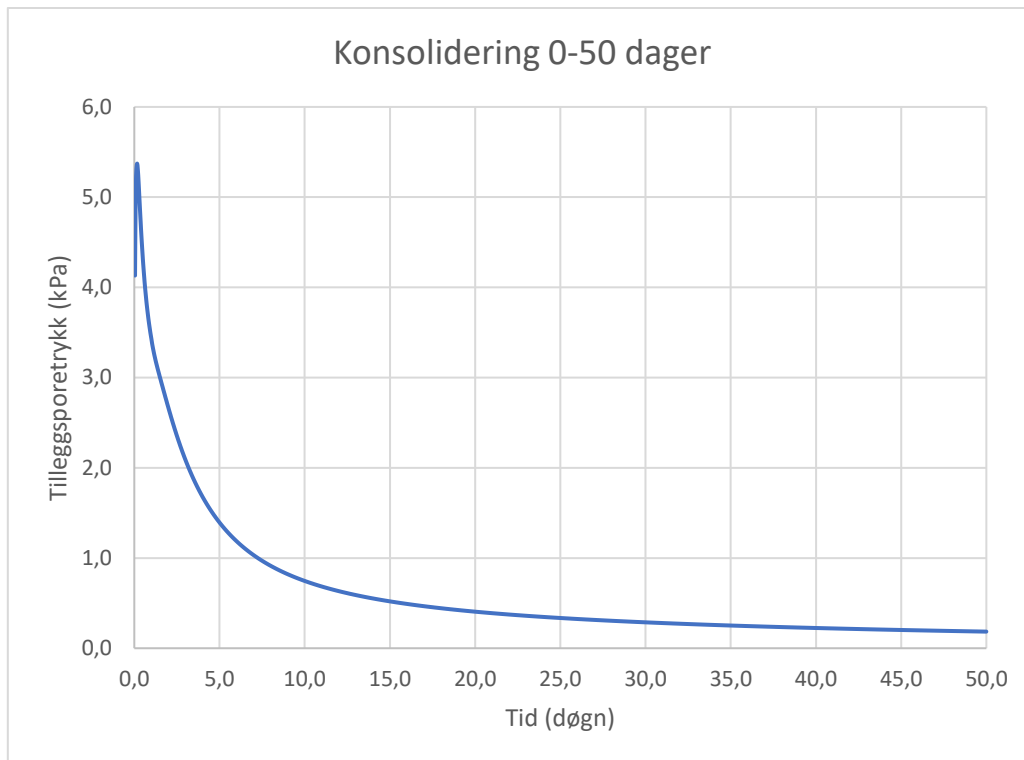
koordinatene til punktet hvor maksimalverdien opptrer, er vist i Tabell 10 for alle tilfeller. Fordeling av momentant poreovertrykk ved udrenert påføring av volumtøyning har en litt jevnere fordeling langs pelen ved større volumtøyninger

Tabell 10 Maksimalverdi av poreovertrykk, Δu_{max} (kPa) og koordinater til punkt

| Tilfelle | 1 døgn | | 5 døgn | | 10 døgn | | 50 døgn | |
|-------------------------------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|
| | Δu_{max} | Punkt | Δu_{max} | Punkt | Δu_{max} | Punkt | Δu_{max} | Punkt |
| $\epsilon=1\%$, $\psi=0^\circ$ | 2,1 | (0,7, -13,6) | 0,5 | (3,0, -13,3) | 0,3 | (1,2, -13,1) | 0,1 | (2,0, -11,4) |
| $\epsilon=1\%$, $\psi=-3^\circ$ | 2,1 | (0,7, -13,6) | 0,5 | (3,0, -13,3) | 0,3 | (1,2, -13,1) | 0,1 | (2,0, -11,4) |
| $\epsilon=1\%$, $\psi=-5^\circ$ | 2,1 | (0,7, -13,6) | 0,5 | (3,0, -13,3) | 0,3 | (1,2, -13,1) | 0,1 | (2,0, -11,4) |
| $\epsilon=3\%$, $\psi=0^\circ$ | 21,7 | (0,4, -4,4) | 3,3 | (0,8, -3,7) | 1,5 | (1,0, -3,8) | 0,3 | (2,0, -10,6) |
| $\epsilon=3\%$, $\psi=-3^\circ$ | 37,6 | (0,4, -4,4) | 3,4 | (0,8, -3,8) | 1,6 | (1,0, -3,8) | 0,3 | (1,9, -9,7) |
| $\epsilon=3\%$, $\psi=-5^\circ$ | 21,8 | (0,4, -4,4) | 3,5 | (0,8, -3,8) | 1,7 | (0,9, -3,9) | 0,4 | (1,9, -7,1) |
| $\epsilon=5\%$, $\psi=0^\circ$ | 41,3 | (0,5, -4,3) | 8,4 | (0,5, -4,1) | 4,0 | (1,0, -3,7) | 0,7 | (1,7, -7,3) |
| $\epsilon=5\%$, $\psi=-3^\circ$ | 41,4 | (0,5, -4,3) | 8,9 | (0,4, -4,0) | 4,3 | (1,0, -3,8) | 0,8 | (1,7, -7,3) |
| $\epsilon=5\%$, $\psi=-5^\circ$ | 41,3 | (0,5, -4,3) | 9,3 | (0,8, -3,8) | 4,5 | (1,0, -3,8) | 0,9 | (1,7, -7,3) |

Konsolidering av poreovertrykk

Konsolideringskurven for et punkt på 7m dybde og 0,22m (0,62, -7,00) fra ytterkant av pelen er fremstilt i Figur 40. Punktet er ikke helt i kanten av pelen og dette gjør at det ikke oppnås like høy maksimal verdi av poretrykk for samme tilfelle. I tillegg fører det til at poretrykket øker en kort periode før det reduseres for de lave verdiene av volumtøyning. Valg av punkt for å studere konsolideringen har bakgrunn i målepunktene av feltdata, og ønske om å ha best mulig sammenligningsgrunnlag.



Figur 40 Konsolideringsforløp i punkt (0,62, -7)

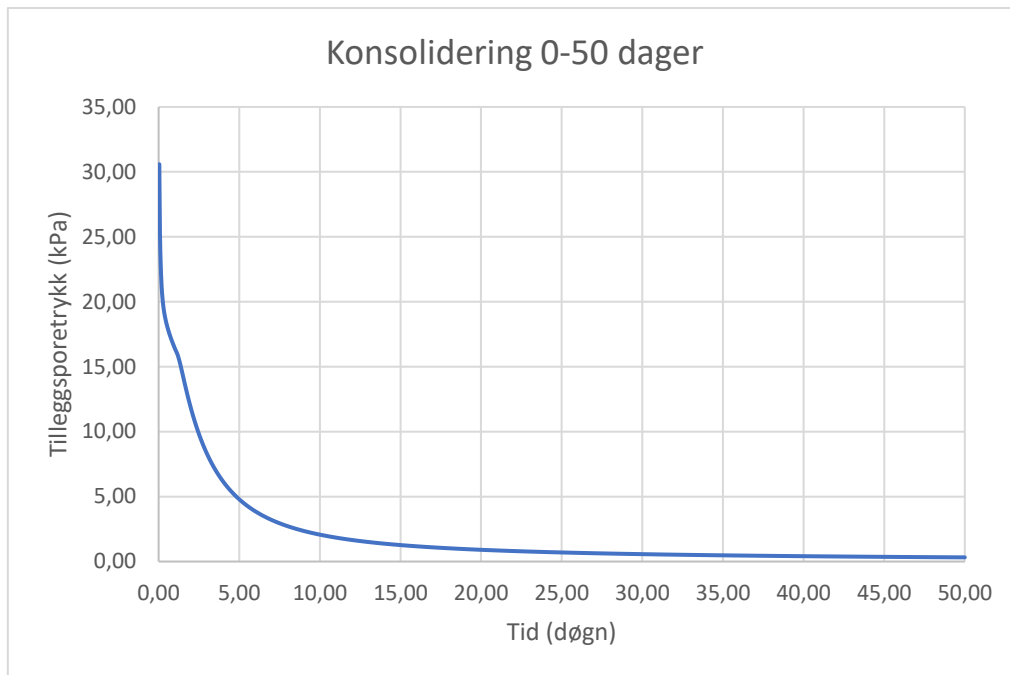
Konsolideringskurvene for omtalt punkt viser at poreovertrykket er tilnærmet dissipert i en avstand 0,62m fra pelen før det har gått 15 dager for alle tilfeller. I tillegg er rundt 80% av høyeste verdi av poretrykket dissipert etter ca. 5 dager. I det følgende er tilleggsporetrykk på 1kPa regnet som fullført konsolidering, fordi det da er snakk om ubetydelig poreovertrykk.

For alle tilfeller med $\epsilon=1\%$ er poretrykket neglisjerbart (3,4kPa) 0,22m fra kant av KS-pel og en kan dermed si at poretrykket dissiperer raskt. Poreovertrykksverdiene er såpass lave at det ikke gir mening å snakke om konsolidering, fordi verdien aldri har vært betydelig.

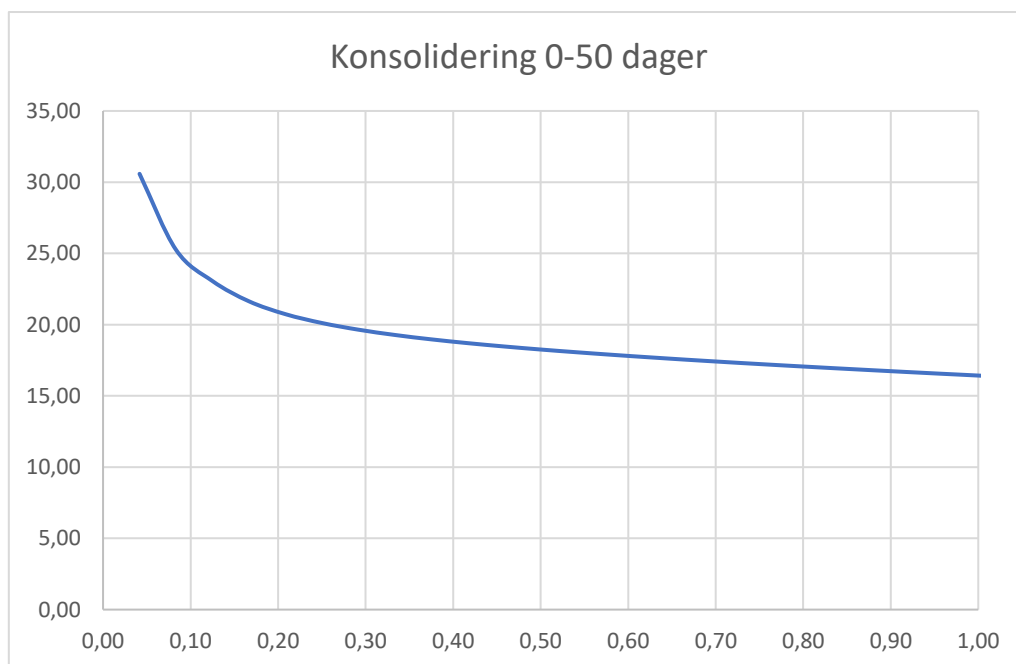
For $\epsilon=3\%$ reduseres poreovertrykket til under 5kPa for alle tilfeller, i løpet av 0,5 døgn etter påsatt volumtøyning. Poretrykket når 1kPa etter omtrent 7,5, 8 og 9 døgn for henholdsvis $\psi=0^\circ$, -3° og -5° . En ser imidlertid at poretrykkskurven ikke flater ut før etter omtrent 15 døgn.

For $\epsilon=5\%$ har dilatansvinkelen, ψ , betydning for konsolideringstiden. Ved $\psi=0^\circ$, går poretrykket ned til 5kPa omtrent etter 4 dager, for $\psi=-3^\circ$ omtrent etter 5 dager og for $\psi=-5^\circ$ omtrent etter 6 døgn. Når det gjelder hvor raskt poreovertrykket går ned til 1kPa, varierer dette også med dilatansvinkelen. For $\psi=0^\circ$ nås 1kPa etter omtrent 20 døgn, for $\psi=-3^\circ$ nås 1kPa etter omtrent 25 døgn og $\psi=-5^\circ$ etter omtrent 30 dager. Konsolideringskurven har nesten flatet ut ved nådde 1kPa for $\epsilon=5\%$.

For å undersøke hvor lang tid konsolideringen i verste tilfelle tar, er også konsolideringskurven for $\epsilon=5\%$ og $\psi=-5^\circ$ så nært KS-pelen som mulig vist. Denne kan studeres i Figur 41. Også i dette tilfellet ser en at poreovertrykker er ca. lik 0 etter 15 døgn.



Figur 41 Konsolidering nært kant av pel (0,42, -6,95) for tilfelle med høyest oppnådd poreovertrykk



Figur 42 Konsolidering for tilfelle med høyest oppnådd poretrykk i (0,42, -6,95) etter 1 døgn

I Figur 42 er det vist konsolidering første døgn etter påført volumtøyning for et punkt nært pelen for tilfellet som gir høyest poretrykk. En ser at poreovertrykket i dette tilfellet bruker mer enn 1 døgn på bli redusert til 15kPa.

Konsolideringsforløpet er forskjellig for forskjellige steder i jordvolumet. Både når det gjelder verdier og hvor raskt poreovertrykket faller. For eksempel er det observert at et

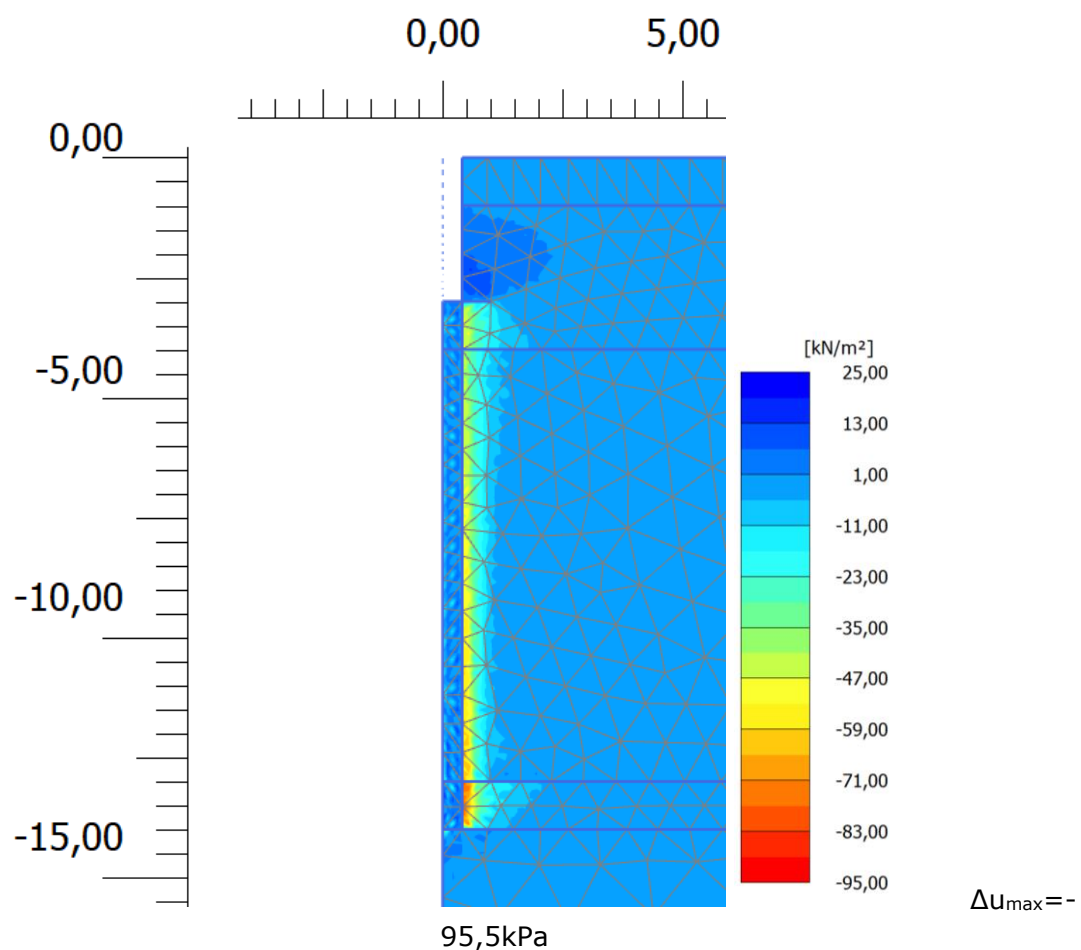
punkt nært pelen og grunnere oppnår høyere poretrykk ved installasjon, men har lavere poretrykk både etter 1, 5 og 10 dager.

4.3.2. Hardening Soil

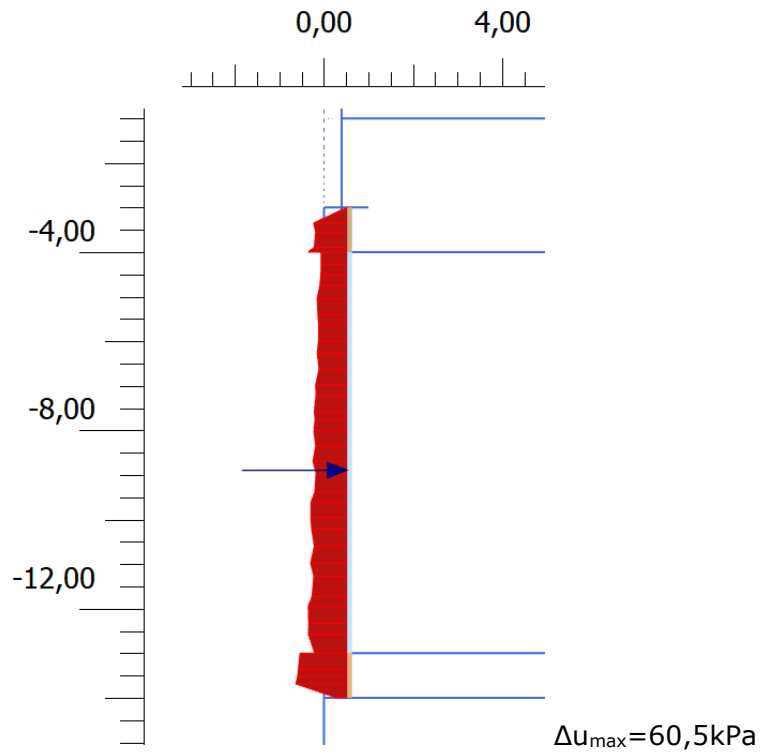
I Figur 43 til Figur 45 er poreovertrykket ved installasjon av én KS-pel (påført volumtøyning) ved bruk Hardening Soil-modellen vist. Figur 43, Figur 44 og Figur 45 viser henholdsvis fargeplott av tilleggsporetrykket, vertikalsnitt 0,58m fra senter av KS-pelen og horisontalsnitt i -7m av poretrykket med en gang etter installasjonen. Figur 46 til Figur 49 viser fargeplott av poreovertrykket 1, 5, 10 og 50 dager etter installasjon av KS-pelen.

I vedlegg B.4 er resultater for andre kombinasjoner av ϵ og ψ presentert. ϵ er variert mellom 1% og 5% og ψ er variert mellom 0° og -5° .

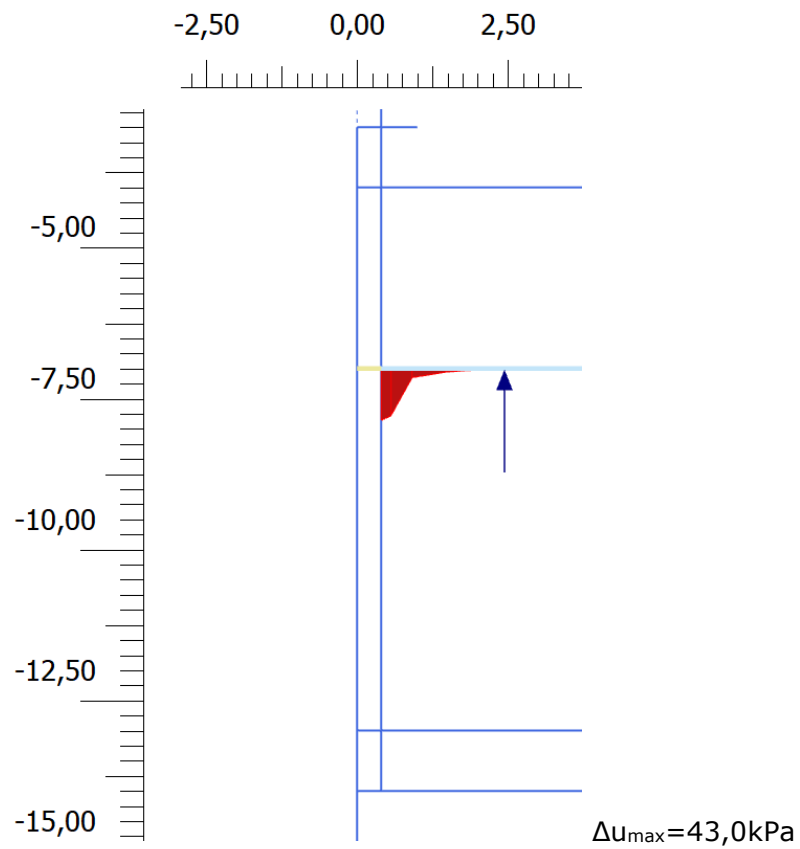
OBS! FIGURENE ER VIST MED FORSKJELLIG SKALA. HVER FIGUR MÅ DERFOR LESES SAMMEN MED TILHØRENDE SKALA. Dette er gjort for å få frem poretrykk også etter 5-50 dager.



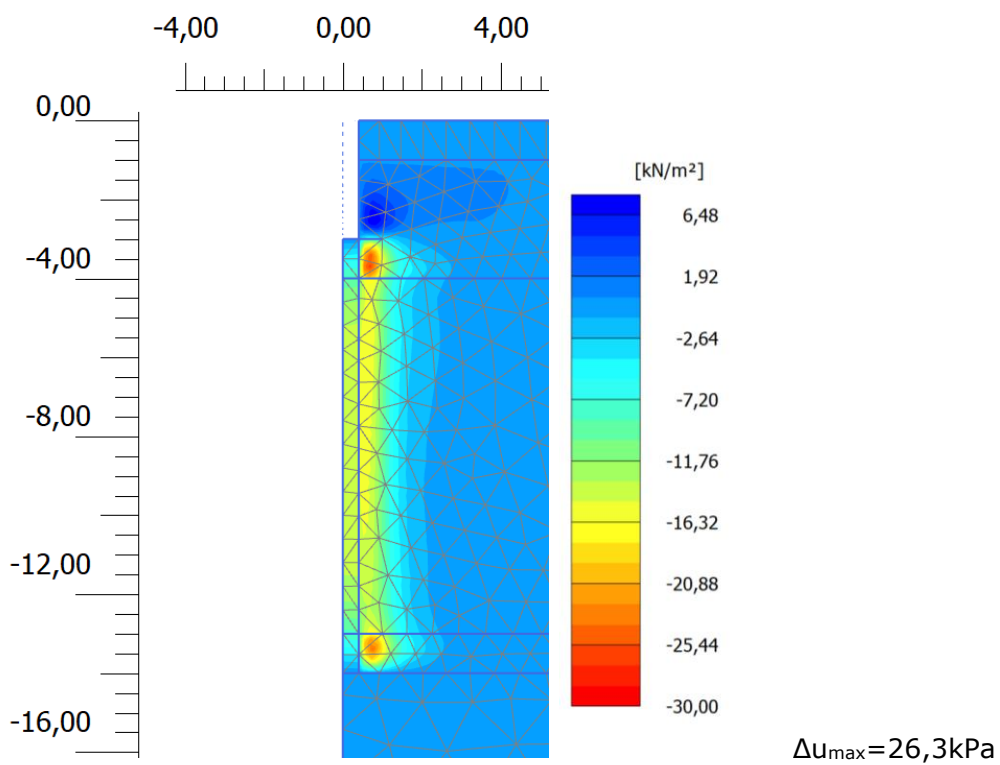
Figur 43 Poretrykksfordeling ved påført volumtøyning



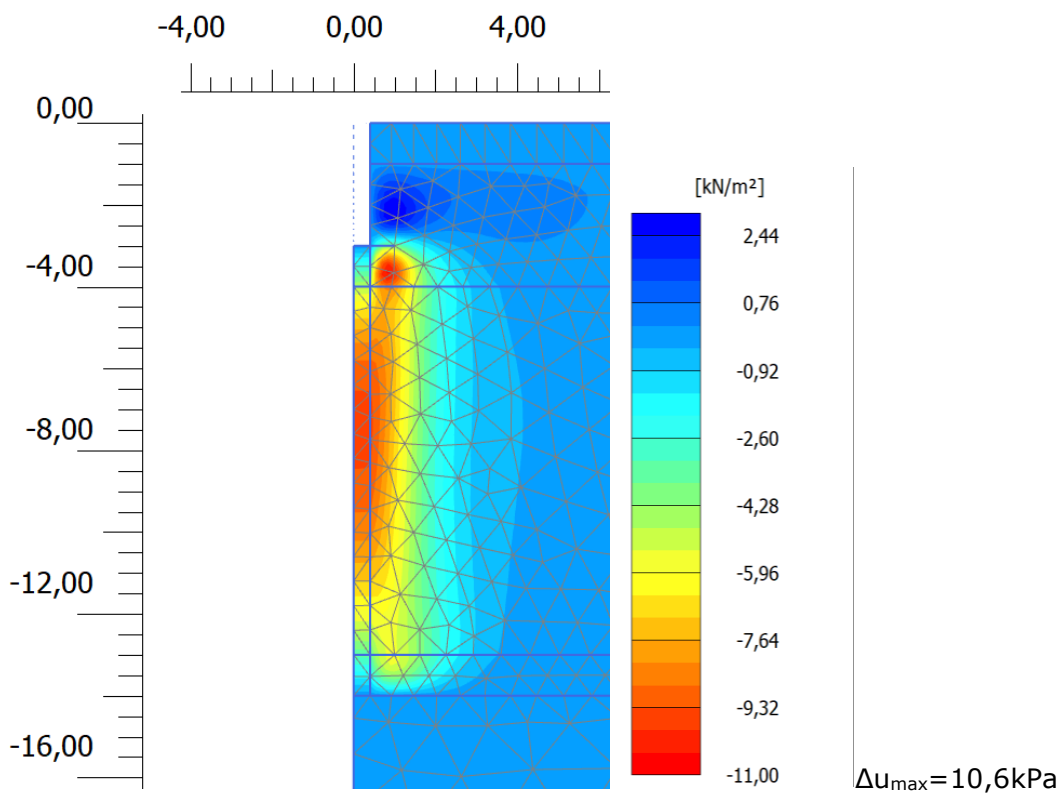
Figur 44 Vertikalsnitt av poretrykk 0,58m fra senter av pel ved påført volumtøyning



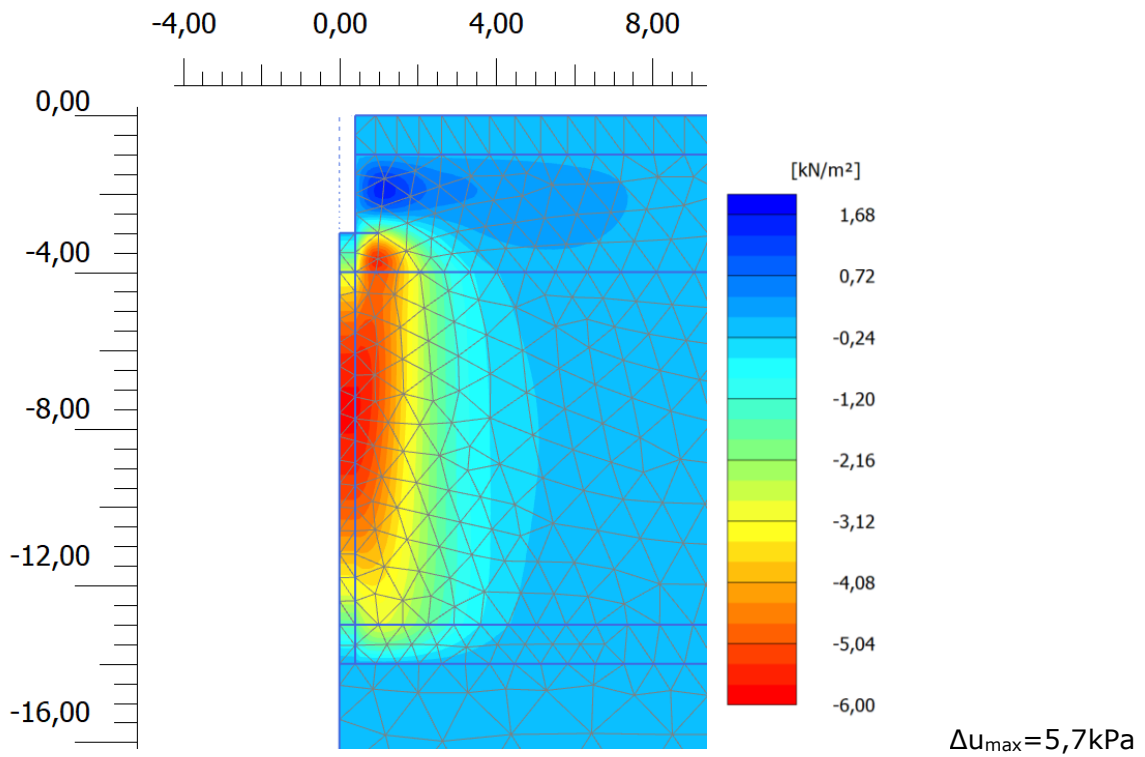
Figur 45 Horisontalsnitt av poretrykk i -7m ved påført volumtøyning



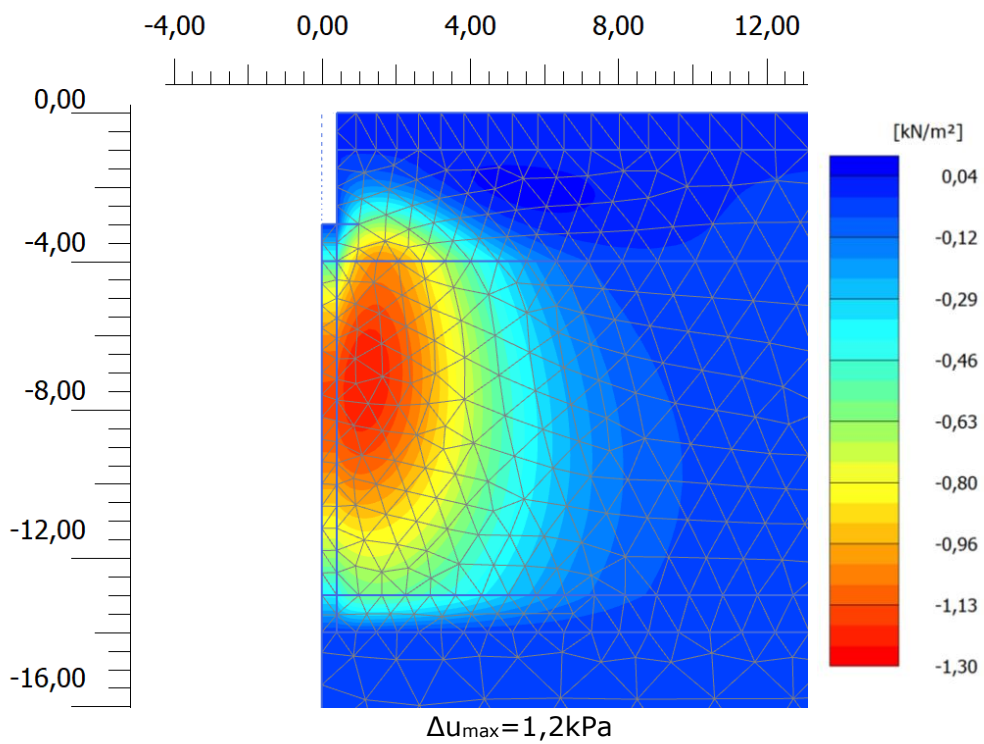
Figur 46 Poretrykksfordeling 1 dag etter påført volumtøyning



Figur 47 Poretrykksfordeling 5 dager etter påført volumtøyning



Figur 48 Poretrykksfordeling 10 dager etter påført volumtøyning



Figur 49 Poretrykksfordeling 50 dager etter påført volumtøyning

I det følgende er resultatene fra Hardening Soil-modelleringen oppsummert.

Størrelse av tilleggsporetrykk

I Tabell 11 er største oppnådde verdi av poreovertrykket ved installasjon av KS-pel for hver kombinasjon av ϵ og ψ gitt. Hvor maksimal verdi av poretrykket oppstår langs pelen er gitt av fargeplottene.

Tabell 11 Maksimalt poreovertrykk (kPa) for variasjon av ϵ og ψ .

| ϵ / ψ | 0° | -3° | -5° |
|-------------------|-------|-------|-------|
| 1% | 19,1 | 19,0 | 19,0 |
| 3% | 95,5 | 99,9 | 102,4 |
| 5% | 139,4 | 147,9 | 152,7 |

Fra resultatene kan en blant annet observere at:

- Oppnådd poreovertrykk ved påført volumtøyning er høyere jo større volumtøyning som påføres.
- Virkningen av økt volumtøyning er større ved lavere verdier for dilatansvinkel. For en økning av volumtøyning fra 1-5% vil poreovertrykket øke med henholdsvis 116,7kPa, 125,3kPa og 129,8kPa for dilatansvinkler 0°, -3° og -5°.
- For $\epsilon=1\%$ gir endring i dilatansvinkel neglisjerbare endringer i poretrykk.
- For $\epsilon=3\%$ påvirker dilatansvinkelen maksimalverdi av poretrykket noe. For en endring i ψ fra 0 til -5° er forskjellen i oppnådd poretrykk på rundt 7kPa.
- For $\epsilon=5\%$ påvirker dilatansvinkelen maksimalverdi av poretrykket noe. For en endring i ψ fra 0 til -5° er forskjellen i oppnådd poretrykk på rundt 14kPa

Influensområde for tilleggsporetrykk

Om en studerer horisontalsnittene av poreovertrykket, som i Figur 45, ser en hvor langt tilleggsporetrykk brer seg utover fra pelen i dybde -7m når volumtøyning blir påført. For $\epsilon=1\%$, er utbredelsen på omtrent 0,6m fra kant av pel ($x=1m$). Lengre unna enn dette er poretrykket tilnærmet lik 0. For $\epsilon=3\%$ blir også poreovertrykket ubetydelig 0,6m fra kant av pel ($x>1m$), men det går ikke like raskt mot 0 som for $\epsilon=1\%$. For $\epsilon=5\%$ blir poretrykket ubetydelig omtrent 1,0m fra kant av pel ($x=1,6m$). Det ser ikke ut som dilatansvinkelen påvirker utbredelsen i særlig grad.

Fargeplottene viser at for ulik tid etter påført volumtøyning, som i Figur 46 til Figur 49, at poreovertrykket brer seg i positiv x-retning, lengre fra KS-pelen med tiden, samtidig som verdien av tilleggsporetrykket blir mindre. Dette gjelder alle tilfeller. For de fleste tilfeller går maksimalverdien bort fra pelen og lengre ut i leirlaget (i positiv x-retning) og mot midten av kvikkeleirelaget (y-retning) med tiden, men dette er ikke tilfellet for alle kombinasjonene av ϵ og ψ . Maksimalverdien av poretrykk etter 1, 5, 10 og 50 døgn i tillegg til koordinatene for punktet hvor denne verdien opptrer, er vist i Tabell 12, for alle

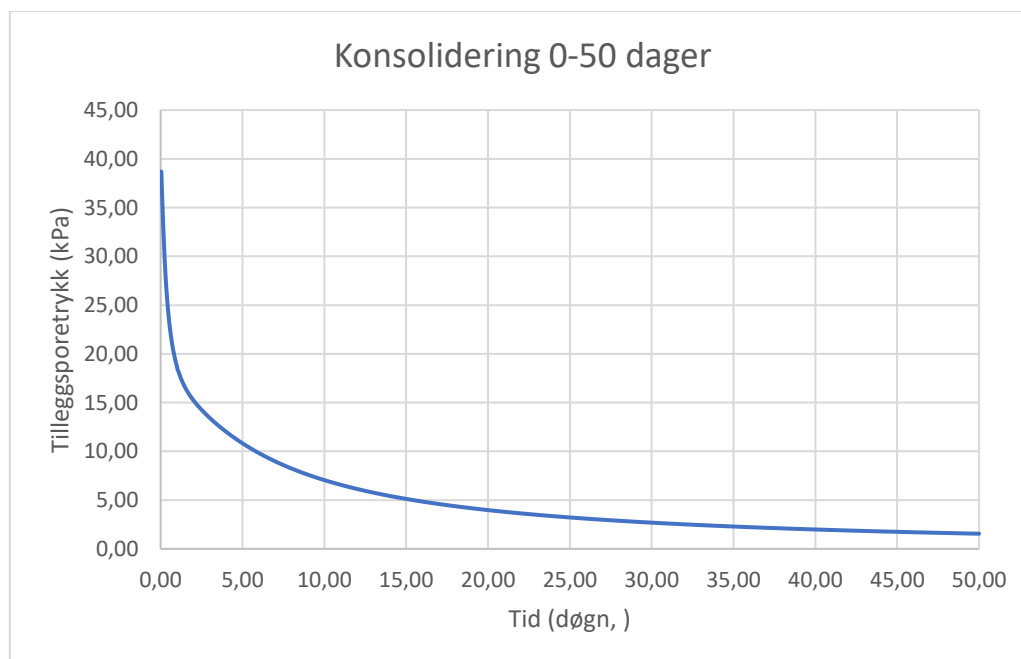
tilfeller. Fordeling av momentant poretrykk ved udrenert påføring av volumtøyning har jevnere fordeling langs pelens lengde ved større volumtøyninger.

Tabell 12 Maksimalverdi av poreovertrykk Δu_{max} (kPa) til ulike tider for alle tilfeller

| Tilfelle | 1 døgn | | 5 døgn | | 10 døgn | | 50 døgn | |
|-------------------------------------|------------------|--------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
| | Δu_{max} | Punkt | Δu_{max} | Punkt | Δu_{max} | Punkt | Δu_{max} | Punkt |
| $\epsilon=1\%$, $\psi=0^\circ$ | 5,4 | (0,7, -3,7) | 1,8 | (0,8, -3,7) | 0,8 | (0,5, -6,8) | 0,1 | (1,3, -7,0) |
| $\epsilon=1\%$, $\psi=-3^\circ$ | 5,4 | (0,7, -3,7) | 1,8 | (0,8, -3,7) | 0,8 | (0,5, -6,8) | 0,1 | (1,3, -7,0) |
| $\epsilon=1\%$, $\psi=-5^\circ$ | 5,4 | (0,7, -3,7) | 1,8 | (0,8, -3,7) | 0,8 | (0,5, -6,8) | 0,1 | (1,3, -7,0) |
| $\epsilon=3\%$, $\psi=0^\circ$ | 26,3 | (0,7, -3,7) | 10,6 | (0,4, -7,7) | 5,7 | (0,4, -7,7) | 1,2 | (1,2, -7,4) |
| $\epsilon=3\%$, $\psi=-3^\circ$ | 26,8 | (0,7, -3,7) | 10,8 | (0,4, -7,7) | 6,3 | (0,4, -7,7) | 1,3 | (1,2, -7,4) |
| $\epsilon=3\%$, $\psi=-5^\circ$ | 27,0 | (0,7, -3,7) | 11,5 | (0,4, -7,7) | 6,8 | (0,4, -7,7) | 1,4 | (1,2, -7,4) |
| $\epsilon=5\%$, $\psi=0^\circ$ | 48,6 | (0,8, -13,4) | 19,0 | (0,0, -8,2) | 12,0 | (0,4, -7,7) | 1,6 | (1,2, -7,7) |
| $\epsilon=5\%$, $\psi=-3^\circ$ | 49,6 | (0,8, -13,4) | 22,1 | (0,0, -8,2) | 13,7 | (0,4, -7,7) | 3,0 | (1,2, -7,7) |
| $\epsilon=5\%$, $\psi=-5^\circ$ | 50,2 | (0,8, -13,4) | 24,6 | (0,0, -8,2) | 15,0 | (0,4, -7,7) | 3,2 | (1,2, -7,7) |

Konsolidering

Konsolideringskurven for et punkt på omtrent 7 meters dybde og 0,58m fra ytterkant av pelen er fremstilt i Figur 50. Punktet er ikke helt i kanten av pelen og dette gjør at det ikke oppnås like høyt poretrykk som maksimal verdi for samme tilfelle.



Figur 50 Konsolideringsforløp etter påført volumtøyning i punkt (0,58, -7,01)

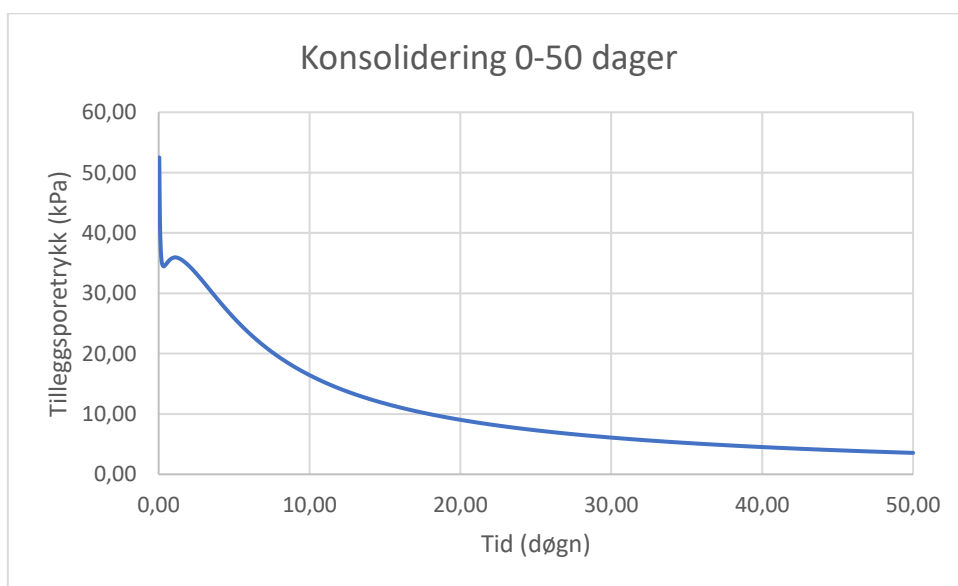
For alle tilfeller flater poretrykket i punkt (0,58, -7,01) ut etter rundt 20 døgn.

For $\epsilon=1\%$ nås 1kPa før det har gått 10 døgn for alle testede verdier av ψ . Det er på ingen tidspunkt snakk om høye verdier av poreovertrykk.

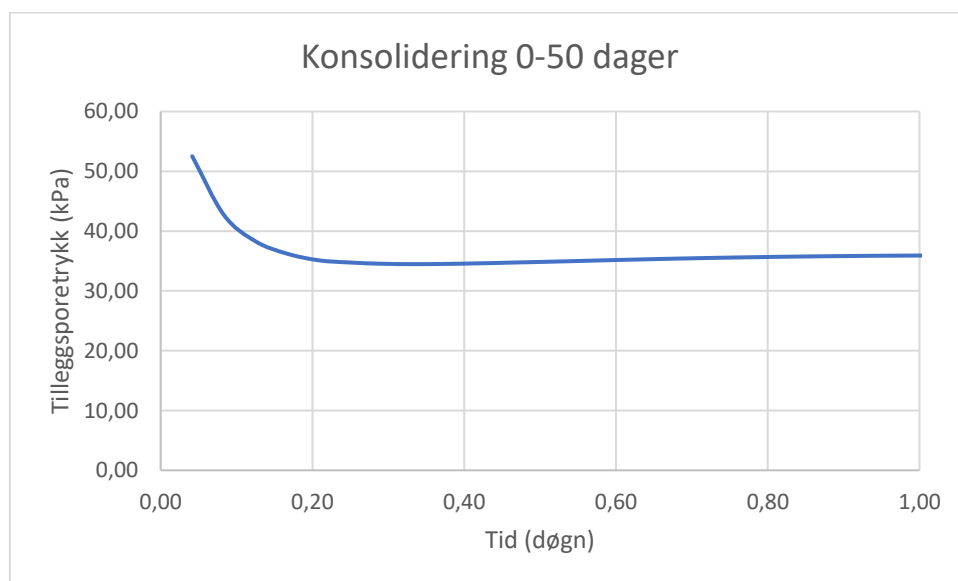
For $\epsilon=3\%$ når tilleggsporetrykket 5kPa etter 15-18 dager (varierer med ψ). For ingen av tilfellene nås 1kPa i løpet av 50 dager, men tilleggsporetrykket er omtrent 2kPa etter 50 dager.

For $\epsilon=5\%$ når tilleggsporetrykket 10kPa etter 15-18 dager (varierer med ψ). 5kPa nås etter omtrent 50 dager for alle tilfeller.

For å undersøke hvor lang tid konsolideringen i verste tilfelle tar, er det vist konsolideringskurve for $\epsilon=5\%$ og $\psi=-5^\circ$ for et punkt så nær KS-pelen som mulig i omtrent 7m dybde. Dette er vist i Figur 51.



Figur 51 Konsolidering nært pel (0,43, -6,98) verste tilfelle



Figur 52 Konsolidering nært pel (0,43, -6,98) verste tilfelle første døgn

I Figur 52 er det vist konsolidering første dag etter påført volumtøyning for et punkt nært pelen for tilfellet som gir høyest poretrykk. En ser at poreovertrykket i dette tilfellet går ned til omtrent 35kPa, men at poretrykket stiger litt igjen i løpet av det første døgnet.

Resultatene fra FEM-analysen kommenteres og diskutres i kapittel 7.

5. Analytiske- og empiriske løsninger

5.1. Cavity Expansion Method

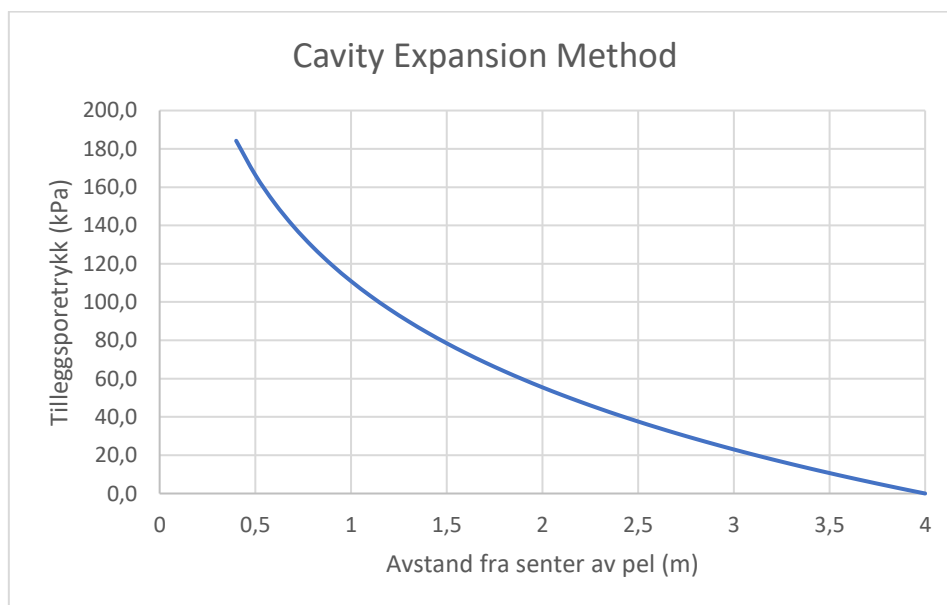
Poreovertrykk funnet med analytisk løsning for ekspansjon av hulrom, presentert i kapittel 2.4.1, ble funnet for ulike verdier av avstanden til senter av pelen, r . Det er brukt parametere som ligner feltparametere fra prosjektet på Sluppen. Verdier av input er gitt i Tabell 13.

Tabell 13 Parametere brukt i Cavity Expansion Method

| Parameter | Verdi |
|-----------------------------|---------|
| Skjærmodul, G | 4000kPa |
| Udrenert skjærstyrke, c_u | 40kPa |
| Radius av pel, r_0 | 0,4m |

Plastisk sone, og gyldighetsområde for ligning (2-14), $r_p = 0,4m \cdot \sqrt{\frac{4000kPa}{40kPa}} = 4m$.

Resultatene er vist i Figur 53, og en ser at tilleggsporetrykket avtar med avstand til pelen og er redusert til 0 ved $r=4m$.



Figur 53 Variasjon av tilleggsporetrykk med avstand fra senter av pel for Cavity Expansion Method

5.2. Shearing Expanding Method

Shen, Miura og Kogas (2003) analytiske løsning for tilleggsporetrykk ved KS-stabilisering, omtalt i kapittel 2.4, ble testet med parametere som passer forhold på prosjektet på Sluppen. Målet var å beregne størrelsen på poretrykket ved installasjon av en KS-pel, samt å se om det er stor forskjell i forhold til analytisk løsning for peleramming. I tillegg er det interessant å sammenligne verdien på tilleggsporetrykket med målte felldata og FEM-analyse.

5.2.1. Valg av parametere

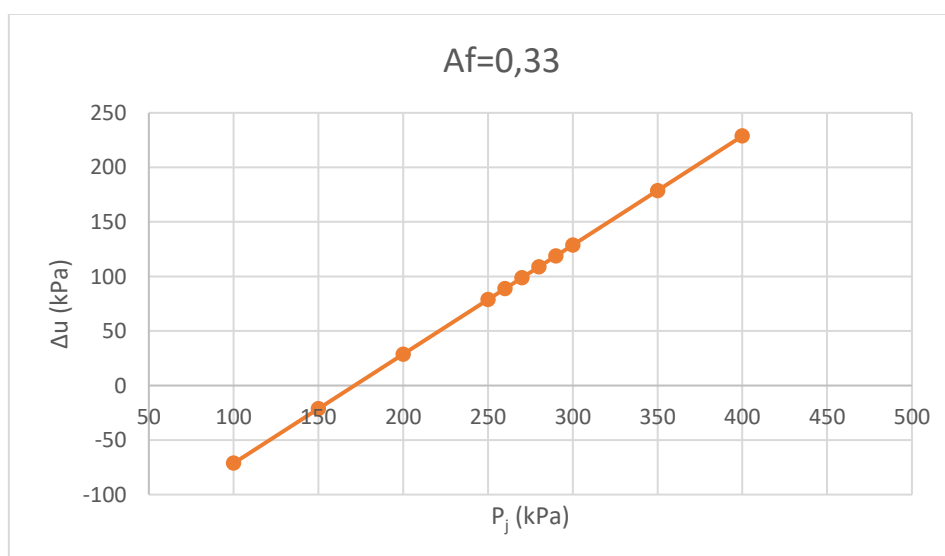
For valg av parametere er det tatt utgangspunkt i informasjon i kapittel 3. Verdier som er brukt er sammenfattet i Tabell 14 og forklaring og begrunnelser følger etter. Utrekning av p_0 kan ses som en del av håndberegningen i vedlegg C.1.

Tabell 14 Parametere analytisk løsning

| Parameter | Symbol | Verdi |
|--------------------------------|--------|----------|
| Horisontaltrykk | p_0 | 101,5kPa |
| Installasjonstrykk | P_j | 266kPa |
| Skjærstyrke | c_u | 40kPa |
| Radius KS-pel | R_c | 0,4m |
| Skemptions poretrykksparemeter | A_f | 0-1,5 |
| Radius plastisk sone | R_p | 3,15m |

Installasjonstrykket, P_j , er ifølge peleprotokollene omtrent 800kPa. Verdien av lufttrykk som når ytterkant av hulrommet ettersom det ekspanderer, vil imidlertid bli lavere. Dette er på grunn av at lufttrykket spres over en større omkrets. I tillegg vil noe luft gå oppover og nedover i KS-pelen. For å finne en representativ verdi for P_j , er det tatt utgangspunkt i et rent elastisk tilfelle. Etter Janbus proetrykklikning, ligning (2-6), vil poretrykksendringen være lik endring i middelspenning $\Delta u = \Delta \sigma_m$ fordi $D=0$.

Videre ble felldata (største målte verdi, 95kPa) brukt, og vi kan si at endring i middelspenning $\Delta \sigma_m=95$ kPa. Videre ble poretrykksøkningen, Δu , funnet med ligning (2-15) og plottet mot forskjellige verdier av P_j for et rent elastisk tilfelle ($A_f = \frac{1}{3}$). Dette er gjort i Figur 54. Ut fra figuren kan det se ut som P_j ligger mellom 260kPa og 270kPa for et tilleggsporetrykk på 95kPa for elastisk oppførsel. Dette er bekreftet med en håndberegning hvor $P_j=266$ kPa. Se håndberegningen i vedlegg C.1.



Figur 54 Tilleggsporetrykk, Δu , med variasjon i installasjonstrykk, P_j . $A_f=0,333$

For videre beregninger er $P_j=266\text{kPa}$ brukt. Etter ligning (2-19) er $A_f=1,52$ og denne verdien brukes som utgangspunkt i noen av beregningene.

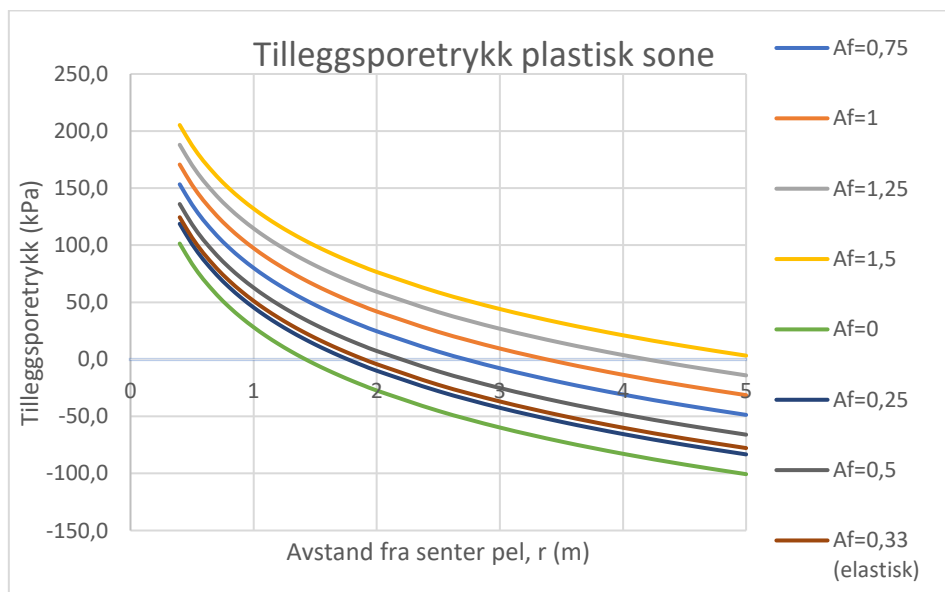
5.2.2. Resultater

Plastisk løsning med varierende A_f

Tilleggsporetrykk ved installasjon av én KS-pel er funnet med ligning (2-15) med forskjellige verdier av Skemptions poretrykksparemet A_f . Resultatene er vist i Figur 55 for $A_f=0-0,5$ (svakt overkonsoliderte leirer) og $A_f=0,75-1,5$ (svært sensitive leirer) med valg av A_f etter Skempton (1954). Poreovertrykket er også vist for $A_f=0,33$ som tilsvarer jord som oppfører seg rent elastisk.

Større verdi av A_f gir høyere verdi av tilleggsporetrykket, og lavere verdi av A_f gir lavere verdi av tilleggsporetrykk, for alle avstander fra senter av pelen. Ved ytterkant av pel ($r=0,4\text{m}$) varierer poreovertrykket mellom omtrent 205kPa og 101kPa for valgte intervall av A_f . For alle verdiene av A_f vil tilleggsporetrykket bli negativt ved store avstander ved bruk av den plastiske ligningen som kun er gjeldende i plastisk sone.

Størrelsen på plastisk sone bestemmes av forholdet $\frac{\Delta u}{c_u} = 1$. Det vil si at størrelsen på den elastiske sonen avhenger av verdien av A_f . Plastisk sone vil ha sin ytre grense der hvor $\Delta u=c_u=40\text{kPa}$. Verdien av A_f og størrelsen av plastisk sone er nærmere diskutert i kapittel 7.



Figur 55 Tilleggsporetrykk, Δu , mot avstand fra senter av KS-pel, r , for plastisk sone

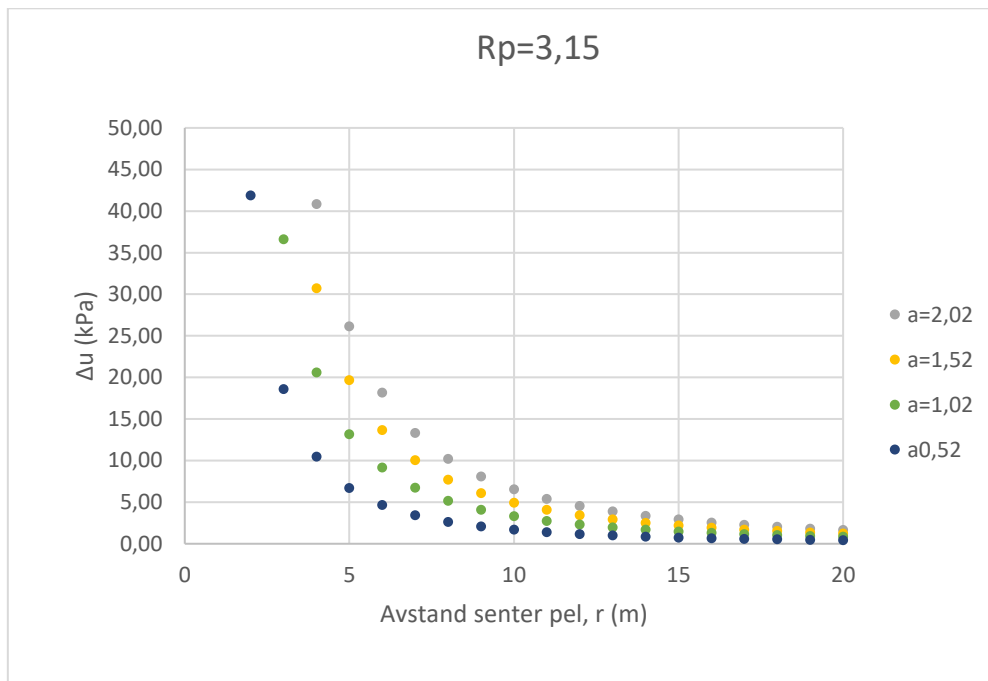
Elastisk løsning

For elastisk sone er ligning (2-16) brukt for å finne størrelse på tilleggsporetrykket ved installasjon av en KS-pel. Det er i videre beregninger forutsatt at radius av plastisk sone $R_p=3,15\text{m}$. Dette begrunnes med bruk av $A_f=1,52$, som oppnås med ligning (2-19). I Figur 72 er det illustrert hvor stor plastisk sone er for ulike verdier av A_f .

Tilleggsporetrykket er funnet for fire forskjellige verdier av a med $a < a_f$. Det er valgt å

bruke $A_f=1,52$ som gir $a_f=2,52$ etter ligning (2-18). I Figur 56 er det vist tilleggsporetrykk for $a=2,02$, $a=1,52$ og $a=1,02$ og $a=0,52$ for $r>R_p=3,15\text{m}$. Se forøvrig kapittel 7 for diskusjon rundt parameterne.

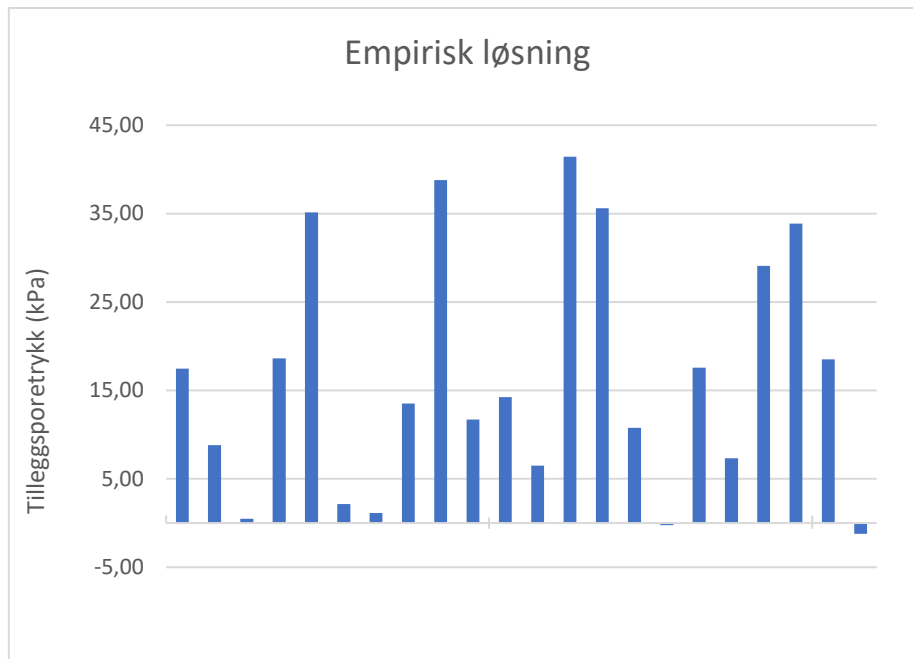
For alle verdier av a minker tilleggsporetrykket med avstand fra KS-pelen, og verdien nærmer seg 0 jo lengre unna senter av pelen en kommer. Høyere verdi av a gir høyere verdi av tilleggsporetrykket for alle verdier av r . Verdien av a utgjør imidlertid mindre større avstander fra senter av pelen det er snakk om.



Figur 56 Tilleggsporetrykk, Δu , mot avstand fra senter av KS-pel, r , for elastisk sone

5.3. Empirisk løsning

For hver av de mest markante poretrykksøkningene som er observert i PZ-17 og PZ-18, er det med ligning (2-20) simulert verdi av tilleggsporetrykket ved installasjon av KS-peler. Resultatet er fremstilt i Figur 57. Resultatene er videre diskutert og sammenlignet med feltdata i kapittel 7.



Figur 57 Tilleggsporetrykk beregnet med empirisk løsning

6. Feltnmålinger

I dette kapittelet er resultater fra poretrykksmålinger i felt i forbindelse med prosjektet på Sluppen, beskrevet i kapittel 3, presentert.

Under KS-stabiliseringen ble det gjort poretrykksmålinger over tid. Det ble her sett på tre poretrykksmålere, PZ-17, PZ-18 og PZ-19, som ble avlest én gang i timen, og det ble benyttet avlesninger i en periode fra 23. november 2018 til 06. februar 2019 (med unntak av PZ-18 som ble ødelagt under anleggsperioden og dermed har siste avlesning 17. januar 2019). Poretrykksmålingene er vist i vedlegg D, både for hele perioden og med en forstørring for perioden hvor det ble gjennomført KS-stabilisering. Poretrykksmålingene ble gjennomført blant annet fordi det var et overvåkningsbehov under selve KS-stabilisering.

For perioden med gjennomført KS-stabilisering ble de observerte poretrykksøkningene vurdert opp mot andre størrelser. Dette ble gjort på to ulike detaljnivå – grovt og fint. Det grove detaljnivået tar for seg de mest markante økningene. (Kan også inkludere korte perioder med liten nedgang i poretrykket). Det fine detaljnivået tar for seg hver periode hvor poretrykket har økt. For å finne poretrykket ble det innhentet data fra piezometerne og lufttrykkdata fra meteorologisk institutt. Lufttrykket ble trukket fra målt poretrykk på grunn av kalibrering av piezometerne og bestemmelse av nullnivå for poreovertrykk.

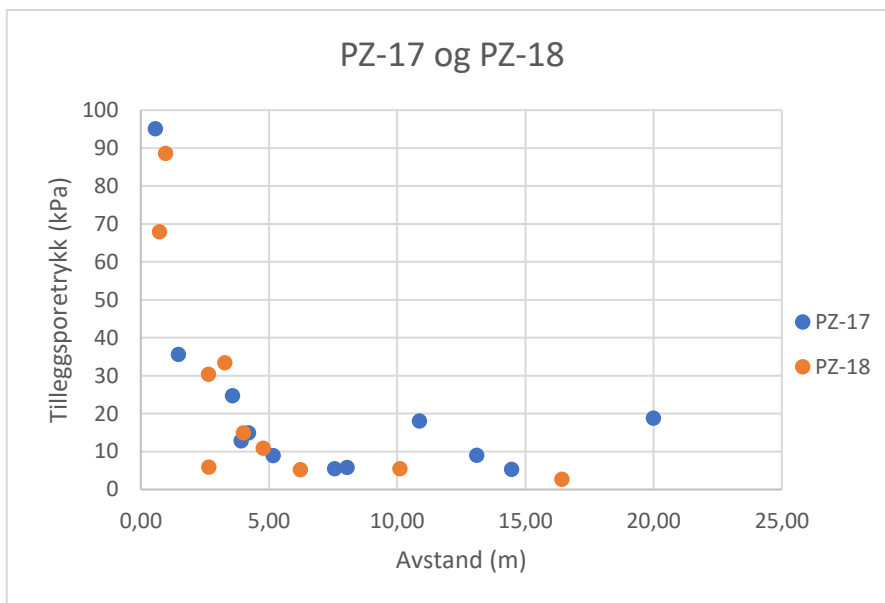
Avstander er beregnet med koordinater for KS-peler og piezometere og ved bruk av Pytagoras' setning.

Tilleggs-poretrykk er regnet ut fra startnivået til poretrykket som er den poretrykksverdien som var i jorda før KS-stabiliseringen startet.

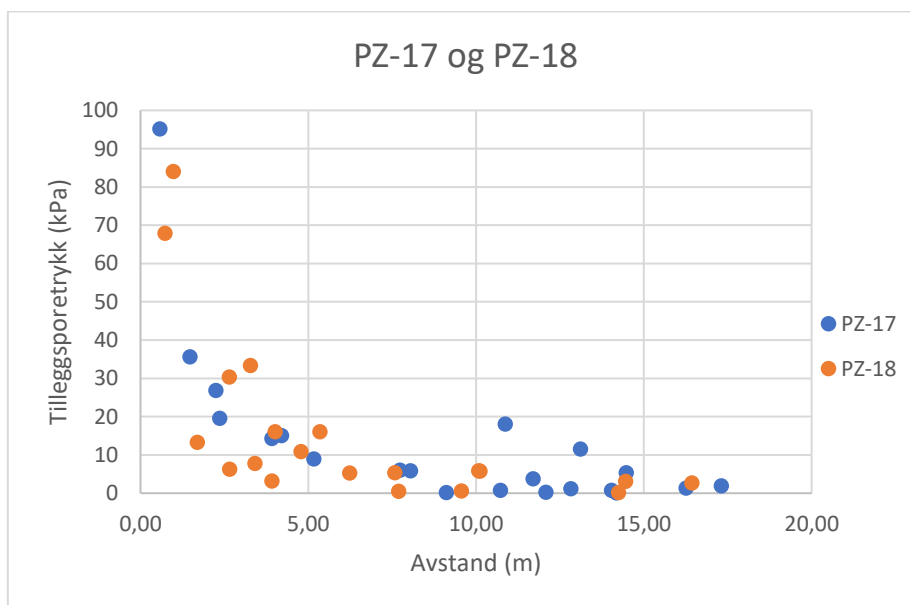
6.1. PZ-17 og PZ-18

6.1.1. Avstand til KS-peler mens økning

For PZ-17 og PZ-18 ble avstanden til KS-pelene som er installert i perioden hvor det har vært økning i poretrykket funnet. I Figur 58 og Figur 59 er avstanden fra poretrykksmåleren til senter av den KS-pelen som er installert *nærmest* poretrykksmåleren vist mot målte tilleggsporetrykk, for henholdsvis grovt og fint detaljnivå.



Figur 58 Tilleggsporetrykk vs. avstand fra senter av pel for nærmeste pel. Grovt detaljnivå.



Figur 59 Tilleggsporetrykk vs. avstand fra senter av pel for nærmeste pel. Fint detaljnivå.

I vedlegg E.1-E.2 er det fremstilt forskjellige plot som viser avstand til et utvalg av installerte KS-peler i periodene med poretrykksøkning. For både grovt og fint detaljnivå er det vist:

- Avstand til alle peler
- Avstand til alle peler innenfor 6m fra poretrykksmåleren
- Gjennomsnittsavstand til alle peler innenfor 6m fra poretrykksmåleren
- Avstand til nærmeste pel til poretrykksmåleren. (Også vist i Figur 58 og Figur 59).

Høyeste oppnådde poretrykk er 95,2kPa i avstand 0,58m fra senter av KS-pelen. Om vi ser bort fra to datapunkter, som skiller seg vesentlig fra de andre (for grov oppløsning), er poretrykket under 10kPa når avstanden til nærmeste KS-pel er større enn 5m-6m. Nærmere KS-pelen enn ca. 3,5m kan en oppnå tilleggsporetrykk over 20kPa. Det registreres at tilleggsporetrykket reduseres med avstand til nærmeste installerte KS-pel.

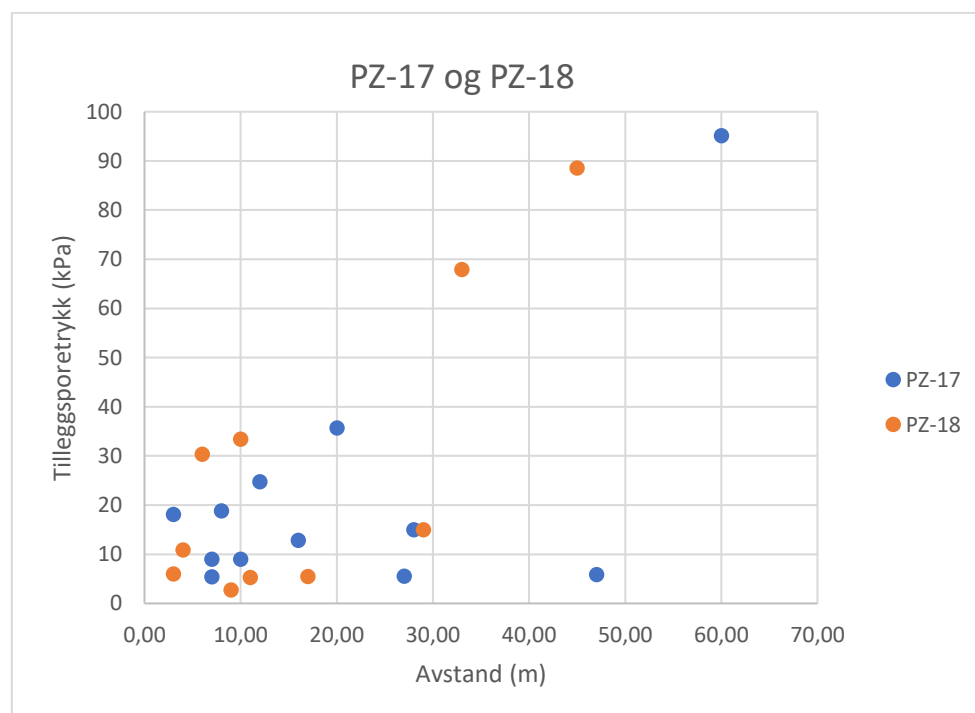
Det er rimelig å anta at mellom nærmeste KS-pel og en poretrykksmåler som måler økning i poretrykket er, har stor betydning for hvor stor tilleggsporetrykk som måles. Derfor ble det valgt å vise avstanden til nærmeste pel for hver periode med poretrykksøkning. Bakgrunnen for valget av fremstillingen av KS-peler innenfor 6m er at en på plottene med nærmeste KS-pel ser at det er innenfor 6m en oppnår poretrykk over 10kPa, og derfor ønsker man å studere pelene innenfor 6m nærmere. I tillegg ble alle peler i perioden med økning vist for å undersøke om det var noen sammenhenger å se.

6.1.2. Antall KS-peler mens økning

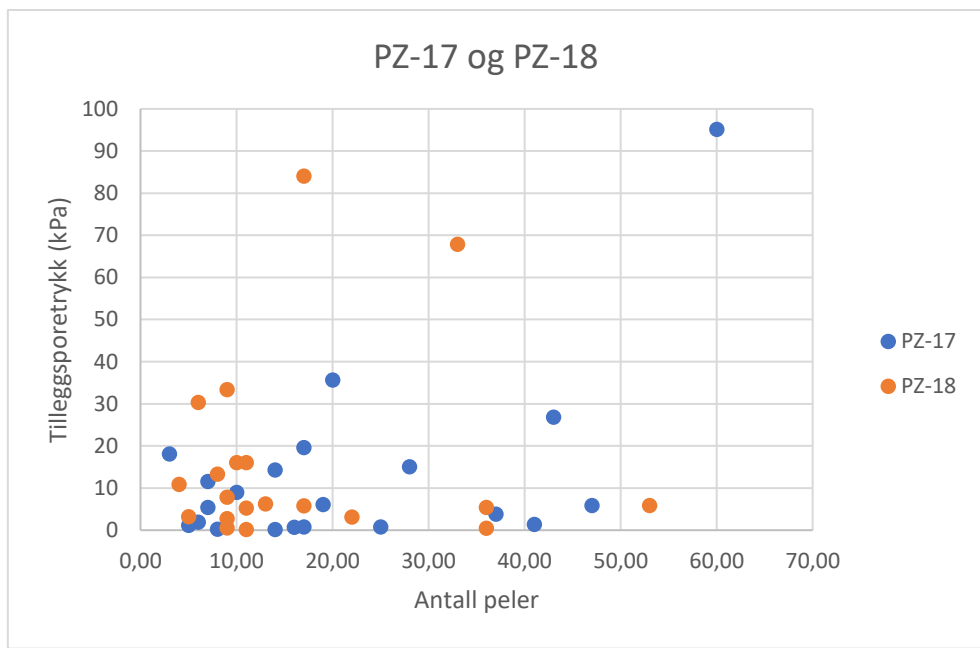
For hver periode med poretrykksøkning for PZ-17 og PZ-18 er det også funnet hvor mange KS-peler som er installert innenfor denne perioden. I vedlegg E.4-E.5 er det fremstilt plot som viser tilleggsporetrykk vs. antall peler. For både grovt og fint detaljnivå er det vist plot med:

- Alle peler i perioden med poretrykksøkning
- Alle peler innenfor 6m i perioden med proetrykksøkning

I Figur 60 og Figur 61, er det vist antall peller totalt for henholdsvis grovt og fint detaljnivå.



Figur 60 Antall KS-peler vs. tilleggsporetrykk. Grovt detaljnivå.



Figur 61 Antall KS-peler vs. tilleggsporetrykk. Fint detaljnivå.

Størrelsen på tilleggsporetrykket ser ut til å øke med antall installerte KS-peler i en periode med poretrykksøkning.

6.1.3. Reduksjon i poretrykk

For PZ-17 og PZ-18 er det funnet avstand til første KS-pel i tid etter maksimalt poretrykk, hvis denne KS-pelen var installert mens det var reduksjon i poretrykket. Dette er sett på som første installerte KS-pel som helt sikkert ikke gir videre poretrykksøkning. Resultatene er vist i Tabell 15.

Tabell 15 Avstand til første pel som ikke har gitt videre økning i poretrykk.

| PZ-17 | | PZ-18 | |
|--------|---------------------|--------|---------------------|
| Pelnr. | Avstand til pel (m) | Pelnr. | Avstand til pel (m) |
| 451 | 6,29 | 560 | 5,56 |
| 271 | 12,64 | 460 | 3,6 |
| 345 | 9,61 | 382 | 5,58 |
| 657 | 5,09 | 495 | 6,98 |
| 73 | 19,73 | 393 | 7,08 |
| 305 | 11,02 | 192 | 11,78 |
| | | 599 | 2,33 |
| | | 670 | 8,98 |
| | | 342 | 14,6 |

Avstand til første KS-pel som ikke gir videre økning i poretrykket varierer svært mye.

Det er funnet avstand til den nærmeste KS-pelen som er installert mens det er nedgang i poretrykket etter toppunkt på poretrykkskurven for PZ-17 og PZ-18. Resultatene er vist i Tabell 16.

Tabell 16 Nærmeste KS-pel mens nedgang i poretrykket.

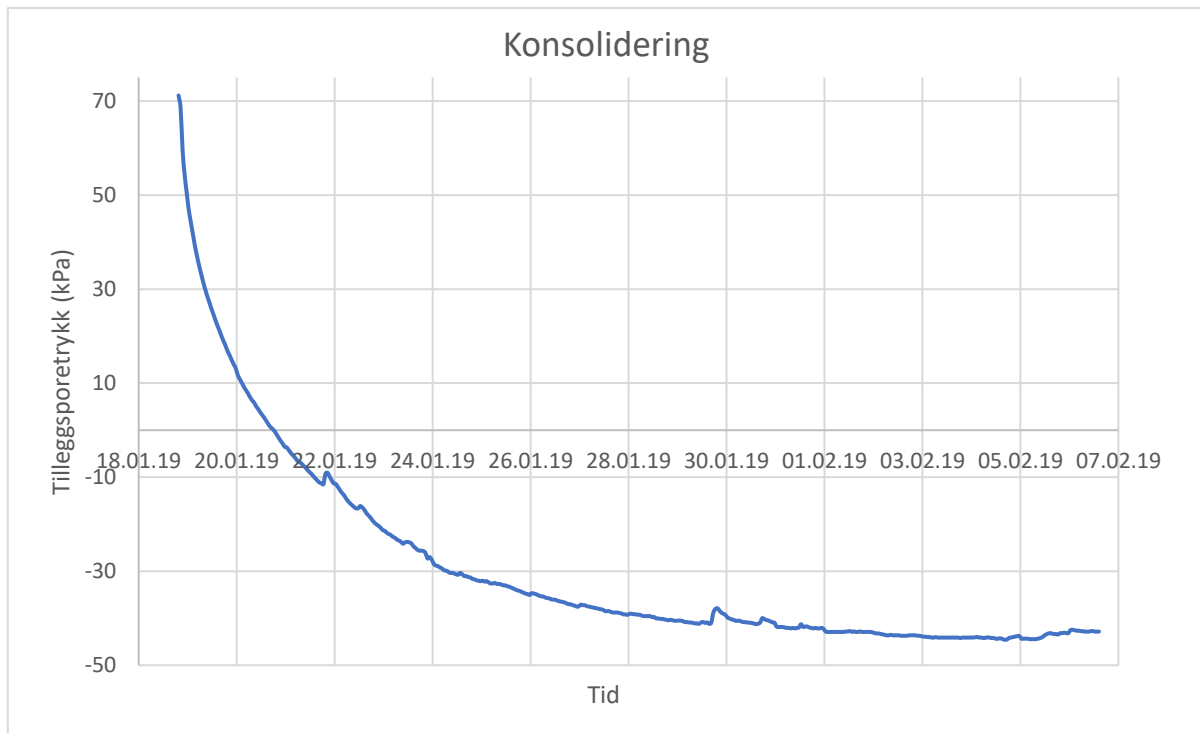
| PZ-17 | | PZ-18 | |
|--------|-------------|--------|-------------|
| Pelnr. | Avstand (m) | Pelnr. | Avstand (m) |
| 467 | 5,16 | 537 | 5,56 |
| 311 | 10,90 | 524 | 2,13 |
| 360 | 14,00 | 463 | 3,00 |
| 320 | 15,16 | 459 | 4,59 |
| 465 | 6,09 | 379 | 6,54 |
| 629 | 7,56 | 300 | 8,92 |
| 345 | 9,61 | 273 | 10,65 |
| 143 | 18,71 | 251 | 11,15 |
| 561 | 4,83 | 396 | 6,19 |
| 657 | 5,09 | 192 | 11,78 |
| 604 | 1,94 | 58 | 17,61 |
| 326 | 9,81 | 117 | 16,53 |
| 305 | 11,02 | 406 | 11,08 |
| | | 582 | 2,32 |
| | | 575 | 7,15 |
| | | 345 | 12,94 |
| | | 263 | 14,70 |
| | | 717 | 18,40 |

Avstanden til nærmeste KS-pel til poretrykksmåleren mens det er nedgang i poretrykket, varierer svært mye.

6.1.4. Konsolidering

Forventet konsolideringstid (tid for primærkonsolidering) med ligning (2-8), som gir konsolideringstid for et endimensjonalt tilfelle, ble beregnet. Det er benyttet initiell konsolideringskoeffisient $c_v=38\text{m}^2/\text{år}=0,104\text{m}^2/\text{døgn}$. Drenasjeveien, H, er valgt til 6,5m og $T_p=1$ på grunn av at konsolideringen er ferdig. Dette gir $t_p = 1 \cdot \frac{(6,5\text{m})^2}{0,104\text{m}^2/\text{døgn}} = 406 \text{ døgn}$.

Det er gjort en enkel analyse av konsolideringsforløp for målte felldata fra Sluppen. Det er kun sett på siste fase, i etterkant av siste maksimalverdi, for PZ-17. Det er siste fase som er mest interessant i konsolideringssammenheng. Dette er fordi poreovertrykket for de tidligere toppunktene ikke får konsolidert ferdig før nye KS-peler installeres og poretrykket øker igjen. PZ-18 ble ødelagt før siste KS-installasjon og PZ-19 har så små poretrykksøkninger at det ikke kan observeres typiske konsolideringsforløp. En kan også observere at poretrykket reduseres etter hver maksimalverdi, men at konsolideringen ikke fullføres og poretrykket derfor ikke reduseres til initialnivå. Dette er på grunn av at nye KS-peler blir installert slik at poretrykket øker på nytt. Konsolideringsforløpet for PZ-17 etter siste KS-pel ble installert er vist i Figur 62.



Figur 62 Konsolidering feltmåling Sluppen (PZ-17)

Det kan observeres at poreovertrykket har dissipert til 10kPa (over 80% reduksjon av tilleggsporetrykk) etter ca. 1,5 døgn. Poreovertrykket er redusert til 5kPa også før det har gått 2 døgn, og det er redusert til 0 omtrent etter 2 døgn. Som Figur 62 viser, går tilleggsporetrykket under 0. Det vil si at poretrykket blir lavere enn det var før installasjonen av KS-peler startet, fordi tilleggsporetrykket er regnet ut fra utgangsnivået som er det poretrykket som var før KS-stabiliseringen startet. Konsolideringskurven flater ut når poreovertrykket er ca. -35kPa og dette er 8 dager.

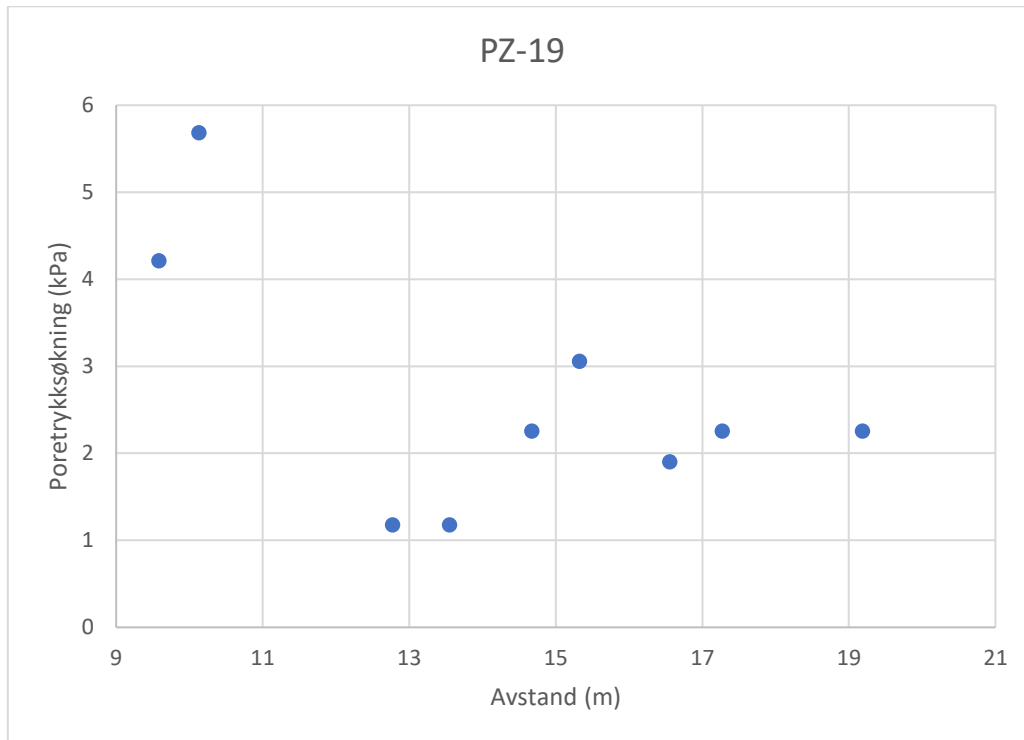
Det ble beregnet ny konsolideringskoeffisient ut fra poretrykksdata fra felt med Taylors metode for å finne tiden for primærkonsolidering. Taylors metode bruker t_{90} som input for konsolideringstiden. t_{90} ble funnet grafisk etter metoden beskrevet i kapittel 2.3 som gir $t_{90} = 7$ dager. Videre gir dette konsolideringskoeffisient

$$c_v = 0,848 \frac{(6,5m)^2}{7døgn} = \frac{5,12m^2}{døgn} = 1868 \frac{m^2}{år}$$

Det ble forsøkt å finne t_{pr} for å beregne c_v med Janbus metode. Dette lyktes imidlertid ikke, på grunn av verdien av poreovertrykket som etter metoden skal være 100% konsolidert poreovertrykk, aldri oppnås.

6.2. PZ-19

PZ-19 ligger 9,58m unna nærmeste KS-pel i det KS-stabiliserte området. De fleste poretrykksøkningene som er registrert er små, rundt 2-3kPa. Den største er på 5,7kPa. Tilleggs-poretrykk mot avstand til nærmeste pel installert i perioden med økning i poretrykket er vist i Figur 63.

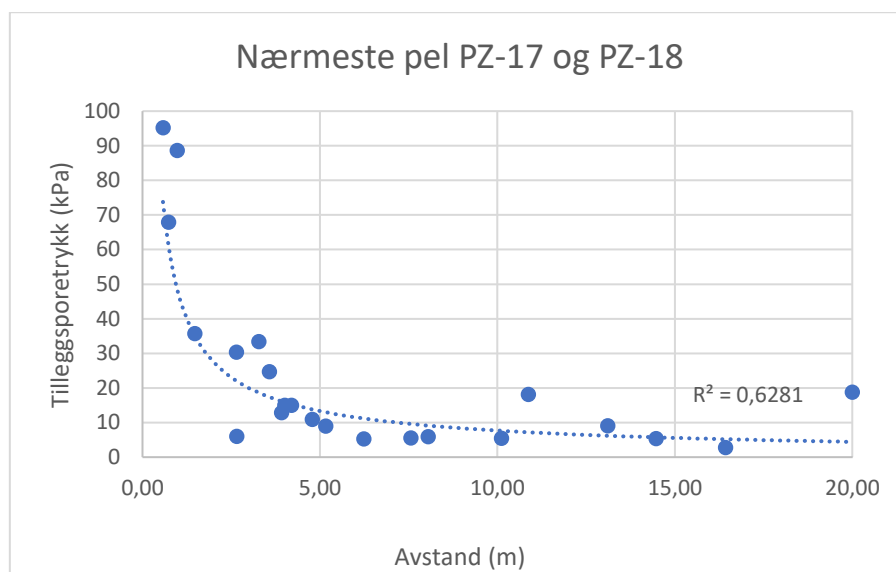


Figur 63 Tilleggs-poretrykk vs. avstand til nærmeste pel for PZ-19

7. Tolkninger og diskusjoner

7.1. Feltmålinger

Resultater fra feltmålinger på Sluppen er presentert i kapittel 6. I fremstillingene med tilleggsporetrykk vs. avstand til nærmeste KS-pel kan det tydelig observeres at poreovertrykket minker med avstanden til nærmeste KS-pel. I Figur 64 er trendlinjene til datapunktene for grovt detaljnivå vist. Den grovste tilnærmingen har høyest R^2 -verdi, som vil si at den passer bedre til datasettet. Derfor tas det utgangspunkt i denne analysen i resten av rapporten.



Figur 64 Tilleggsporetrykk vs. avstand til nærmeste pel. Grovt detaljnivå

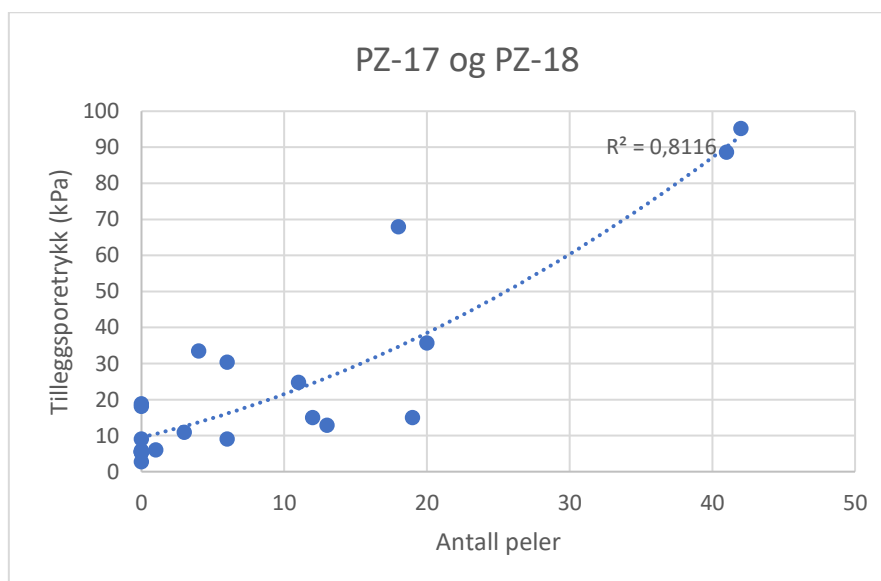
Størst tilleggsporetrykk nærmest installert KS-pel og avtagende tilleggsporetrykk med avstanden, er forventet, både i henhold til erfaring, presentert i kapittel 2, og annen presentert litteratur på tema. I tillegg viser de andre analysene gjort i masteroppgaven samme trend. Dette er behandlet videre i diskusjonskapitlet.

KS-pelene er installert med lufttrykk på omtrent 800kPa. Største målte poretrykk er på ca. 95kPa, 0,18m fra ytterkant av KS-pelen. Dette viser at jorda rundt KS-pelen ikke blir utsatt for 800kPa trykk. Det gitte lufttrykket er påsatt i senter av KS-pelen og trykket fordeler seg utover et større areal med tiden. I tillegg vil en del av lufttrykket gå opp og ned i KS-pelen, hvor det sannsynligvis er gunstig for luft å slippe ut. Dermed opplever ikke jorda et like stort trykk som installasjonstrykket KS-pelen blir satt med. Høyeste målte poretrykk er for dette tilfellet ca. $\frac{1}{8}$ av påsatt lufttrykk.

I kapittel 6 er det også vist plott med tilleggsporetrykk vs. *alle* KS-peler som er installert i perioder med poretrykksøkning. Her kan en ikke observere samme trend. Særlig kan en legge merke til at det også observeres KS-peler langt unna i periodene med høye poretrykk. Det er rimelig å anta at disse ikke påvirker poretrykket i like stor grad. Dette kan bekreftes ved å studere PZ-19 som har større avstand til KS-pelene og bare

registrerer lave poreovertrykk. Resultatene som viser tilleggsporetrykk vs. avstand til *alle KS-peler installert innenfor 6m* fra poretrykksmålerne i periodene med poretrykksøkning, har stor spredning. For store poretrykksøkninger er det installert KS-peler både nært (<1m) og langt unna (6m). Det samme gjelder for de små poretrykksøkningene, selv om nærmeste pel er lengre unna. Plott som viser avstand til alle peler og alle peler innenfor 6m, med svært stor spredning, viser at ikke alle installerte KS-peler har betydning for tilleggsporetrykket. Når det gjelder gjennomsnittsavstanden til KS-peler innenfor 6m, kan en imidlertid observere at på de store avstandene (3,5-6m), er det bare poretrykksøkninger under 35kPa. For de små avstandene (<3,5m), er det imidlertid observert både høye og lave verdier av tilleggsporetrykk.

Som vist i det foregående er det fremstillingen av den nærmeste KS-pelen som gir best overensstemmelse med forventningene om at poretrykket reduseres med avstand fra KS-pelen. Dette kan tyde på at det i hovedsak er den nærmeste KS-pelen som bestemmer størrelsen på poreovertrykket. Det er imidlertid også et faktum at ved installasjon av flere KS-peler etter hverandre vil det bli en kumulativ effekt på poretrykket, grunnet at det ikke rekker å nå tilbake til initialtilstand før det stiger på nytt. Dette bekreftes med at det observeres en sammenheng mellom antall KS-peler installert i en periode og størrelsen på tilleggsporetrykket. I Figur 65 er tilleggsporetrykk vs. antall KS-peler innenfor 6m vist. Det er tydelig at poretrykket øker med antall installerte KS-peler. Det er naturlig at ikke inkludere alle KS-peler i hele området inkluderes i dette plottet når en vet at de som er lengst unna mest sannsynlig ikke påvirker poretrykket.



Figur 65 Tilleggsporetrykk vs. antall KS-peler innenfor 6m

Ut fra plottet i Figur 65, kan det også observeres at det forekommer tilleggsporetrykk opp mot 20kPa uten at det er installert KS-peler nærmere enn 6m. En tilleggsobservasjon om en studerer poretrykkskurvene i vedlegg D, er at de største tilleggsporetrykkene varer over lengre tid enn de små. Dette kan være fordi det er installert flere peler over en tid og styrker teorien om at installasjon av flere KS-peler har en kumulativ effekt på tilleggsporetrykket.

Kritisk poreovertrykk ved PZ-17 omtrent 100kPa og ved PZ-18 omtrent 70kPa, som beskrevet i kapittel 3. Alle målinger av poretrykket for PZ-17 ligger under 100kPa. For PZ-18 finnes imidlertid målinger av poretrykk som er større enn total vertikalspenning. En kan da regne med at effektivspenningene har vært 0 på et tidspunkt. Terrenget er imidlertid flatt og poretrykket har dissipert rimelig raskt, slik at det ikke ble et problem i dette tilfellet.

For PZ-19, som ligger vesentlig lengre unna KS-pelene, er det tydelig at verdiene av tilleggsporetrykk er mye lavere. Dette er som forventet. De to høyeste målte verdiene av tilleggsporetrykk er mellom 4kPa og 6kPa og er målt i avstand 9,6m og 10,1m. Dette generaliseres til å si at det kan oppstå tilleggsporetrykk på rundt 5kPa rundt 10m fra en installert KS-pel. Tilleggsporetrykket er ubetydelig, for nesten enhver situasjon, i avstander større enn 11m fra KS-pelen. For PZ-17 og PZ-18 er det målt noe høyere poretrykk i avstander større enn 11m, men de fleste målingene på disse avstandene er imidlertid også små, under ca. 5kPa.

Om konsolideringsforløpene kan en si at det observeres typiske konsolideringskurver etter hvert toppunkt på poretrykkskurvene. I de fleste tilfellene stiger poretrykket på nytt før alt poretrykk er dissipert grunnet installasjon av flere KS-peler. Etter siste installasjon av KS-peler ser en at tilleggsporetrykket dissiperer og kurven flater ut. Dette skjer når verdien av tilleggsporetrykket er lavere enn 0. Det er på grunn av at permeabiliteten til et KS-stabilisert område er høyere enn den initielle permeabiliteten i kvikkleira at tilleggsporetrykket kan bli <0 . Permeabiliteten kan bli opptil 100 ganger større Norges geotekniske forening (2012). Beregnet konsolideringskoeffisient ut fra konsolideringstiden er innenfor det en kan forvente. Den benyttede ligningen er imidlertid med antagelse om at konsolideringen er et endimensjonalt tilfelle. Dette stemmer ikke for konsolidering etter installasjon av KS-peler som vil foregå radielt utover. Beregnet konsolideringstid i kapittel 6 er svært lang i forhold til hva som registreres i felt. Dette er også rimelig, i og med at permeabiliteten øker. I tillegg er ligningen som er brukt for å finne konsolideringstid gjeldende også for en 1D-situasjon, og er ikke representativt for felt i denne sammenhengen. Å benytte 1D-ligninger for 3D- og radielle situasjoner er av begrenset nytte, men kan fungere som førstehåndstilnærminger. Den store begrensningen i dette tilfellet, er imidlertid at permeabiliteten, og dermed konsolideringskoeffisienten, endres ved KS-stabilisering. Dette må tas med i betraktningen når en ønsker å finne konsolideringstid etter KS-stabilisering. Årsaken til at konsolideringen går såpass raskt kan altså være at det er installert KS-peler.

Alle feltresultatene er vist for to ulike detaljnivå. Generelt sett, ser det ut som den groveste oppløsningen gir best samsvar med forventningene og mulighet for best tilpassede trendlinjer. Dette gjelder både for samsvar med *avstand* til KS-peler og samsvar med *antall* KS-peler. Det er mulig dette er på grunn av at den detaljerte analysen fikk "oppnopning" av datapunkter for lave tilleggsporetrykk, mens de høye tilleggsporetrykkene var de samme som for den grovt detaljerte løsningen.

Det finnes flere begrensninger med feltmålingene. Unøyaktighet i selve måleinstrumentet og kalibrering kan forekomme. I tillegg er det en usikkerhet i lufttrykksdataene som er hentet fra en målestasjon som ikke ligger på samme høyde over havet. Dessuten er det en ulempe for helhetsinntrykket at det kun er poretrykksmålinger i en enkelt dybde. Dette gjør at en for eksempel går glipp av hvor det høyeste poreovertrykket oppstår. I tillegg er det et viktig poeng at poretrykket bare er logget en gang i timen. Det installeres over 10 KS-peler i timen på det meste. Dette gjør at en i poretrykksmålingene

kan ha "gått glipp av" poretrykkets maksimalverdier. Verdien av poretrykket er uvisst mellom registreringene. Dessuten gjør dette utvelgelsen av hvilke peler som innvirker på poretrykksøkningen mere usikker. Det er likevel lagt til grunn at poretrykksmålingene er brukbare til å si noe om sammenhengen mellom KS-stabilisering og poreovertrykk. Shen, Miura og Koga (2003) fant også at tilleggsporetrykket var mer spredt jo lengre tidsintervallet på målingene var.

Fordi det ikke finnes noen uteliggere med høye poretrykk som ikke kan forklares med installasjon av KS-peler, antas det at alle høye verdier av tilleggsporetrykk er grunnet installasjon av KS-peler. Økt poretrykk kan forekomme grunnet andre forhold, som kraftig regnvær eller masseforflytninger, men det foreligger ikke kunnskap om slike forhold underveis i KS-stabiliseringen. Noen av toppunktene på poretrykkskurven, oppstår noen timer etter siste installasjon av KS-peler for dagen. Det er lite trolig at poretrykket bruker så lang tid etter KS-stabilisering på å nå høyeste verdi. Forsinkelsen av toppunktet kan være grunnet at poretrykket måles sjeldent eller på grunn av ovenfornevnte faktorer. Dette forblir imidlertid uvisst.

Avstanden til første KS-pel etter toppunkt på poretrykkskurven og avstanden til nærmeste KS-pel i hele perioden med nedgang i poretrykk, varierer svært mye. Det er usikkert hvorfor det ikke finnes noen sammenheng. Det var ikke mulig å trekke noen konklusjoner angående avstand til KS-peler som ikke gir økning i poretrykk.

Det hadde vært mulig å sammenligne data fra E6-prosjektet på Klett, omtalt i kapittel 2.1.1, med data fra prosjektet på Sluppen. Det er valgt å ikke gjøre dette på grunn av usikkerhet rundt hvilket grunnlag en sammenligner på. Poretrykksmålerne står i ulike dybder og grunnforholdene er forskjellige. Installasjonstrykket er ganske likt, men ikke helt. På Klett var det også bare en av poretrykksmålerne som lå inne i det kalk-/sementstabiliserte området, mens resten lå et stykke utenfor. Det er altså mange forhold som gjør at en sammenligning ville blitt vanskelig å tolke.

I det følgende er det antatt at lastøkningen ved installasjon av KS-pelene skjedde udrenert. Leira har lav permeabilitet og installasjon av en KS-pel skjer relativt raskt, slik at mesteparten av spenningsendringen blir endring i poretrykk.

Janbus poretrykksligning (2-6) kan gi størrelsen på en poretrykksendring ut fra om materialet er kontraktant eller dilatant. I parameterrapporten (Multiconsult, 2019c) viser de fleste prøvene fra relevant område dilatant materiale. Dette gjør i så fall at poretrykk vil bli lavere enn forventet og kan være med å forklare at det måles lavere poretrykk enn påsatt lufttrykk. På den andre siden vet vi at kvikkleire vanligvis er kontraktant og vil oppleve større poretrykk. Dette gjelder imidlertid bare kvikkleire med $OCR < 2$. Kvikkleire med $OCR > 2$ vil ha dilatant oppførsel (jf. Cam-Clay-modellen (Brinkgreve, Swolfs og Kumarswamy, 2017)). Dette stemmer også overens med Skemptions poretrykksligning, se ligning (2-3) og anslag av verdiene av parameteren A. Her har sterkt overkonsoliderte leirer negativ A og dermed lavere tilleggsporetrykk, mens svakt overkonsoliderte leirer har positiv A og dermed høyere tilleggsporetrykk. Vedlegg A.2 viser verdi for OCR tolket med dybden for et punkt som er sagt å være relevant for området rundt pressgrop S9, men som ligger et stykke unna Multiconsult (2019c). Denne gir omtrent $OCR = 1,5$ for kvikkleirelaget, noe som tilsier at materialet er kontraktant. Relevant OCR-tolkning og treaksialforsøkene stemmer altså ikke overens. For dette tilfellet er det størst tiltro til treaksialforsøkene blant annet på grunn av at disse er tatt nærmere relevant sted. I så fall kan materialet regnes som dilatant og det kan være en medvirkende årsak til at det er målt mye lavere poretrykk enn det påsatte lufttrykket.

Det er i kapittel 7.2 og 7.3 diskutert rundt metodene brukt i kapittel 4 og kapittel 5. Resultatene og vurderingene brukes til å si noe om feltmålingene fra Sluppen er som forventet.

7.2. FEM-analyse

Betydning av volumtøyning og dilatans

Som vist i kapittel 4, gir økt påsatt volumtøyning i et jordvolum økt tilleggsporetrykk i omliggende leire for både *Mohr-Coulomb* og *Hardening Soil*. Dette er som forventet fordi endring i volumtøyningen, ϵ , gir endring i total middelspenning, $\Delta\sigma_m$. På grunn av at leira blir udrenert lastet, vil etter ligning (2-2) effektivspenningsendringen være 0. Effektivspenningsprinsippet gitt i ligning (2-1) gir dermed at all endring av $\Delta\sigma_m$ går til endring i poretrykk, Δu . Økning i ϵ gir større Δu , og dette er også som forventet, fordi økt ϵ gir økt $\Delta\sigma_m$.

Andersson og Karlström (2010) fikk ikke like entydige resultater med *Mohr-Coulomb* i Plaxis. De oppnådde både økt og redusert poretrykk ved påsatt volumtøyning. Dette var ikke forventet, men det diskuteres ikke rundt hvorfor dette kan være tilfellet.

I kapittel 4 er det også vist at lavere verdier av dilatansvinkelen, ψ , (negative), for de fleste kombinasjoner av ϵ og ψ , gir større verdier av Δu for både *Mohr-Coulomb* og *Hardening Soil*. Kontraktante materialer ($\psi < 0^\circ$ og $D < 0$) vil etter Janbus poretrykkligning (ligning (2-6)) få økt poretrykk grunnet endring i skjærspenning.

For leirer med $\psi = 0^\circ$ er $\Delta u = \Delta\sigma_m$. Dette gir at verdien av poretrykket er gitt av $u = u_0 + \Delta\sigma_m$, hvor u_0 er initielt poretrykk. På den andre siden vil en leire med $\psi < 0^\circ$ (og $D < 0$) ha $\Delta u > \Delta\sigma_m$, begrunnet med Janbus poretrykkligning. Da kan poretrykket gis ved $u = u_0 + \Delta\sigma_m - D\Delta q$, hvor Δq er endring i deviatorspenning. Dette har sammenheng med at strukturen i leira kollapser, spenningene mellom kornene minker, og dermed må poretrykket øke for å ha samme totalspenning. Økt poretrykk ved lavere verdier av ψ er dermed som forventet i en kvikkeleire uten kraftig overkonsolidering.

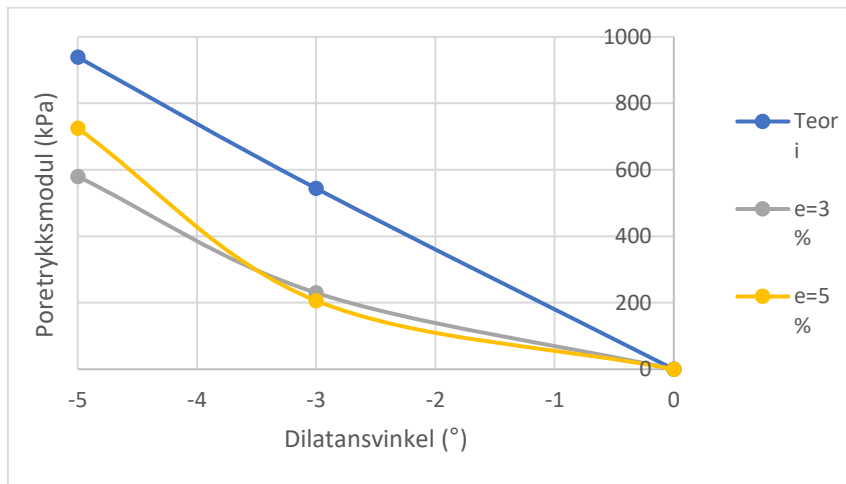
Dilatansvinkelen ser ut til å ha større betydning for poreovertrykket for større volumtøyninger. For små ϵ ($\epsilon = 1\%$) ga ikke endring i ψ utslag på poreovertrykket verken for *Mohr-Coulomb* eller for *Hardening Soil*. Dette er fordi volumendringen (pålastingen) må være av en viss størrelse før dilatansvinkelen gir utslag i form av poretrykksendring.

Modell og metode

Mohr-Coulombmodellen er en lineær elastisk perfekt plastisk modell, hvor det kun oppstår elastiske tøyninger, ikke plastiske, før materialet når brudd. Jord følger sjeldent en lineær elastisk oppførsel i virkeligheten.

Ligningen gitt i (2-22) beskriver poretrykksendring ved endring i skjærtøyning for et lineært elastisk tilfelle. I Figur 66 er den teoretiske løsningen for poretrykksmodulen vist sammen poretrykksmodulen beregnet fra tilleggsporetrykk og tøyninger oppnådd med Plaxis. Plottet viser hvordan poretrykket varierer med dilatansvinkelen, ψ . For den teoretiske løsningen er det valgt å bruke $G = 4000 \text{ kPa}$, $\nu = 0,3$, $\phi = 20^\circ$ og $\alpha = 2,5$, som er verdier som tilsvarer input i Plaxis. For $\psi = 0$, vil man med ligning (2-22) oppnå en poretrykksendring på 0, noe som ikke er realistisk og heller ikke tilfellet i

Plaxissimuleringen. I Figur 66 er derfor poretrykksverdiene fra Plaxis "tvunget" til 0 ved $\psi=0$, for så å bruke verdier for endring i poretrykksmodul for $\psi < 0$.



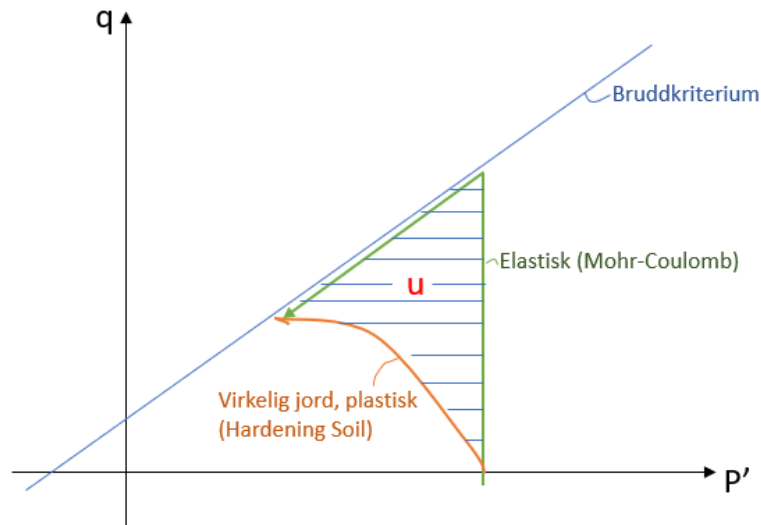
Figur 66 Elastisk teori (blå) sammenlignet med Mohr-Coulombresultater i Plaxis (grå og gul) ($e=\epsilon$)

Fremstillingen i Figur 66 viser at Plaxis oppnår lavere verdier for poretrykk enn *Mohr-Coulombmodellen* teoretisk sett ville gjort. Plaxis implementerer den lineært elastiske Mohr-Coulombmodellen, så dette burde i teorien ikke vært tilfellet. De viser imidlertid samme trend med økning av tilleggsporetrykk med lavere verdier (negative) av ψ . Forskjellen kan komme av usikkerhet både rundt input i Plaxis og input i den teoretiske ligningen. I tillegg er verdien for tøyning lest av i Plaxis Output, og dette er ikke en helt nøyaktig metode. Dette kan imidlertid indikere at Plaxis ikke simulerer den teoretiske verdien av poreovertrykk, men lavere verdier.

Hardening Soil implementerer *isotropisk hardening*, og er en elastisk perfekt-plastisk modell, som gjør at det vil oppstå plastiske tøyninger før materialet går til brudd. Dette gjør at modellen ligner mer på virkelig materialoppførsel for jord enn *Mohr-Coulomb*. I tillegg er stivheten til jorda spenningsavhengig, som også er et mer virkelighetsnært forhold.

For lik volumtøyning og dilatansvinkel gir *Hardening Soil* større verdier av poreovertrykk enn *Mohr-Coulomb*. Forskjellen er større, jo mindre volumtøyningene er. For $\epsilon=1\%$, $\epsilon=3\%$ og $\epsilon=5\%$ er andelen av maksimalt poreovertrykk for *Mohr-Coulomb* i forhold til maksimalt poreovertrykk for *Hardening Soil* henholdsvis 0,35, 0,44 og 0,49. For alle testede volumtøyninger gir *Hardening Soil* over dobbelt så høyt maksimalt poreovertrykk. Dette er gjennomsnittsverdier for de tre testede dilatansvinklene.

Årsaken til større poreovertrykk ved bruk av *Hardening Soil* enn *Mohr-Coulomb* er at jorda opplever plastiske tøyninger. Dette er illustrert i Figur 67 hvor en ser at forskjellen på spenningsstien mellom ren elastisk materialoppførsel og virkelig jord er poretrykk. Økning av volumtøyning har større innvirkning på poreovertrykket med *Hardening Soil* enn *Mohr-Coulomb* fordi det initieres mer plastiske tøyninger når lasten er større.



Figur 67 Spenningsstier i p' - q -plot. Elastisk og virkelig materialoppførsel. Differansen er poretrykk (u)

Hardening Soil simulerer poreovertrykk ved installasjon av KS-pel (på satt volumtøyning) bedre enn *Mohr-Coulomb*, på grunn av at modellen tar hensyn til at det oppstår plastiske tøyninger i leira, noe som kan antas at skjer ved en KS-pel ved installasjon.

Det var rimelig å forvente at ψ hadde størst virkning på Δu med *Hardening Soil*, fordi plastiske tøyninger da finner sted før materialet går til brudd, og det er ved plastiske tøyninger ψ er relevant (Nordal, 2015). For *Mohr-Coulomb* opptrer imidlertid plastiske tøyninger først ved brudd og ψ skulle ikke hatt betydning før brudd oppstår. Det er imidlertid ikke entydig om redusert ψ gir størst utslag med *Mohr-Coulomb* eller *Hardening Soil*. ψ har betydning for poreovertrykket både for *Mohr-Coulomb* og *Hardening Soil*, for $\epsilon > 1\%$. Årsaken til at ψ også har betydning for *Mohr-Coulomb* kan være at det også for denne modellen vil oppstå plastiske tøyninger i punkter som går til brudd uten at hele mekanismen går til brudd. Det vil være flere slike plastiske punkter jo større på satt volumtøyning er. Derfor gir dette mindre utslag for lavere ϵ og altså ikke utslag for $\epsilon = 1\%$ for *Mohr-Coulomb*.

Influensområdet for tilleggsporetrykket umiddelbart etter installasjon av KS-pel er noe større for *Hardening Soil* enn *Mohr-Coulomb*. Det er rimelig å tro at også dette er fordi det oppstår mer plastiske tøyninger. Når de gjelder konsolideringen går den litt saktere for *Hardening Soil* enn for *Mohr-Coulomb*. For *Mohr-Coulomb* tar det omtrent 5 dager før 80% av poretrykket har dissipert, mens det for *Hardening Soil* tar nærmere 10 dager. Trolig har dette med størrelsen på initiert poretrykk å gjøre.

Plaxis 2D er et endelig elementmetodeprogram. Elementmetoden er en tilnæringsmetode som gir numeriske svar. Nøyaktigheten på svaret vil komme an på hvor god modellen er. Det er gjort noen tiltak for å sørge for at modellen er så god som mulig. Dette inkluderer blant annet at det er sjekket at størrelsen på elementene ikke har betydning for størrelsen på poretrykket og at jordvolumet er stort nok, slik at grensebetingelsene ikke påvirker resultatet.

Ved bruk av 15-noders elementer med aksesymmetrisk modell, kan det oppstå problemer med fluktuering av verdier innad i elementene. Dette skjedde ved påført volumtøyning i elementene langs kanten av KS-pelen. I kapittel 4 er det forklart hvordan dette problemet ble løst med tanke på fremstilling av resultatene. Det er vurdert at det ble mer rett å fremstille tilleggsporetrykket $1 \cdot 10^{-9}$ døgn etter påsatt volumtøyning. På dette tidspunktet er maksimalverdien jevnt fordelt langs kanten av KS-pelen, fremfor at en verdi i et hjørne av et element er veldig mye høyere enn ellers. I tillegg kommer det tydeligere frem at poretrykksverdien blir redusert med avstand fra KS-pelen.

I FEM-modelleringen ble installasjon av en KS-pel simulert med påført volumtøyning. Dette er en indirekte måte å simulere installasjonen av en KS-pel på. I virkeligheten vil det være flere forhold ved installasjonen som kan påvirke poretrykket, blant annet installasjonstrykket, skjærkraften fra vispen og tilført masse i jordvolumet. Når det ble valgt å bare bruke endring i volumtøyning kan det tenkes at dette begrenser utslaget på poretrykket i og med at det er vanskelig å anslå en volumtøyning som tar hensyn til alle faktorene som innvirker på poretrykket.

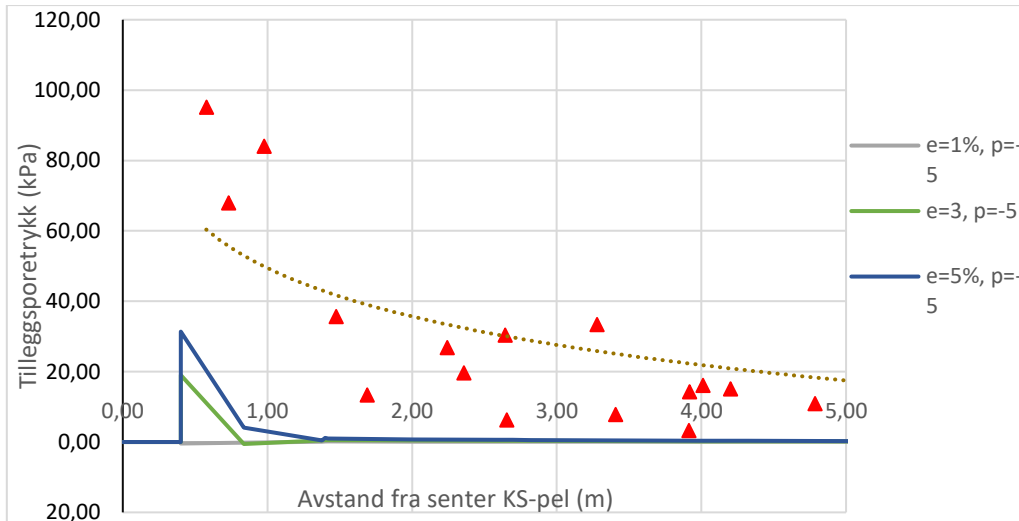
Forskyvning i y-retning i topp og bunn av KS-pelen ble låst i simuleringen av installasjonen. Dette er ikke slik det fungerer i praksis, men er ansett som konservativt for anslag av poreovertrykk i kvikkleirelaget, i tillegg til at det var gunstig for å unngå lokalt veldig høye verdier av poretrykk i hjørnene av elementene ved topp og bunn av pel. I virkeligheten vil nok noe av lufttrykket ved installasjon gå både opp mot overflaten og ned i jordlaget under. Dette kan være en medvirkende årsak til at påført installasjonstrykk ikke når ut til ytterkant av KS-pelen. Volumtøyningen er påført i hele KS-pelen momentant. Dette er ikke slik det i praksis gjøres. Da blir bindemiddelet blåst inn nedenfra og opp, men det ble modellert slik for å ha en enkel modell. I tillegg er det rimelig å tro at dette er konservativt med tanke på oppnådd poretrykk da det ikke vil gi poretrykk i noen deler av jorda tid til å dissipere mens installasjonen pågår.

Andersson og Karlström (2010) viser at økt stivhet i form av økt effektiv Youngs modul, E' , gir økt tilleggsporetrykk ved påsatt volumtøyning ved bruk av *Mohr-Coulombmodellen*. Dette ser også ut til å gjelde for *Mohr-Coulombmodellen* brukt i denne masteroppgaven. Stivheten har også betydning for *Hardening Soil*, men med noe mindre virkning enn for *Mohr-Coulomb*. Dette sies uten at det er lagt vekt på parameteranalyse av stivhet i dette arbeidet. En hadde forventet at stivheten skulle ha størst betydning for *Hardening Soil* fordi det da oppstår plastiske deformasjoner før brudd. For *Mohr-Coulomb* er det imidlertid bare snakk om reversible elastiske deformasjoner, og stivheten skulle dermed ikke påvirke poretrykket i like stor grad, da det ikke er snakk om bruddsituasjon.

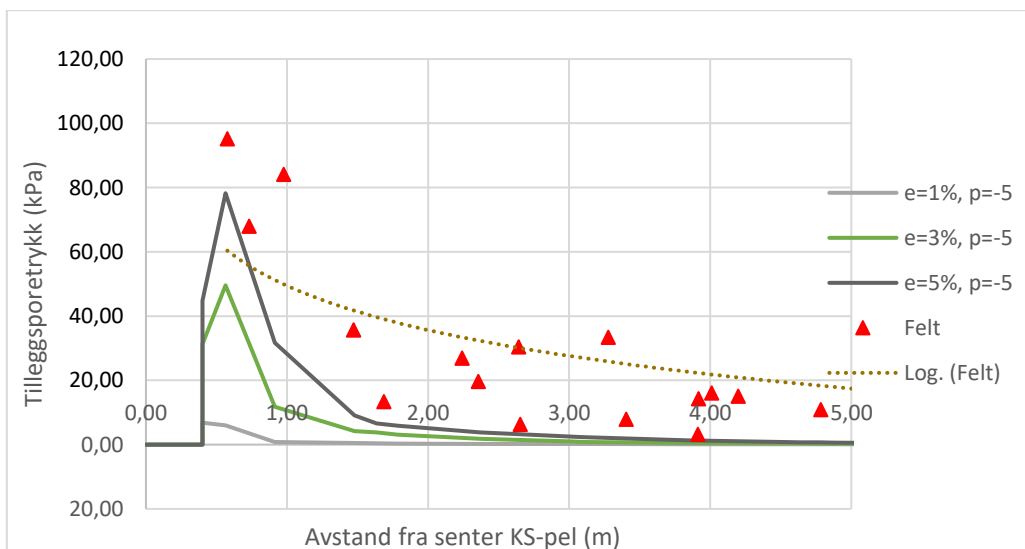
Sammenligning med felldata

For å sammenligne resultater fra FEM-beregningene med felldata, er det tatt utgangspunkt i et horisontalsnitt i -7m, fordi poretrykksmålingene fra felt er i 7m dybde. I Figur 68 er størrelsen på Δu fremstilt for hver kombinasjon av $\epsilon=1\%$, 3% og 5% og $\psi=-5^\circ$ for *Mohr-Coulomb*, sammen med felldata. De samme tilfellene er vist i Figur 69 for *Hardening Soil*. Det er sammenlignet med avstand til nærmeste KS-pel for gjeldende poretrykksøkning for PZ-17 og PZ-18. Dette er den mest representative analysen av felldata med tanke på at det modelleres installasjon av én KS-pel i Plaxis. Det er bare vist i en radius 5m fra senter av KS-pelen fordi beregningene av poretrykket er 0 for større avstander.

For å finne Δu for x-verdier hvor Plaxis beregner Δu , er det brukt gjennomsnittsverdi av de to verdiene Plaxis gir for samme punkt (grunnet at to elementer møtes i ett punkt). Dette gjør at verken de høyeste eller laveste verdiene er inkludert, men det unngås at en har to verdier for poreovertrykket i samme avstand fra senter av KS-pelen.



Figur 68 Sammenligning Mohr-Coulomb (Plaxis) og feltmålinger



Figur 69 Sammenligning Hardening Soil (Plaxis) og feltmålinger

Sammenligningen av feltmålinger og den numeriske analysen i Plaxis, viser at verken *Mohr-Coulomb* eller *Hardening Soil* oppnår like høye poreovertrykk som det er målt i felt, på noen avstander. *Mohr-Coulomb* gir de laveste verdiene, mens *Hardening Soil* simulerer poreovertrykket noe bedre.

Det kan være flere årsaker til at FEM-analysen ikke simulerer så høye poreovertrykk som målt i felt. Den viktigste er at under prosjektet på Sluppen (og vanligvis ved KS-stabilisering), er det installert flere KS-peler nært hverandre innenfor et relativt kort

tidsrom. Dette gir en kumulativ effekt på tilleggsporetrykket, beskrevet i kapittel 7.1, som fører til større tilleggsporetrykk. Dessuten er påsatt volumtøyning en indirekte måte å simulere installasjon av KS-peler på, og en må finne en verdi for ϵ som tar hensyn til alle forhold som kan gi poretrykksøkning, som lufttrykk, skjærspenninger fra vispen og massetilførsel. En annen mulig medårsak til at verdiene fra FEM-analysen er lavere enn feltnålingene, er at verdien brukt for volumtøyning er for små.

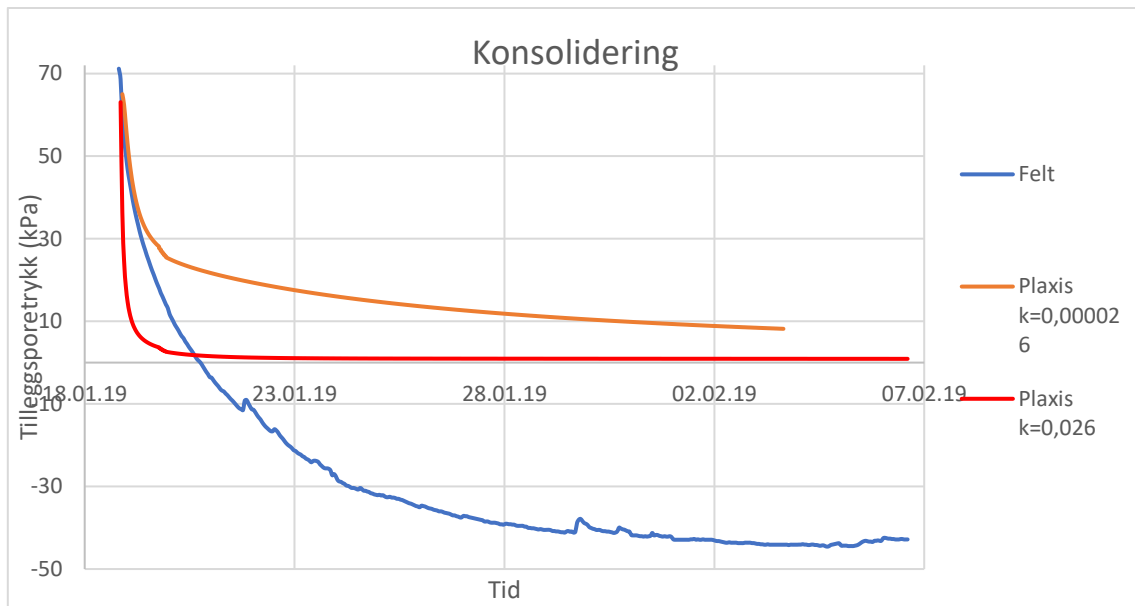
Det er forsøkt å simulere forholdene i felt så godt som mulig. Likevel vil jordparametere og lagdeling alltid være en usikkerhet i geotekniske problemer, da det kun er et begrenset antall punkter det er funnet verdier for. Parameterne er basert på tolkede grunnundersøkelser og usikkerheten er forsøkt gjort så liten som mulig ved også å benytte erfaringstall i tolkningen av parameterne. En kan aldri være helt sikker på faktiske verdier for hele jordvolumet og det er forhold som kan gi utslag i simulerte verdier av poreovertrykk. Det antas at jordparameterne er innenfor det rimelige og er representative for jordartene. Det ble også gjort forenklinger som kan påvirke resultatene. For eksempel ble det ikke tatt hensyn til stivhetsøkning med dybden og permeabiliteten ble antatt lik i x- og y-retning. Stivheten øker i realiteten med dybden og størrelsen ville sannsynligvis ha vært av betydning for lagene med en viss dybde. Det betviles likevel at det har hatt stor innvirkning på verdier for tilleggsporetrykk.

Som diskutert i kapittel 7.1, er muligens kvikkleira i felt dilatant, på grunn av høy OCR. I så fall ville det blitt mer virkelighetsnært og brukt positiv dilatansvinkel i Plaxis-simuleringen. Dette ville imidlertid etter all sannsynlighet gitt lavere poreovertrykk, jf. Janbus poretrykklikning i (2-6), og gitt enda større forskjell mellom Plaxis-simuleringen og feltnålinger.

Om en studerer trenden, vil en imidlertid se at den er lik for Plaxis-simuleringen og feltdata. Poreovertrykket avtar med avstand fra KS-pelen. Dette illustrerer at modelleringen av KS-pel og poreovertrykk i Plaxis fungerer, selv om verdiene er litt små. For å illustrere dette ble det lagt til trendlinjer for feltnålingene i plottene.

For en del av konsolideringskurvene fra de ulike tilfellene ser en at poretrykket øker en tid før det reduseres. Dette er på grunn av at det er sett på et punkt ikke helt inntil KS-pelen og derfor blir ikke jorda umiddelbart påvirket av volumtøyningen. Det tar en tid før poretrykket øker her. Det er også observert at for noen tilfeller er det en "knekk" i konsolideringskurven mellom 2-3 dager, og til og med en økning for noen tilfeller. Dette gjelder bare Mohr-Coulomb og bare små volumtøyninger. Årsaken er uviss, men kan dreise seg om en feil i modelleringen som ikke er oppdaget. Permeabiliteten er den samme i alle konsolideringsfaser, slik at en kunne forvente en jevn kurve.

I Figur 70 er konsolideringskurven etter siste installerte KS-pel fra felt vist sammen med konsolideringskurver simulert av Plaxis med to ulike verdier av permeabiliteten.



Figur 70 Konsolidering sammenligning Plaxis og felt

$k=0,000026$ er tolket verdi av permeabilitet i felt og burde sånn sett passet bra med feltkurven. Poretrykket tar imidlertid svært lang tid før det konsolideres for dette tilfellet i Plaxis. Denne kurven stemmer imidlertid bra overens med felt i starten. Om permeabiliteten økes betraktelig ser en av poreovertrykket faller mye raskere. I felt går poreovertrykket under 0 og dette er sannsynligvis grunnet økt permeabilitet etter KS-stabilisering. Plaxis-modellen simulerer ikke den økte permeabiliteten og derfor går ikke disse kurvene under 0.

Det ble gjort beregninger for å finne hvilke verdier av ψ og ϵ som var nødvendig for å oppnå poreovertrykk på størrelse med det som ble målt i felt. I **Feil! Ugyldig selvreferanse for bokmerke.** er det gitt eksempler på nødvendige kombinasjoner for å oppnå over 93kPa i avstand 0,18m fra kant av KS-pel for Mohr-Coulomb og i Tabell 18 for Mohr-Coulomb.

Tabell 17 Kombinasjoner av ϵ og ψ for å oppnå tilleggs-poretrykk som i felt Mohr-Coulomb

| ϵ (%) | ψ (°) |
|----------------|------------|
| 3 | <-25 |
| 5 | -18 |
| 7 | -10 |
| 10 | -5 |
| 12 | -3 |

Tabell 18 Kombinasjoner av ϵ og ψ for å oppnå tilleggs-poretrykk som i felt Hardening Soil

| ϵ (%) | ψ (°) |
|----------------|------------|
| 1 | <-25 |
| 3 | -21 |
| 5 | >0 |

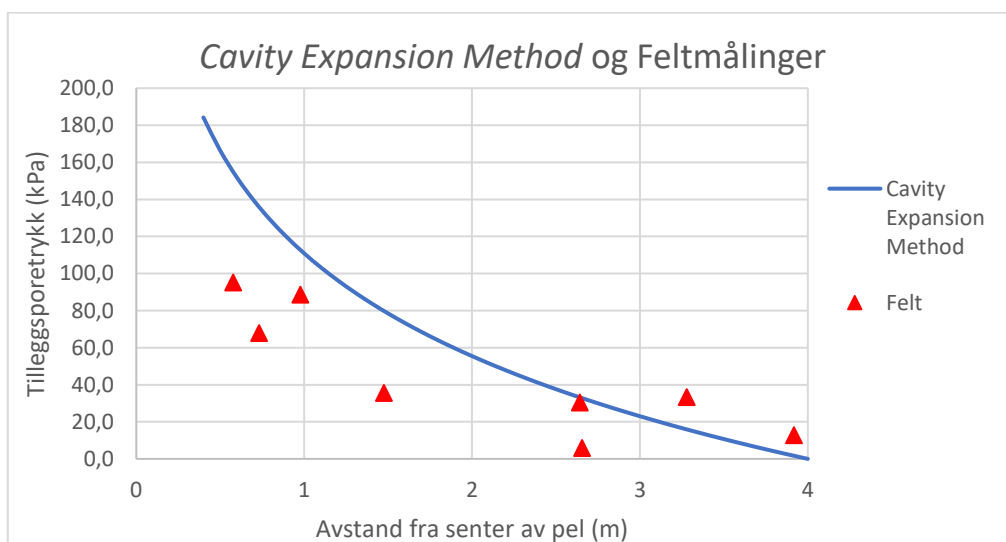
Kombinasjonene av ϵ og ψ som gir verdier av det maksimale tilleggs-poretrykket nært det som er målt i felt, er høye verdier av ϵ og ψ for Mohr-Coulomb. Mulige årsaker til dette er diskutert tidligere i dette delkapittelet. Dette resultatet understreker at Mohr-Coulombsimuleringen ikke er tilstrekkelig, da verdiene av ϵ og ψ som kreves er

urealistisk høye. For Hardening Soil derimot, er ikke verdiene som kreves for å oppnå lignende verdier av poreovertrykk som i felt urealistisk høye. En ser til og med at det kan oppnås for dilatant materiale. Dette understreker at Hardening Soil er en modell som fungerer god for å simulere poreovertrykk ved KS-stabilisering, så lenge en har store nok verdier for volumtøyningen.

7.3. Analytiske metoder

7.3.1. Cavity Expansion Method

Metoden for å finne tilleggsporetrykk ved utvidelse av et hulrom, gitt i ligning (2-14), gir som forventet lavere tilleggsporetrykk med større avstand til senter av hulrommet. Ligningen tar kun hensyn til at hulrommet utvides, og tar ikke hensyn til eventuelt andre årsaker til økt poretrykk. I Figur 71 er verdiene fra Cavity Expansion Method sammenlignet med feltdata fra Sluppen. Innsatt i ligning (2-14) er det brukt parametere som passer med prosjektet på Sluppen, for best mulig sammenligningsgrunnlag.



Figur 71 Sammenligning Cavity Expansion Method og Feltnmålinger fra Sluppen

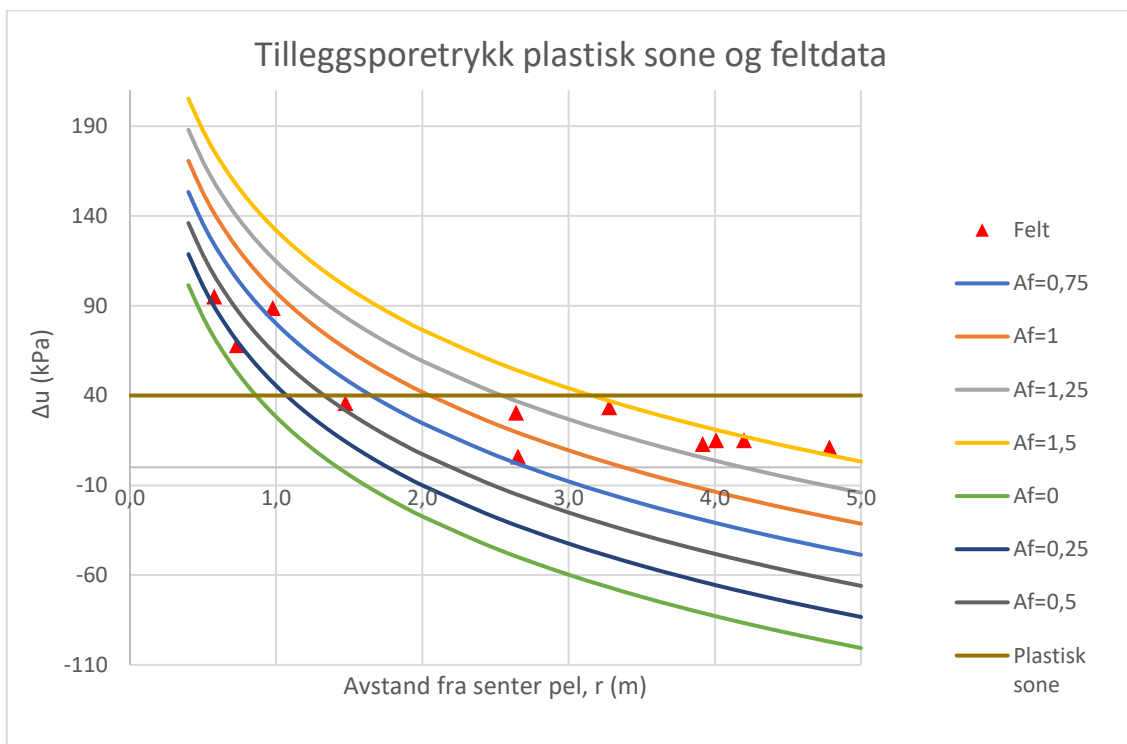
Cavity Expansion Method estimerer høyere tilleggsporetrykk enn det som ble målt i felt på Sluppen, nært pelen. Mellom 2m og 4m stemmer metoden imidlertid bedre overens med feltdata. Det kan være mange årsaker til at målingene i felt er lavere enn Cavity Expansion Method skulle tilsi. Av størst betydning er at det er stor forskjell på et hulrom som utvider seg og det som i praksis skjer i felt ved installasjon av en KS-pel. Ved KS-stabilisering, vil ikke volumutvidelsen være like stor som et hulrom som tilsvarer størrelsen på pelen. Lengre unna KS-pelen vil har utvidelsen av hulrommet mindre effekt og dermed passer metoden bedre til feltdataene.

Cavity Expansion Method gir for høye verdier av poretrykket ved KS-stabilisering nært pelen, men trenden med lavere tilleggsporetrykk med avstand er som forventet. Metoden kan brukes som en svært konservativ førstehåndsberegning.

7.3.2. Shearing-Expanding Method

Plastisk del

I Figur 72 er målte felldata fra Sluppen vist i samme plot som den plastiske løsningen av Shen, Miura og Koga (2003) for ulike verdier av A_f . I tillegg er linjen for å beskrive plastisk sone tegnet inn. Hvilken verdi en velger for A_f , har betydning for størrelsen på tilleggsporetrykket. A_f varierer med jordarten (Skempton, 1954). Hvilken verdi av A_f som samsvarer best med felldata med avstanden fra KS-pelen. For en økning av fra $A_f=0$ til $A_f=1,5$ øker Δu med 104kPa i 1m fra senter av KS-pelen. Nær KS-pelen ($r=0,5\text{m}-1,0\text{m}$) passer felldataene best med A_f mellom 0,25 og 0,50. Videre ser det ut som A_f mellom 0,5 og 1,25 samsvarer godt for r mellom ca. 1m og 3m. For $r>3\text{m}$, samsvarer Δu godt med felldata for A_f mellom 1,25 og 1,50. For $A_f=1,5$ vil dette vil imidlertid være i elastisk sone, jf. Figur 72, og dermed gjelder ikke den plastiske delen av løsningen. Ut fra at felldata passer godt også etter det som er satt som grense for plastisk sone, er det en mulighet at plastisk sone når lengre ut enn det som er lagt til grunn. Dette er imidlertid lite trolig, først og fremst grunnet størrelsen Cavity Expansion Method gir på plastisk sone, som er 4m. I tillegg får en med den elastiske løsningen ganske god tilpasning til felldata for $r=3,15$.



Figur 72 Plastisk løsning og felldata med inntegnet grense for plastisk sone

I tillegg til poretrykksparameteren A_f har installasjonstrykket, P_j , stor betydning for utfallet. Metoden P_j er valgt med er diskutabel og det er vanskelig å vurdere hvor stor del av installasjonstrykket som når ytterkanten av pelen. Δu øker proporsjonalt med P_j , slik at om P_j økes med 50% ($P_j=399\text{kPa}$) hadde ligning (2-15) gitt et poreovertrykk på 266kPa for $A_f=1,5$. Størrelsen på P_j har stor betydning for verdien av Δu og det er derfor viktig å finne en representativ verdi for P_j for det gitte tilfellet. P_j er ikke lik faktisk påsatt lufttrykk, grunnet av det også unnslipper opp og ned i KS-pelen under installasjon i

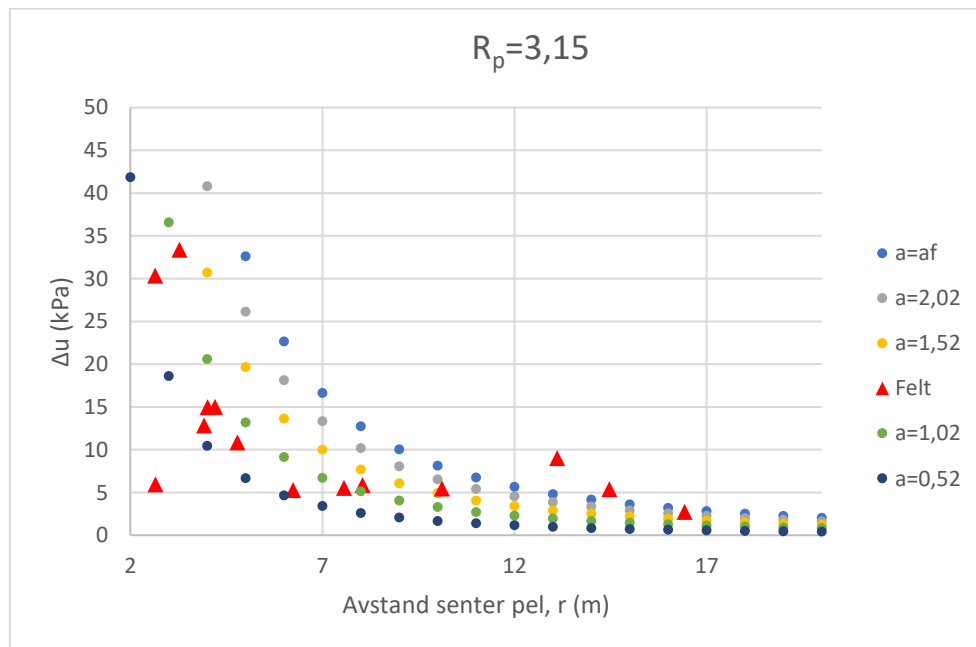
tillegg til at verdien av poretrykket reduseres samtidig som den bres utover. I dette tilfellet ville $P_j=800\text{kPa}$, som er det faktiske installasjonstrykket brukt i prosjektet på Sluppen, gitt tilleggsporetrykk på 711kPa (med $A_f=1,52$) $0,58\text{m}$ fra senter av pelen. Dette er veldig mye høyere enn målte verdier og ikke et realistisk tilleggsporetrykk. Det ville ført til effektivspenninger lik 0.

Om en bruker A_f som foreslått av Shen, Miura og Koga (2003) i ligning (2-19), oppnår en litt for høye verdier for Δu , særlig i plastisk sone. Dette kan være fordi denne verdien for A_f ikke stemmer eller at P_j er antatt for høyt. A_f vil også variere med spenningen og Shen, Miura og Koga (2003) viser at A_f varierte med dybden. Det er ikke tatt hensyn til dette i analysen.

Valg av de andre parameterne vil også ha betydning for verdien av Δu . For eksempel størrelsen på den udrenerte skjærstyrken, c_u , og effektivt horisontaltrykk og sensitivitet. Dette er parametere som kan måles i felt og det ble brukt beste anslag fra felt på Sluppen i tillegg til erfaringstall. Om parameterne likevel ikke stemmer godt med faktiske grunnforhold, har dette innvirkning på verdien av tilleggsporetrykket.

Elastisk del

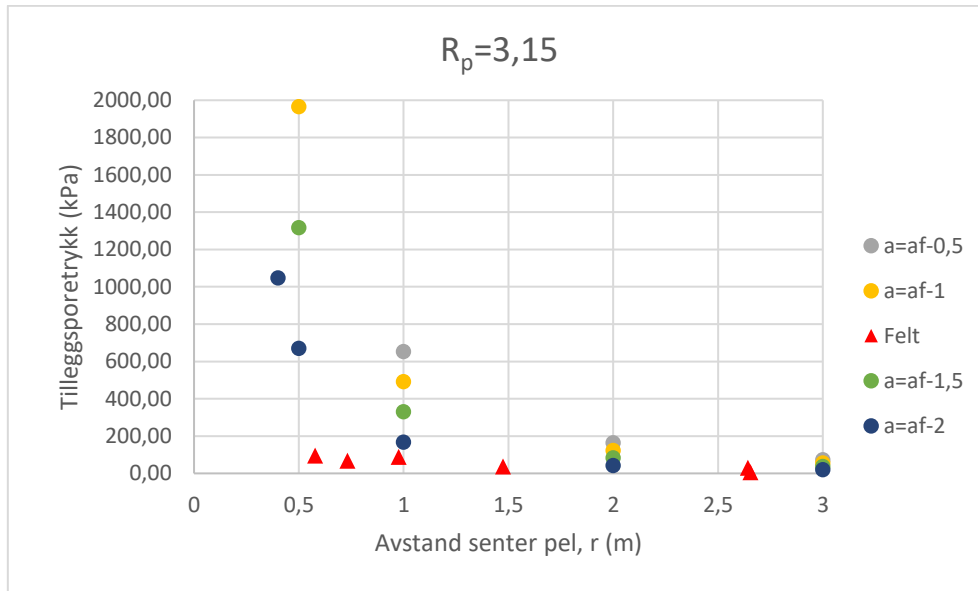
For den elastiske delen av den analytiske løsningen kan resultatene ses sammen med feltdata i Figur 73. Det kan se ut som α mellom $0,52$ og $1,02$ simulerer poreovertrykket best frem til 8m fra senter av KS-pel, etterfulgt av et intervall hvor $\alpha=1,52$ passer bedre. På store avstander ($r>12\text{m}$) virker det som denne løsningen underestimerer poretrykket for alle verdier av α . $\alpha=\alpha_f$ er tatt med i Figur 73 for å illustrere dette, da det er øvre grense for α .



Figur 73 Elastisk del med feltdata

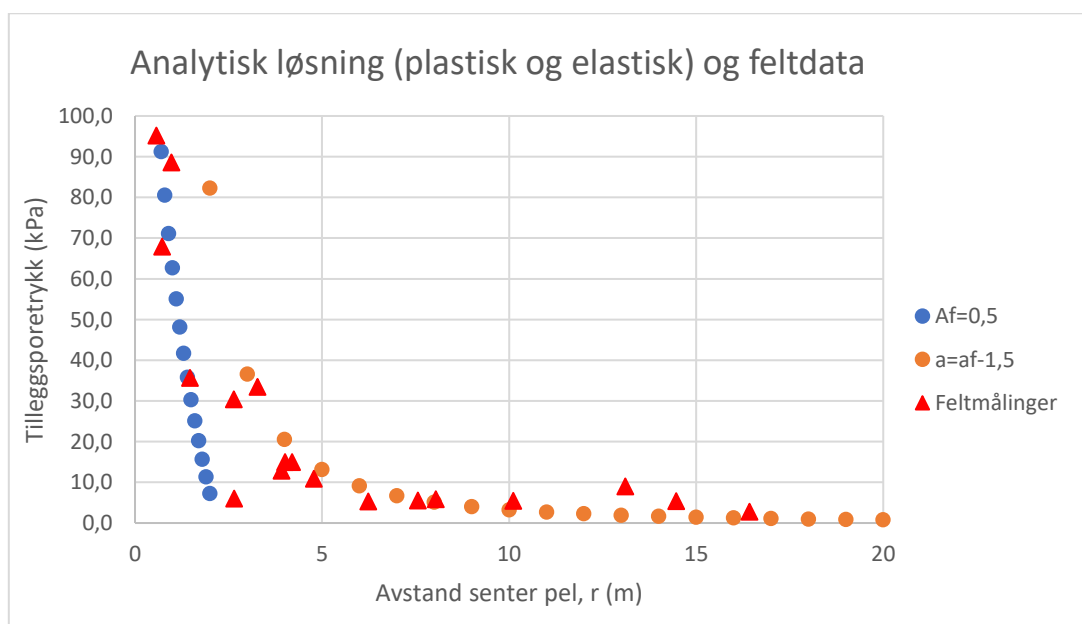
For elastisk løsning har både α og R_p stor betydning for størrelsen på tilleggsporetrykket. Hvor stor betydning R_p har er avhengig av hvor langt unna senter av pelen det er snakk om. I Figur 74 hvor den elastiske løsningen for α mellom $0,52$ og $2,02$ er plottet,

kommer det tydelig frem at elastisk løsning ikke fungerer nær KS-pelen. At ligningen ikke simulerer tilleggsporetrykket godt nær KS-pelen stemmer i og med at den elastiske ligningen bare er gyldig for $r > R_p$.



Figur 74 Elastisk løsning og målte feltdata nær KS-pel

Ved bruk av elastisk ligning ble det valgt $R_p = 3,15$ for alle verdier av a . R_p vil nok i virkeligheten variere med a . Dette er på grunn av at a avhenger av A_f og størrelsen på A_f vil påvirke størrelsen på plastisk sone, se Figur 72. Dette gjør at beregningene for elastisk løsning ikke er helt tilpasset og en vil kanskje ha sett et annet gyldighetsområde om R_p varierte med a .



Figur 75 Elastisk og plastisk del sammenstilt med feltdata

Den analytiske løsningen i ligningen gitt av ligning (2-15) og (2-16), viser seg å kunne stemme relativt godt overens med feltdata fra et KS-stabiliseringsprosjekt med tørr dypstabilisering. Det krever imidlertid at parameterne blir tilpasset godt og en må bestemme A_r og P_j med gode vurderinger. I denne sammenhengen ble $A_r=0,5$ og $\alpha=1,02$ valgt fordi dette totalt sett gir best overensstemmelse med feltdata. Dette valget av A_r vil etter Skempton (1954) ikke innebære sensitiv leire, se tabell Tabell 1.

Poretrykkparameter $A=0,5$ vil innebære svakt overkonsolidert eller normalkonsolidert leire. For tilfellet med data fra Sluppen vil det være et sjikt i starten av elastisk sone hvor poretrykket ikke blir simulert godt. En kan uansett si at den plastiske løsningen passer godt innenfor 2m fra senter av pelen og at elastisk løsning kan brukes utenfor dette. Det er tydelig at den plastiske ligningen simulerer tilleggporetrykket dårlig fra 2m og utover, særlig fordi den etter hvert blir negativ. I følge Shen, Miura og Koga (2003) blir plastisk sone større ved kumulativ effekt når det installeres flere KS-peler. Dette kan forklare hvorfor plastisk sone må være såpass stor for å være godt tilpasset feltdata. Den elastiske løsningen går mot 0 på store avstander og er derfor ansett å simulere poretrykket på store avstander relativt godt.

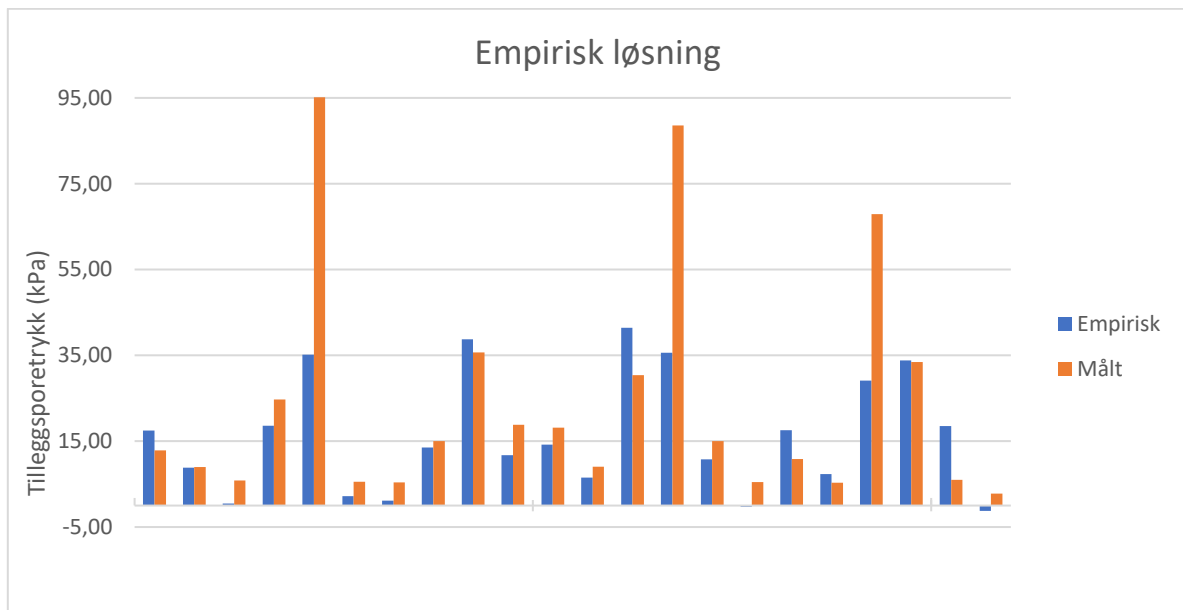
Det er viktig å bemerke at de anbefalte parameterne er på bakgrunn av et spesifikt prosjekt og for andre grunnforhold og situasjoner, vil et annet parametervalg gi bedre simuleringer. I tillegg er parametervalget gjort med bakgrunn i tilpasning til feltdata, noe som er en av årsaken til at den viser seg å stemme godt overens. Dette er en svakhet ved gjennomført analyse.

Ligning (2-15) og (2-16) er ment for å simulere installasjon av én pel. Det er altså en forskjell i simuleringen og i hvordan poretrykket oppnås i felt, i og med at det installeres flere peler i løpet av relativt kort tid i felt. Dette gir en kumulativ effekt som er diskutert i kapittel 7.1. Det er derfor ikke urimelig om det er forskjeller. At den analytiske løsningen stemmer godt overens med feltdata når en velger ut nærmeste pel, kan tyde på at det er nærmeste pel som i hovedsak bestemmer poreovertrykket.

Den analytiske ligningen for å simulere tilleggporetrykk ved installasjon av KS-peler er i utgangspunktet laget for våt metode. Resultatene viser imidlertid at ligningene kan fungere også for tørr metode.

Shen, Miura og Koga (2003) oppnår 95kPa som høyeste målte poreovertrykk i felt. Dette er omtrent helt likt med høyeste oppnådde poreovertrykk på Sluppen. Det er uvisst om dette er helt tilfeldig, eller om det kan være en grunn til at høyeste målte poreovertrykk er like.

7.4. Empirisk løsning



Figur 76 Sammenligning empirisk løsning og feltmålinger

Den empiriske løsningen samsvarer relativt godt overens med de målte dataene fra felt for tilleggsporetrykk med størrelser som verken er veldig høye eller lave. Den empiriske løsningen klarer imidlertid ikke å estimere de høyeste tilleggsporetrykkene. Også for de laveste tilleggsporetrykkene underestimerer løsningen poretrykk og gir til og med negative verdier i noen tilfeller.

Metoden til Zhang, Chen og Wang (2012) ble laget for våt dypstabilisering. Den ser til en viss grad ut til å kunne funke for tørr dypstabilisering også. Løsningen tar hensyn til at det blir installert flere peler over en tid og avstanden til disse, men ser ikke ut til å fungere godt forhold som på Sluppen. Dette kan kanskje være på grunn av andre grunnforhold eller på grunn av at metoden er tilpasset med felldata fra våt metode. Det blir derfor ikke anbefalt å bruke denne ligningen til å estimere poreovertrykk ved installasjon av flere KS-peler med tørr metode, uten at den testes ytterligere.

7.5. Oppsummert

Det er flere mulige måter å simulere installasjon av KS-peler på, for å anslå tilleggsporetrykk ved installasjon, og noen har blitt testet. I tillegg er felldata fra et prosjekt analysert for få et inntrykk av størrelser på poreovertrykk i praksis, og for å sammenligne og tilpasse de andre metodene best mulig. Alle metodene viser at poreovertrykket reduseres med avstanden fra installert(e) KS-pel(er). Målte felldata stemmer overens med forventninger etter litteraturen. Verdien av tilleggsporetrykk ved installasjon av KS-peler er imidlertid avhengig av lokale forhold.

Cavity Expansion Method overestimerer poreovertrykket ved KS-stabilisering, men fungerer som en veldig konservativ førstehåndberegning og illustrerer godt at poreovertrykket reduseres med avstanden til pelen. *Shearing Expanding Method* gir gode

estimat for poreovertrykket om en bruker parametere som er godt tilpasset. Metoden krever mye med tanke på tilpasning av parametere, men har potensiale til å anslå poreovertrykket godt. For denne løsningen må den plastiske delen brukes i det som en regner som plastisk sone, som ble vurdert til 2m i dette tilfellet. Den elastiske delen av ligningen brukes for elastisk sone. Den empiriske løsningen fra Zhang, Chen og Wang (2012) simulerte de høye poretrykkene dårlig, og om denne skal brukes til å anslå poretrykket, burde det undersøkes hva som er årsaken til dette, slik at det eventuelt kan unngås.

Størst potensiale for å simulere virkeligheten best mulig, og dermed også til å anslå poreovertrykk ved KS-stabilisering, ligger i elementmetodeprogrammet Plaxis. Dette er først og fremst grunnet muligheten til å modellere og tilpasse mange ulike forhold, slik at hele simuleringen ligner på felt og KS-installasjonen i praksis. Det også er en rekke begrensninger. Det vanskeligste er kanskje å finne en god måte å modellere KS-stabiliseringen på. I dette tilfellet ble det brukt volumtøyning, og en må da anslå en verdi av denne som omfatter alle forhold som gir økt poretrykk ved KS-stabilisering. Dette kan blant annet være lufttrykk, skjærkraft fra vispen og massefortregning. Plaxis fungerer godt til å simulere installasjon av én KS-pel, men simuleringen ga ikke like høye poretrykk som feltmålingene. Dette kan ha flere årsaker. For det første at verdien av påsatt volumtøyning var for lav eller at en har gjort dårlige antagelser av grunnforhold. Et viktig poeng er også at det i Plaxis bare ble modellert installasjon av én KS-pel, mens det i virkeligheten ble installert flere KS-peler. Dette vil gi en kumulativ effekt på poreovertrykket. Derfor er det rimelig at verdiene for tilleggsporetrykket i Plaxis er lavere enn feltmålingene. For å benytte modellen opp mot felt, må en være klar over dette, men det er også mulig å simulere installasjon av flere KS-peler i Plaxis.

Med Plaxis-beregningene viste det seg at økt volumtøyning, ϵ , ga økt tilleggsporetrykk. Redusert dilatansvinkel, ψ , (negativ) ga også økt tilleggsporetrykk, men bare om volumtøyningen hadde en viss størrelse. $\epsilon=1\%$ var for dette tilfellet ikke stort nok til at ψ hadde innvirkning på verdien av tilleggsporetrykket. Jordmodellen *Hardening Soil* fungerer bedre til å simulere poretrykk ved KS-stabilisering enn *Mohr-Coulomb*. Jordparametere er også en usikkerhet som kan gi utslag i poretrykksverdier for Plaxis-simuleringen. At det er stor forskjell på de ulike tilfellene i beregningene i Plaxis, bekrefter at det også vil være stor forskjell for KS-stabilisering i felt. Med volumtøyning $\epsilon=3\%$ og dilatansvinkel $\psi=-3^\circ$ ble det med Plaxis (*Hardening Soil*) simulert maksimalt poreovertrykk på ca. 100kPa inntil kanten av KS-pelen. Dette stemmer relativt godt overens med feltmålinger og $\epsilon=3\%$ og $\psi=-3^\circ$ å være passende parametere for dette tilfellet. Her er det ikke tatt hensyn til at det installeres flere KS-peler. Disse parameterne ville vært annerledes ($\epsilon<3\%$ og/eller $\psi>-3^\circ$) om en tok den kumulative effekten med i beregningen.

Feltemålingene fra Sluppen stemmer med forventninger når det gjelder størrelse på tilleggsporetrykk og trend med reduksjon av tilleggsporetrykk med avstanden til de installerte KS-pelene. Det ble installert mange KS-peler og tilleggsporetrykket øker også med antall KS-peler installert i en periode. Den høyeste målte verdien av poreovertrykk hadde trolig vært lavere om det ikke hadde vært installert flere KS-peler etter hverandre i samme område, grunnet den kumulative effekten ved installasjon av flere KS-peler før poreovertrykket har dissipert. Poreovertrykk har i en prosess med KS-stabilisering ofte ikke mulighet til å dissipere helt, grunnet at nye KS-peler installeres og poretrykket øker på nytt, noe som gjør at poreovertrykkene blir enda større.

Det er flere forhold i leira og ved installasjonsprosessen som påvirker poretrykket. For eksempel permeabiliteten og stivheten til leira. Permeabiliteten vil ha stor betydning for hvor raskt poreovertrykket konsoliderer. Viktigste faktor for størrelsen på poreovertrykket nært KS-peler er med stor sannsynlighet installasjonstrykket.

Med alle analyser og vurderinger tatt i betraktning, kan en si følgende om poretrykksrespons for KS-stabilisering i lignende tilfeller som på Sluppen:

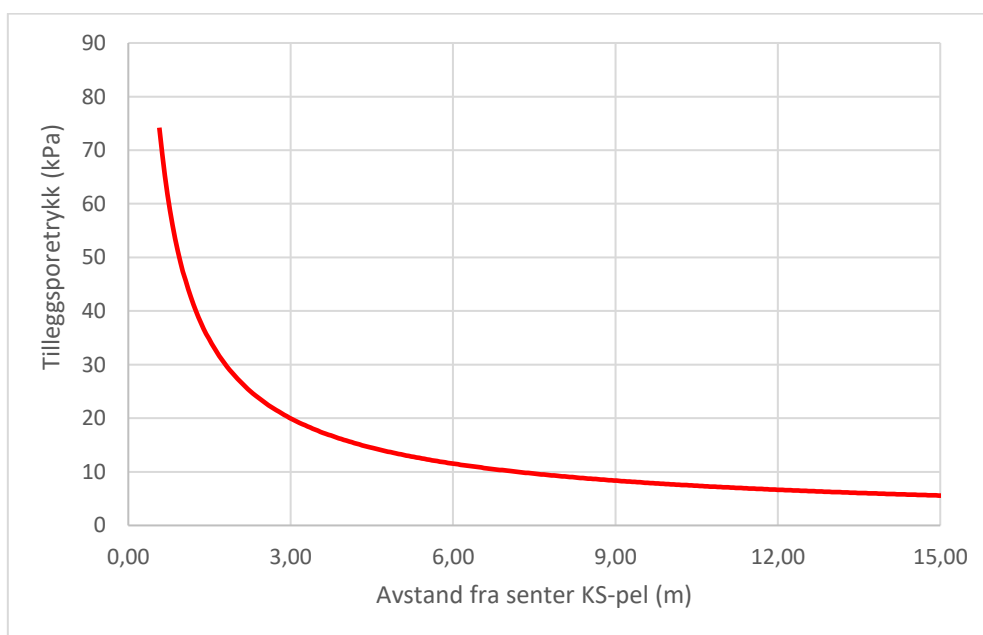
- Størrelsen på tilleggsporetrykket kan komme opp mot 95kPa ca. 0,2m fra installerte KS-peler når det installeres flere innenfor samme tidsrom.
- Størrelsen på tilleggsporetrykket reduseres med økt avstand til de installerte KS-pelene. Tilleggsporetrykkene kan bli ca. 20kPa, uten at KS-peler er installert nærmere enn 6m.
- Det er en kumulativ effekt når en installerer flere KS-peler og antall peler installert i en periode også har betydning. Avstanden til den nærmeste KS-pelen er imidlertid avgjørende for størrelsen på tilleggsporetrykket.
- Tilleggsporetrykkene er ubetydelige lengre unna enn 11m.
- Konsolideringen kan ta mellom 1,5 døgn og 2 døgn.

8. Konklusjoner og anbefalinger

For å vurdere poretrykksresponsen ved KS-stabilisering er det benyttet flere ulike metoder og løsninger. Det er lagt størst vekt på feltmålinger. Disse stemte med forventningene og kan derfor brukes som grunnlag for å kvantifisere poreovertrykk ved KS-stabilisering. Det påpekes at poretrykksrespons er svært avhengig av lokale grunnforhold og installasjonstrykket til KS-pelene, i tillegg til mange andre faktorer. En del av funnene er imidlertid overførbart til områder med lignende grunnforhold som omtalt i rapporten. Om grunnforhold og andre faktorer er tilstrekkelig like som for prosjekt VA-Sluppenvegen, kan det følgende sies å gjelde om poretrykksresponsen ved installasjon av KS-peler.

Det er målt poreovertrykk opp mot 95kPa i en avstand ca. 0,2m fra ytterkant av nærmeste KS-pel i dybde -7m ved installasjon av KS-peler med ca. 800kPa lufttrykk. Når flere KS-peler installeres, er det trolig en betydelig kumulativ effekt på poreovertrykket, slik at det blir større. Antall installerte KS-peler har betydning for størrelsen på poreovertrykket og det er observert at poreovertrykket øker med antall installerte KS-peler. Poreovertrykket reduseres med avstand til installerte KS-peler og kan regnes som ubetydelige fra ca. 11m avstand fra KS-pelen. Det kan imidlertid ikke utelukkes at poreovertrykk kan bli høyere enn høyeste målte verdi i dette tilfellet.

I Figur 77 er det vist hvordan en kan gå ut fra at tilleggsporetrykket avtar med avstand fra KS-pelen.



Figur 77 Anbefalt veiledning for størrelse av tilleggsporetrykk med avstand til KS-pel

Permeabiliteten øker ofte etter at leire er KS-stabilisert. Dette gjør at konsolideringen kan gå raskere enn forventet. Det er erfart at det går mellom 5 døgn og 10 døgn før poretrykket har dissipert til 80% av maksimalverdien.

På grunn av mulighetene programvaren Plaxis gir, egner FEM-analyse seg godt til å simulere installasjon av KS-peler. Jordmodellen *Hardening Soil* egner seg bedre til å anslå poreovertrykk ved KS-stabilisering enn *Mohr-Coulomb*. Påsatt volumtøyning i volumet til KS-pelen fungerer godt til å simulere installasjon av KS-pel. Imidlertid må det gjennomføres vurderinger rundt størrelsen på volumtøyningen i forhold til lasten gjorda blir utsatt for, som i hovedsak er grunnet lufttrykket som benyttes i installasjonen. Med volumtøyning $\epsilon=3\%$ og dilatansvinkel $\psi=-3^\circ$ ble det med Plaxis (*Hardening Soil*) simulert maksimalt poreovertrykk på ca. 100kPa inntil kanten av KS-pelen, som stemmer relativt godt overens med feltmålinger. I benyttet Plaxis-modell er det imidlertid ikke tatt hensyn til den kumulative effekten som finner sted når flere KS-peler installeres nesten samtidig. Poreovertrykket blir dermed underestimert. En må gå ut fra at ved installasjon av flere KS-peler blir poretrykket høyere enn ved installasjon av én KS-pel.

Den analytiske metoden for *Cavity Expansion Method*, som er vanlig å bruke for vanlig peleramming, overestimerer poreovertrykk for KS-stabilisering. Mens den analytiske løsningen for *Shearing Expanding Method* fungerer godt om parameterne blir tilpasset bra. Det anbefales for lignende grunnforhold som på Sluppen å benytte den plastiske delen av løsningen innenfor 2m radius fra KS-pelen og den elastiske løsningen for større radius. For lignende grunnforhold kan det brukes følgende poretrykksparetere: $A_r=0,5$ og $\alpha=1,02$.

Den presenterte empiriske løsningen anbefales ikke brukt, da den ikke klarte å simulere de høye tilleggporetrykkene.

Om leira har kontraktant eller dilatant oppførsel vil påvirke størrelsen på poretrykket. For kontraktant leire blir poreovertrykket gjerne høyere enn forventet ut fra påsatt last. Kvikkleire med $OCR < 2$ er ofte kontraktant.

Det påpekes at det alltid er viktig å gjøre vurderinger for hvert enkelt tilfelle på grunn av at størrelsen på poreovertrykk, influensområde og konsolideringstid er sterkt avhengig av grunnforholdene. Det er likevel ingen tvil om at det kan oppstå kritisk høye poretrykk ved KS-stabilisering i områder med opprinnelig lav sikkerhet. Det er derfor viktig at det undersøkes på forhånd hvor stort poreovertrykk som aksepteres og at poretrykket overvåkes underveis for å bekrefte at poretrykket ikke blir høyere enn det som er akseptgrensa.

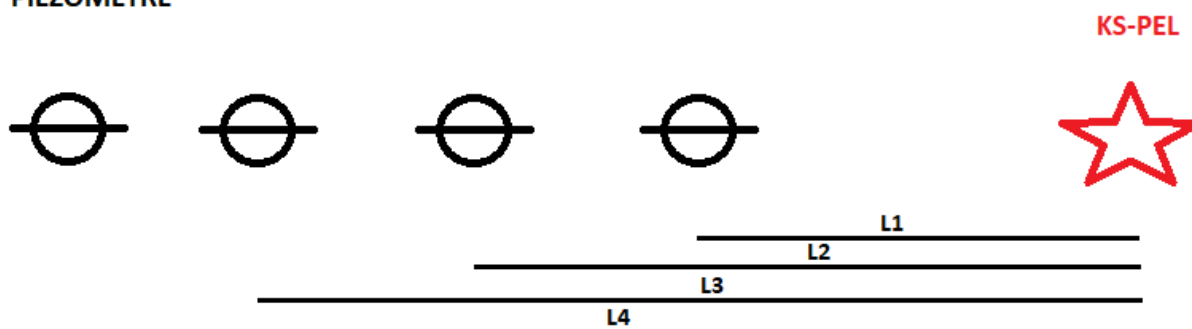
9. Videre arbeid

Det mangler fremdeles innsikt i poretrykksrespons ved KS-stabilisering. Særlig når det gjelder variasjon i grunnforhold og hvordan dette vil påvirke størrelsen på poreovertrykket. For å ha et bedre bilde av hvordan poreovertrykk varierer med grunnforhold og andre faktorer, anbefales det å måle poretrykk ved flere kalk-/sementstabiliseringsprosjekter som utføres og å analysere disse målingene. Det trengs et større datagrunnlag fra flere prosjekter for å kunne si noe generelt om poreovertrykk ved KS-stabilisering. Logging av poretrykk bør skje oftere enn en gang i timen. Dette vil gjøre det tydeligere hvilke KS-peler som fører til poretrykksøkningene i tillegg til at flere av variasjonene i poretrykket vil bli fanget opp.

I dette arbeidet har det vært en mangel at det er ukjent hvor stor andel av påsatt lufttrykk fra installasjon som når ut til omliggende leire. Om dette hadde vært kjent, hadde det vært enklere å anslå hvor stort poretrykk som vil oppstå rundt KS-peler som blir installert. Det anbefales derfor å undersøke hvor stor andel av lufttrykket som unnslipper og dissiperer.

For å få et tydeligere bilde av hvordan poreovertrykk varierer med avstand fra installerte KS-peler anbefales det å gjøre forsøk hvor det installeres én KS-pel, med flere poretrykksmålere på rekke i ulik avstand fra KS-pelen. Dette vil trolig gi et godt bilde av hvordan poretrykket avtar med avstand til installert KS-pel. Forsøksprinsippet er skissert i Figur 78.

PIEZOMETRE



Figur 78 Prinsipp for anbefalt forsøk med piezometere i ulik avstand (L1, L2, L3, L4) fra KS-pel

Det anbefales også å undersøke hvilken metode som fungerer best i Plaxis for simulering av installasjon av KS-pel. I dette arbeidet ble det brukt volumtøyning, men det kan også tenkes at det er andre måter som fungerer. Som forslag nevnes forskyvning i kanten av KS-pelen og linjelast. I tillegg, når det gjelder volumtøyning, anbefales det å finne ut hvordan en kan bestemme verdien av volumtøyningen best mulig med tanke på at den må ta hensyn til blant annet lufttrykk, skjærkraft og massetilførsel. I tillegg kunne det vært interessant å sjekke om det er andre jordmodeller enn Hardening Soil som er bra for å simulere poreovertrykk ved KS-stabilisering.

Å modellere installasjon av flere KS-peler anbefales for å få et bedre bilde av faktisk situasjon i KS-stabiliseringsprosjekt. Dette vil kunne simulere den kumulative effekten når flere KS-peler installeres. Det er også av stor interesse å kunne undersøke den kumulative effekten nøyere. Det vil kunne gi retningslinjer om hvor ofte og hvor tett det er mulig å installere KS-peler og dette er av stor interesse for de utførende, som har størst nytte av å installere KS-peler inntil hverandre uten å drive å flytte rundt på feltet.

I denne rapporten er det antydnet at det er nærmeste KS-pel som er installert i en periode med poretrykksøkning som er avgjørende for størrelsen på tilleggsporetrykket. Dette er blant annet på grunn av at om en plotter størrelse på tilleggsporetrykk mot avstand til nærmeste KS-pel, stemmer trenden godt med forventningene med tanke på tilleggsporetrykkets variasjon med avstand til installerte KS-peler. Det hadde vært nyttig å vite om dette faktisk er tilfellet og om det er avstand til den nærmeste KS-pel eller den kumulative effekten ved installasjon av flere KS-peler som er mest avgjørende. Derfor anbefales det å undersøke om det er den nærmeste installerte KS-pelen i en periode med poretrykksøkning som avgjør størrelsen på tilleggsporetrykket.

I dette arbeidet ble det ikke brukt Plaxis 3D for modellering av installasjon av KS-peler. Dette ses på som et nyttig verktøy og kan gi et godt bilde av 3D-effektene ved installasjon. Plaxis 3D bør derfor også testes ved en senere anledning.

Referanseliste

- Andersson, C. og Karlström, B. (2010) *Installation effects of lime-cement columns*. Master thesis, Chalmers University of Technology.
- Bergset, K.-H. (2015) *Radial Consolidation of Pore Pressure Induced by Pile Driving*. Master, Norges tekniske og naturvitenskaplige universitet.
- Brinkgreve, R. B. J., Swolfs, W. M. og Kumarswamy, S. (2017) Plaxis 2D 2017.
- Dahl, C. E., Bodholt, G. og Oset, F. (2016) *Bruk av vertikaldren og poretrykkskontroll for bløt leire som er stabilisert med kalk-sementpeler*. Upublisert paper presentert på NGM. Reykjavik.
- Edstam, T. (1997) *Erfarenhetsbank för klak-cementpelare*. (Svensk Djupstabilisering 1). Linköping: Statens geotekniska institut.
- Engen, A. (2012) *Skånsomme installasjonsmetoder for kalksementpeler og bruk av slurry*. (37): Norges vassdrags- og energidirektorat, Jernbaneverket og Statens vegvesen.
- Geosafe (2019) *Poretrykksmåling*. Tilgjengelig fra: <http://www.geosafe.no/poretrykksmaaling> (Hentet: 14.05 2019).
- Giske, S. (1978) *Dypstabilisering med kalk (kalkpelmetoden) - Erfaringer og resultater fra prosjektet Rørvik fergeleire, oppstillingsplass*. (Internrapport 853). Oslo: Veglaboratoriet.
- Janbu, N. (1970) *Grunnlag i geoteknikk*. Trondheim: Tapir forlag.
- Janbu, N. (1976) Static Bearing Capacity of Friction Piles, *Proceedings of the 6th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1.2, s. 479-488.
- Johansson, Å. (1998) *Rörelser och portryck vid kalkpelarinstallation. Redovisning av mätresultat*. (Arbetsrapport 6). Linköping: Statens geotekniska institut.
- Karstunen, M. (2014) *Pre-study: Ground Improvement for marginally stable slopes*. (Naturfareprosjektet: Delprosjekt 6: Kvikkleire). Gøteborg: Norges vassdrags- og energidirektorat, Statens vegvesen og Jernbaneverket.
- Miljøpakken (2018) *Åpner firefelts E6 mellom Trondheim og Melhus før jul*. Tilgjengelig fra: <https://miljopakken.no/nyheter/apner-firefelts-e6-mellom-trondheim-og-melhus-for-jul> (Hentet: 30.01. 2019).
- Multiconsult (2018a) *Notat VA Sluppenvegen - Instruks for stabilisering rundt spuntgroper (VA Sluppenvegen)*: Multiconsult.
- Multiconsult (2018b) *E1 - VA Sluppenvegen - Geotekniske grunnundersøkelser*. (E1 - VA Sluppenvegen 10204943-RIG-RAP-001). Trondheim: Multiconsult.
- Multiconsult (2019a) *Beregningshefte - SPUNT pressgrop*. (VA-Sluppenvegen 0). Trondheim.
- Multiconsult (2019b) *E1 - VA Sluppenvegen - Geotekniske prosjekteringsforutsetninger*. (E1 - VA Sluppenvegen). Trondheim: Multiconsult.
- Multiconsult (2019c) *Beregningshefte - JORDPARAMETERE*. (VA - Sluppenvegen). Trondheim.
- Norcem (2014) *Tekniske datablad - Multicem*. Tilgjengelig fra: www.norcem.no
- Nordal, S. (2015) *TBA4116 Geotechnical Engineering Advanced Course - Lecture Notes and Background Material*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Norges geologiske undersøkelse (2019) *Lømasser - Nasjonal løsmassedatabase* Tilgjengelig fra: http://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/ (Hentet: 16.05 2019).
- Norges geotekniske forening (2012) *Veiledning for grunnforsterkning med Kalksesmentpeler*. Oslo.
- Norges geotekniske institutt (2014a) *Installasjon og testresultater klaksement- og stålrørspeler, Geoteknisk forsøksfelt*. (Miljøpakken - E6 Jaktøyen Storler - Byggeplan R-G-04): Norges geotekniske forening,
- Norges geotekniske institutt (2014b) *Kalksementstabilisering - valg av designparametere* (Miljøpakken - E6 Jaktøyen Storler - Byggeplan): Norges geotekniske forening,

- Norges vassdrags- og energidirektorat (2019) *NVE Faresoner*. Tilgjengelig fra: <https://temakart.nve.no/link/?link=faresoner&layer=5&field=KOMMNAVN&value=Trondheim&buffer=10000> (Hentet: 16.05. 2019).
- NTNU Faggruppe for geoteknikk (2018) *Introduksjon til geoteknikk*. Trondheim: Faggruppe for geoteknikk NTNU.
- NTNU Geotechnical division (2015) *Geotechnics - Field and Laboratory Investigations*. Trondheim: NTNU Department of Civil and Transport Engineering.
- Shen, S.-L., Miura, N. og Koga, H. (2003) Interaction mechanism between deep mixing column and surrounding clay during installation, 40. doi: 10.1139/T02-109.
- Skempton, A. W. (1954) The Pore-Pressure Coefficients A and B, *Géotechnique*, 4(4), s. 143-147.
- Standard Norge (1997) *Eurokode 7: Geoteknisk prosjektering - Del 1: Alemenne regler*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/PDF/DisplayFile/?file=si0u7U%2FP2glBGu6OyzpETQ%3D%3D> (Hentet: 29.05 2019).
- Statens vegvesen (1995) *RV 109 Frescoveien-Høyendal - Grunnforsterkning med kalksementpeler, erfaringsrapport*. (RV 109 Frescoveien-Høyendal 2). Østfold: Statens vegvesen.
- Statens vegvesen (2001) *E18 Kristiansand, Bjørndalsletta - Grunnforsterkning med kalk-sementpeler, Erfaringsrapport*. (Oppdrag K-121B 8): Statens vegvesen.
- Statens vegvesen (2008) *E6 Østfold: Solberg-Årum - Erfaring emd oppfølging av produksjon og kontroll av kalk/ement-peling*. (Teknologirapport 2526): Statens vegvesen.
- Statens vegvesen (2014) *Grunnforsterkning, fyllinger og skrånninger - Håndbok V221*.
- Statens vegvesen (2018) *Håndbok V220 - Geoteknikk i vegbygging*.
- Thakur, V. (2007) *Strain Localization in Sensitive Soft Calys*. Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU).

Vedlegg

- A VA – Sluppenvegen
- B Plaxis – beregningsforutsetninger og resultater
- C Utregninger
- D Poretrykksmålinger
- E Feltresultater

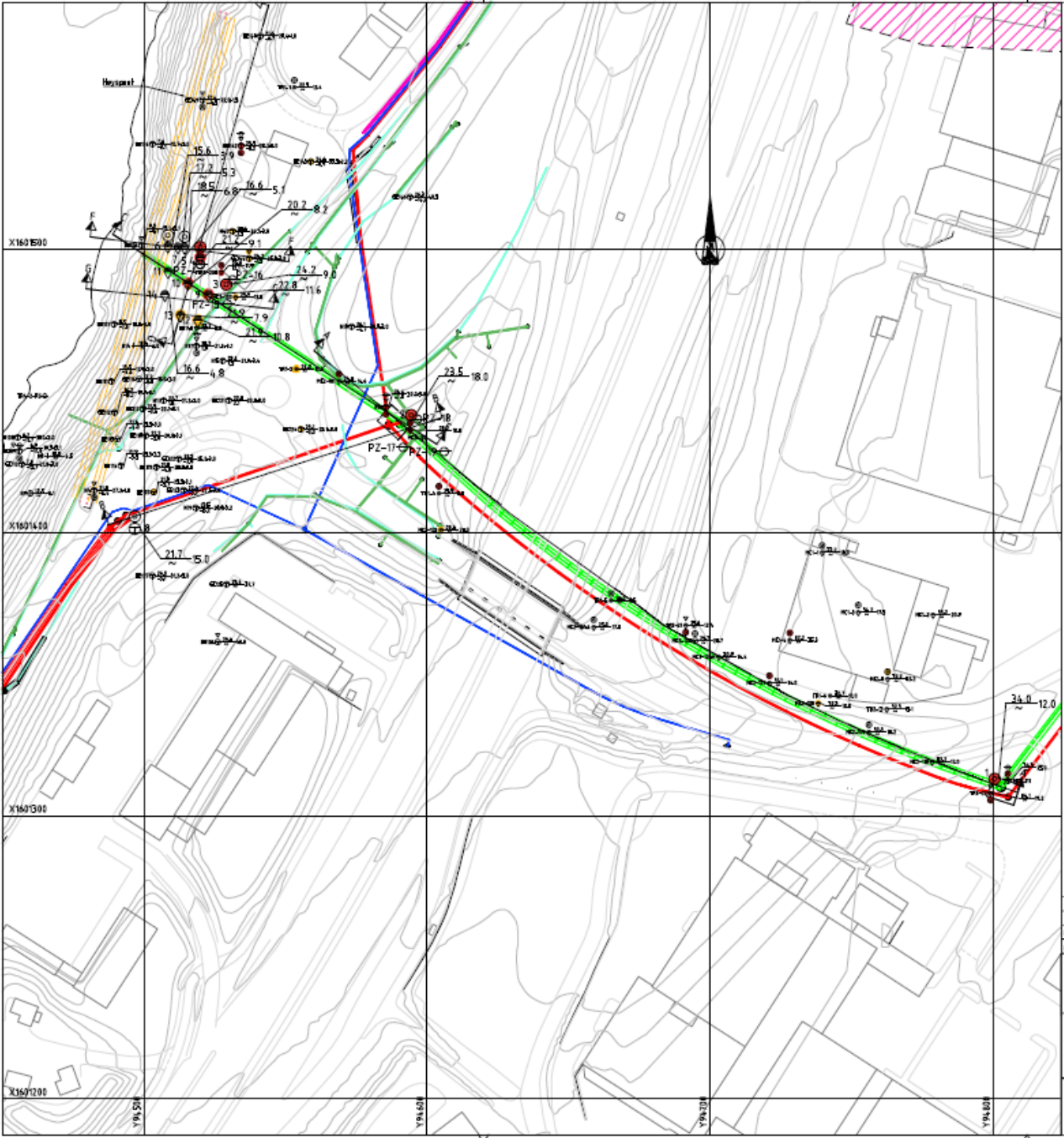
Vedlegg A – Informasjon om prosjekt VA Sluppenvegen

A.1 Borplan

A.2 CPTU 20B

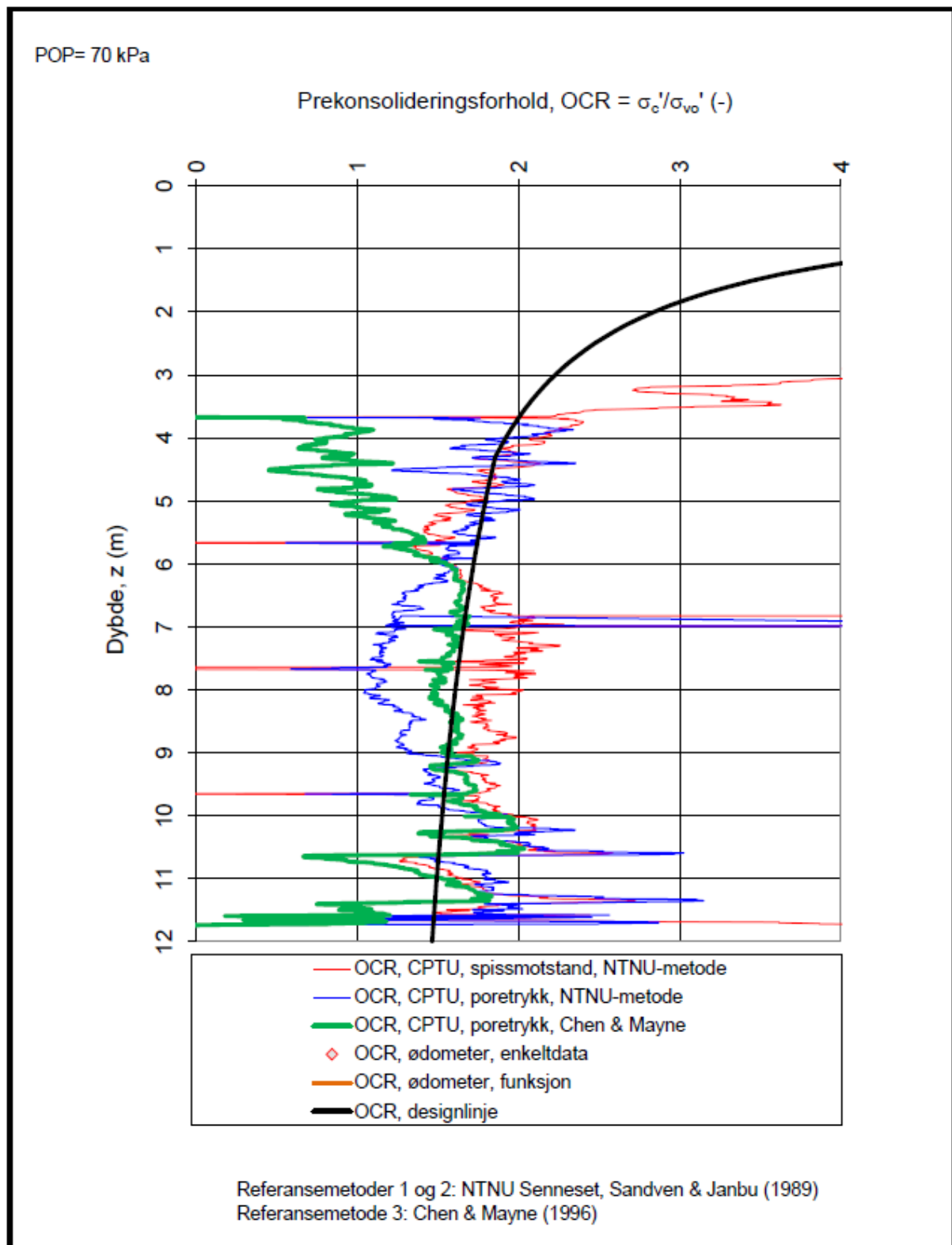
A.3 Oversikt KS-peler

A.1. Borplan

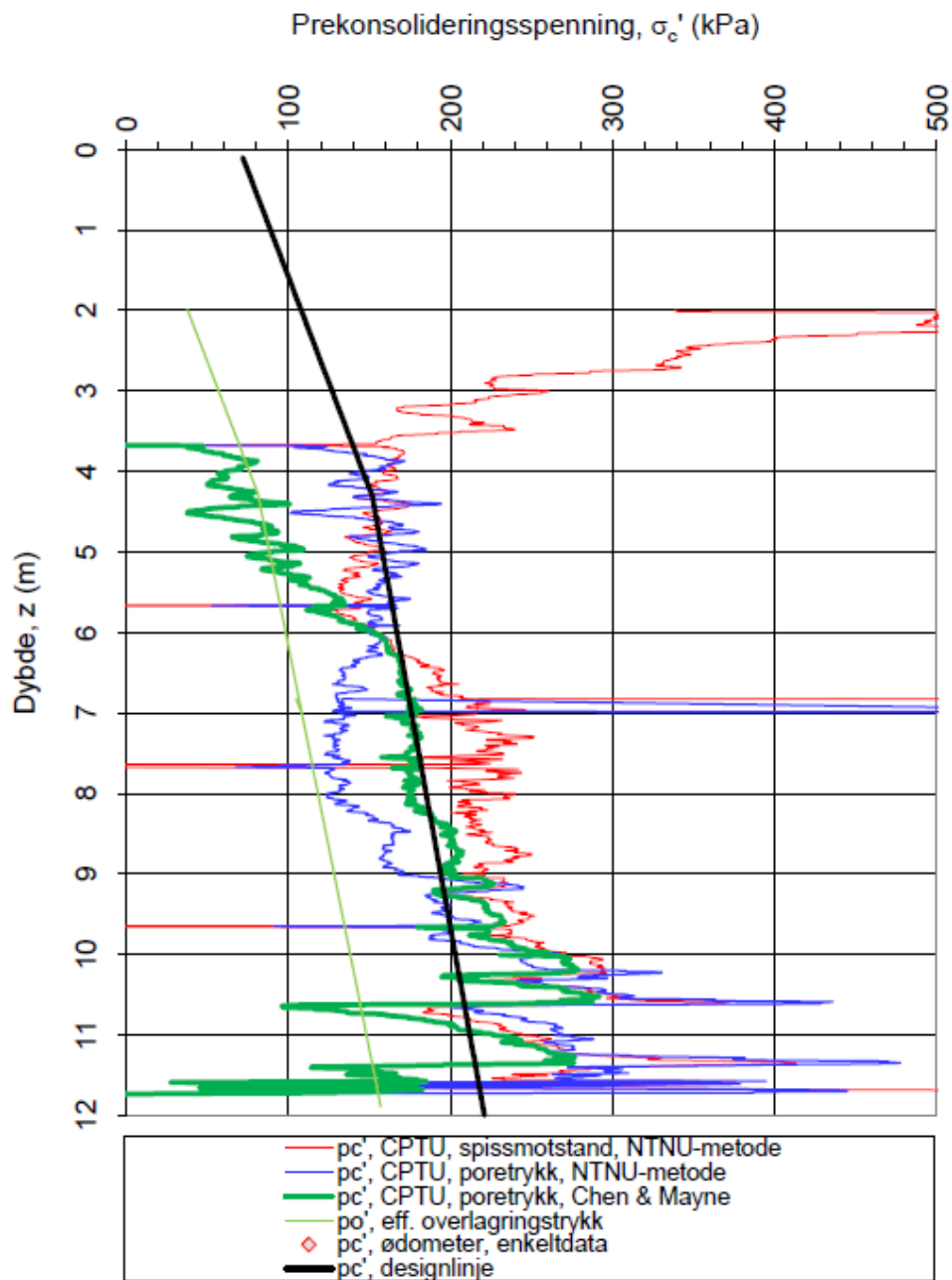


Tilpasset fra (Multiconsult, 2019)

A.2. CPTU 20B



POP= 70 kPa



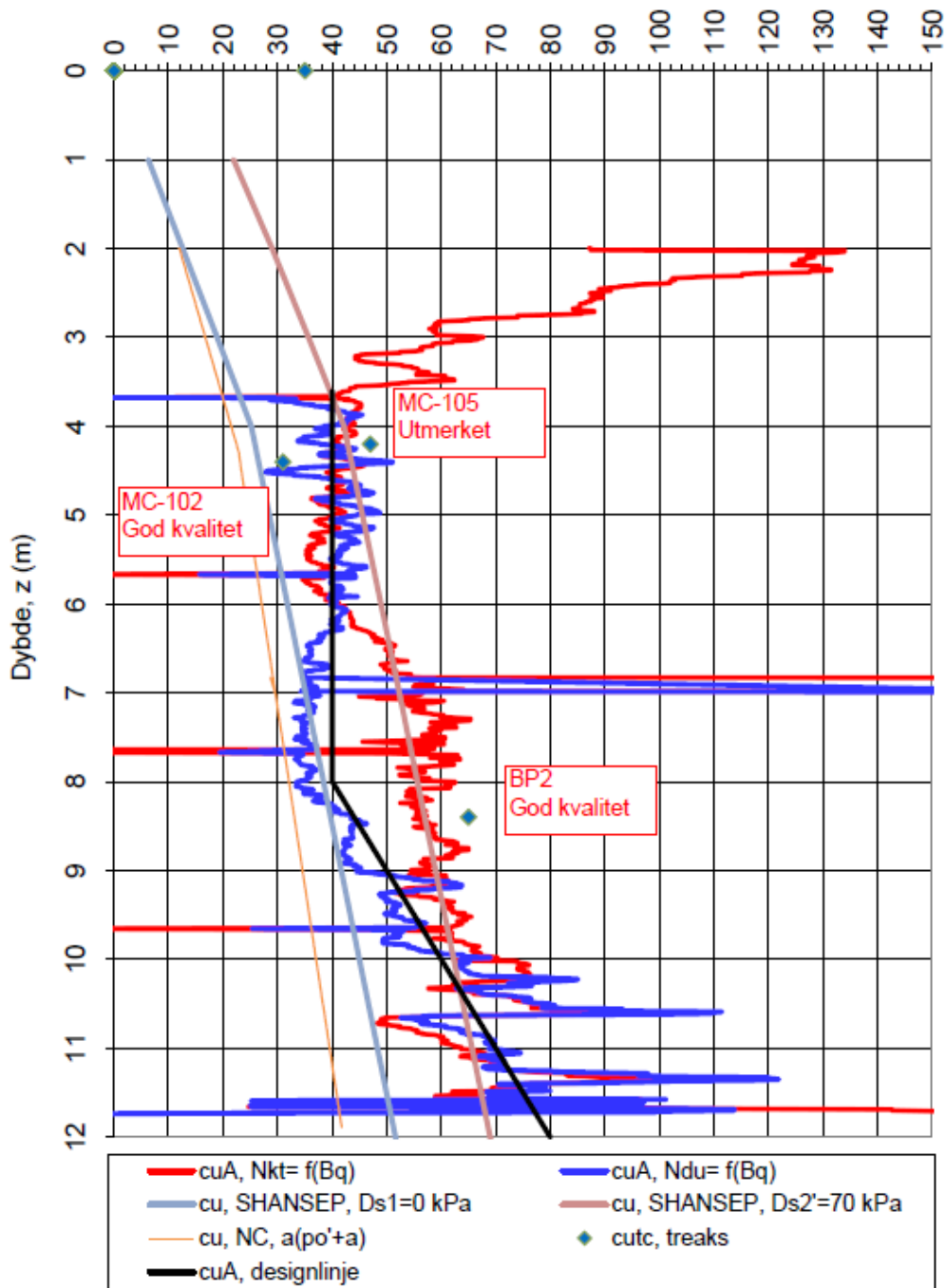
Referansemetoder 1 og 2: NTNU Senneset, Sandven & Janbu (1989)
Referansemetode 3: Chen & Mayne (1996)

Terrang: +24,0

GV ca. 4m u/terreng

Designlinje: $40 + 10^* (z-8m)$ [kPa]

Udrenert skjærfasthet, c_{uA} (kN/m²)



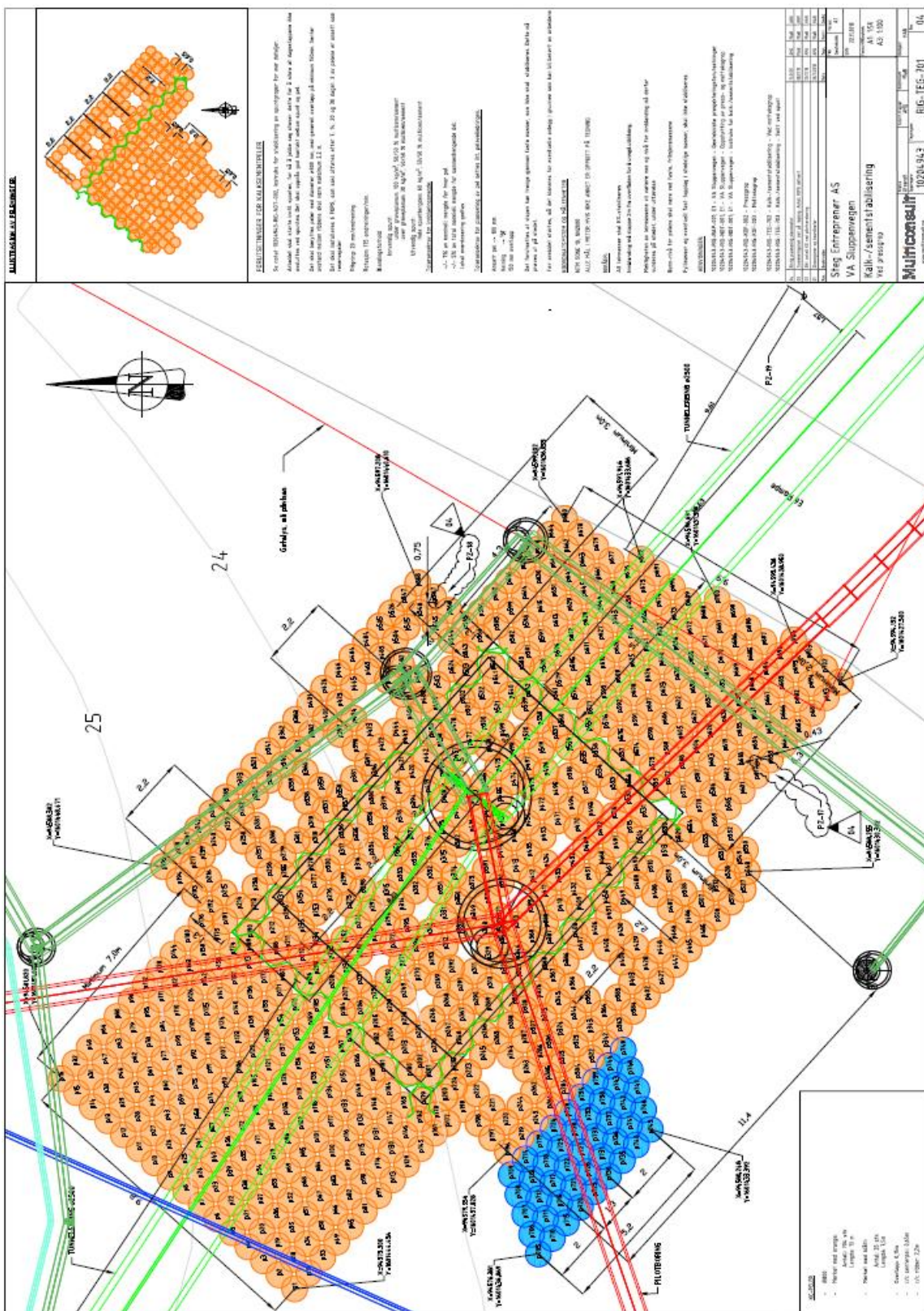
N_{kt} : (18,7-12,5 B_q)

N_{du} : (1,8+7,25 B_q)

α_c valgt: 0.25

Referansemetode: Karlsrud et al. (1996)






A.3. Oversikt KS-peler



Vedlegg B – parametere og resultater fra Plaxis

- B.1. Parametere jordlag – Mohr-Coulomb
- B.2. Resultater – Mohr-Coulomb
- B.3. Parametere jordlag – Hardening Soil
- B.4. Resultater – Hardening Soil

B.1. Parametere jordlag – Mohr-Coulomb

| Identification | Enhet | Tørrskorpe | Siltig leire øverst | Siltig leire nederst | Kvikkleire | Sand og grus |
|-------------------------|----------------------|---|---|---|---|---|
| Identification number | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Drainage type | | Drained | Undrained (A) | Undrained (A) | Undrained (A) | Drained |
| Colour | |  |  |  |  |  |
| Comments | | ? | ? | ? | ? | |
| γ_{unsat} | kN/m ³ | 19,00 | 21,00 | 21,00 | 21,00 | 18,00 |
| γ_{sat} | kN/m ³ | 19,00 | 21,00 | 21,00 | 21,00 | 18,00 |
| Dilatancy cut-off | | No | No | No | No | No |
| E_{init} | | 0,5000 | 0,5000 | 0,5000 | 0,5000 | 0,5000 |
| E_{min} | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| E_{max} | | 999,0 | 999,0 | 999,0 | 999,0 | 999,0 |
| Rayleigh a | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Rayleigh β | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| E | kN/m ² | 6000 | 13,00E3 | 15,60E3 | 10,40E3 | 20,00E3 |
| ν (nu) | | 0,3000 | 0,3000 | 0,3000 | 0,3000 | 0,3000 |
| G | kN/m ² | 2308 | 5000 | 6000 | 4000 | 7692 |
| E_{oed} | kN/m ² | 8077 | 17,50E3 | 21,00E3 | 14,00E3 | 26,92E3 |
| C_{ref} | kN/m ² | 2,900 | 2,650 | 2,650 | 1,820 | 0,000 |
| f (phi) | ° | 30,00 | 28,00 | 28,00 | 20,00 | 35,00 |
| ψ (psi) | ° | 0,000 | 0,000 | 0,000 | -5,000 | 0,000 |
| V_s | m/s | 34,52 | 48,33 | 52,94 | 43,23 | 64,75 |
| V_p | m/s | 64,58 | 90,42 | 99,05 | 80,87 | 121,1 |
| Set to default values | | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes |
| E_{inc} | kN/m ² /m | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| γ_{ref} | m | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| C_{inc} | kN/m ² /m | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| γ_{ref} | m | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

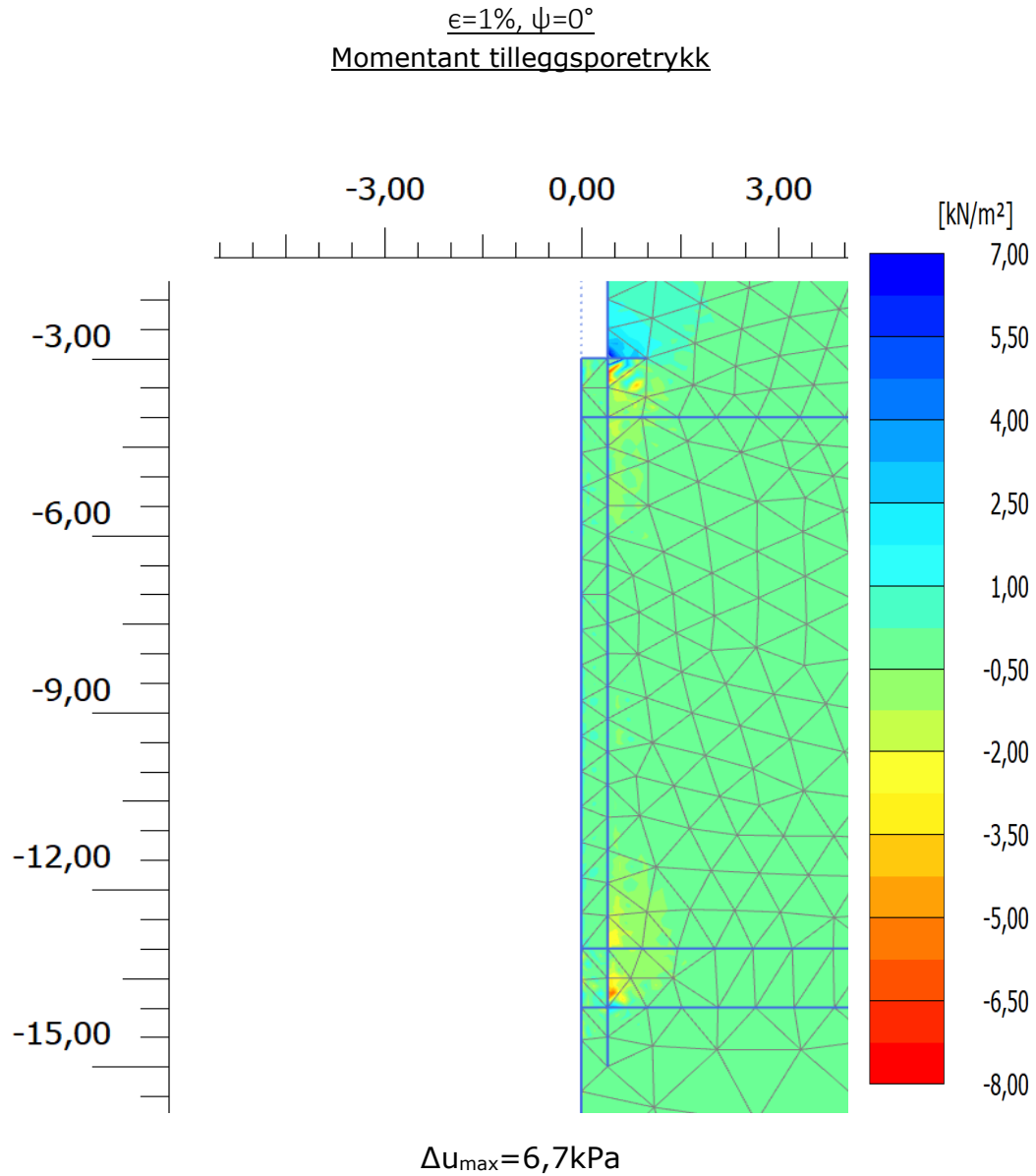
| | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Tension cut-off | | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes |
| Tensile strength | kN/m ² | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Undrained behaviour | | Standard | Standard | Standard | Standard | Standard |
| Skempton-B | | 0,9783 | 0,9783 | 0,9783 | 0,9783 | 0,9783 |
| v _u | | 0,4950 | 0,4950 | 0,4950 | 0,4950 | 0,4950 |
| K _{w,ref} / n | kN/m ² | 225,0E3 | 487,5E3 | 585,0E3 | 390,0E3 | 750,0E3 |
| C _{v,ref} | m ² /day | 0,000 | 0,01435 | 0,01722 | 0,03640 | 0,000 |
| Strength | | Rigid | Rigid | Rigid | Rigid | Rigid |
| R _{inter} | | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Consider gap closure | | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes |
| d _{inter} | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Cross permeability | | Impermeable | Impermeable | Impermeable | Impermeable | Impermeable |
| Drainage conductivity, dk | m ³ /day/m | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| R | m ² K/kW | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| K ₀ determination | | Manual | Manual | Manual | Manual | Manual |
| K _{0,x} = K _{0,z} | | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes |
| K _{0,x} | | 0,7000 | 0,7000 | 0,7000 | 0,7000 | 0,5000 |
| K _{0,z} | | 0,7000 | 0,7000 | 0,7000 | 0,7000 | 0,5000 |
| Data set | | Standard | Standard | Standard | Standard | Standard |
| Type | | Coarse | Coarse | Coarse | Coarse | Coarse |
| < 2 µm | % | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |
| 2 µm - 50 µm | % | 13,00 | 13,00 | 13,00 | 13,00 | 13,00 |
| 50 µm - 2 mm | % | 77,00 | 77,00 | 77,00 | 77,00 | 77,00 |
| Use defaults | | None | None | None | None | None |
| k _x | m/day | 0,1000 | 8,200E-6 | 8,200E-6 | 0,02600E-3 | 2,700 |
| k _y | m/day | 0,1000 | 8,200E-6 | 8,200E-6 | 0,02600E-3 | 2,700 |
| -γ _{unsat} | m | 10,00E3 | 10,00E3 | 10,00E3 | 10,00E3 | 10,00E3 |
| e _{init} | | 0,5000 | 0,5000 | 0,5000 | 0,5000 | 0,5000 |
| S _s | 1/m | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

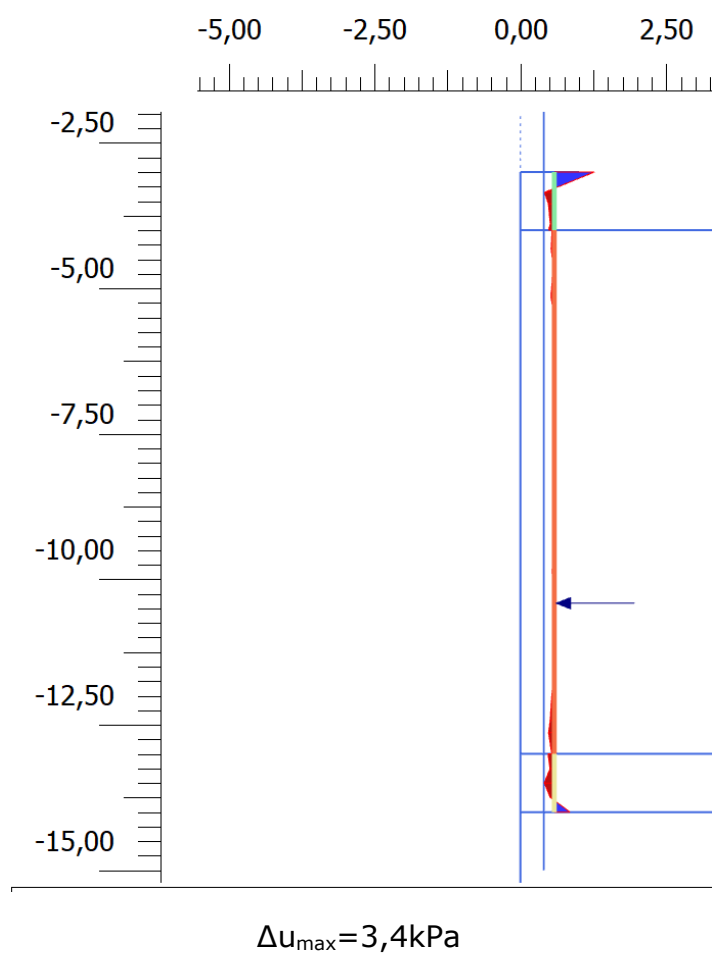
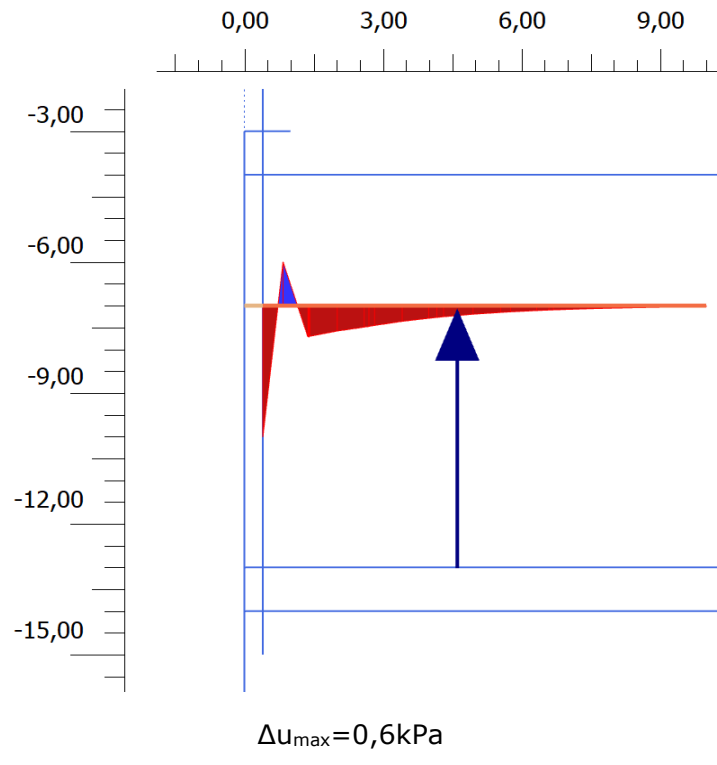
| | | | | | | |
|-------------------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| C _k | | 1000E12 | 1000E12 | 1000E12 | 1000E12 | 1000E12 |
| C _s | kJ/t/K | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| γ _s | kW/m/K | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| ρ _s | t/m ³ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Solid thermal expansion | | Linear | Linear | Linear | Linear | Linear |
| a _x | 1/K | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| a _y | 1/K | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| a _z | 1/K | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| D _v | m ² /day | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| f _{Tv} | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Unfrozen water content | | None | None | None | None | None |

Merknad: ψ varieres.

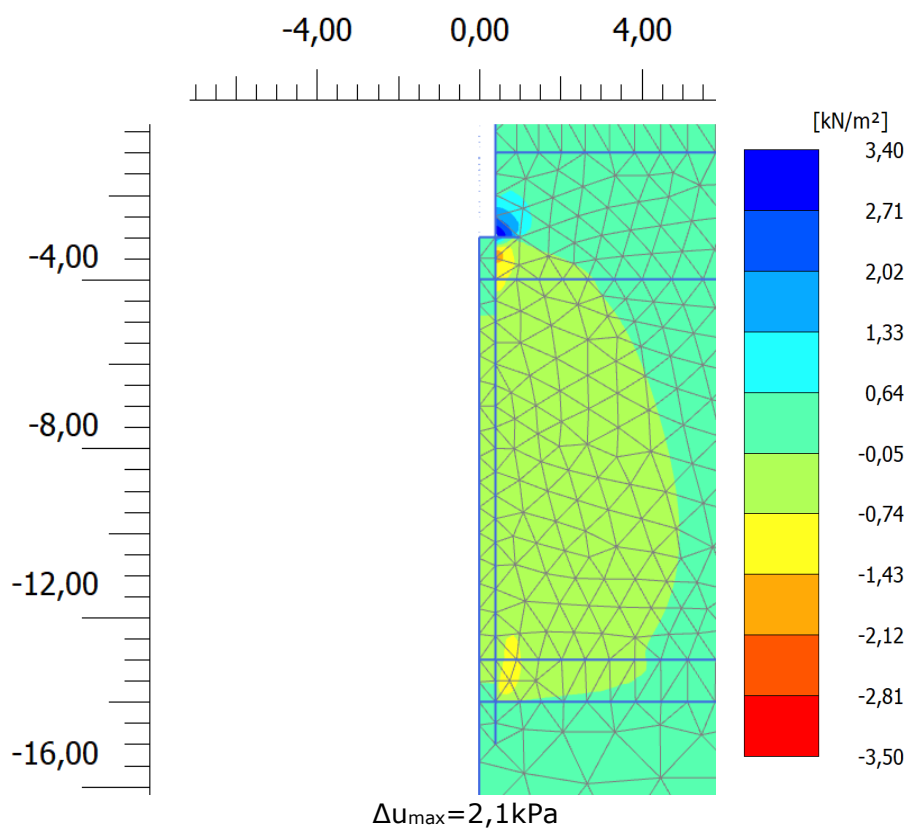
B.2. Resultater – Mohr-Coulomb

OBS! Skalaen er forskjellig for de ulike tidspunktene. Hver figur må leses med tilhørende skala.

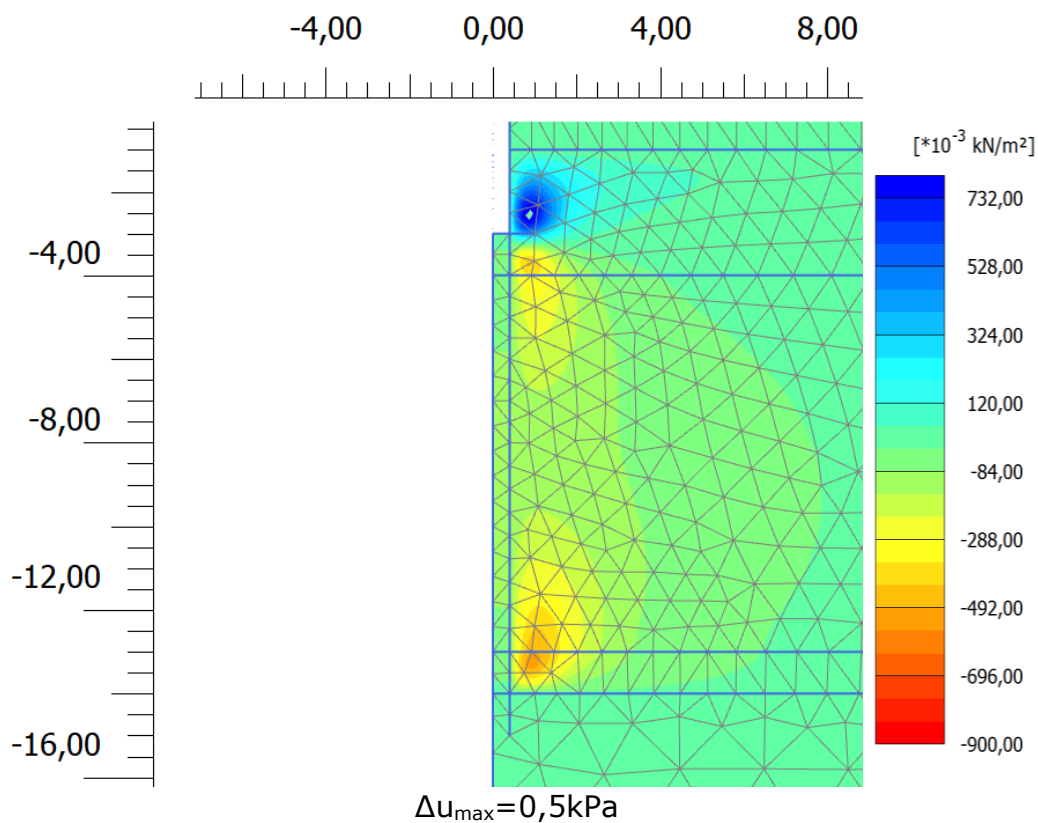




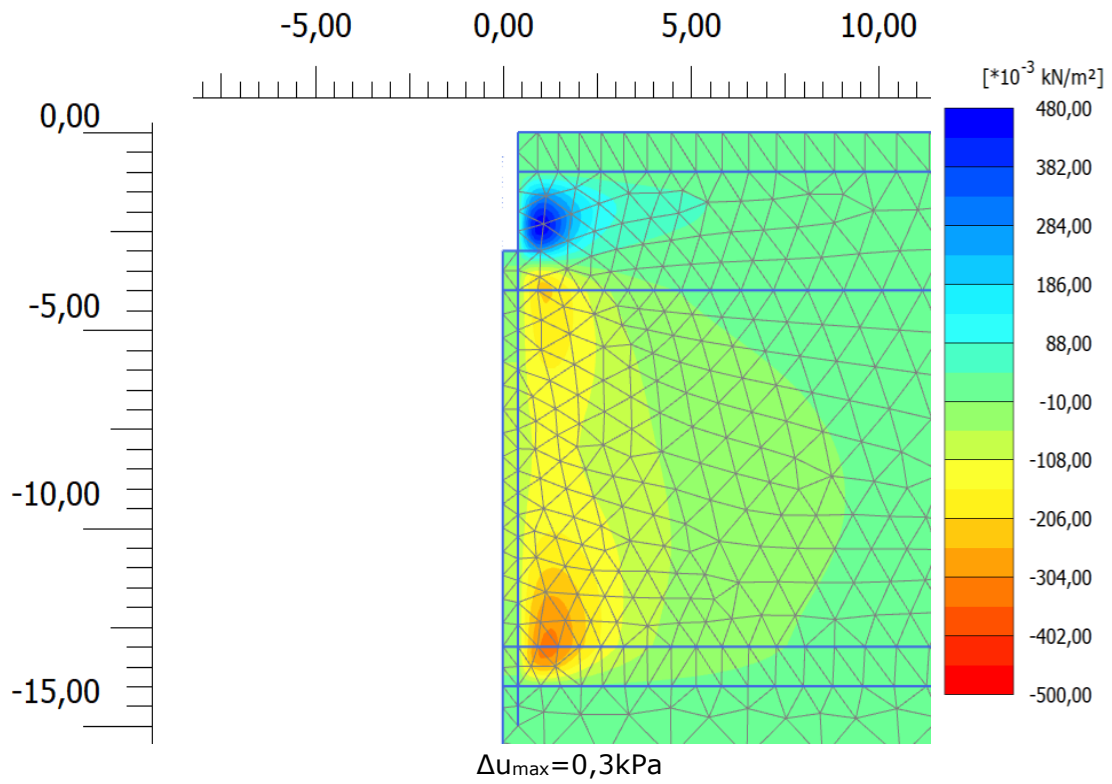
Tilleggsporetrykkoretrykk etter 1 døgn



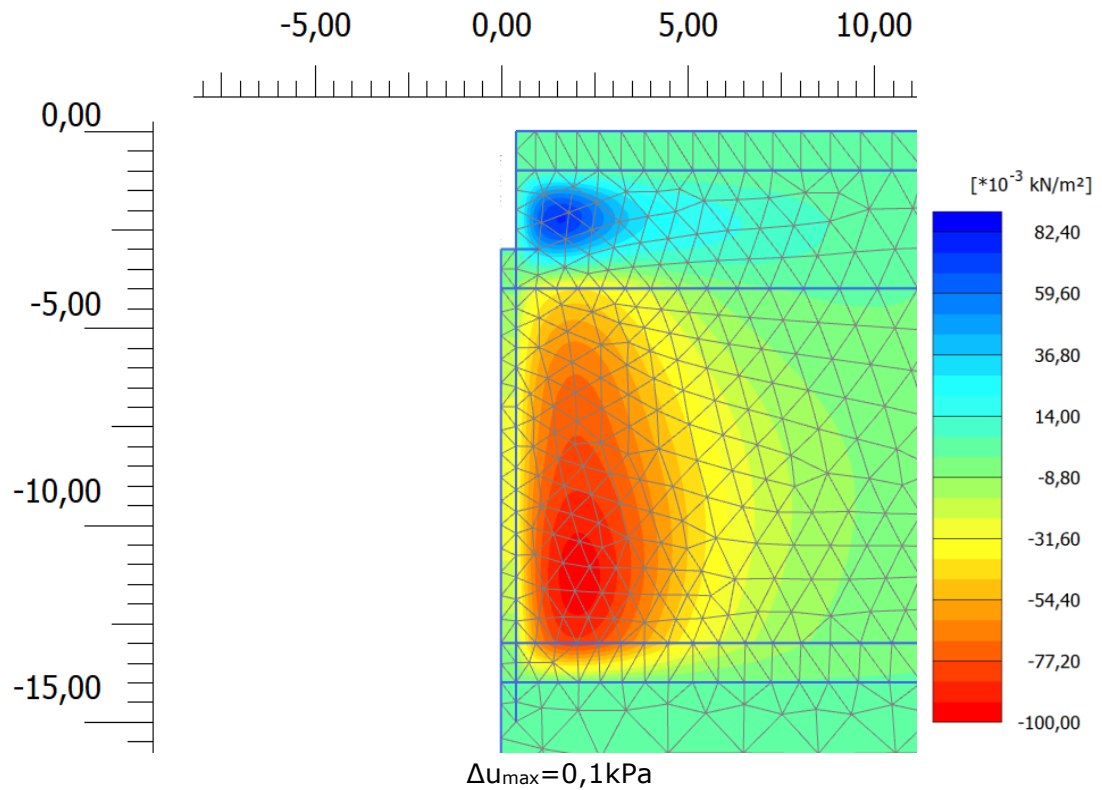
Tilleggsporetrykk etter 5 døgn



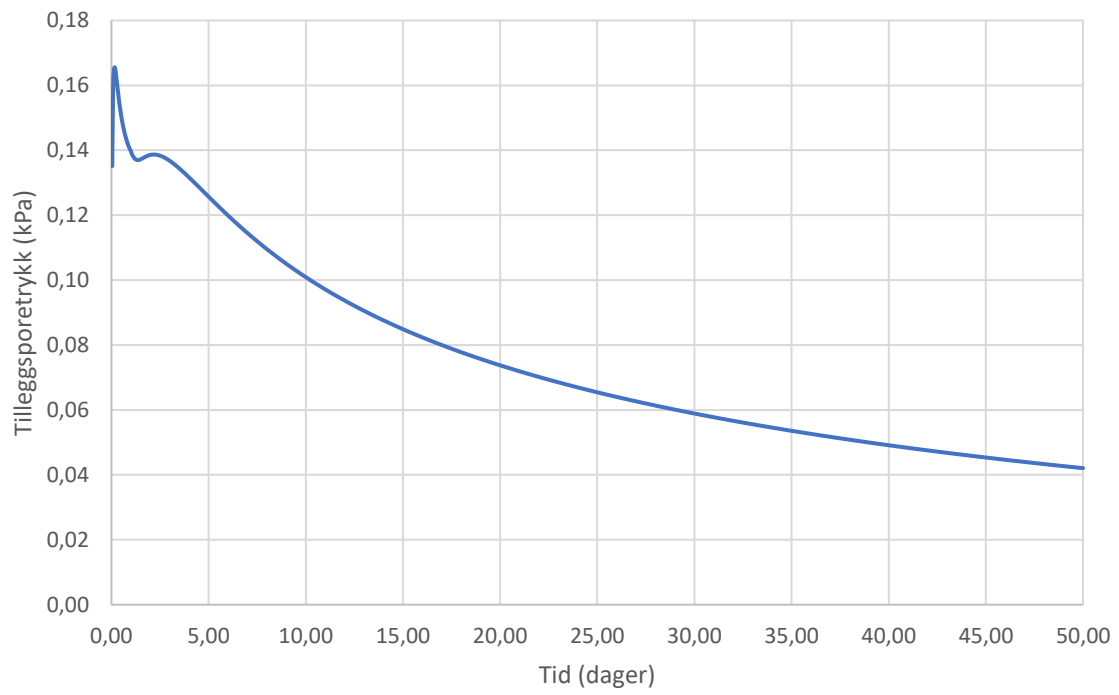
Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



Tilleggsporetrykk etter 50 døgn

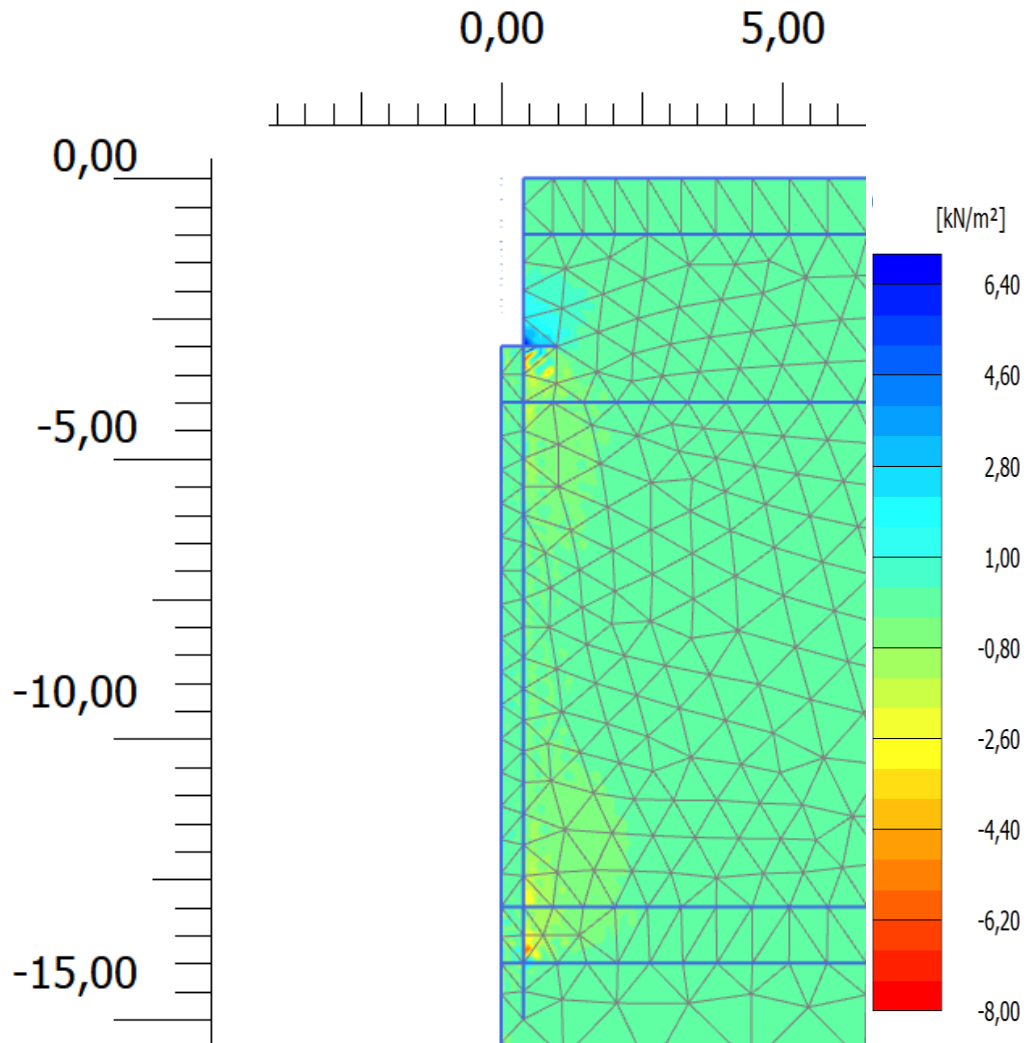


Konsolidering 0-50 dager

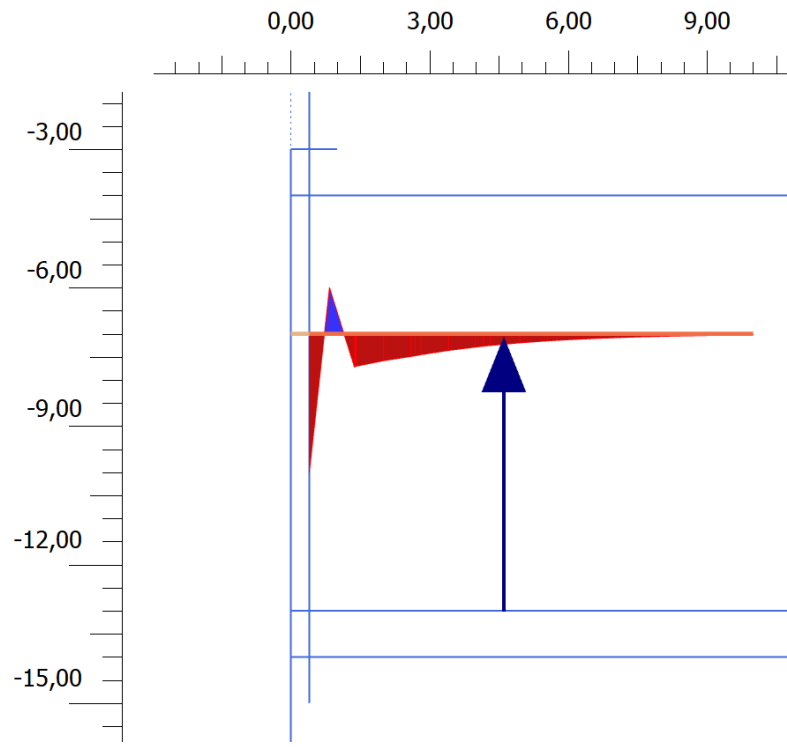


$\epsilon=1\%$, $\psi=-3^\circ$

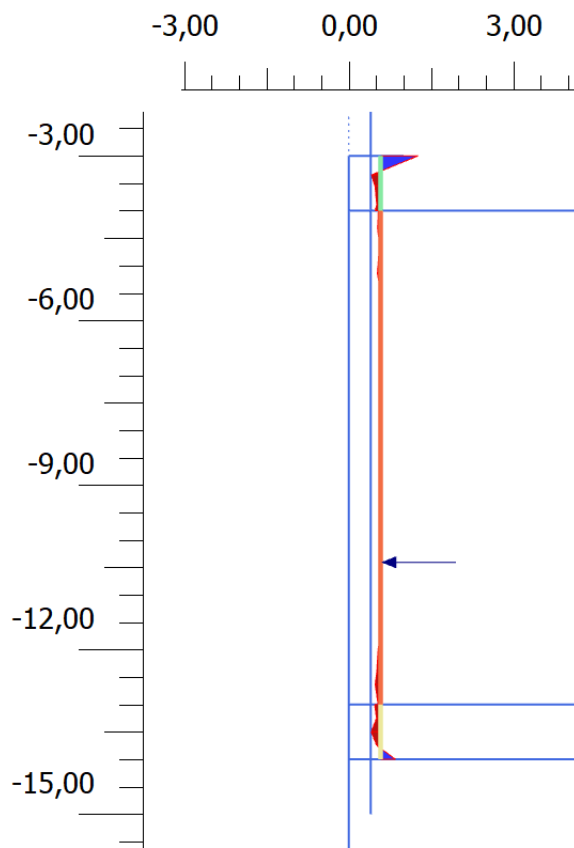
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max} = 6,7 \text{ kPa}$

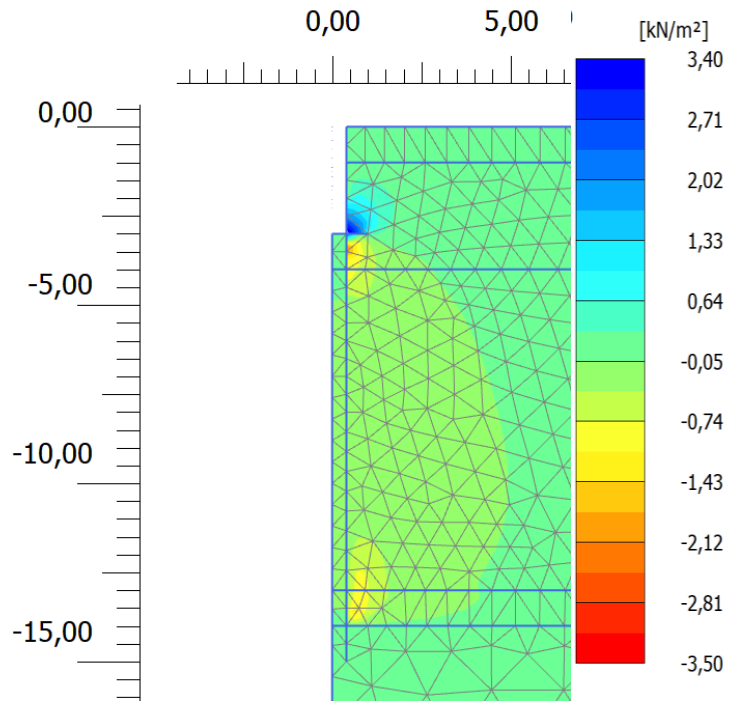


$\Delta u_{\max} = 0,6 \text{ kPa}$



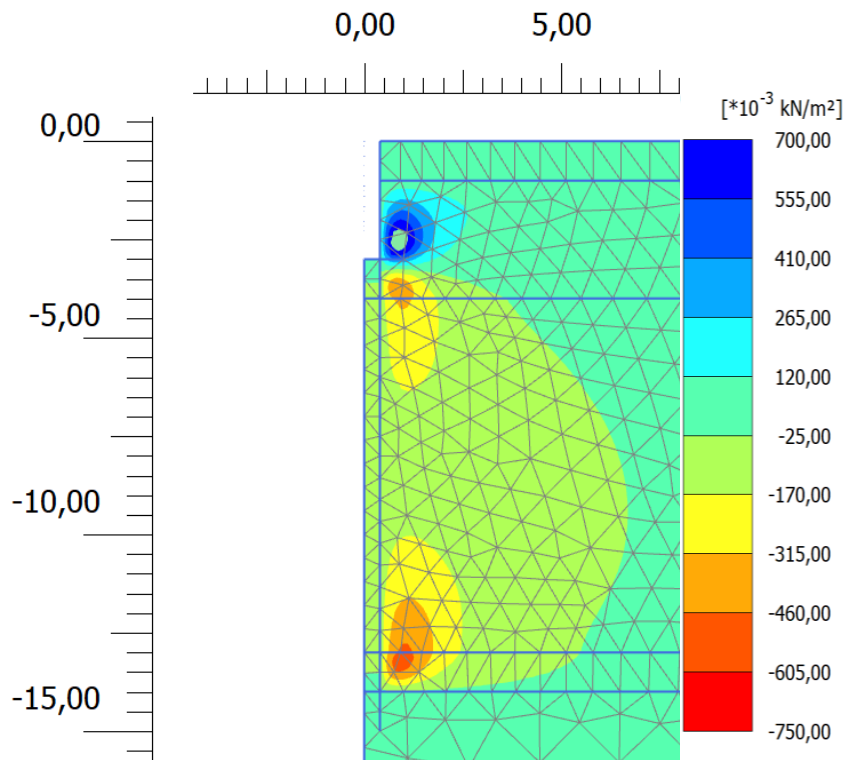
$\Delta u_{\max} = 3,4 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



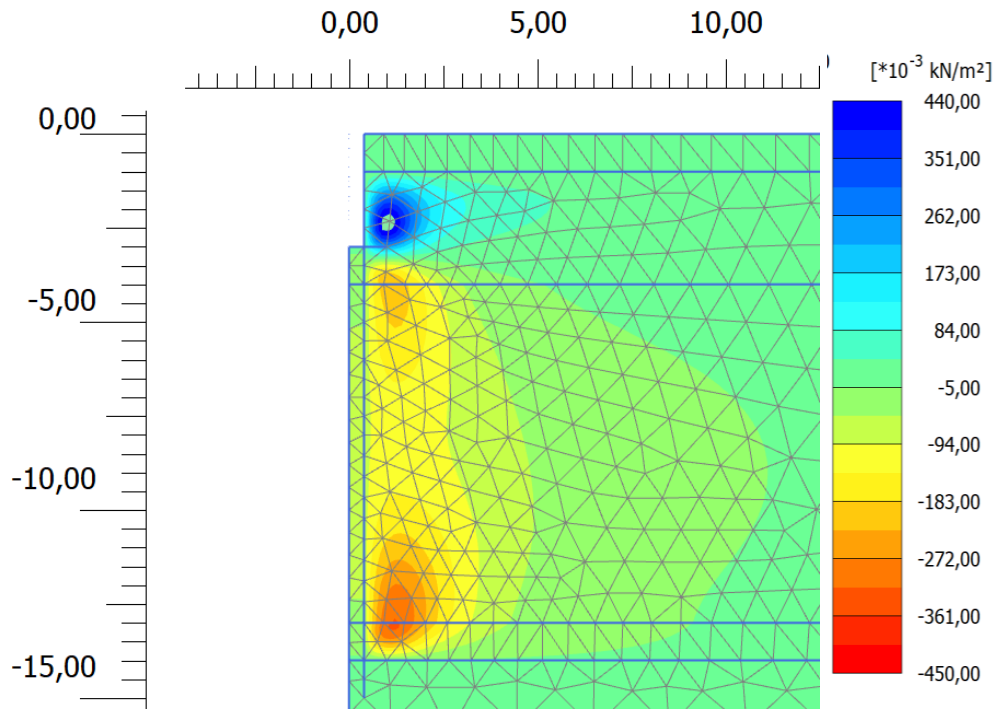
$\Delta u_{\max} = 2,1 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn



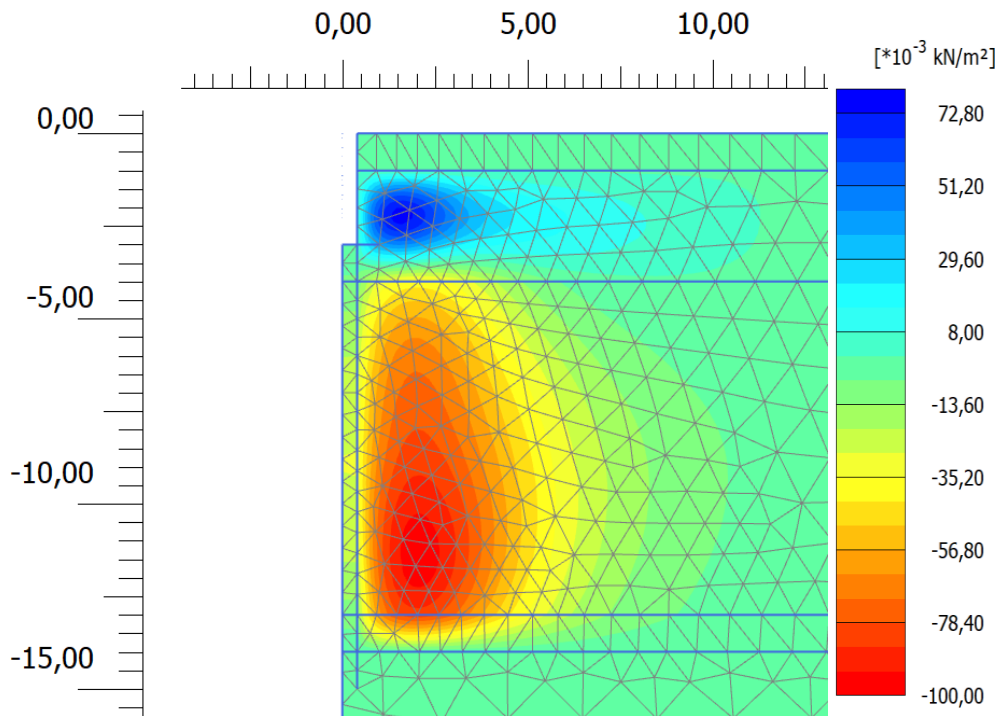
$\Delta u_{\max} = 0,5 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



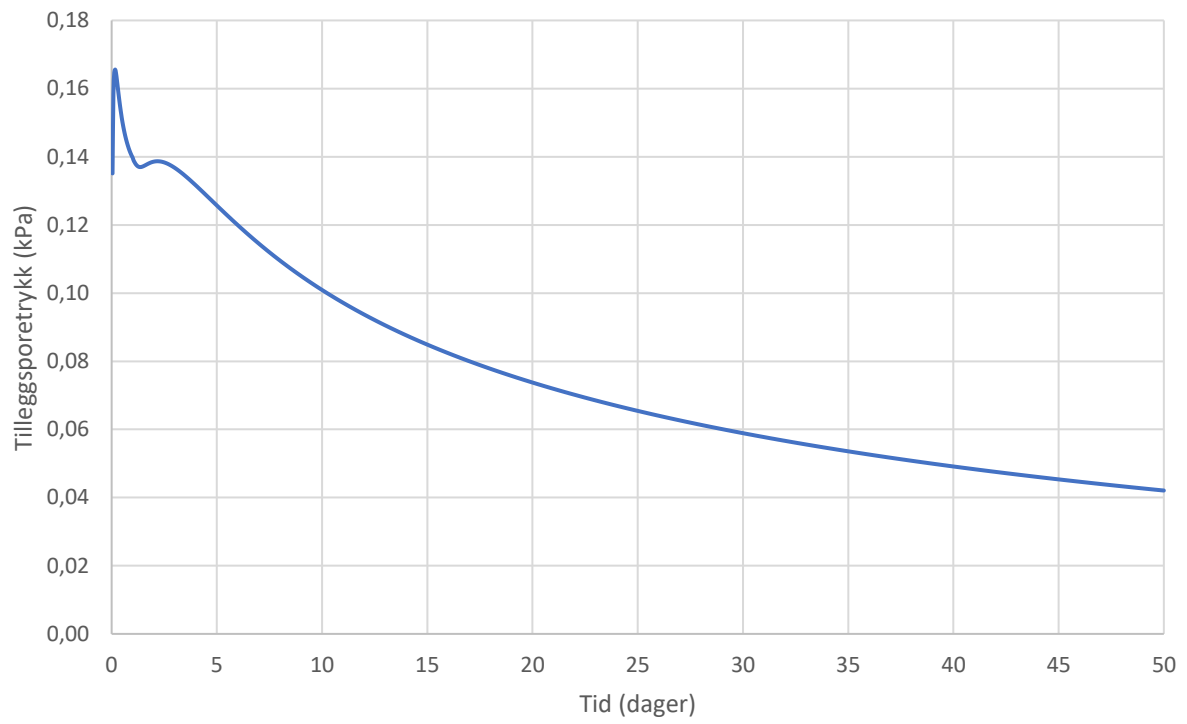
$\Delta u_{\max} = 0,3 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 50 døgn



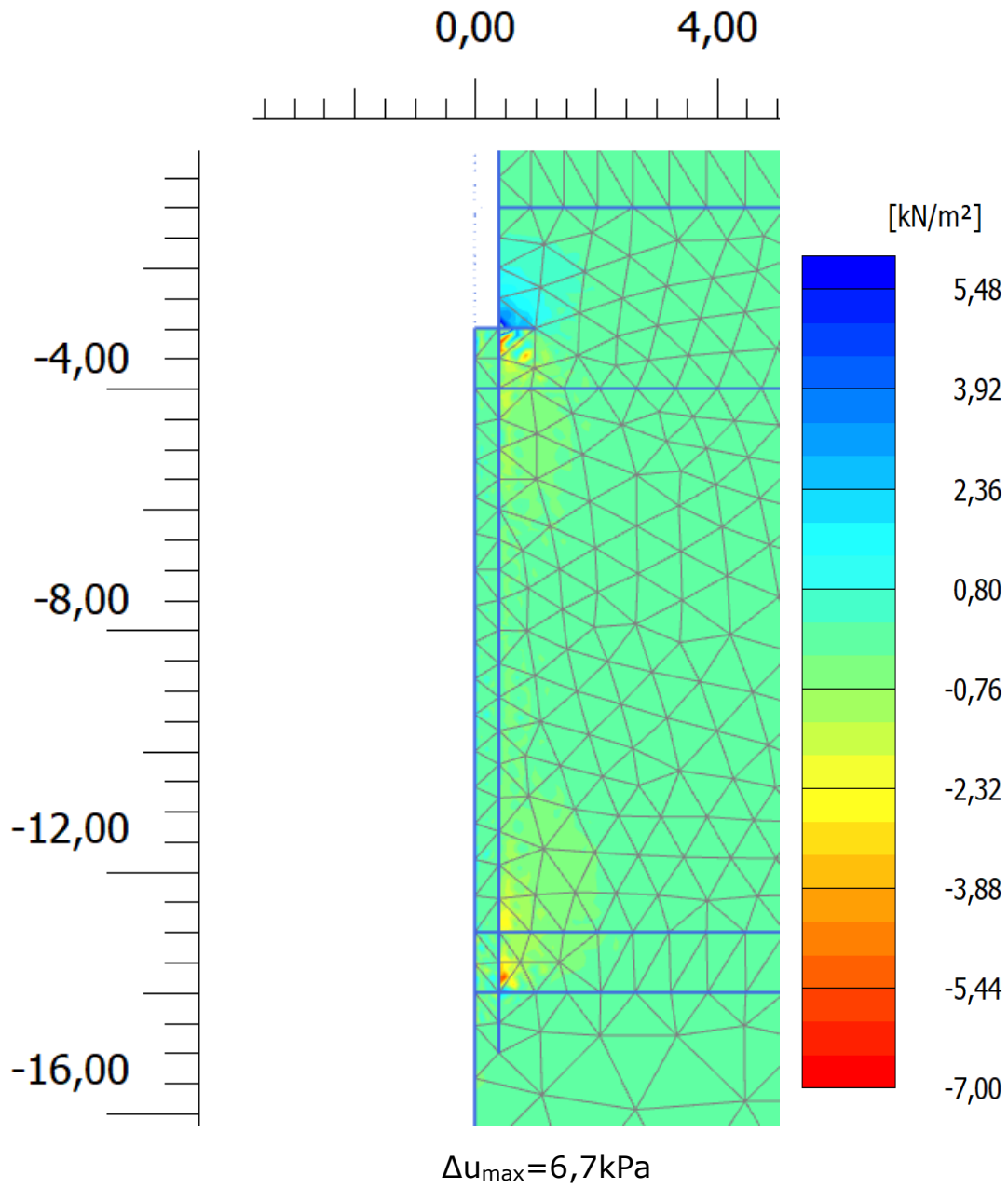
$\Delta u_{\max} = 0,1 \text{ kPa}$

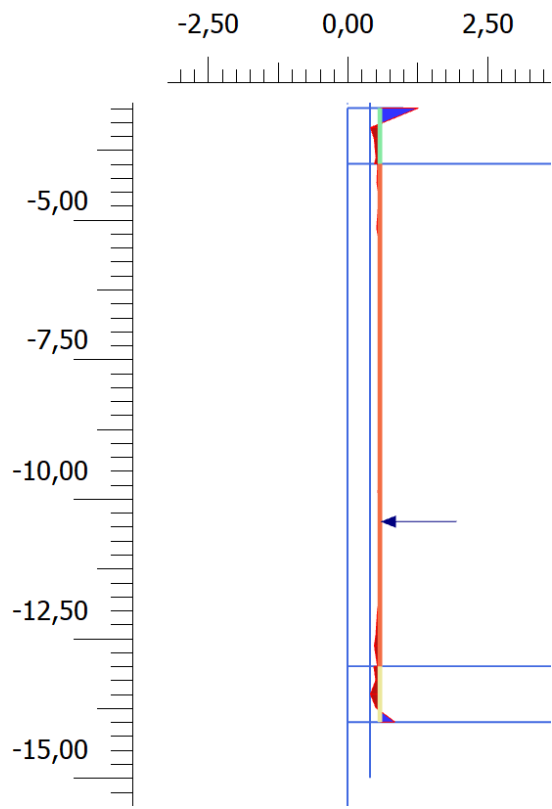
Konsolidering 0-50 dager



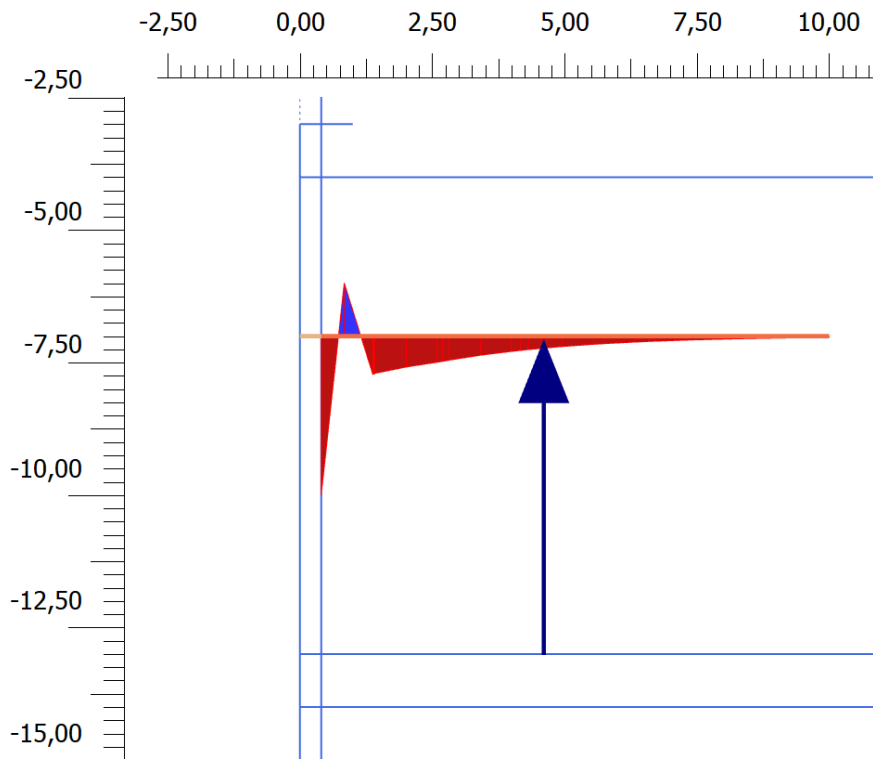
$\epsilon=1\%$, $\psi=-5^\circ$

Momentant tilleggsporetrykk



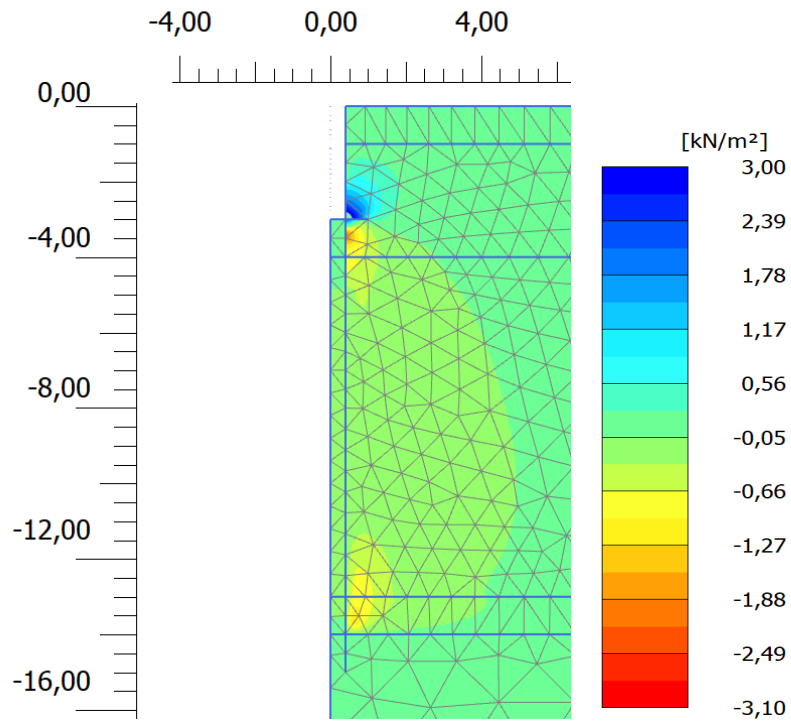


$\Delta u_{\max} = 3,4 \text{ kPa}$



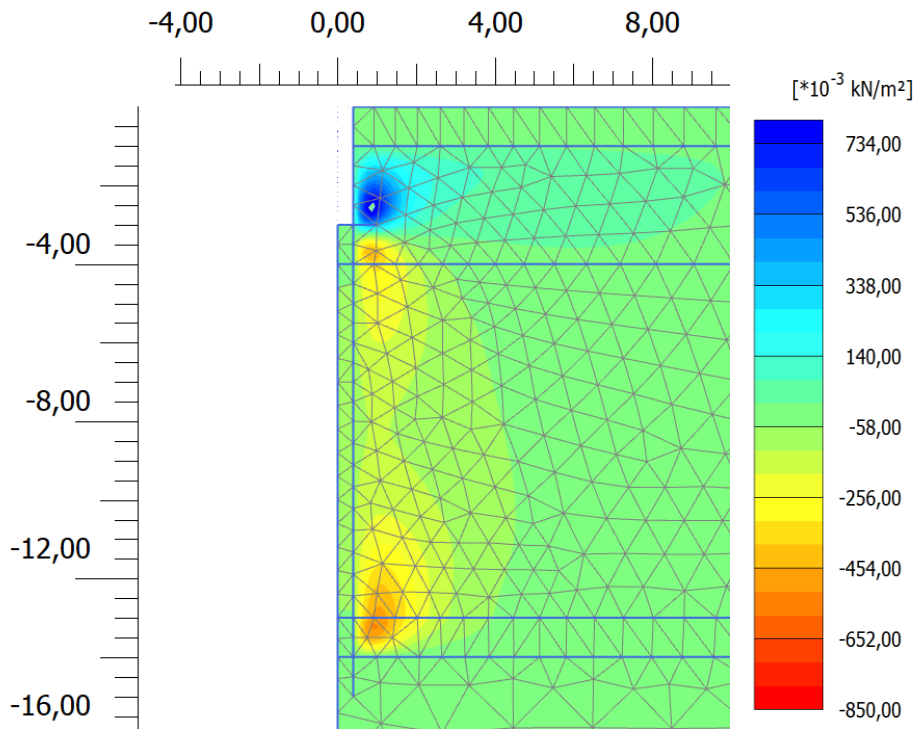
$\Delta u_{\max} = 0,6 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



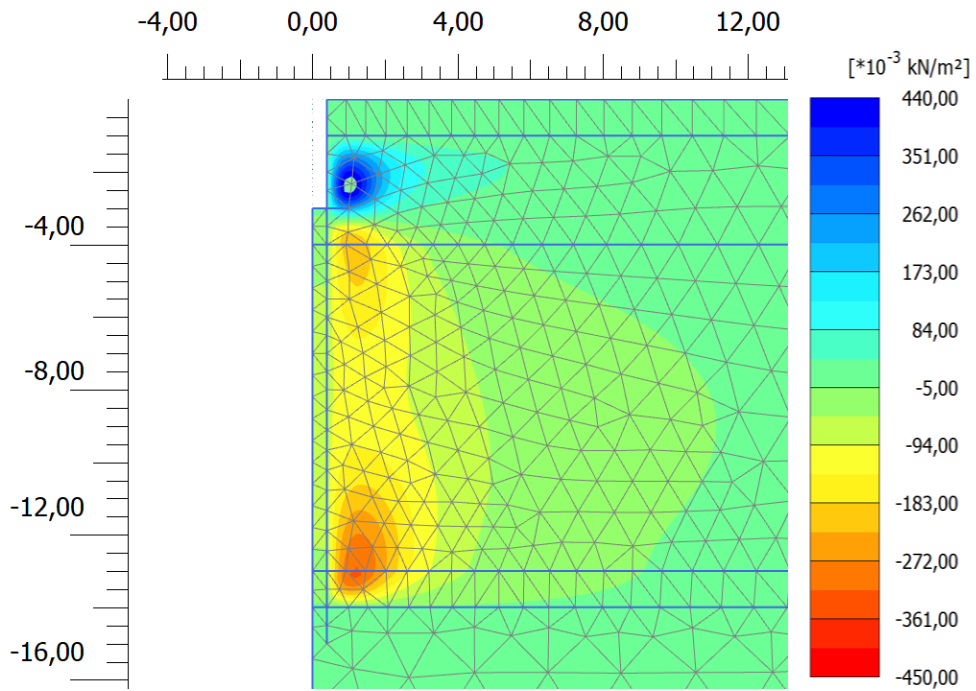
$\Delta u_{\max} = 2,1 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn



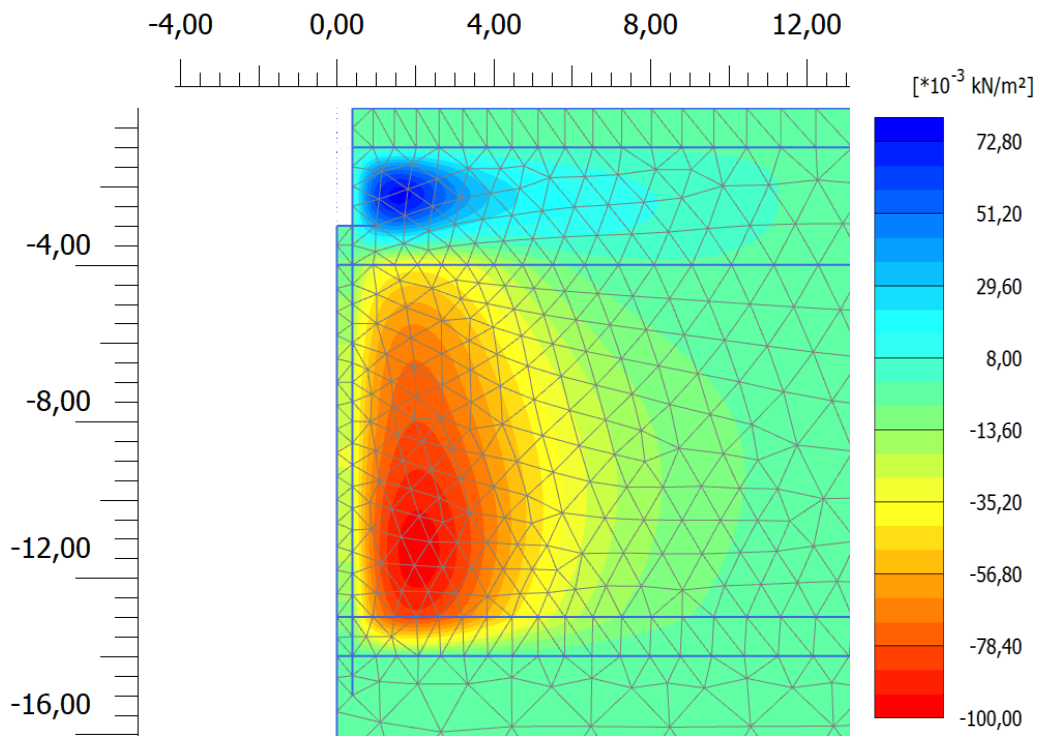
$\Delta u_{\max} = 0,5 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



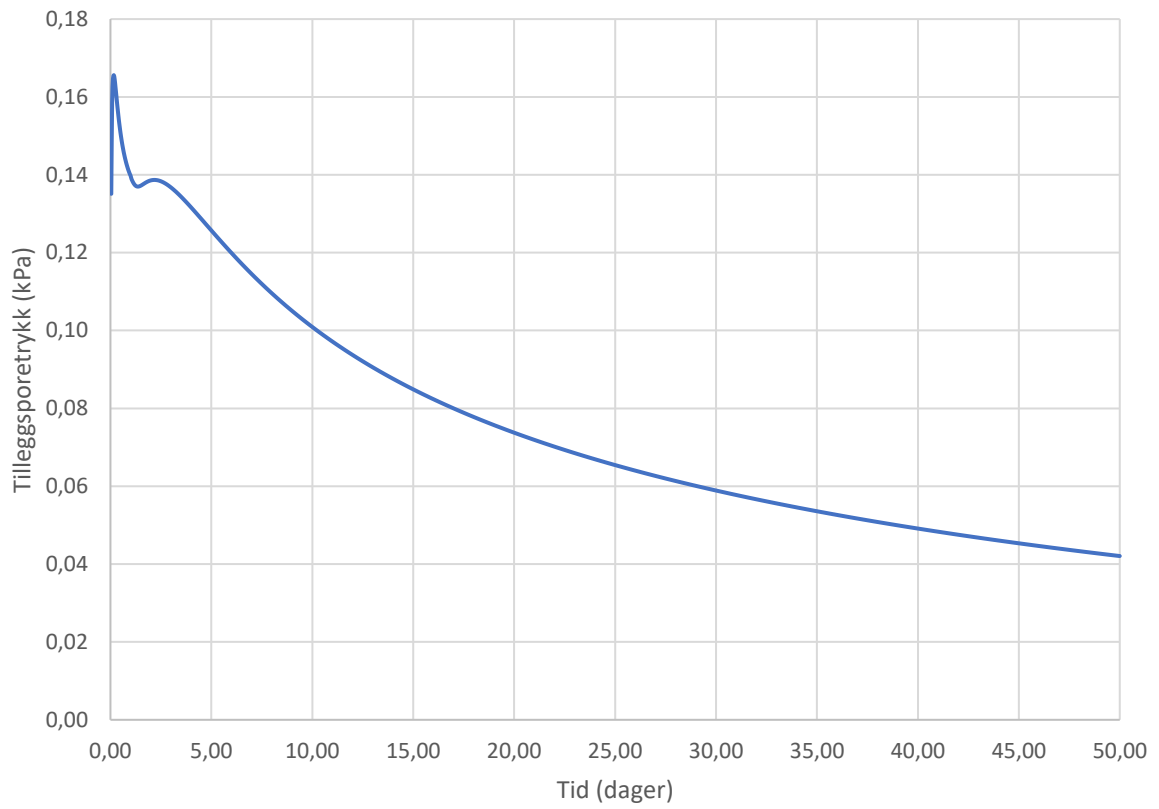
$\Delta u_{\max} = 0,3 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 50 døgn



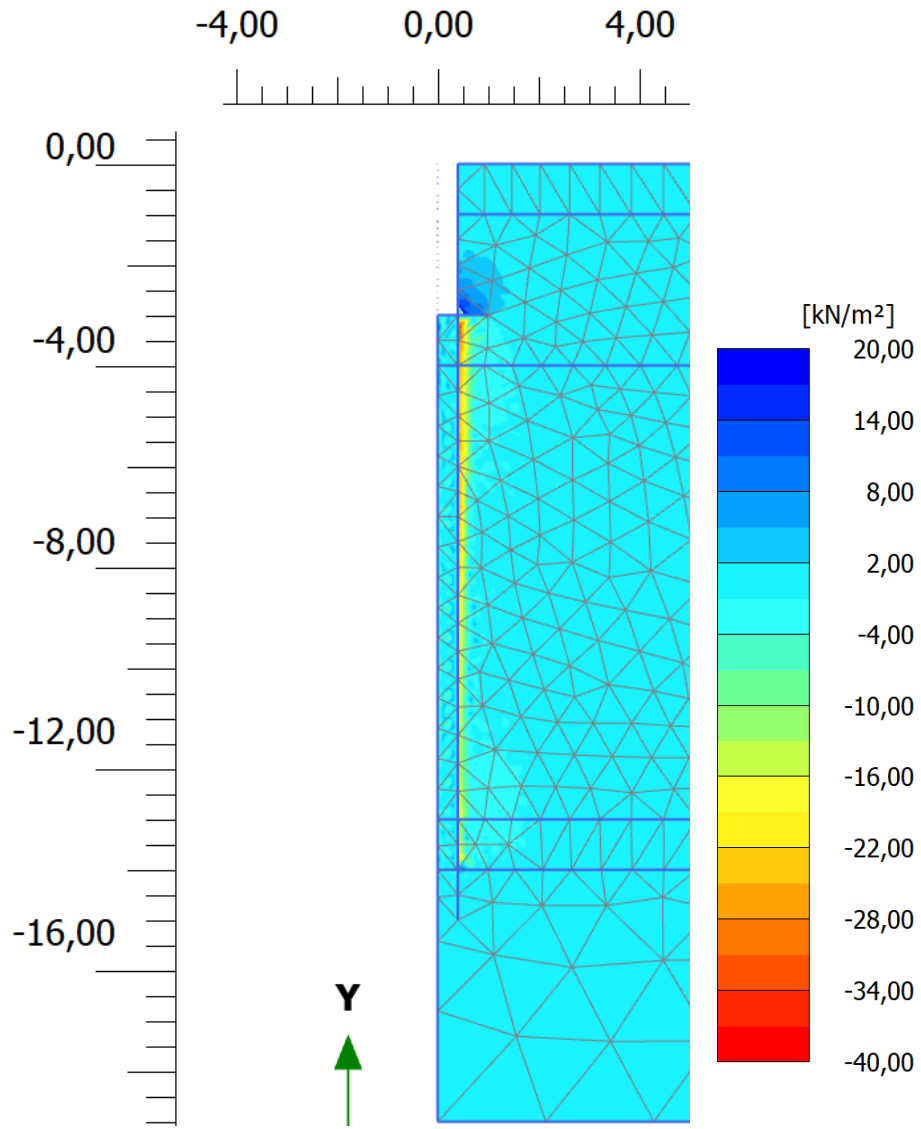
$\Delta u_{\max} = 0,1 \text{ kPa}$

Konsolidering 0-50 dager

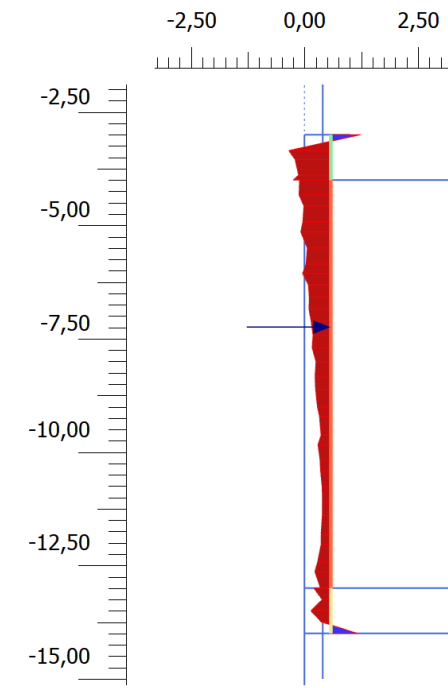


$\epsilon=3\%, \psi=0^\circ$

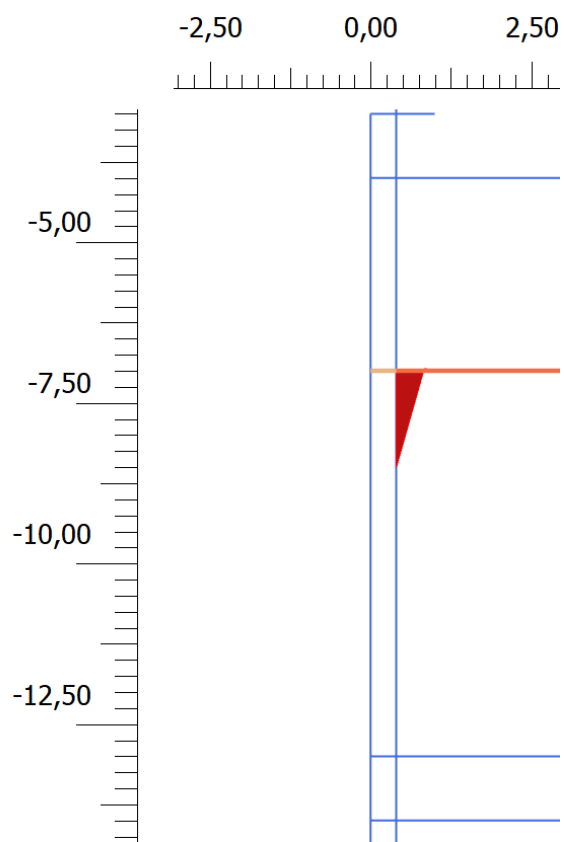
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max}=38,9\text{kpa}$

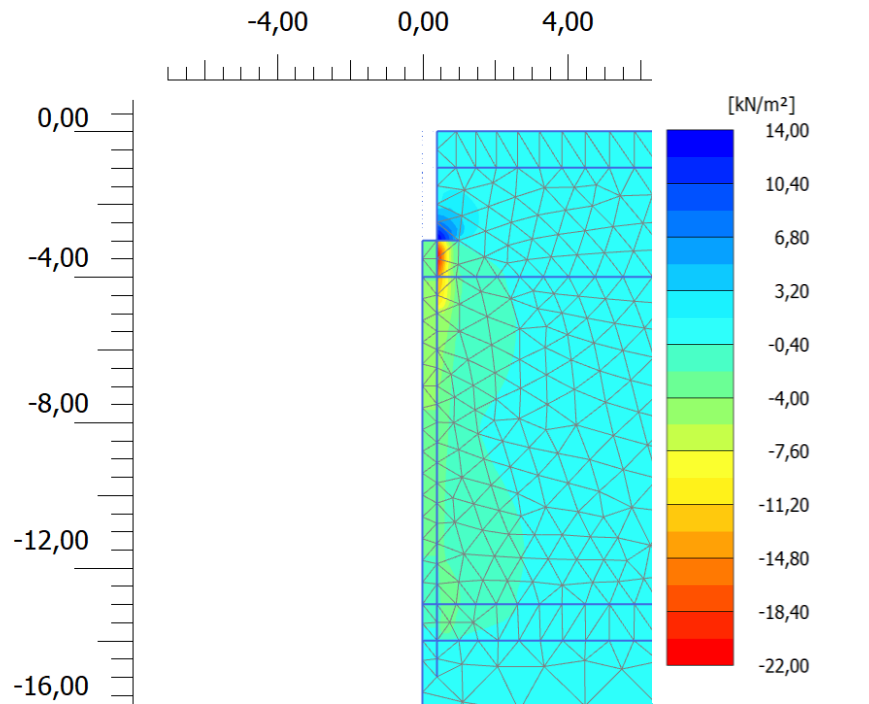


$\Delta u_{\max} = 18,5 \text{ kPa}$



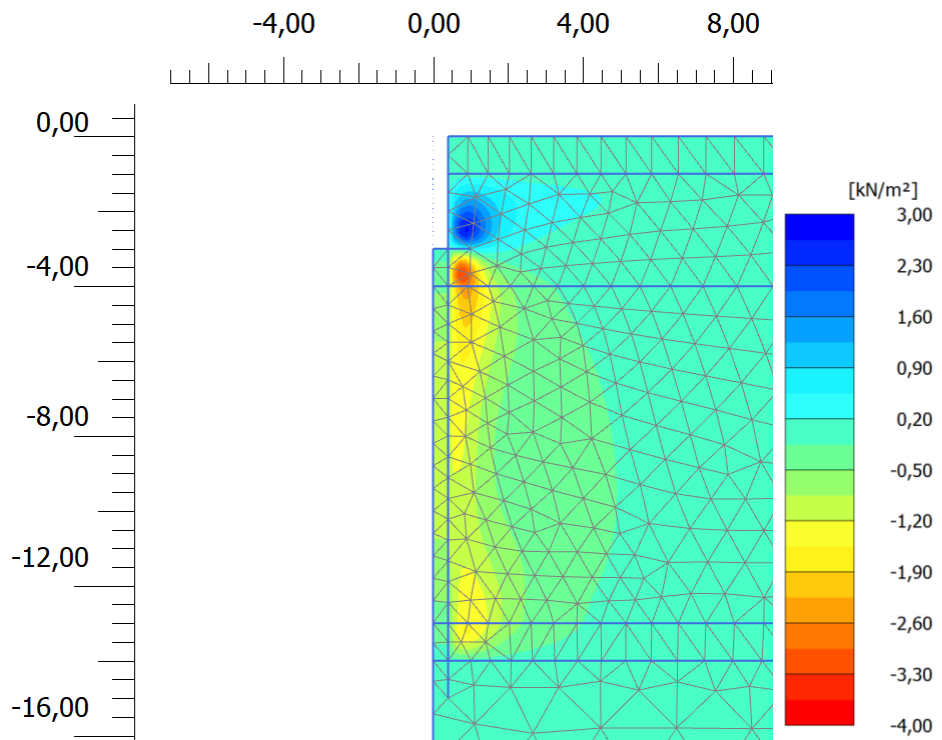
$\Delta u_{\max} = 30,2 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



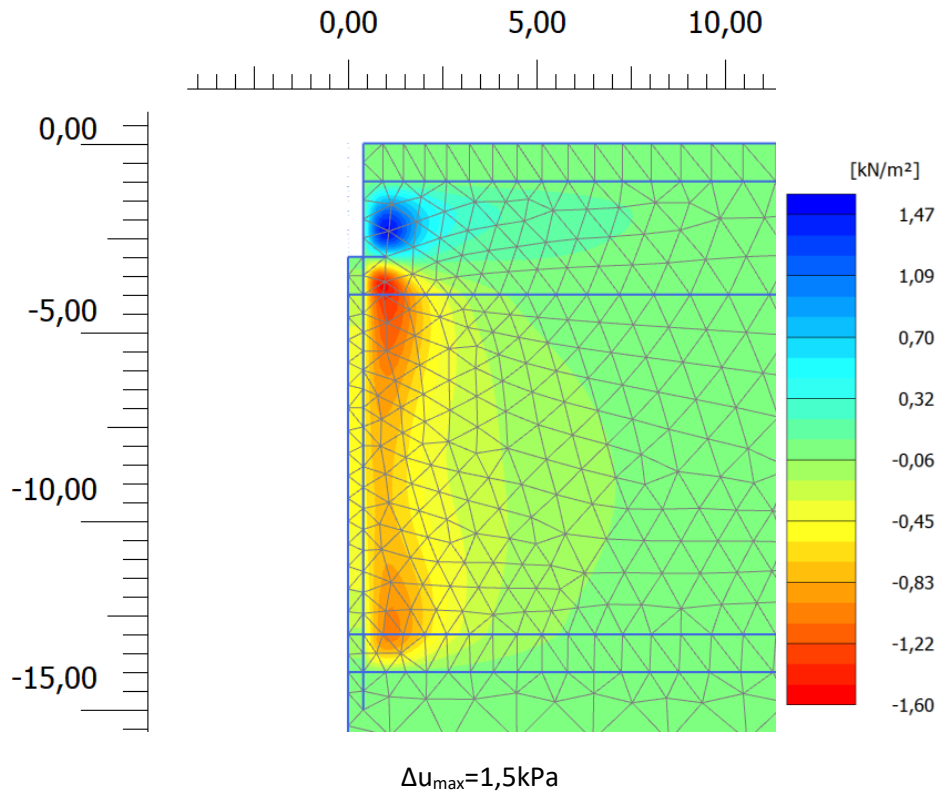
$\Delta u_{\max} = 21,7 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn

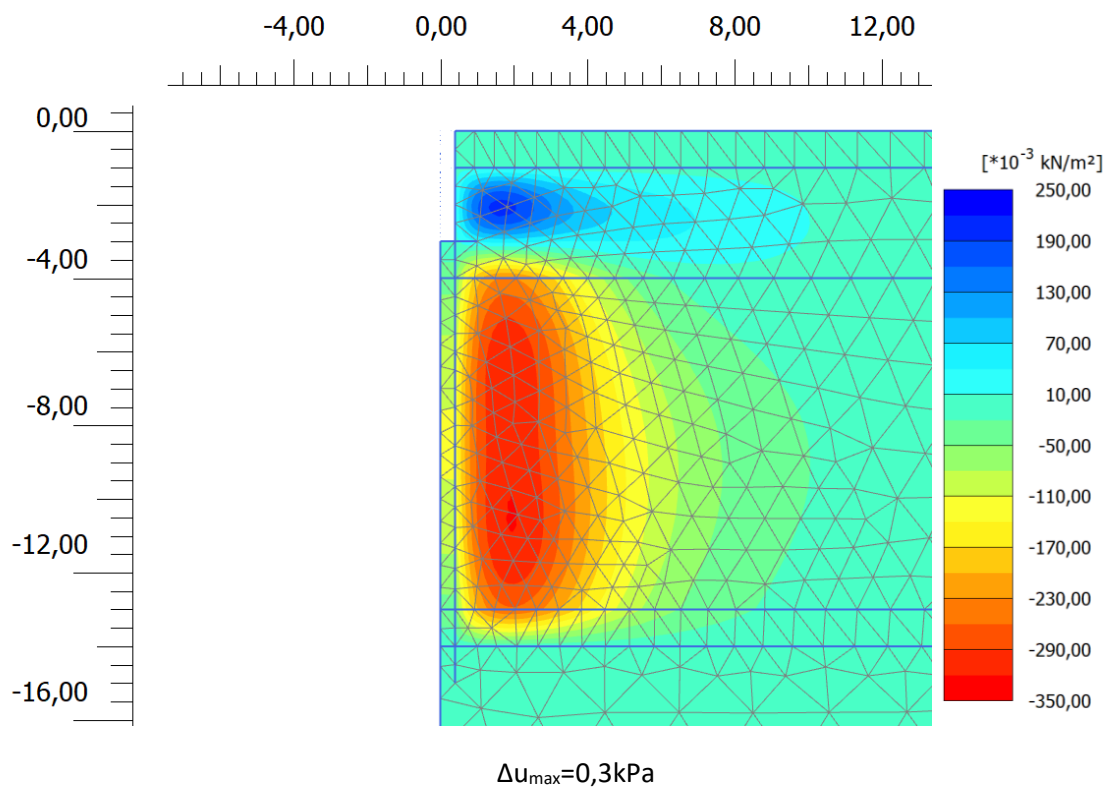


$\Delta u_{\max} = 3,3 \text{ kPa}$

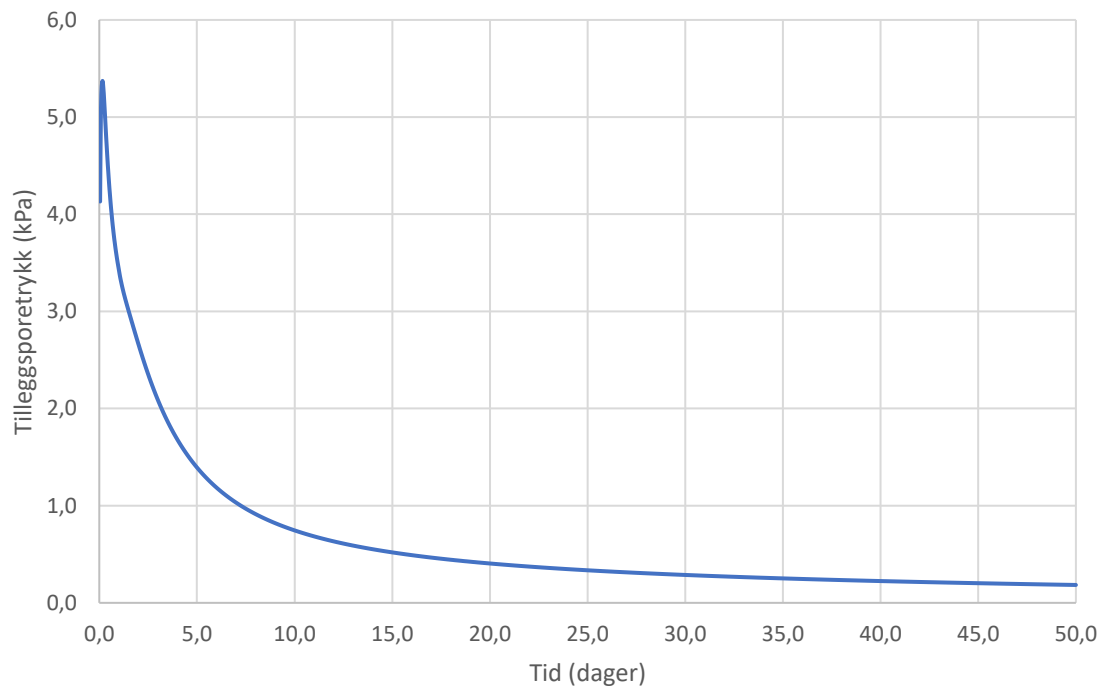
Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



Tilleggsporetrykk etter 50 døgn

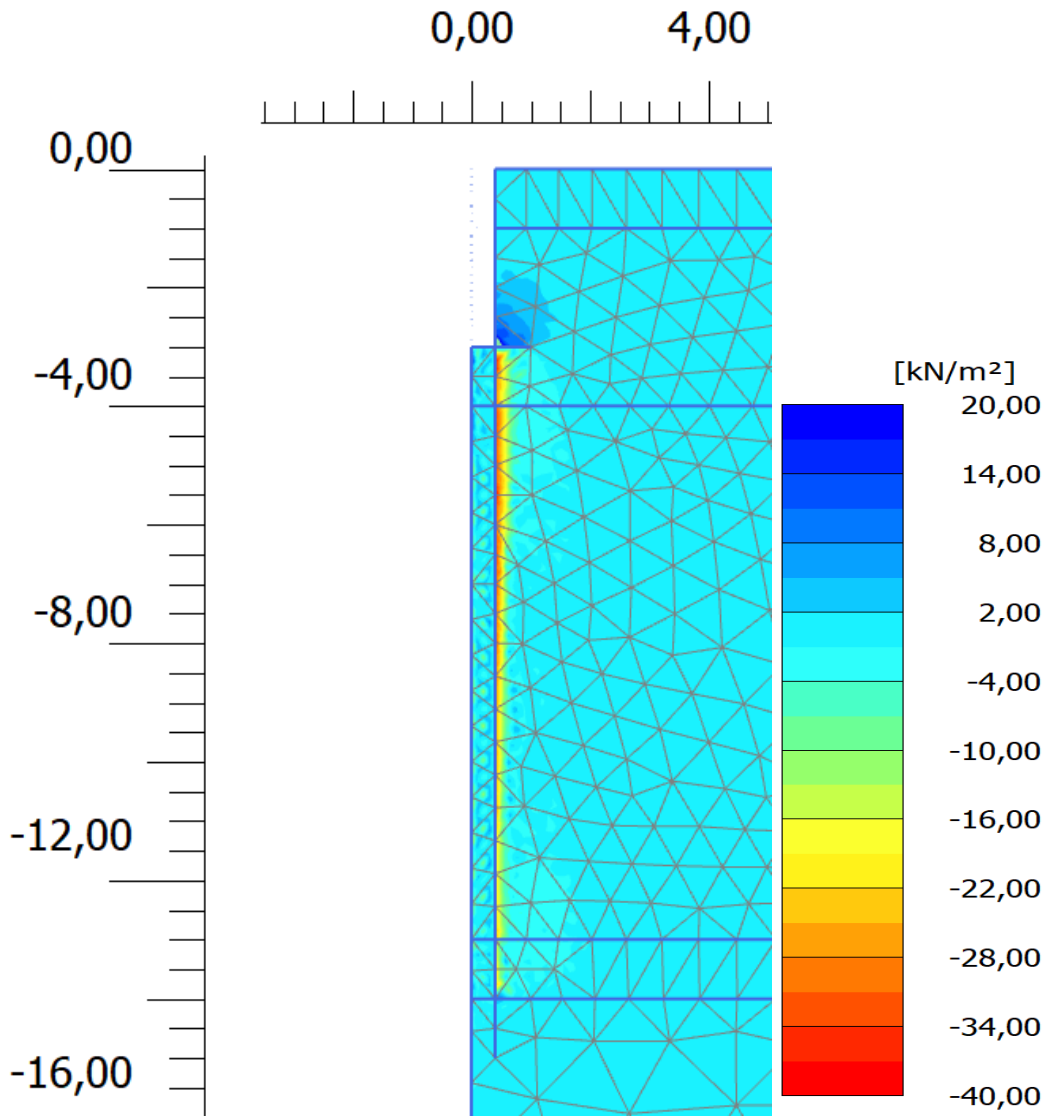


Konsolidering 0-50 dager

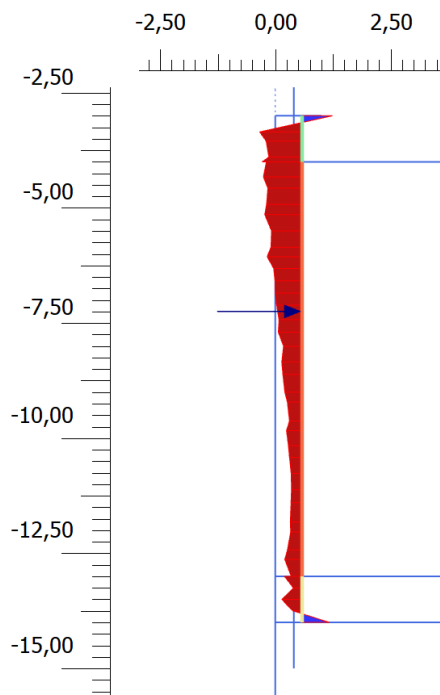


$\epsilon=3\%$, $\psi=-3^\circ$

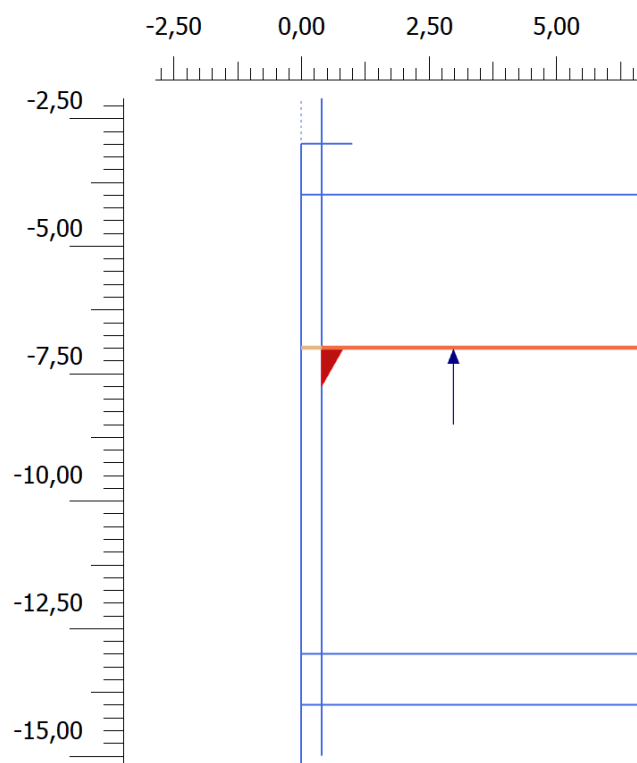
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max}=41,2\text{kPa}$

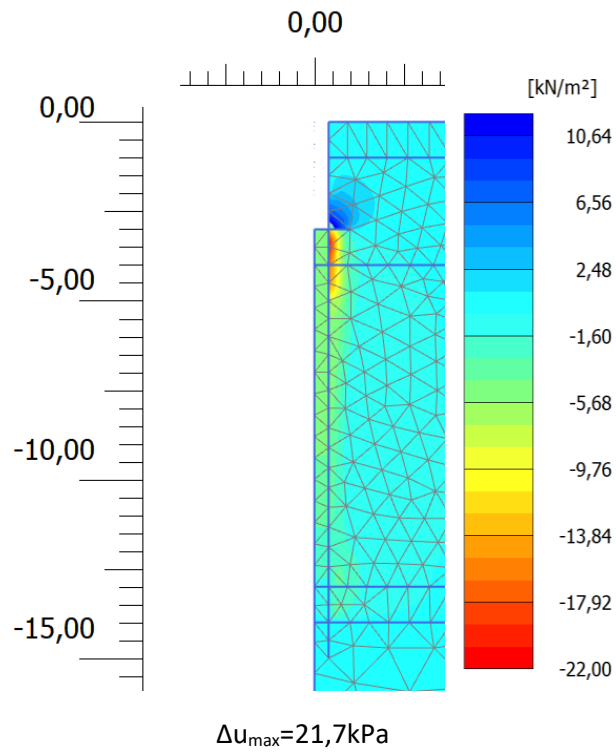


$\Delta u_{\max} = 18,4 \text{ kPa}$

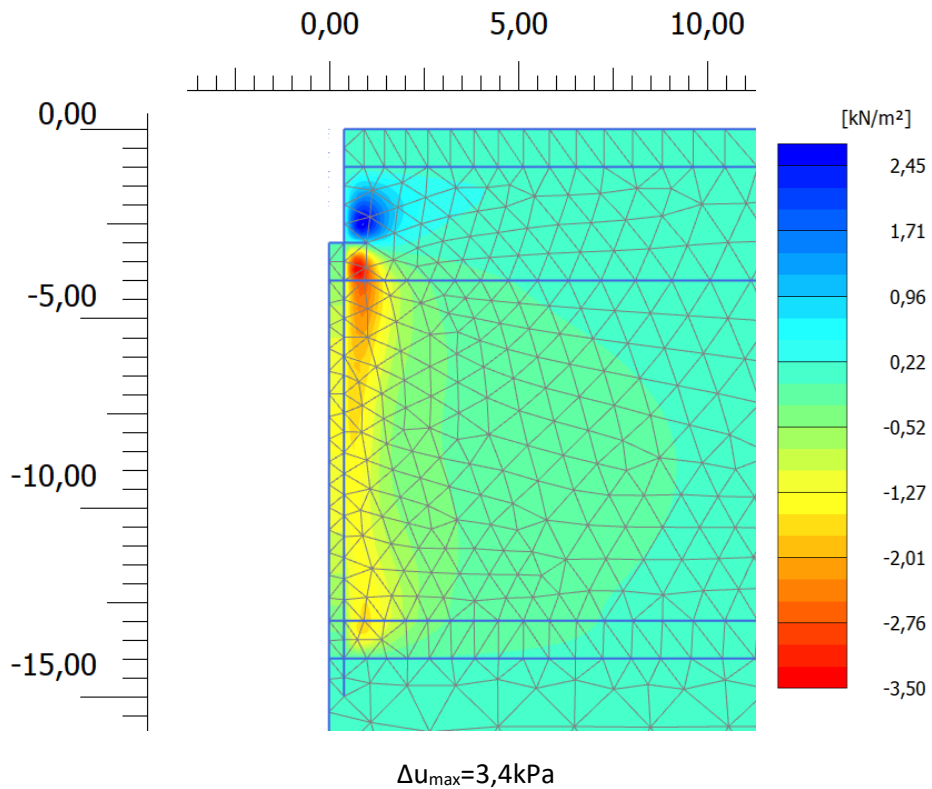


$\Delta u_{\max} = 37,6 \text{ kPa}$

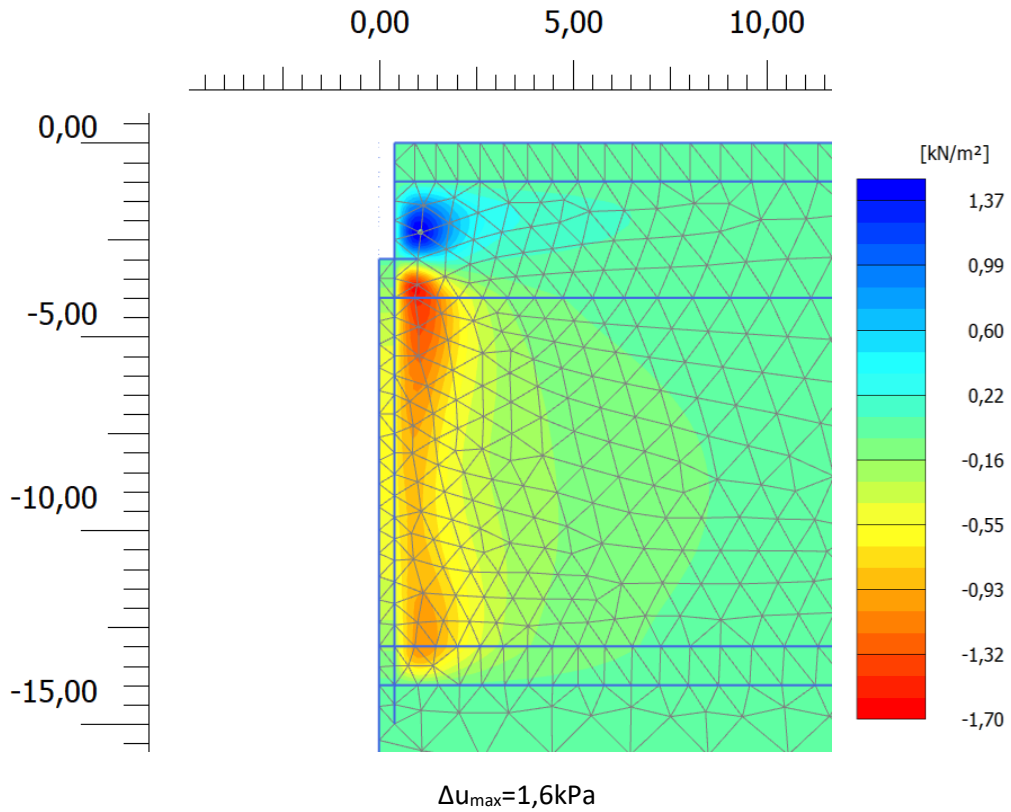
Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



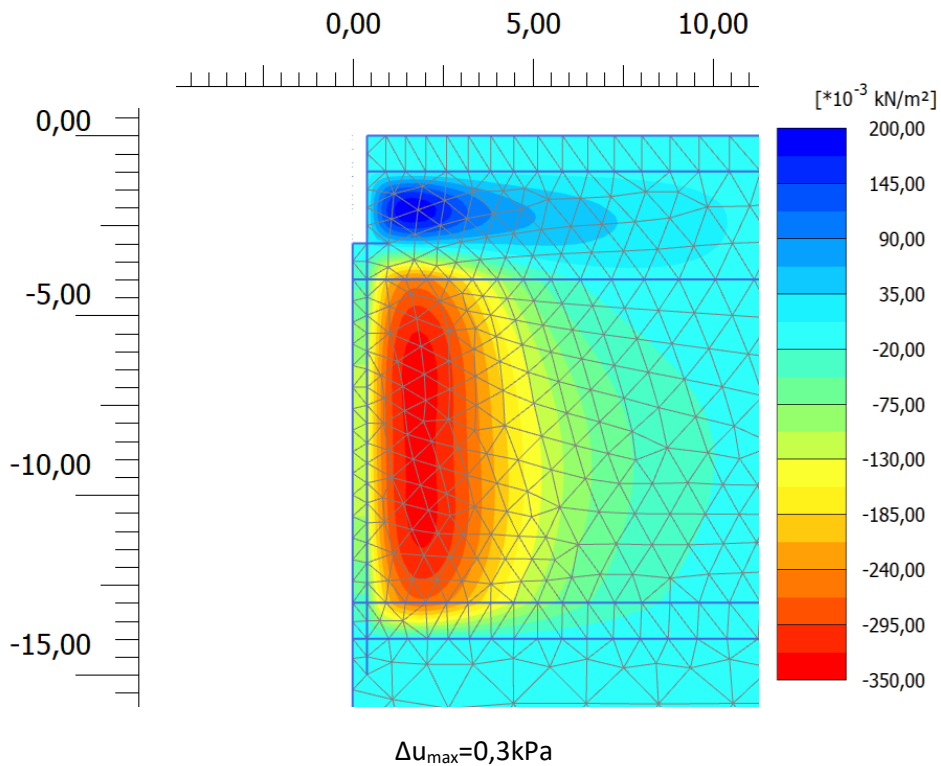
Tilleggsporetrykk etter 5 døgn



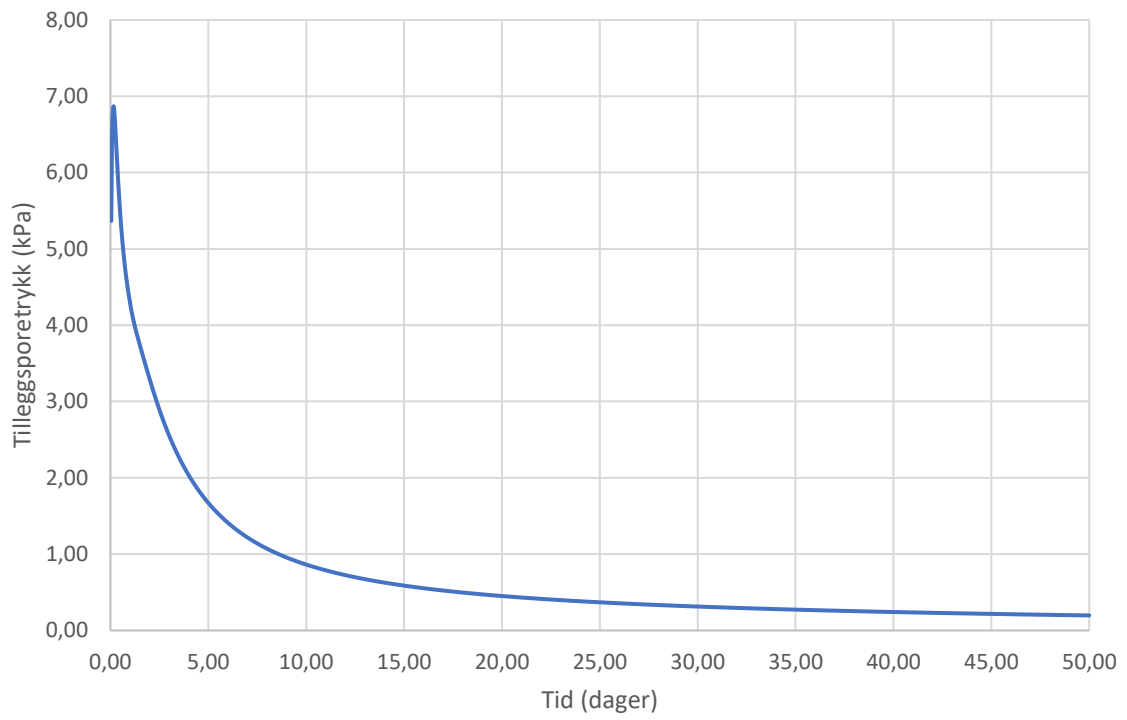
Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



Tilleggsporetrykk etter 50 døgn

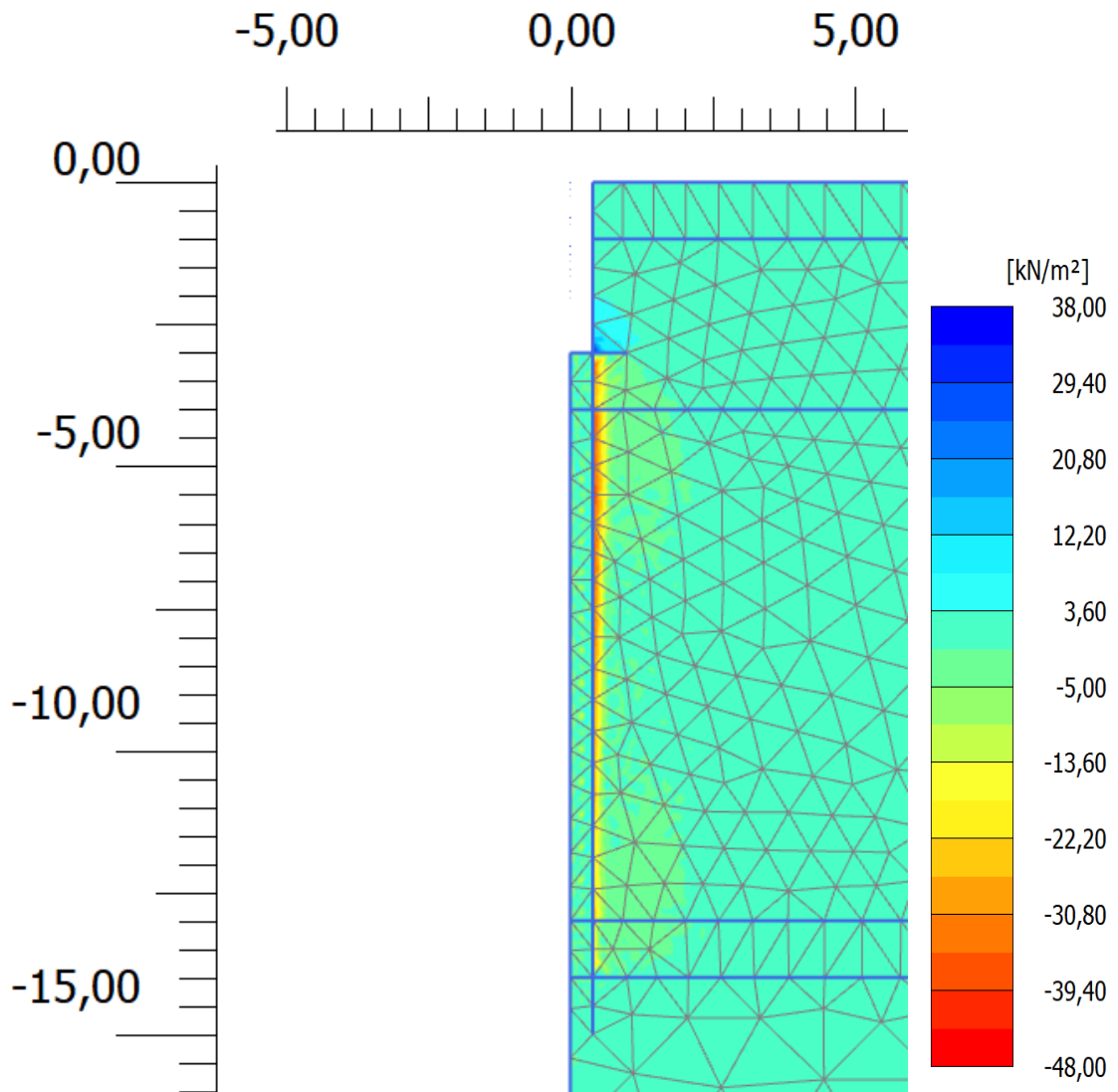


Konsolidering 0-50 dager

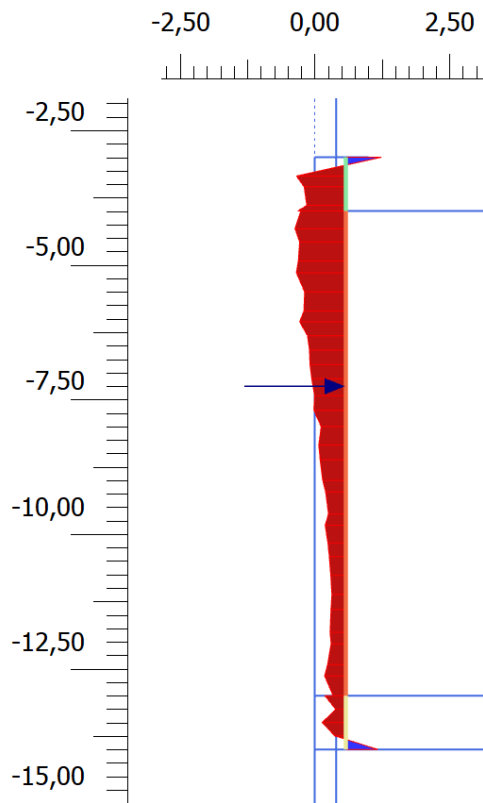


$\epsilon=3\%$, $\psi=-5^\circ$

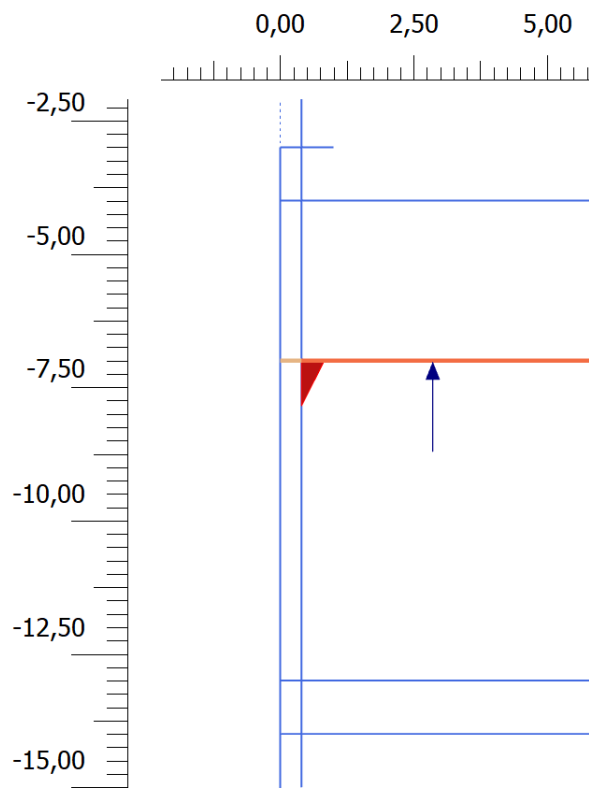
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max}=47,0\text{kPa}$

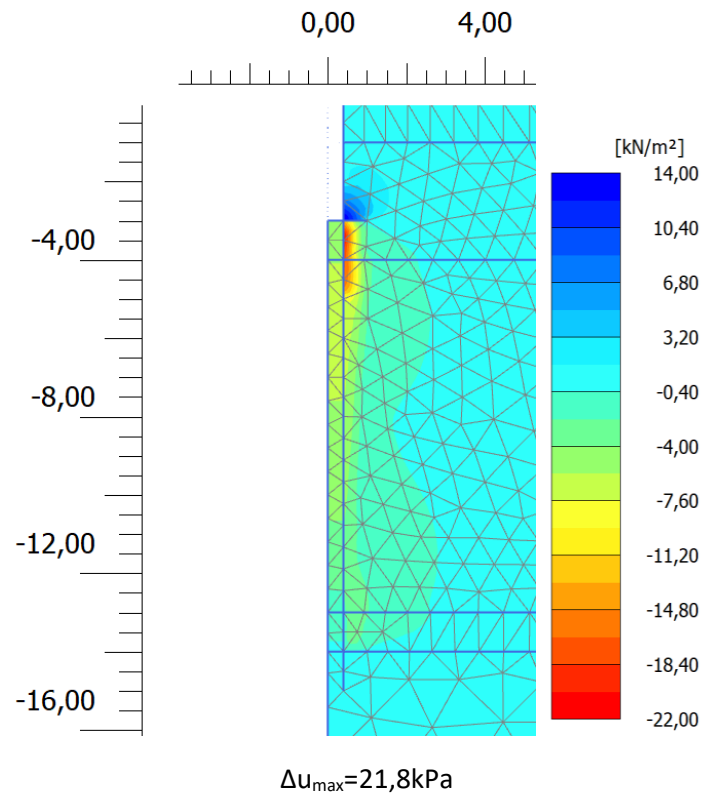


$\Delta u_{\max} = 18,9 \text{ kPa}$

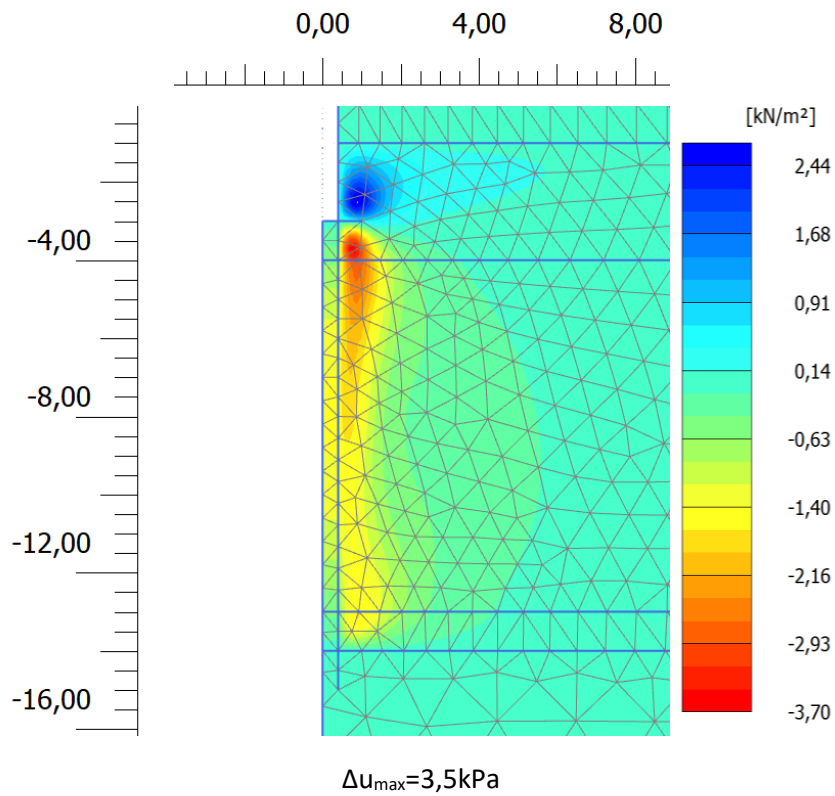


$\Delta u_{\max} = 42,8 \text{ kPa}$

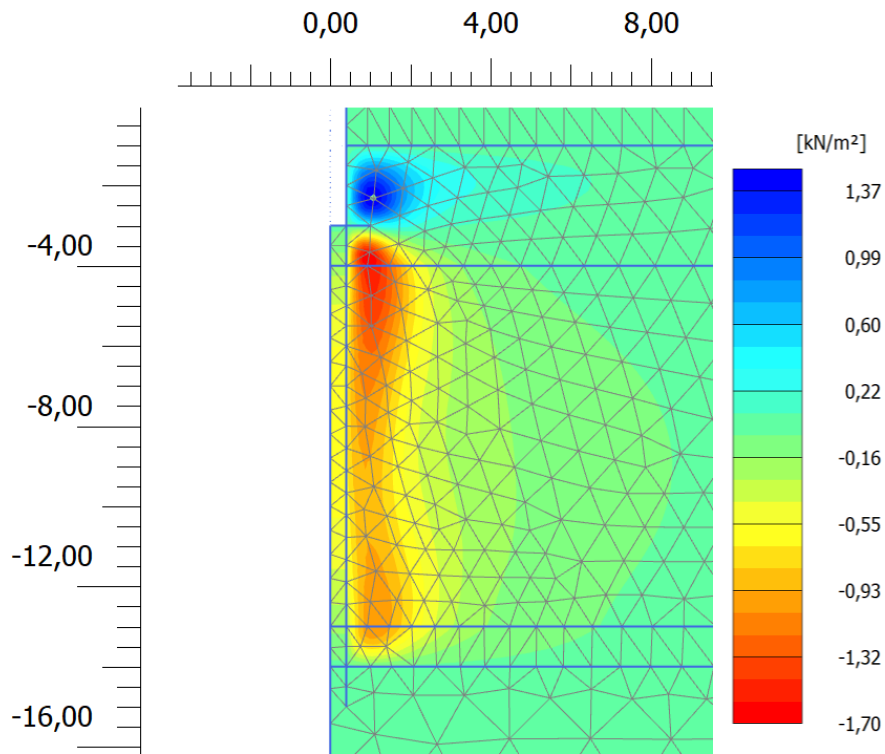
Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



Tilleggsporetrykk etter 5 døgn

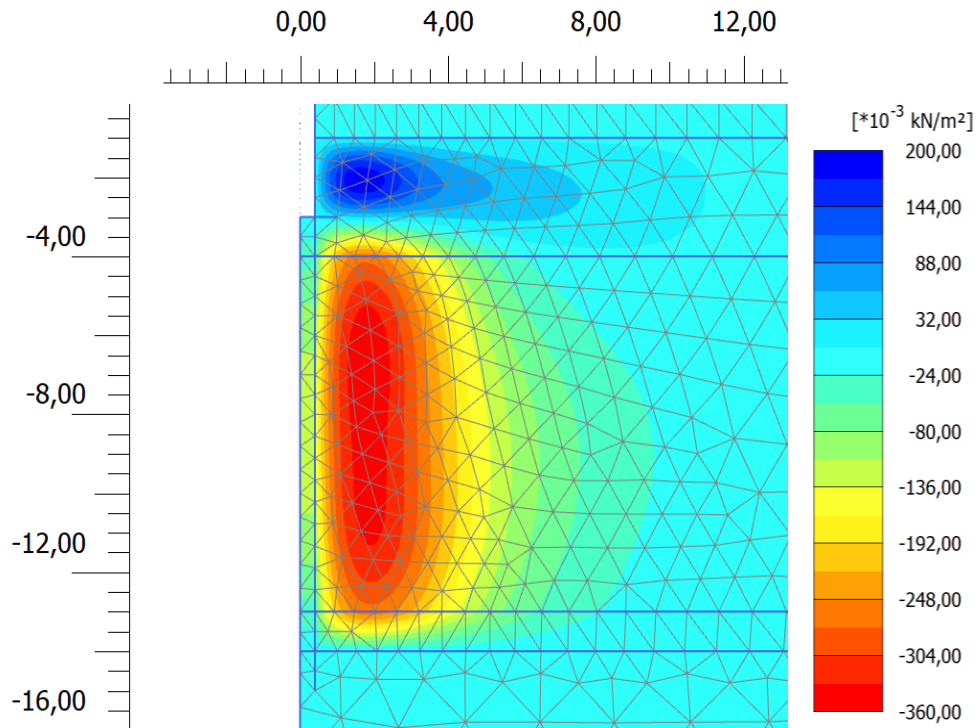


Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



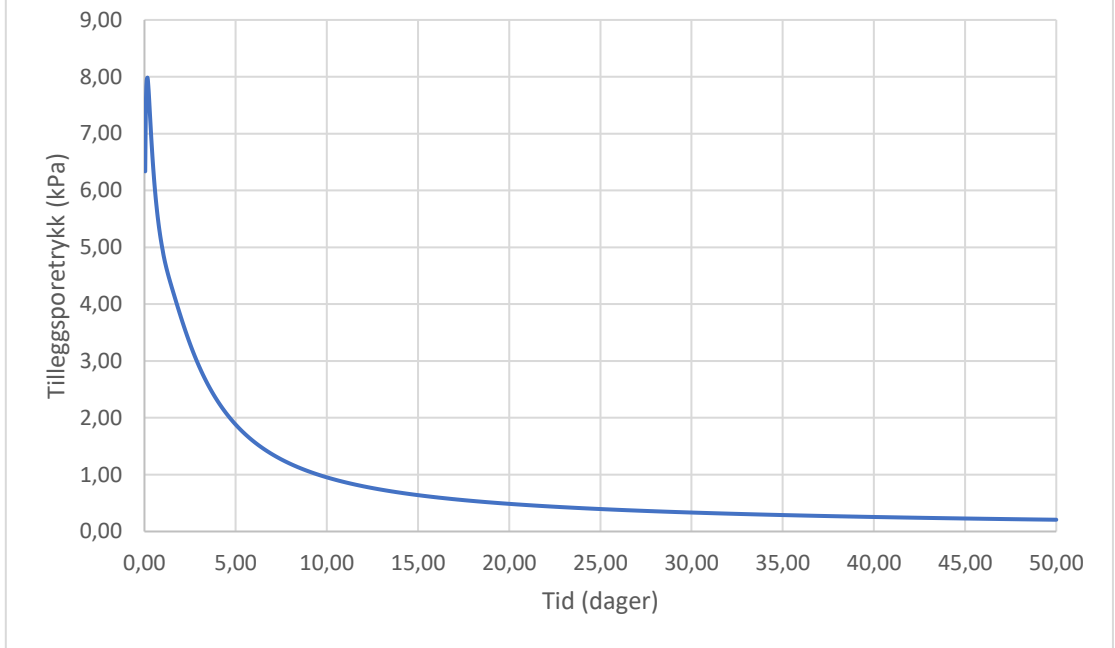
$\Delta u_{\max} = 1,7 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 50 døgn



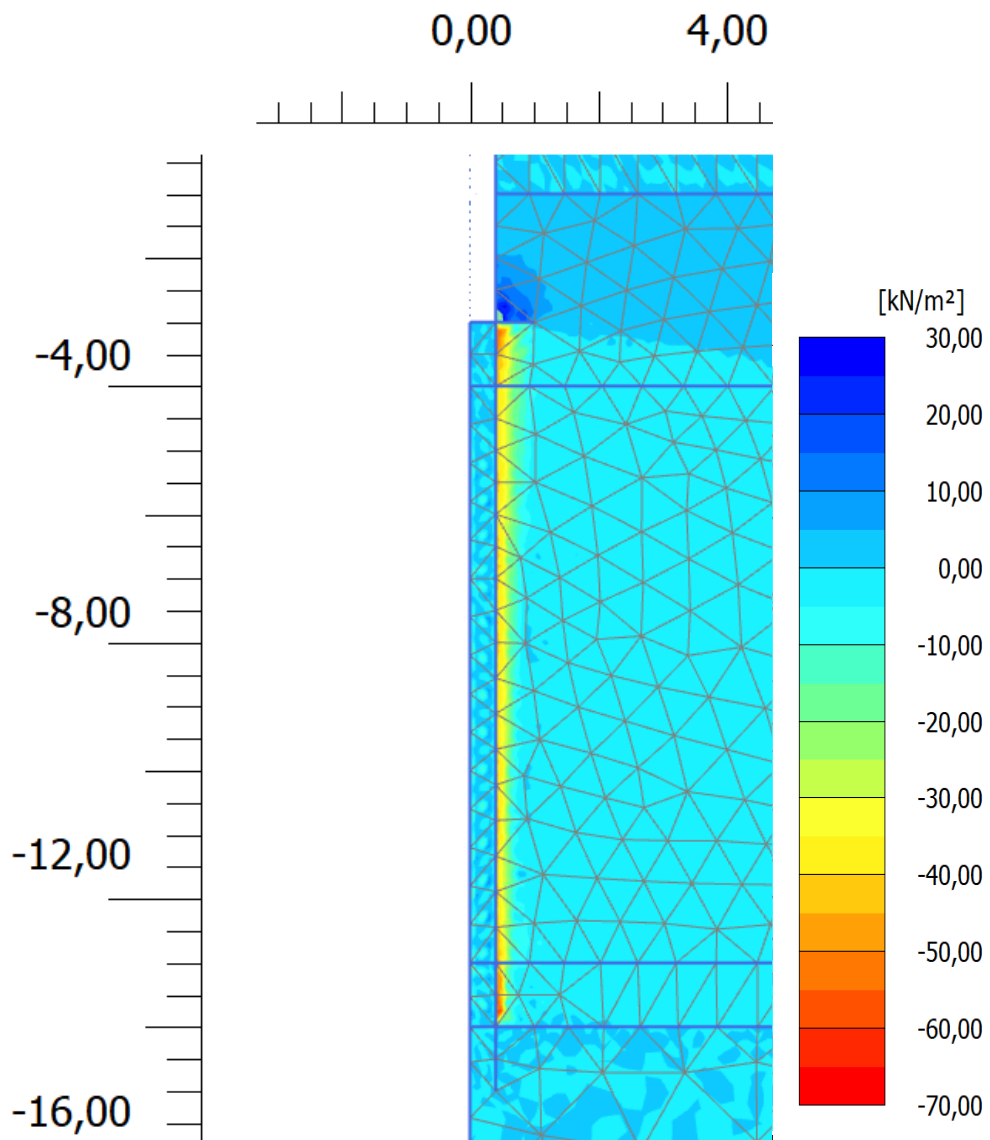
$\Delta u_{\max} = 0,4 \text{ kPa}$

Konsolidering 0-50 dager

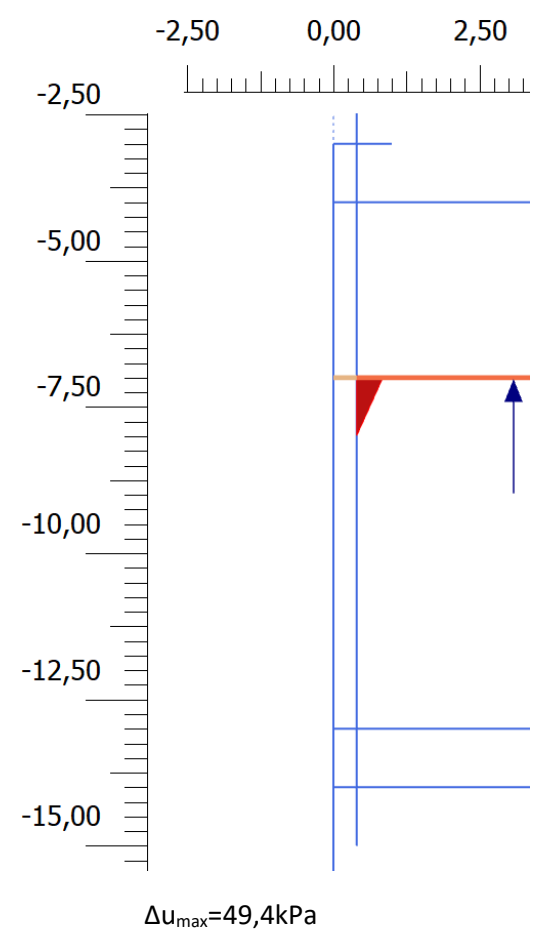
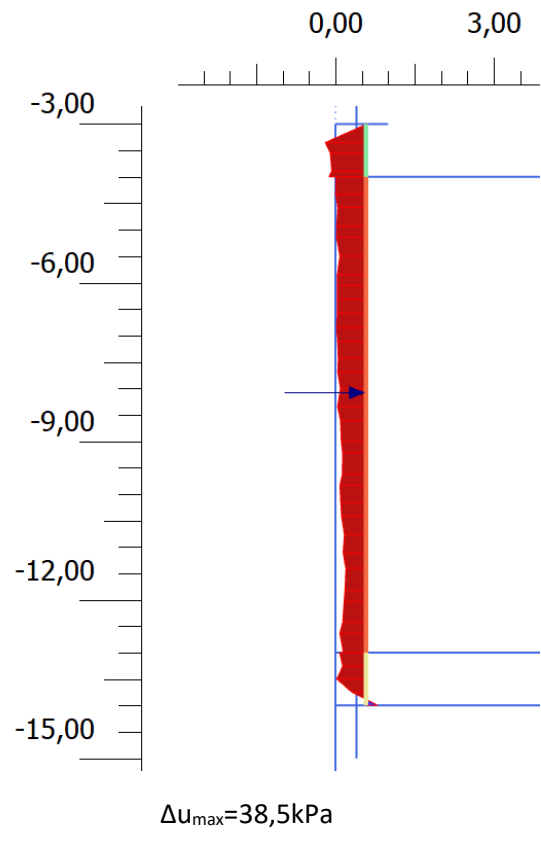


$\epsilon=5\%$, $\psi=0^\circ$

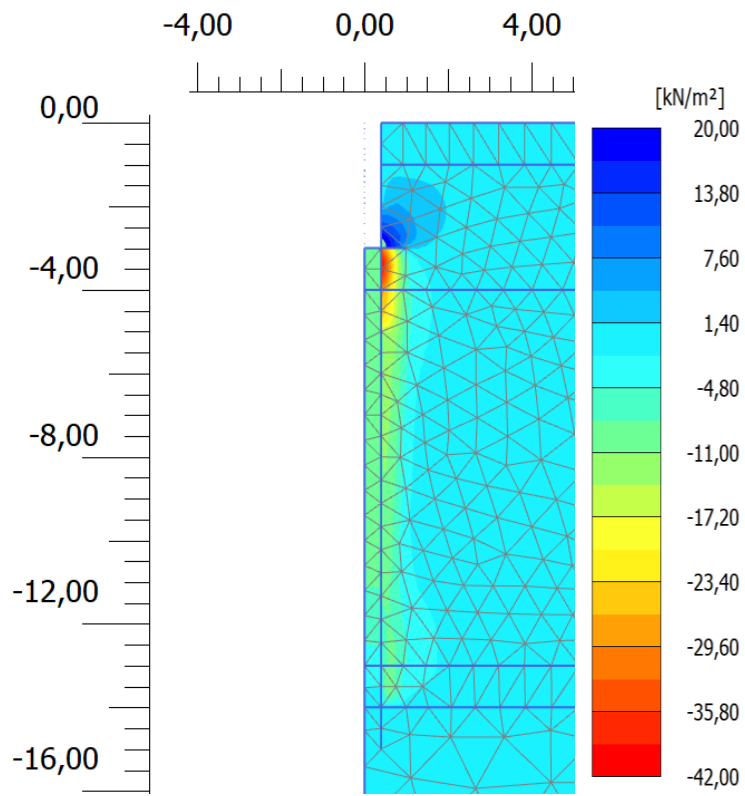
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max}=63,4\text{kPa}$

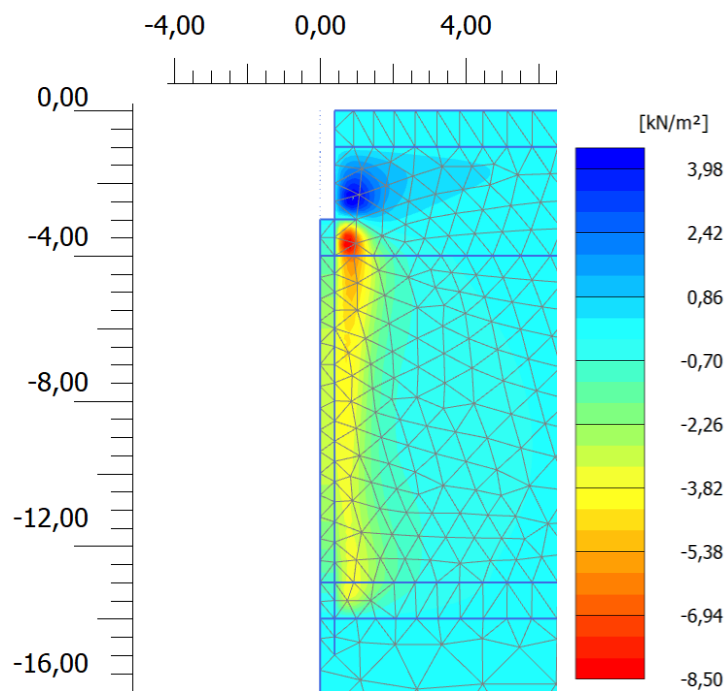


Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



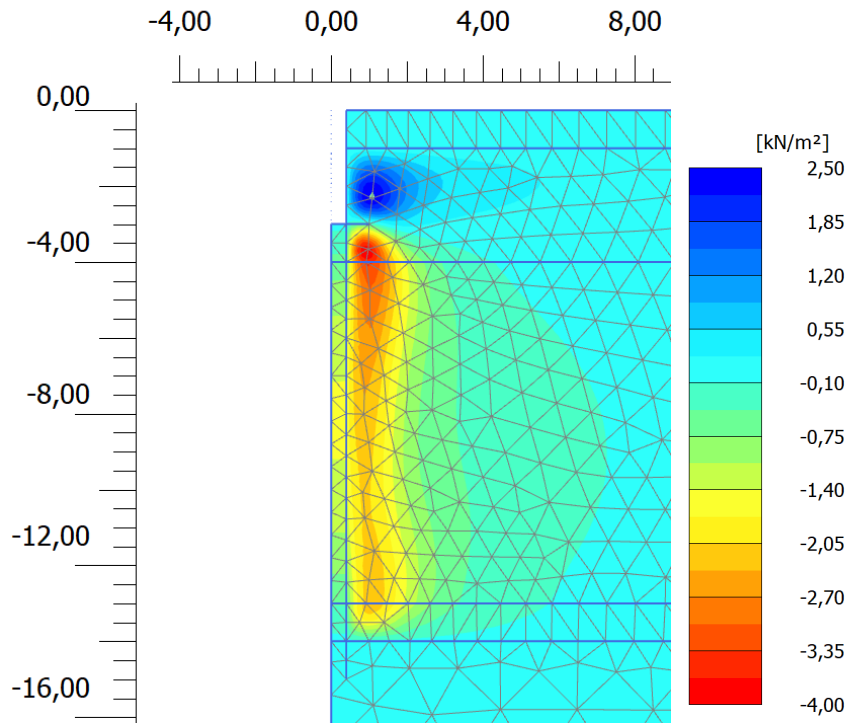
$\Delta u_{\max} = 41,3 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn



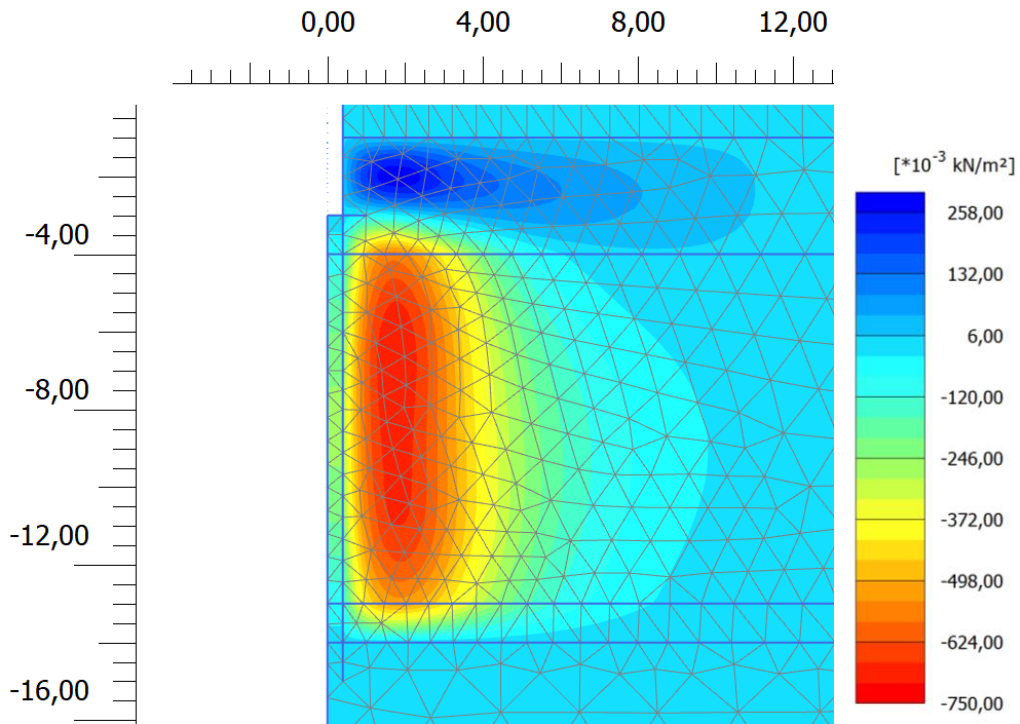
$\Delta u_{\max} = 8,4 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



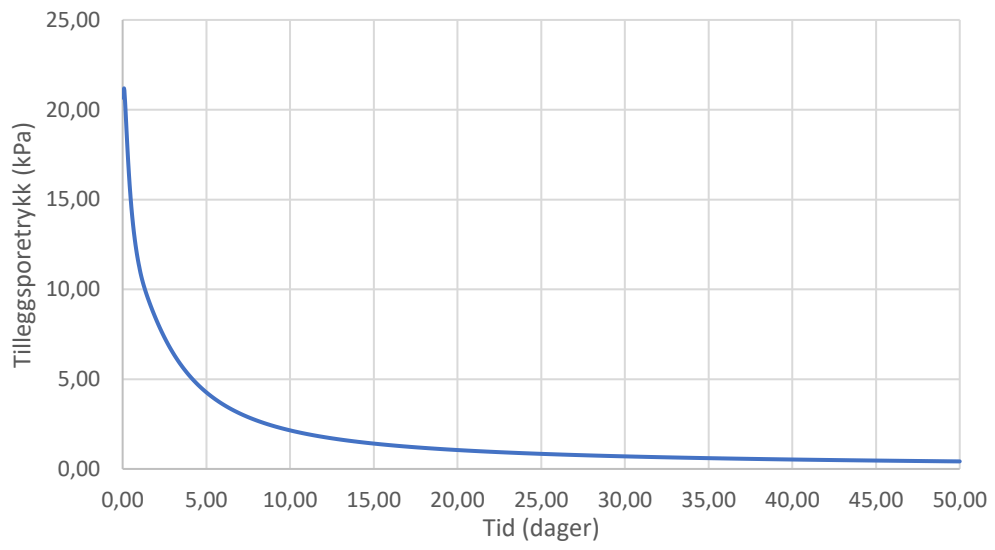
$\Delta u_{\max} = 4,0 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 50 døgn



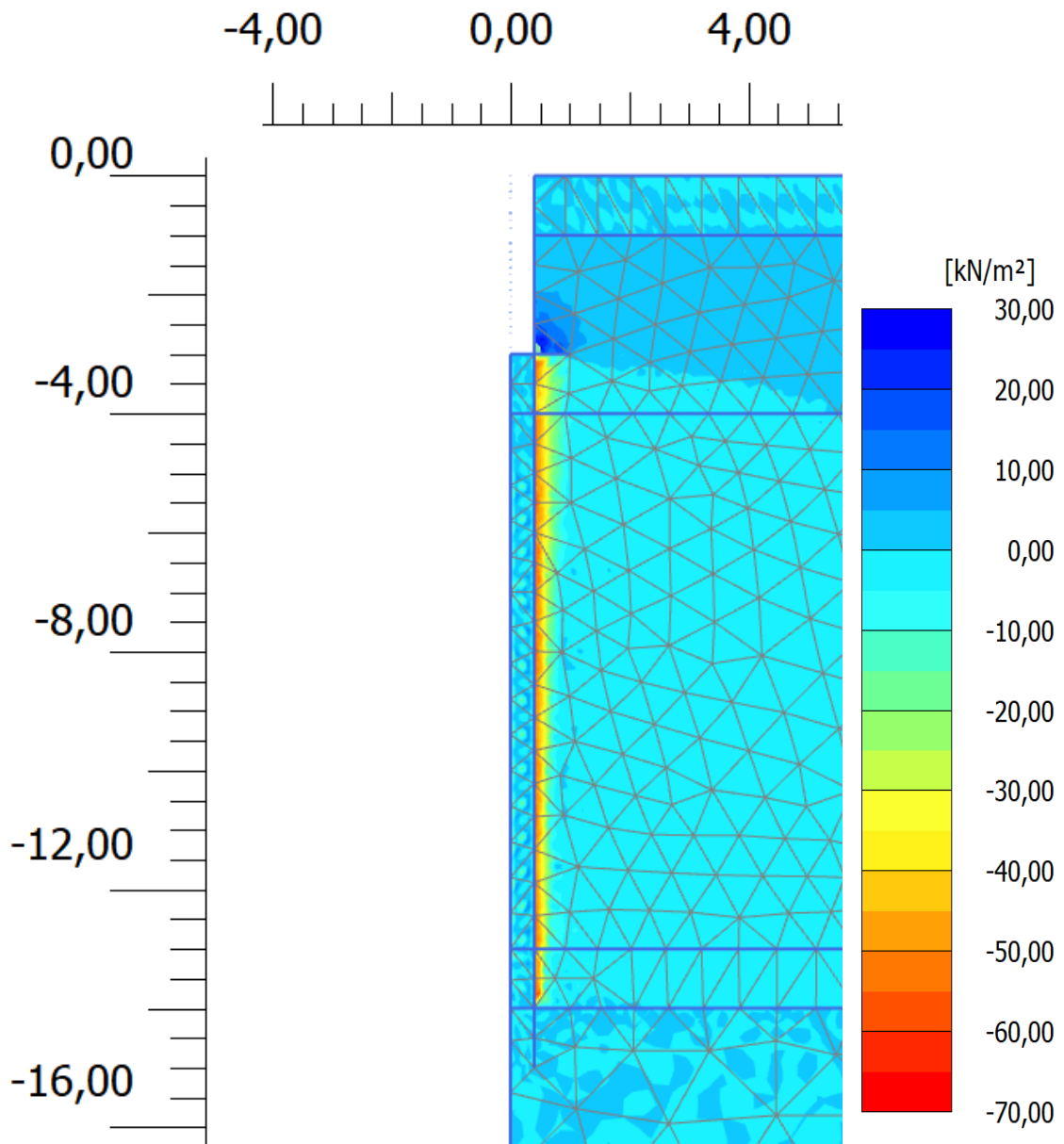
$\Delta u_{\max} = 0,7 \text{ kPa}$

Konsolidering 0-50 dager

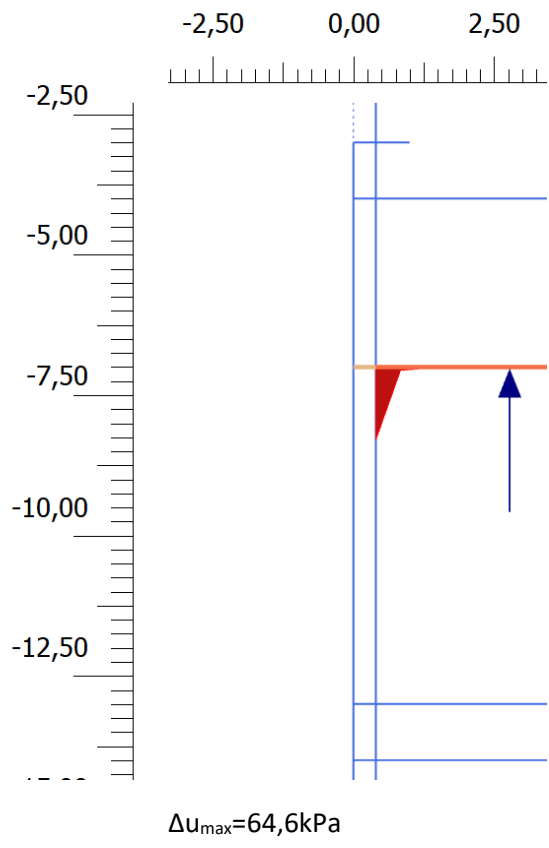
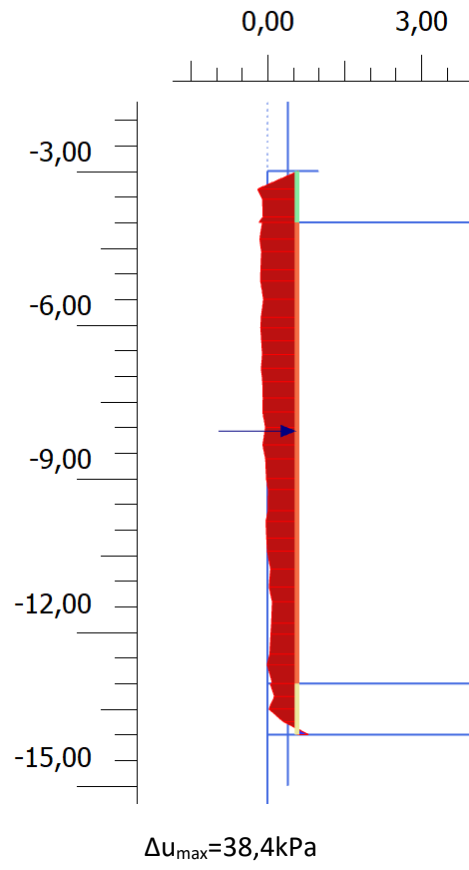


$\epsilon=5\%$, $\psi=-3^\circ$

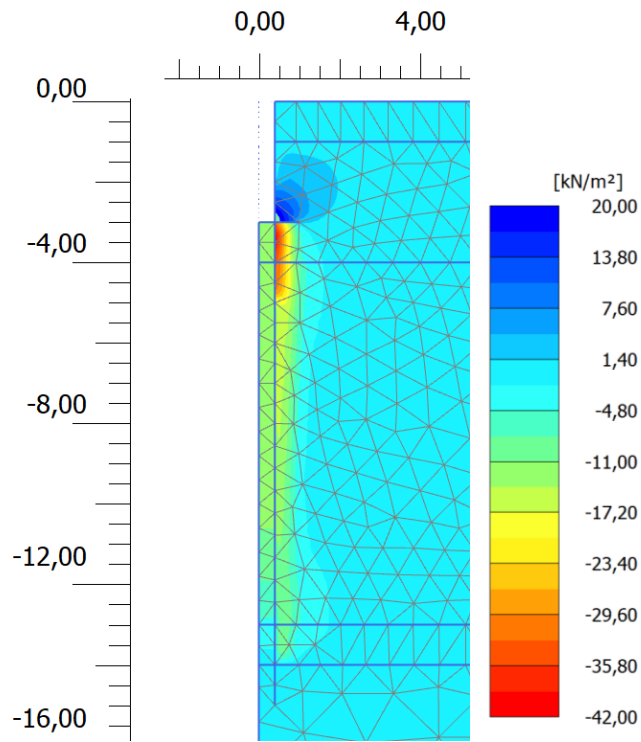
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max}=66,7\text{kPa}$

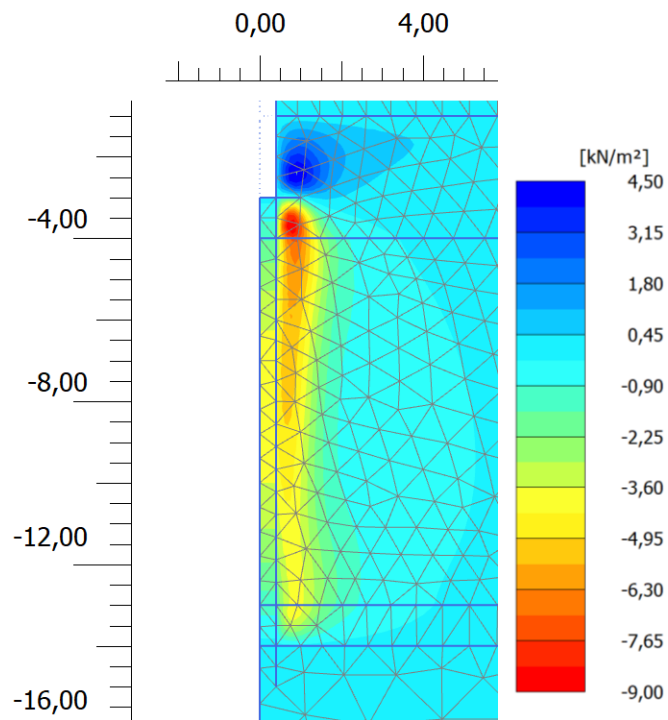


Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



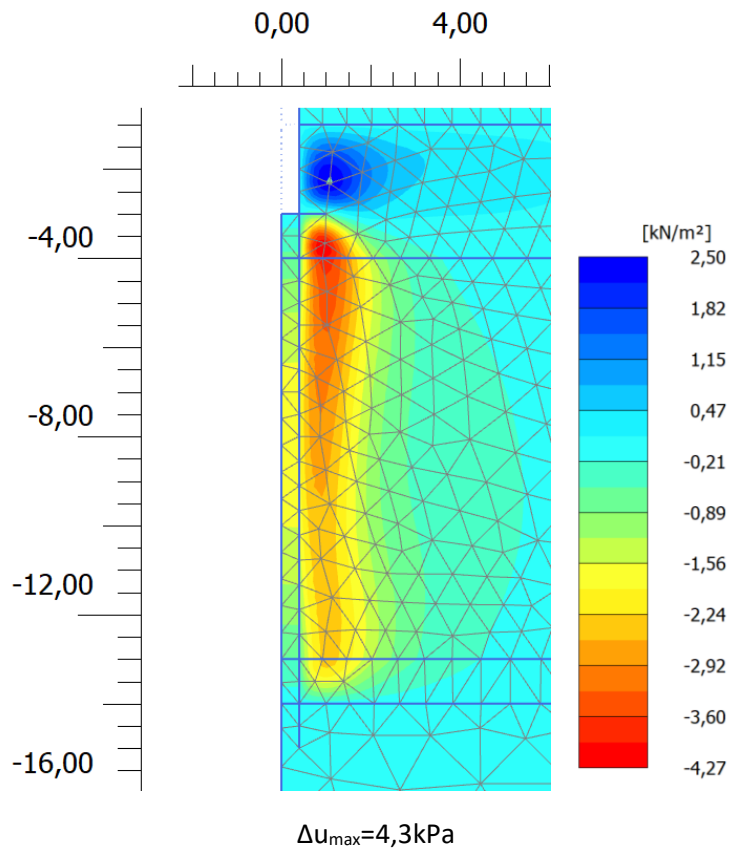
$\Delta u_{\max} = 41,4 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn

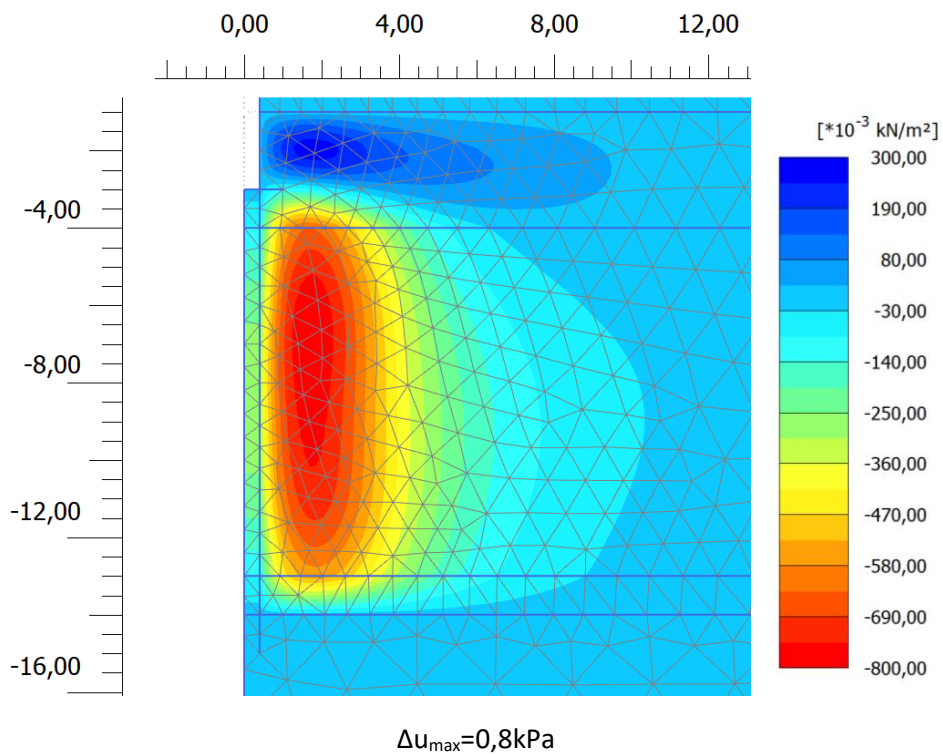


$\Delta u_{\max} = 8,9 \text{ kPa}$

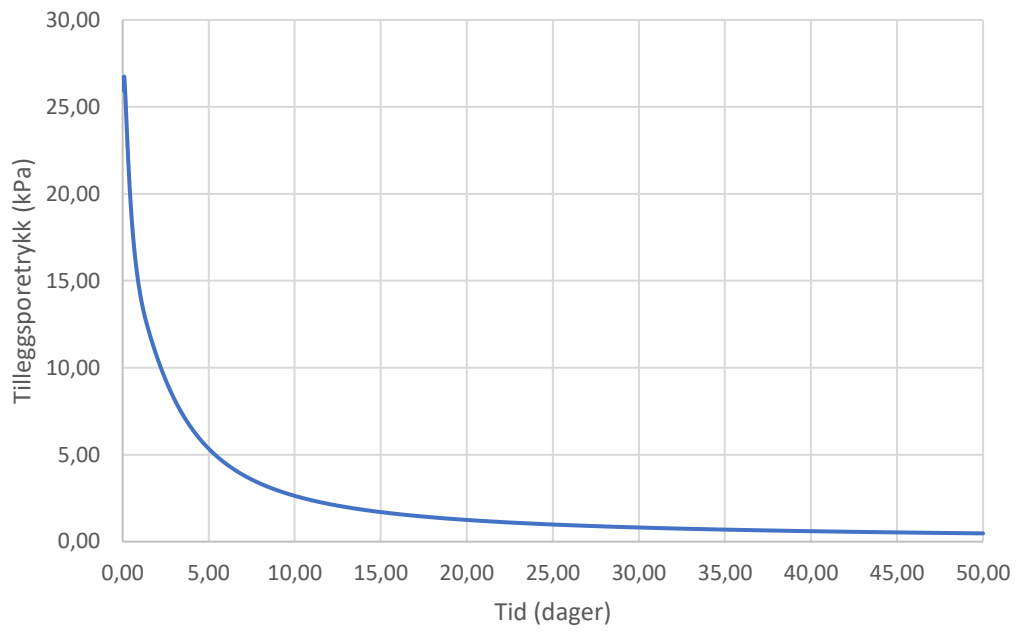
Tilleggs poretrykk etter 10 døgn



Tilleggs poretrykk etter 50 døgn

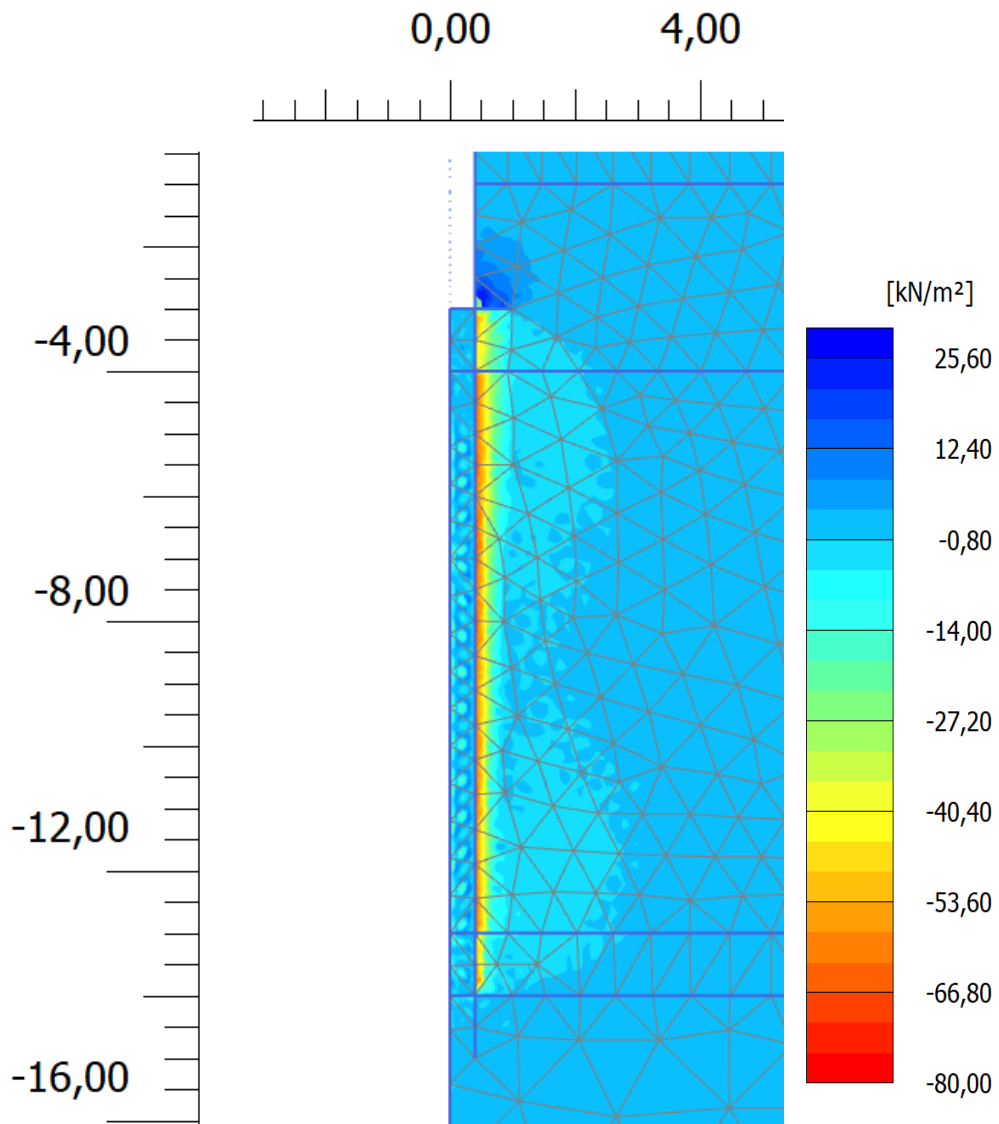


Konsolidering 0-50 dager

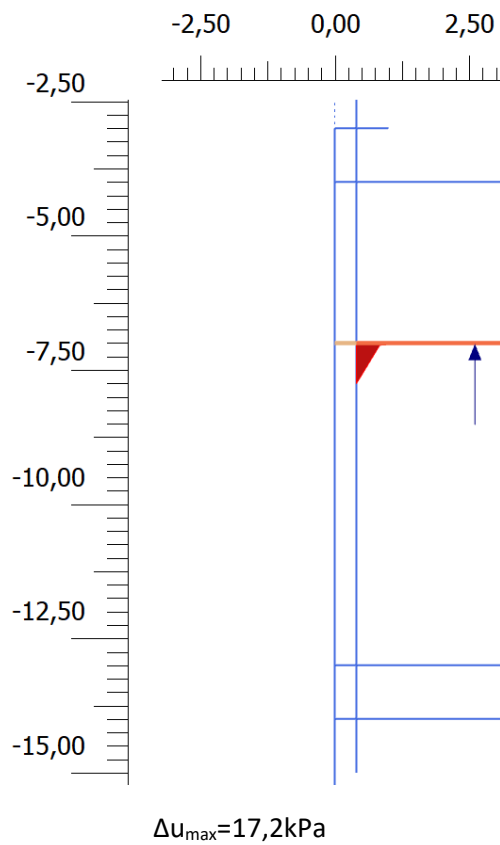
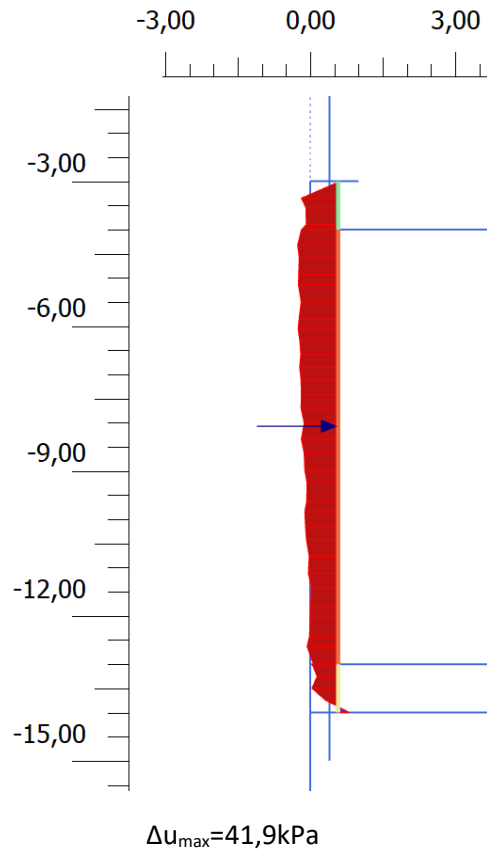


$\epsilon=5\%$, $\psi=-5^\circ$

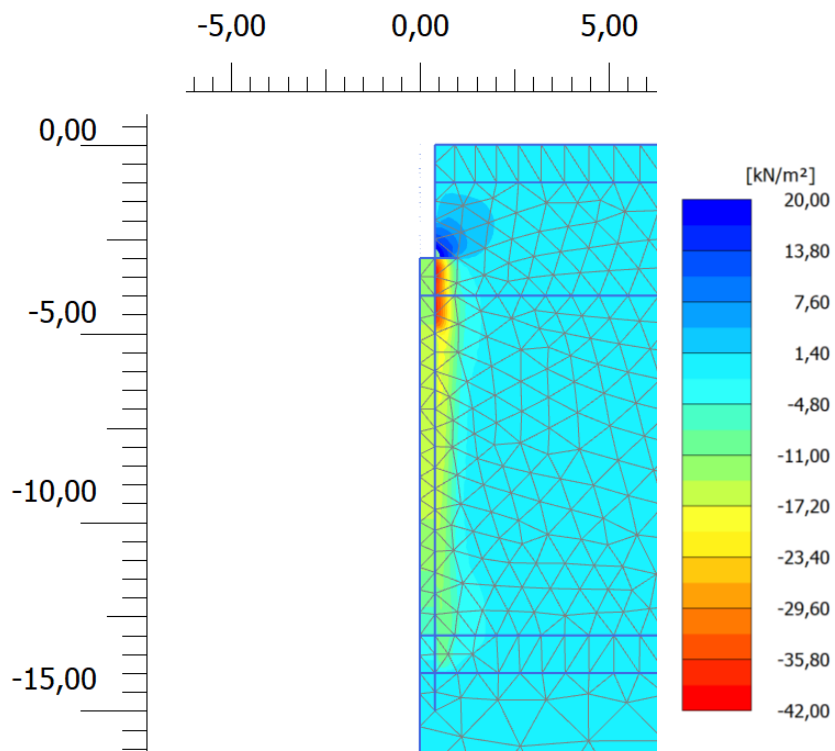
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max}=78,3\text{kPa}$

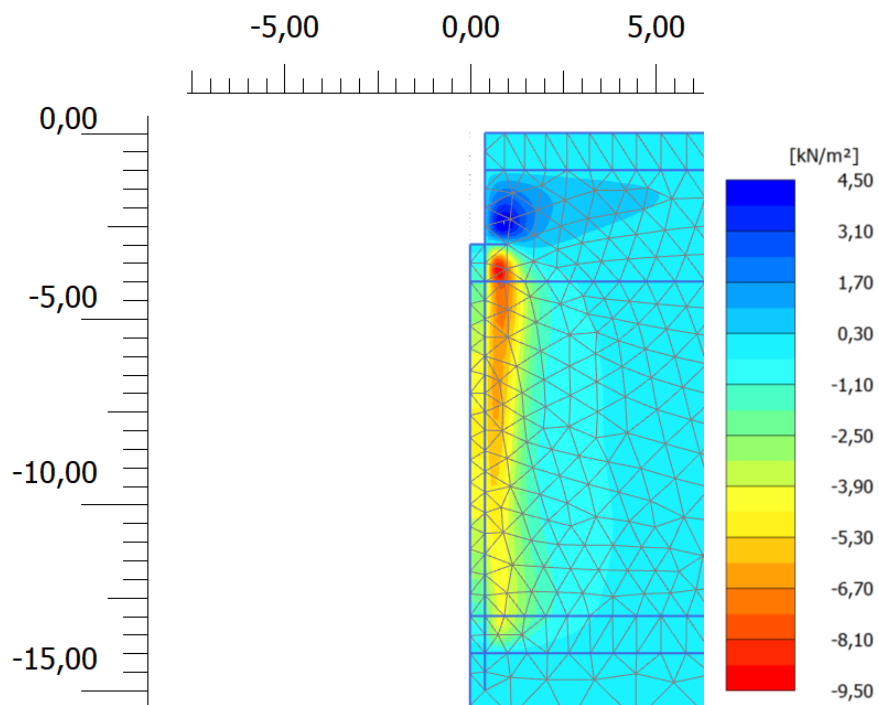


Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



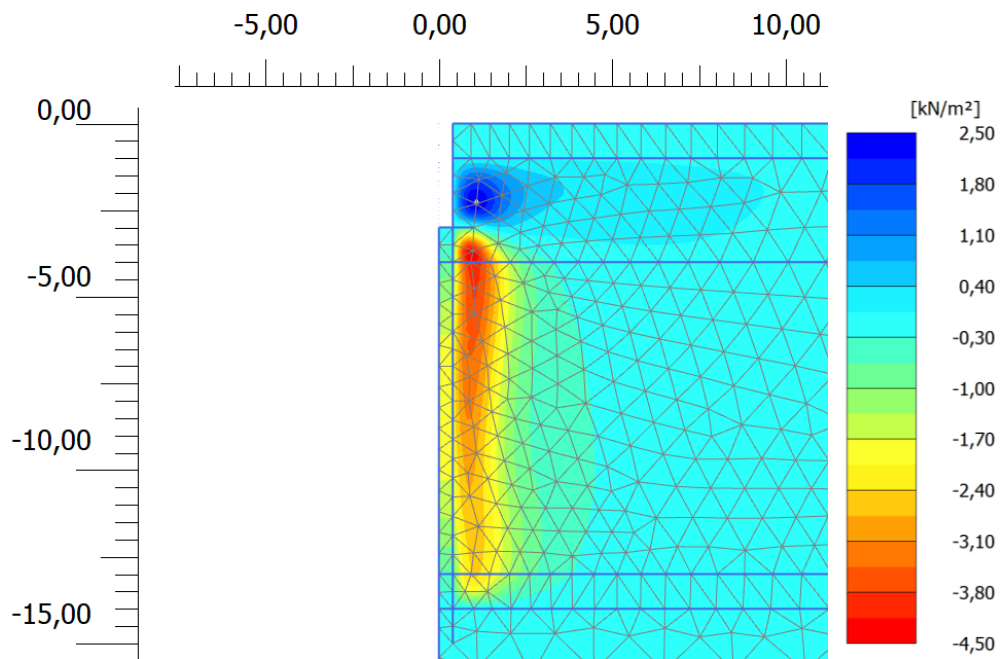
$\Delta u_{\max} = 41,3 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn



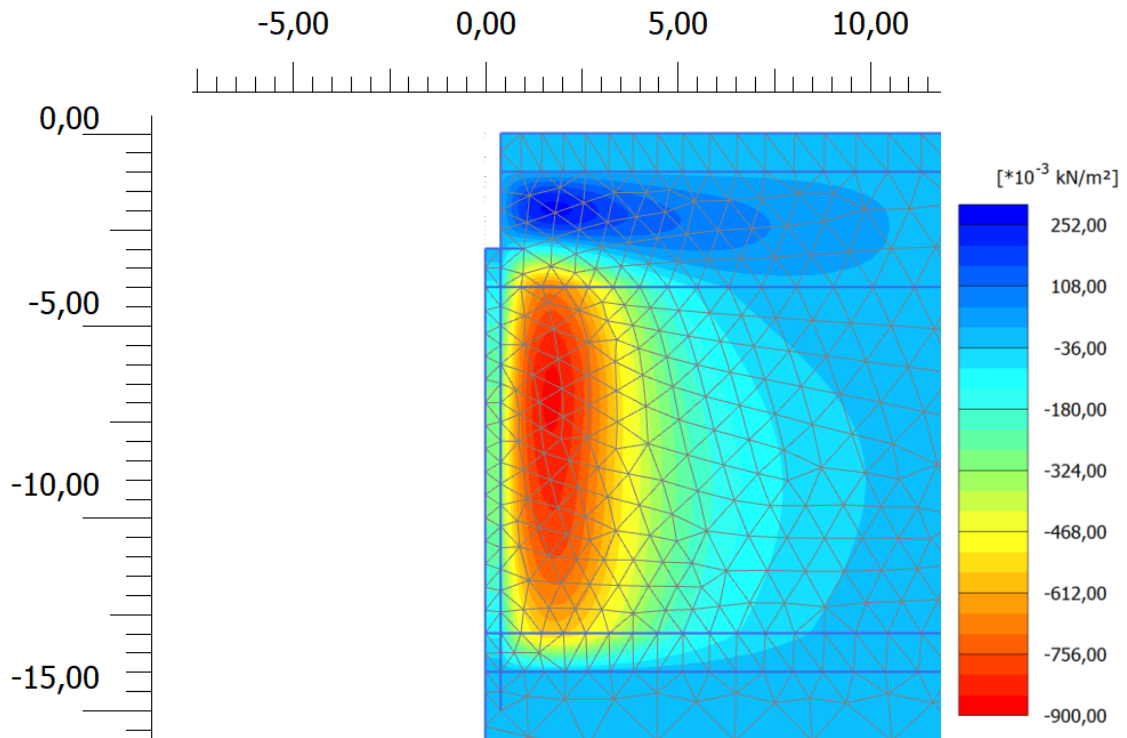
$\Delta u_{\max} = 9,3 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



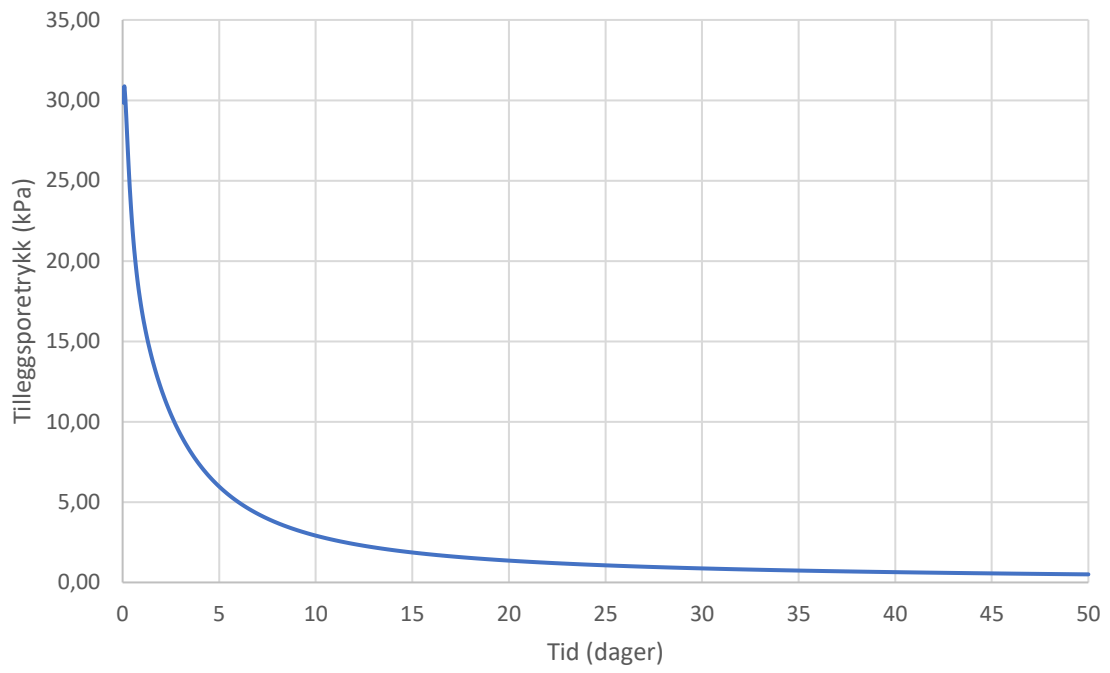
$\Delta u_{\max} = 4,5 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 50 døgn






$\Delta u_{\max} = 0,9 \text{ kPa}$

Konsolidering 0-50 dager



B.3. Parametere jordlag – Hardening Soil

| Identification | | Kvikkleire | Siltig leire nederst | Siltig leire øverst |
|-----------------------|----------------------|---|---|---|
| Identification number | | 4 | 5 | 6 |
| Drainage type | | Undrained (A) | Undrained (A) | Undrained (A) |
| Colour | |  |  |  |
| Comments | | | | |
| γ_{unsat} | kN/m ³ | 21,00 | 21,00 | 21,00 |
| γ_{sat} | kN/m ³ | 21,00 | 21,00 | 21,00 |
| Dilatancy cut-off | | No | No | No |
| e_{init} | | 0,5000 | 0,5000 | 0,5000 |
| e_{min} | | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| e_{max} | | 999,0 | 999,0 | 999,0 |
| Rayleigh α | | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Rayleigh β | | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| E_{50}^{ref} | kN/m ² | 12,00E3 | 18,00E3 | 15,00E3 |
| E_{oed}^{ref} | kN/m ² | 10,00E3 | 18,00E3 | 15,00E3 |
| E_{ur}^{ref} | kN/m ² | 40,00E3 | 72,00E3 | 60,00E3 |
| power (m) | | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Use alternatives | | No | No | No |
| C_c | | 0,03450 | 0,01917 | 0,02300 |
| C_s | | 7,762E-3 | 4,312E-3 | 5,175E-3 |
| e_{init} | | 0,5000 | 0,5000 | 0,5000 |
| C_{ref} | kN/m ² | 1,820 | 2,650 | 2,650 |
| ϕ (phi) | ° | 20,00 | 28,00 | 28,00 |
| ψ (psi) | ° | -5,000 | 0,000 | 0,000 |
| Set to default values | | No | No | No |
| V_{ur} | | 0,2000 | 0,2000 | 0,2000 |
| p_{ref} | kN/m ² | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| K_0^{nc} | | 0,5000 | 0,5000 | 0,5000 |
| C_{inc} | kN/m ² /m | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| γ_{ref} | m | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

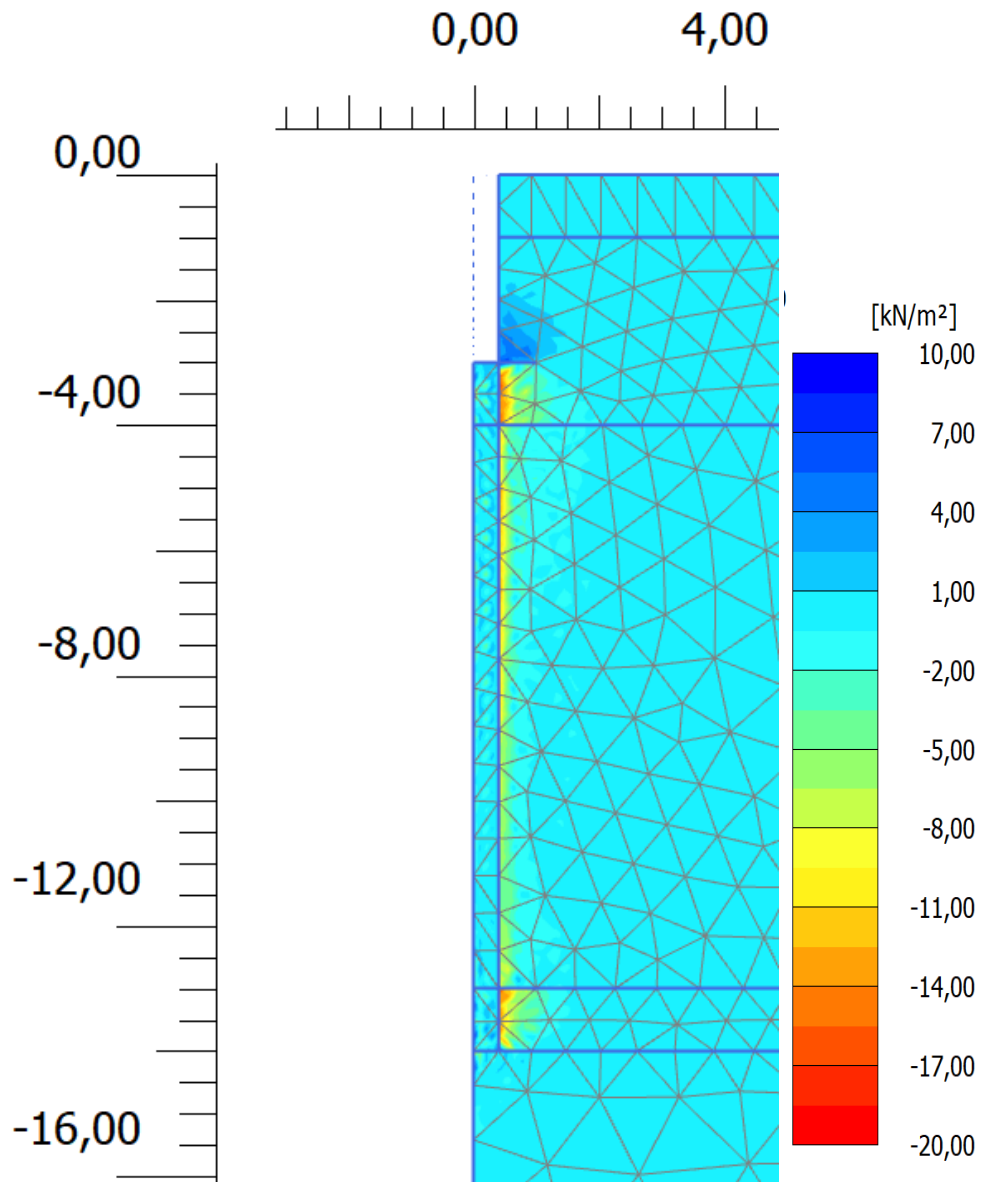
| | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| R _f | | 0,9000 | 0,9000 | 0,9000 |
| Tension cut-off | | Yes | Yes | Yes |
| Tensile strength | kN/m ² | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Undrained behaviour | | Standard | Standard | Standard |
| Skempton-B | | 0,9866 | 0,9866 | 0,9866 |
| v _u | | 0,4950 | 0,4950 | 0,4950 |
| K _{w,ref} / n | kN/m ² | 1,639E6 | 2,950E6 | 2,458E6 |
| Strength | | Rigid | Rigid | Rigid |
| R _{inter} | | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Consider gap closure | | Yes | Yes | Yes |
| δ _{inter} | | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Cross permeability | | Impermeable | Impermeable | Impermeable |
| Drainage conductivity, dk | m ³ /day/m | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| R | m ² K/kW | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| K ₀ determination | | Manual | Manual | Manual |
| K _{0,x} = K _{0,z} | | Yes | Yes | Yes |
| K _{0,x} | | 0,7000 | 0,7000 | 0,7000 |
| K _{0,z} | | 0,7000 | 0,7000 | 0,7000 |
| OCR | | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| POP | kN/m ² | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Data set | | Standard | Standard | Standard |
| Type | | Coarse | Coarse | Coarse |
| < 2 μm | % | 10,00 | 10,00 | 10,00 |
| 2 μm - 50 μm | % | 13,00 | 13,00 | 13,00 |
| 50 μm - 2 mm | % | 77,00 | 77,00 | 77,00 |
| Use defaults | | None | None | None |

B.4. Resultater – Hardening Soil

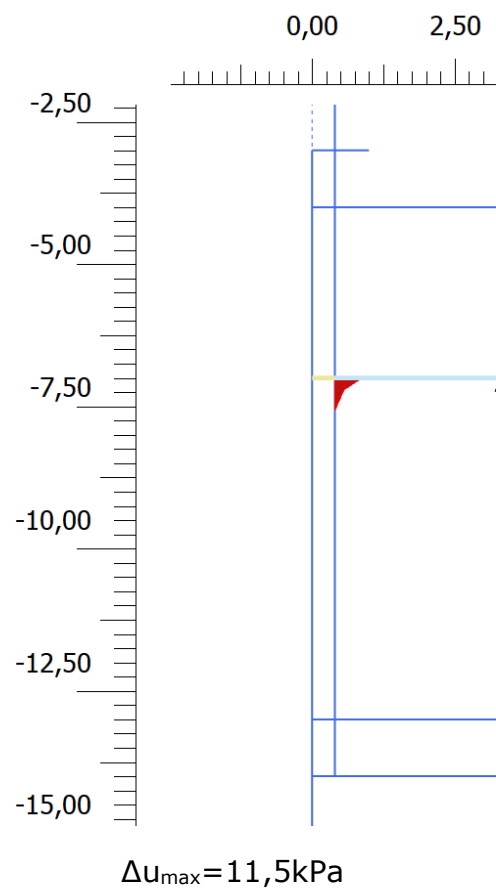
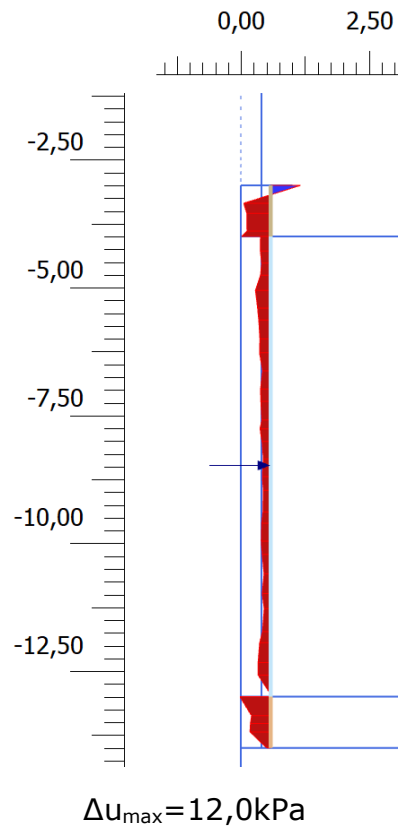
OBS! Skalaen er forskjellig for de ulike tidspunktene. Hver figur må leses med tilhørende skala.

$\epsilon=1\%$, $\psi=0^\circ$

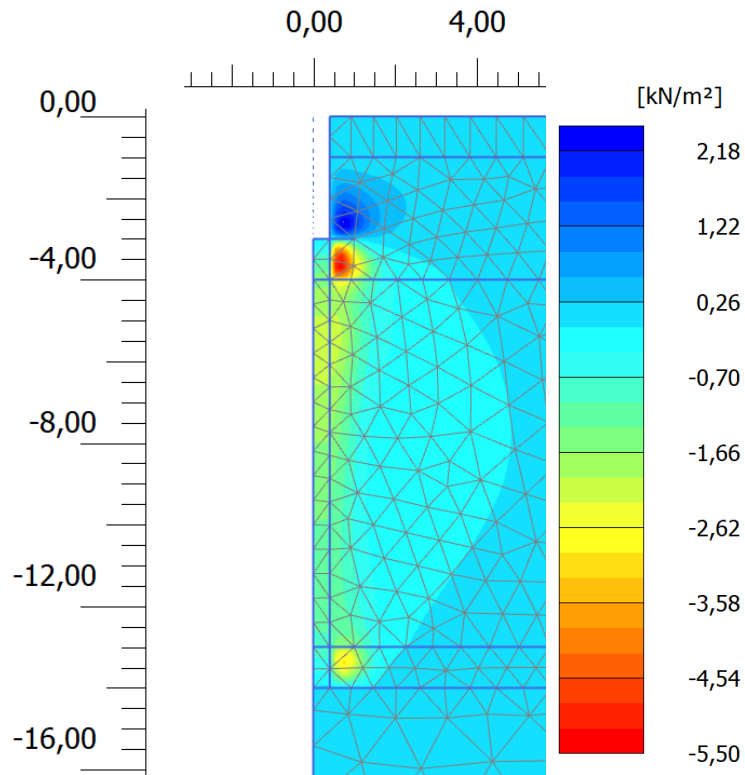
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max}=19,1\text{kPa}$

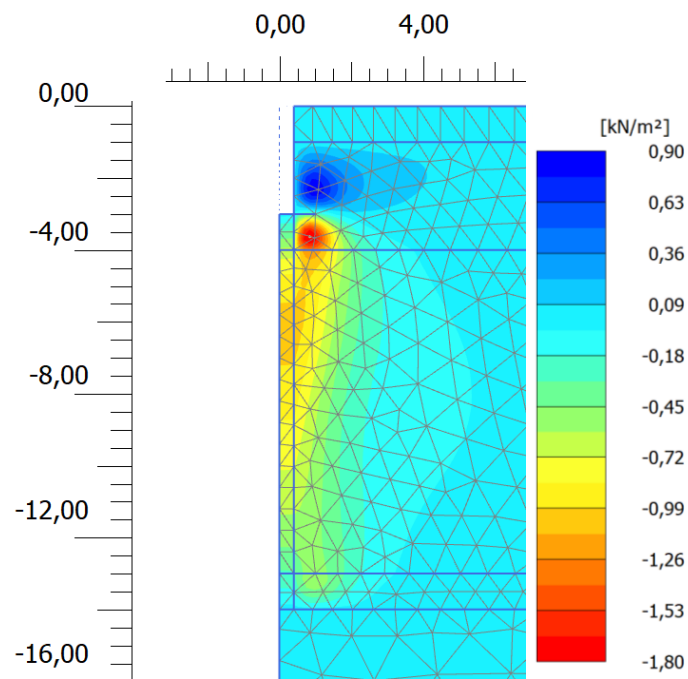


Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



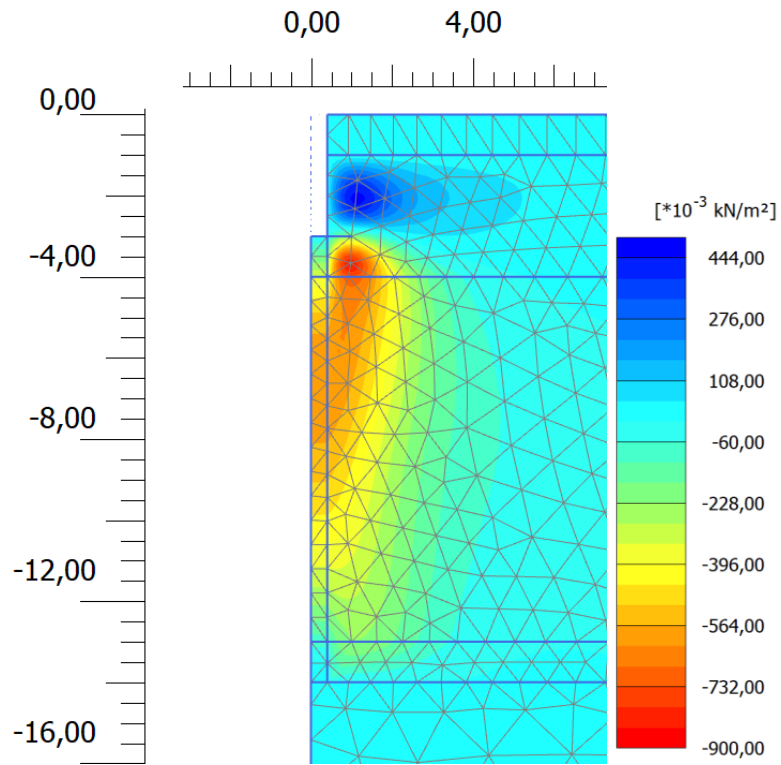
$\Delta u_{\max} = 5,4 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn



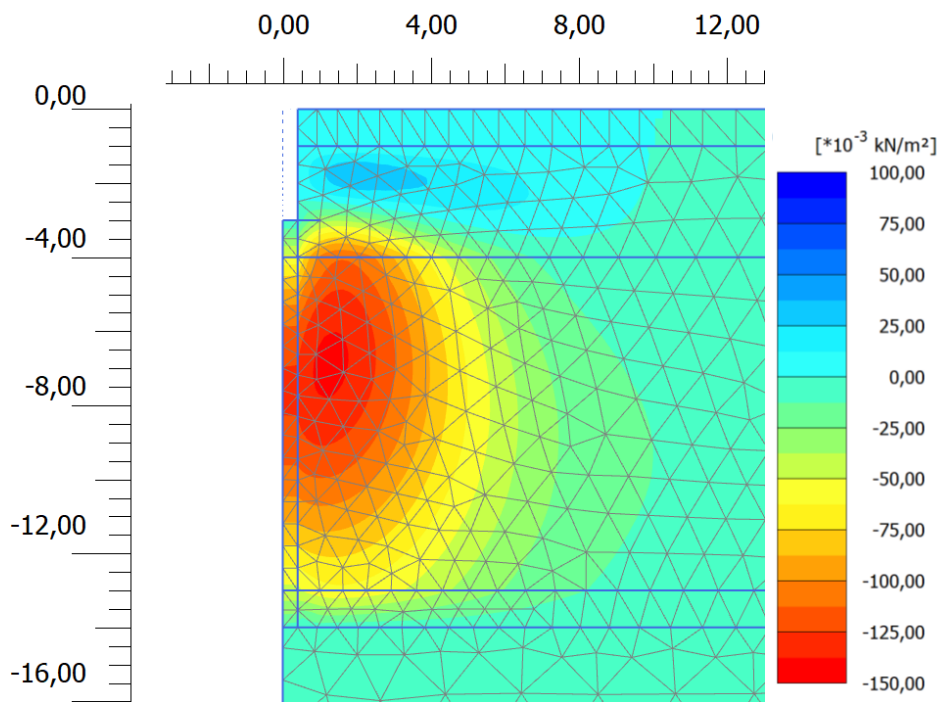
$\Delta u_{\max} = 1,8 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



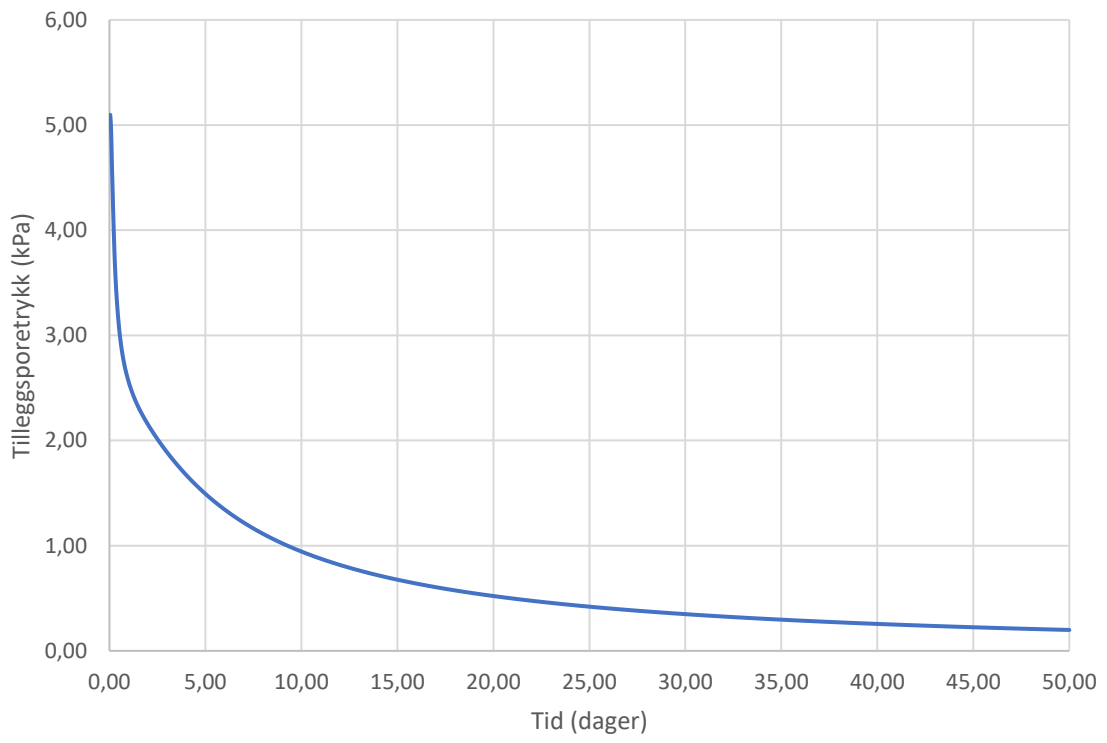
$\Delta u_{\max} = 0,8 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 50 døgn



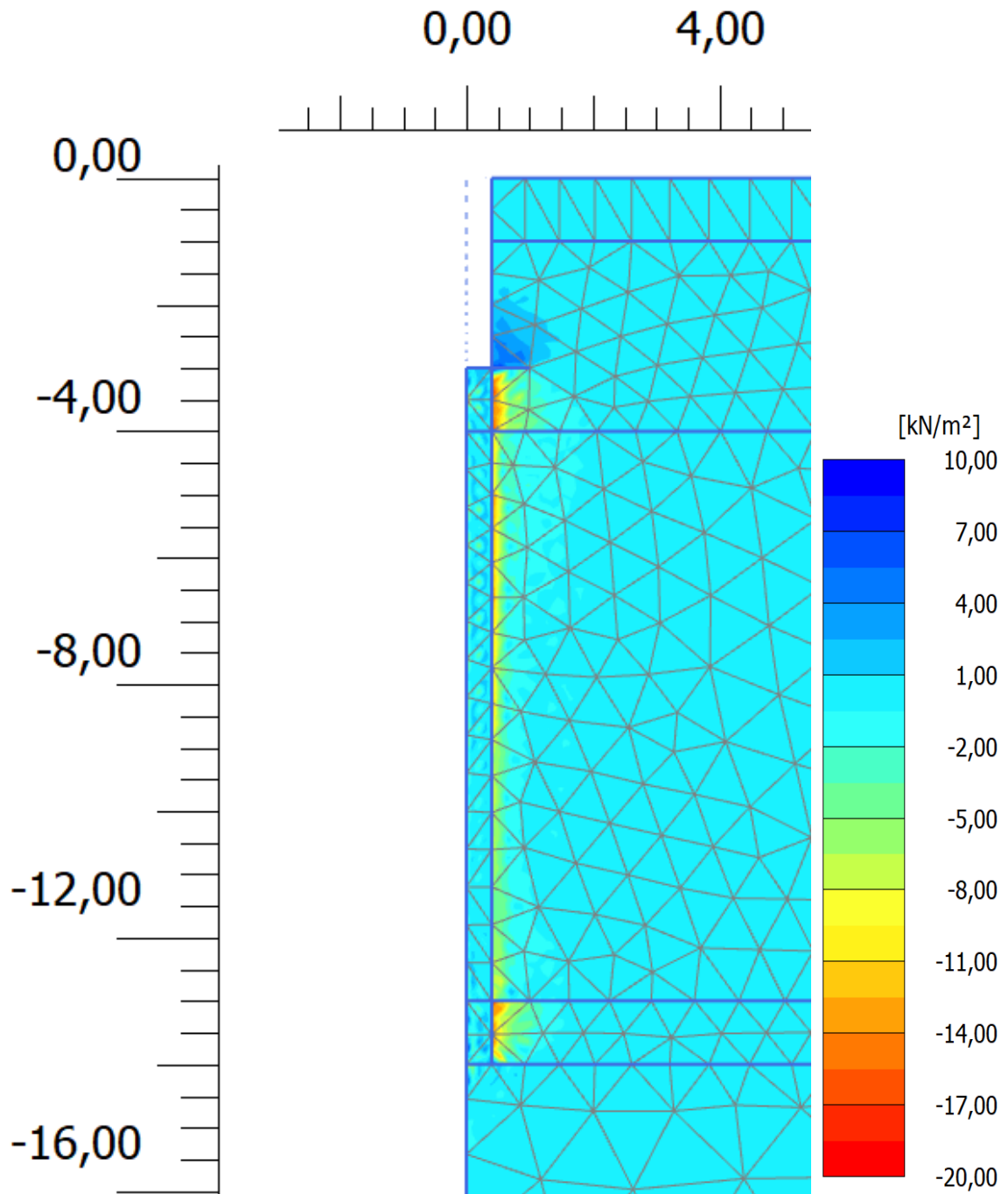
$\Delta u_{\max} = 0,1 \text{ kPa}$

Konsolidering 0-50 dager

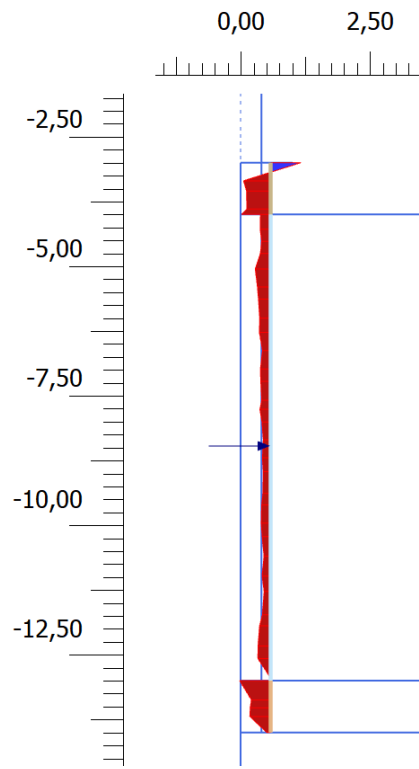


$\epsilon=1\%, \psi=-3^\circ$

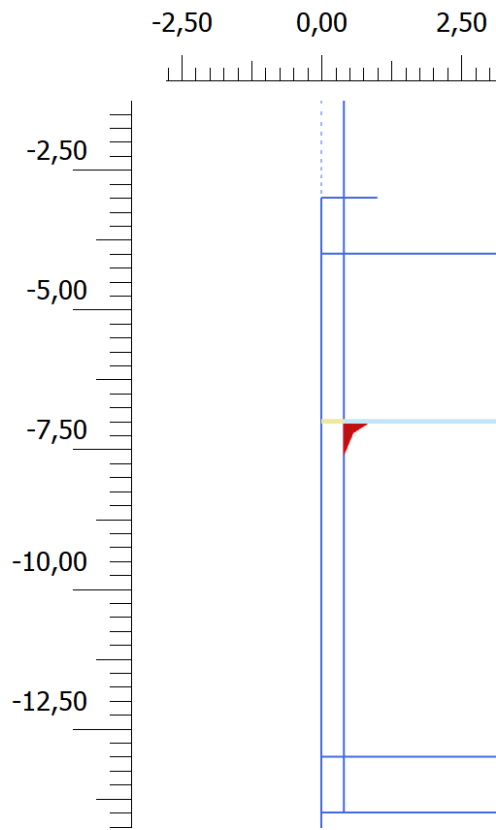
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max}=19,0\text{kPa}$

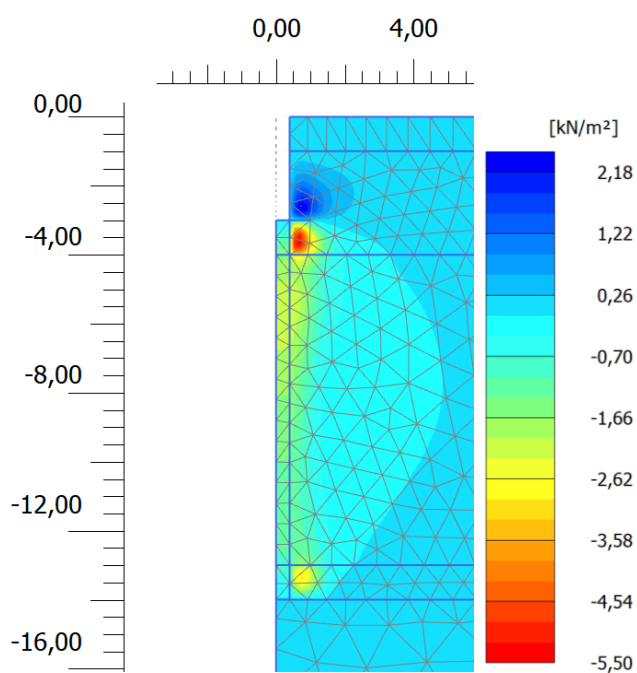


$\Delta u_{\max} = 12,0 \text{ kPa}$



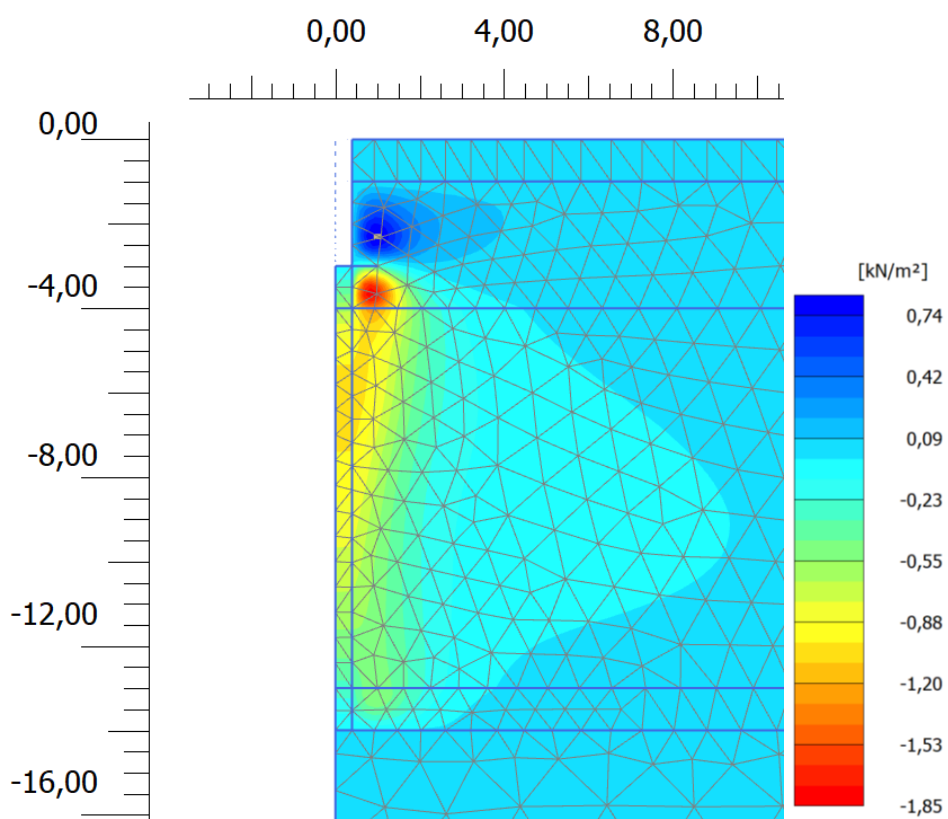
$\Delta u_{\max} = 12,0 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



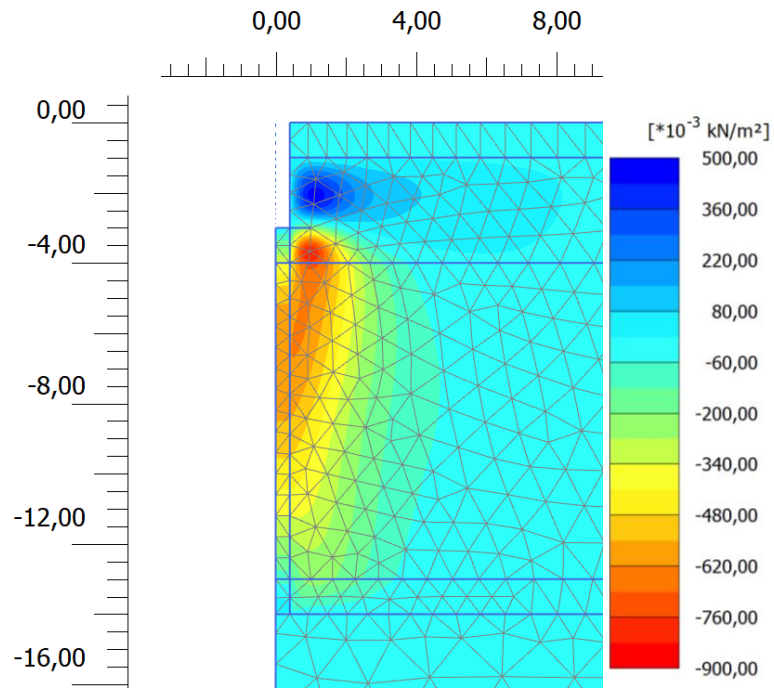
$\Delta u_{\max} = 5,4 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn



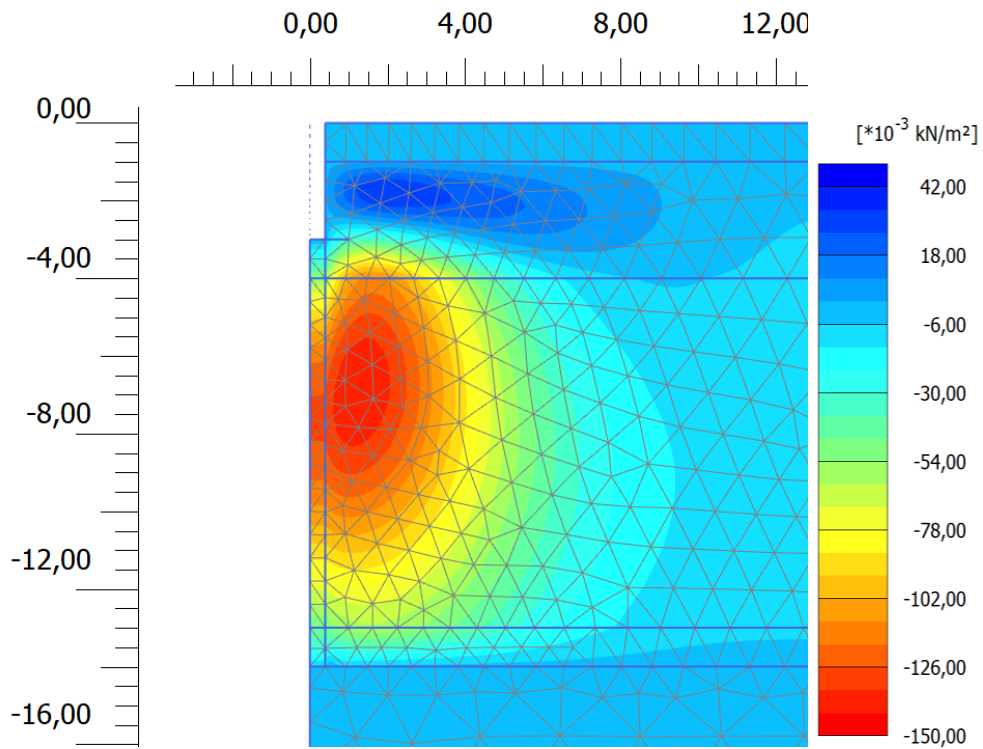
$\Delta u_{\max} = 1,8 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



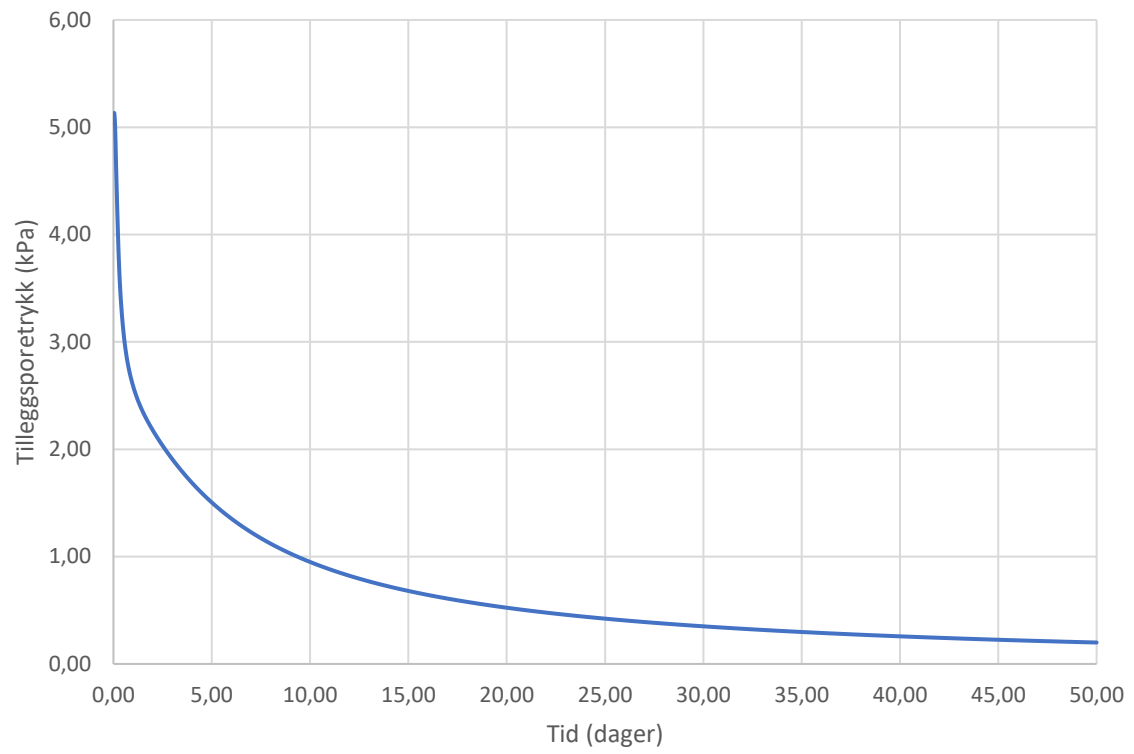
$\Delta u_{\max} = 0,8 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 50 døgn



$\Delta u_{\max} = 0,1 \text{ kPa}$

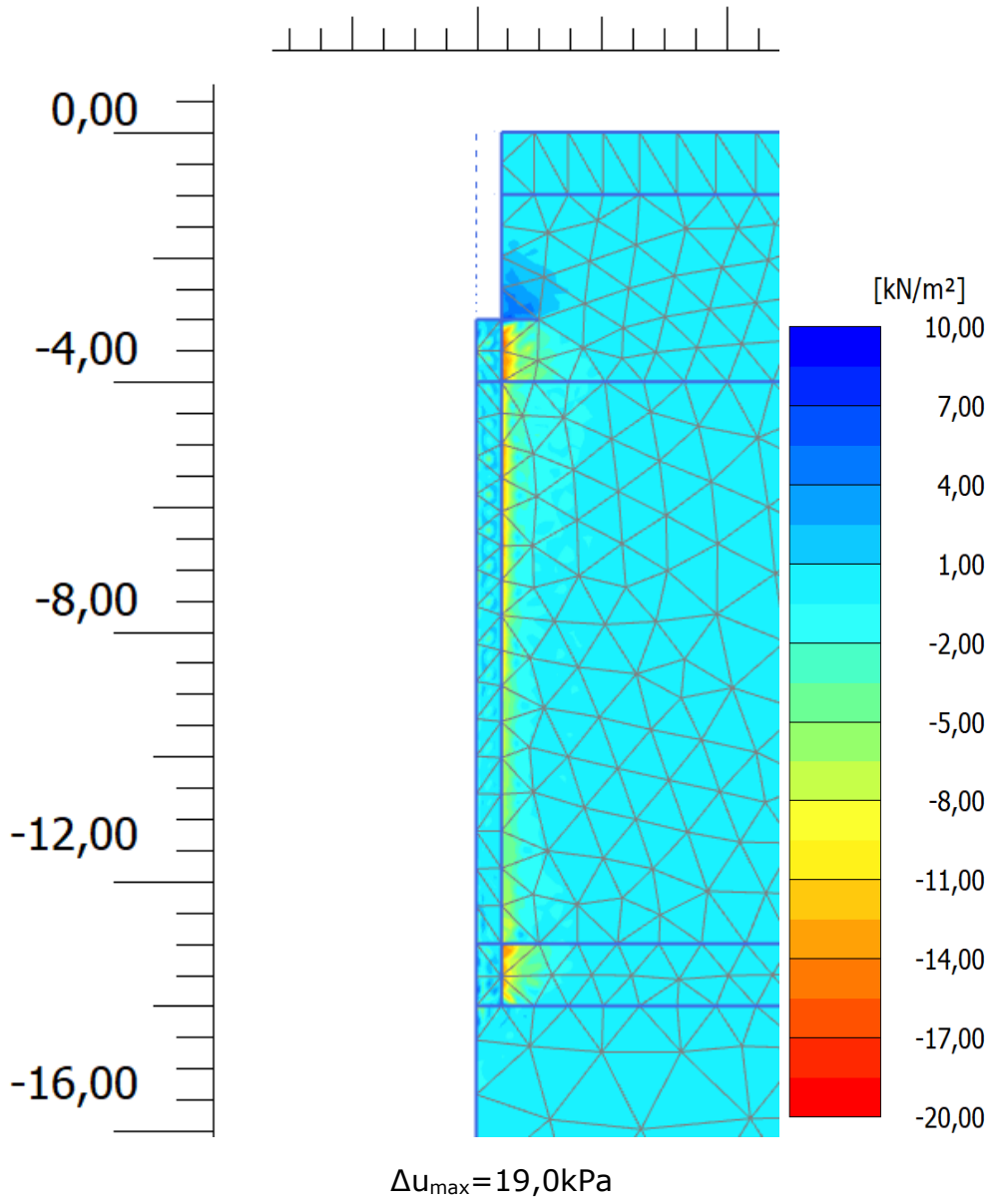
Konsolidering 0-50 dager

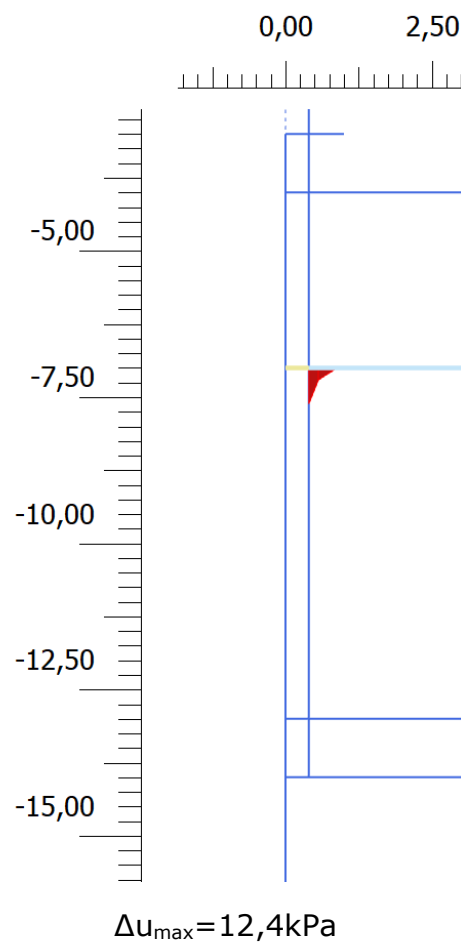
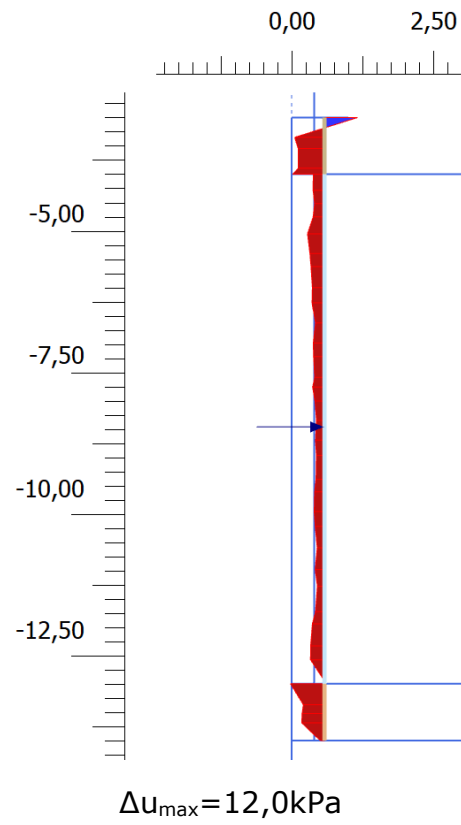


$\epsilon=1\%$, $\psi=-5^\circ$

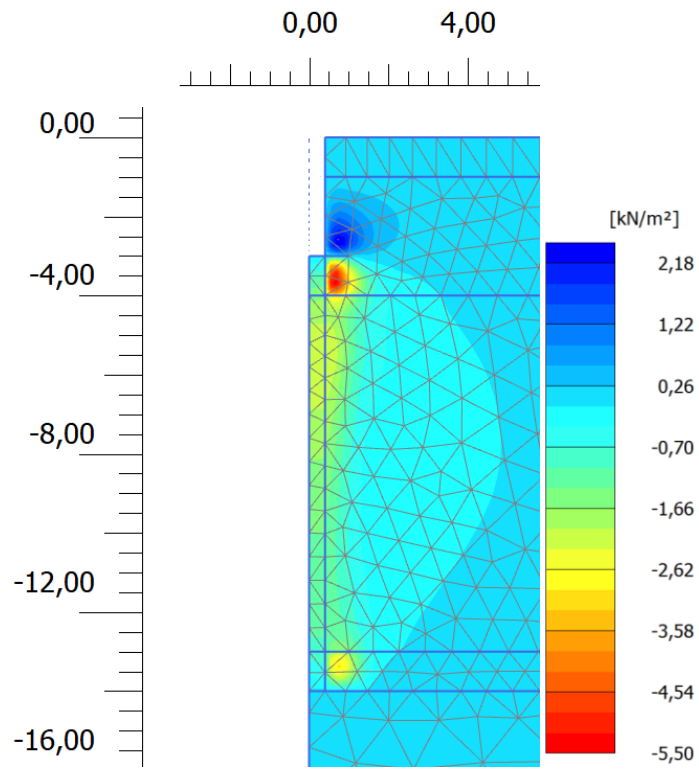
Momentant tilleggsporetrykk

0,00 4,00



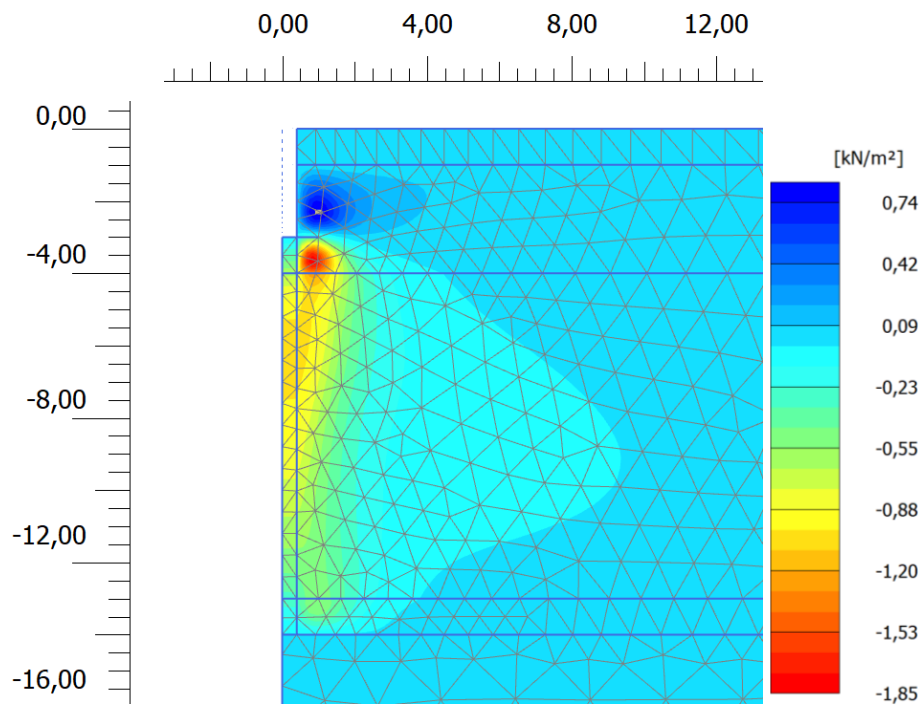


Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



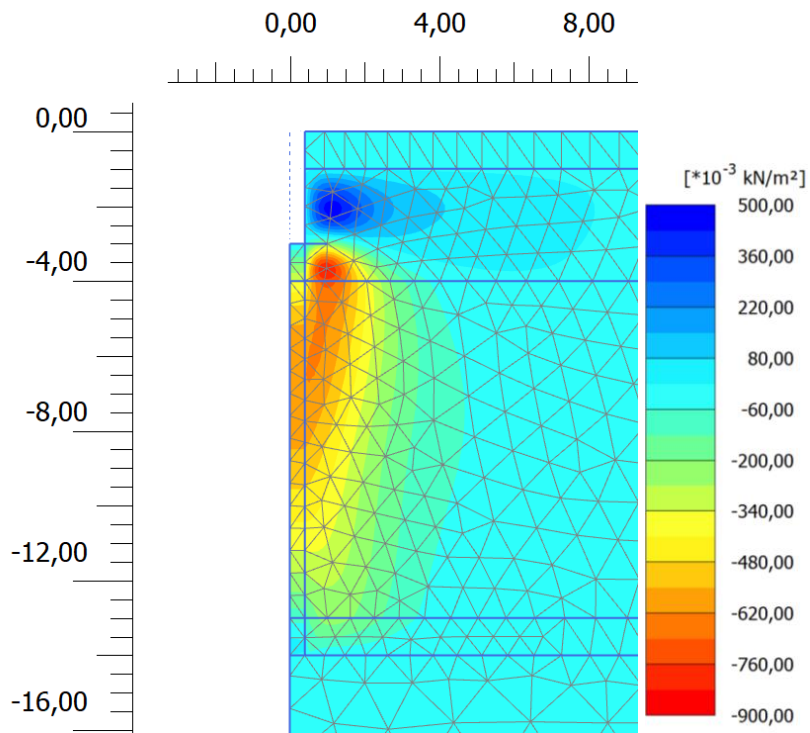
$\Delta u_{\max} = 5,4 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn



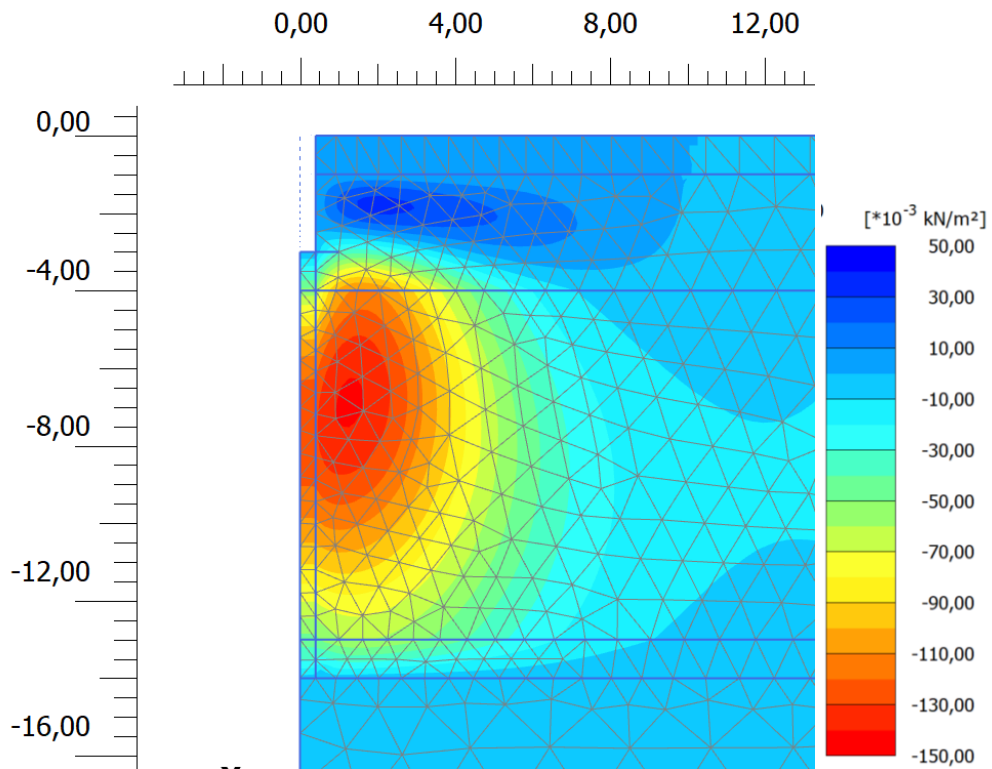
$\Delta u_{\max} = 1,8 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



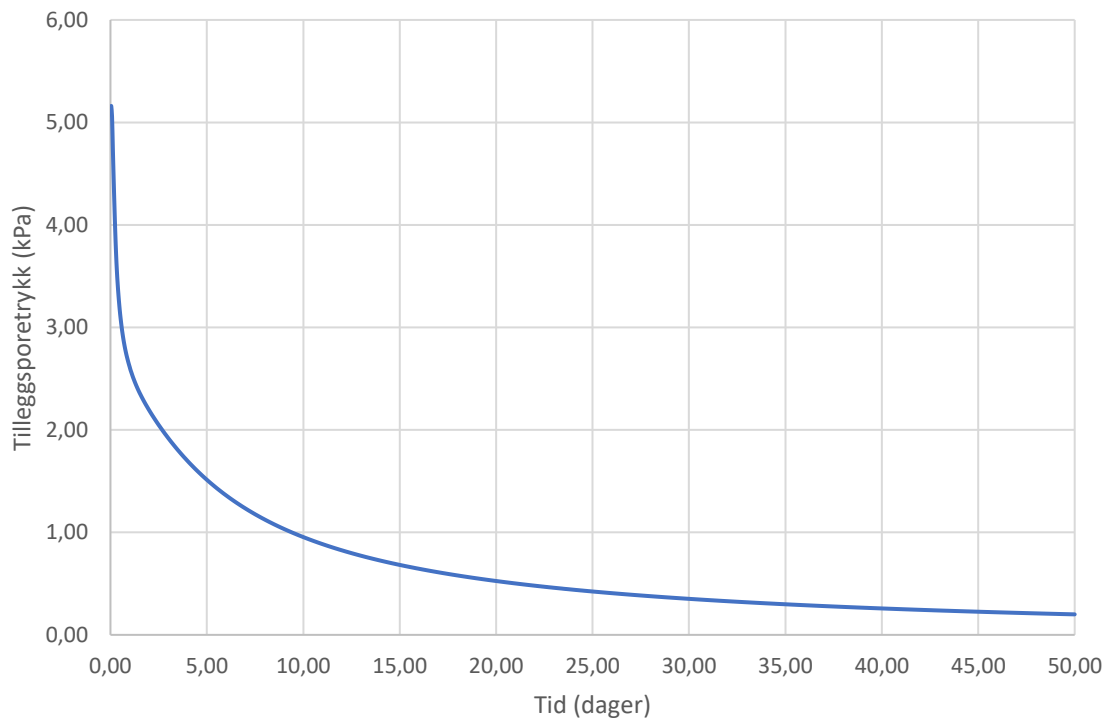
$\Delta u_{\max} = 0,8 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 50 døgn



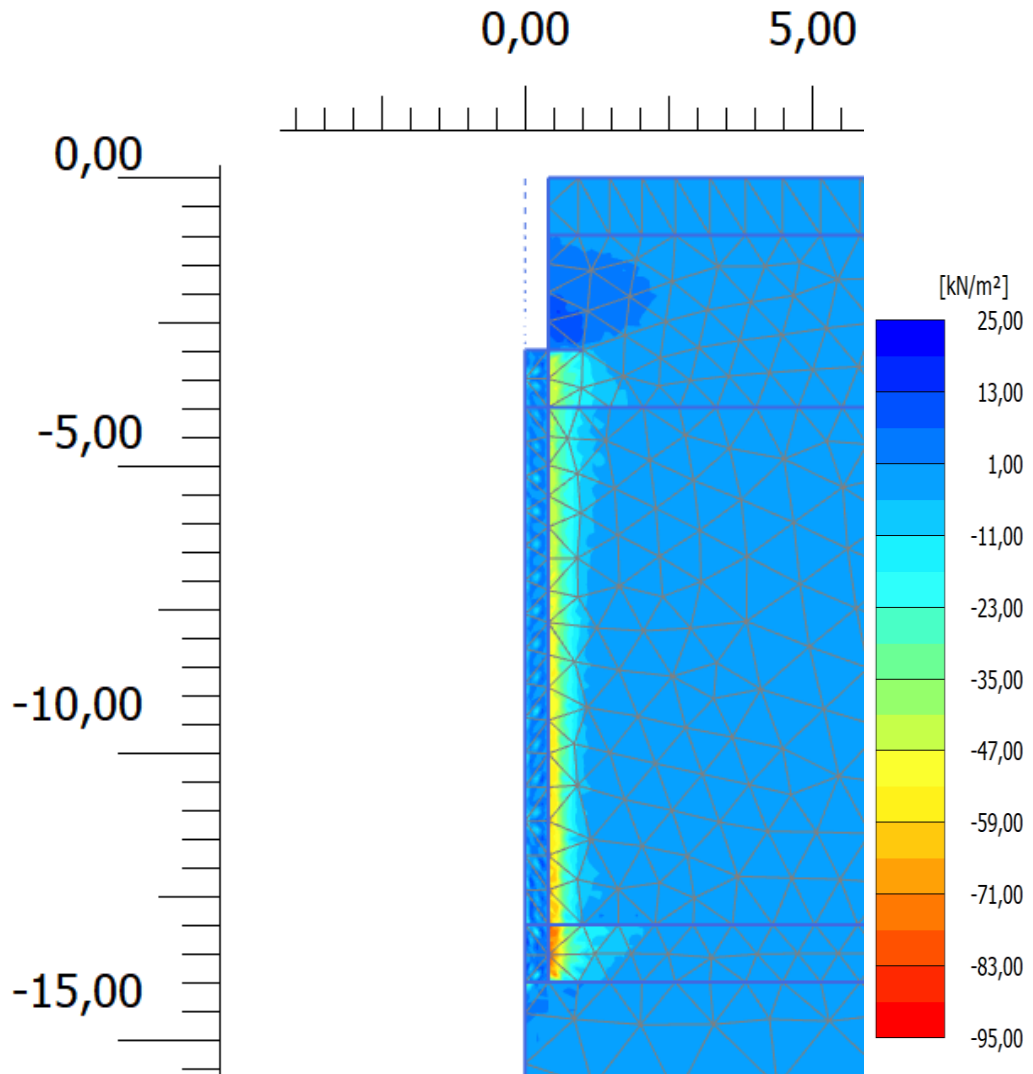
$\Delta u_{\max} = 0,1 \text{ kPa}$

Konsolidering 0-50

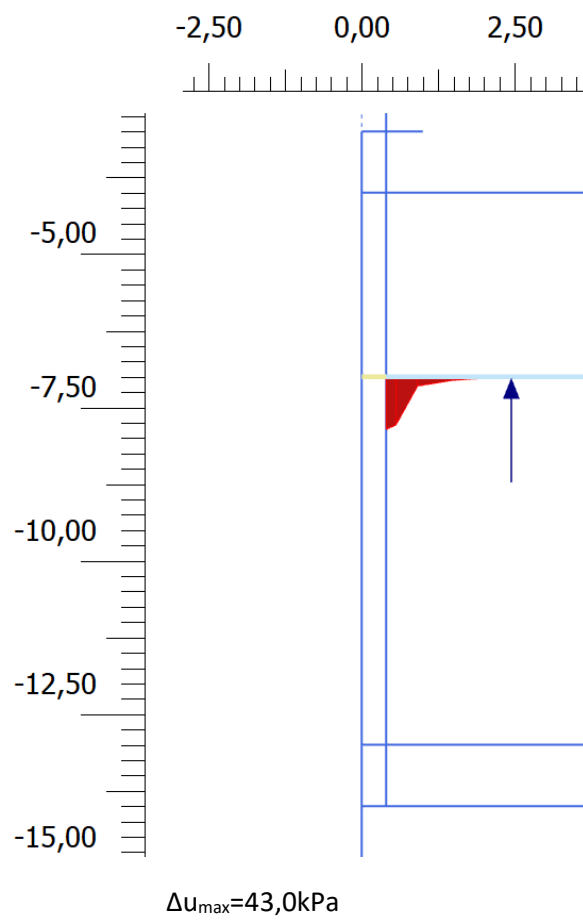
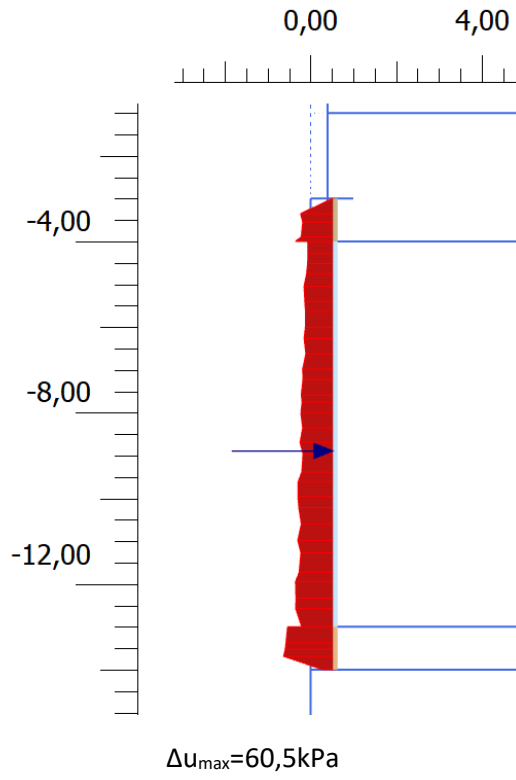


$\epsilon=3\%$, $\psi=0^\circ$

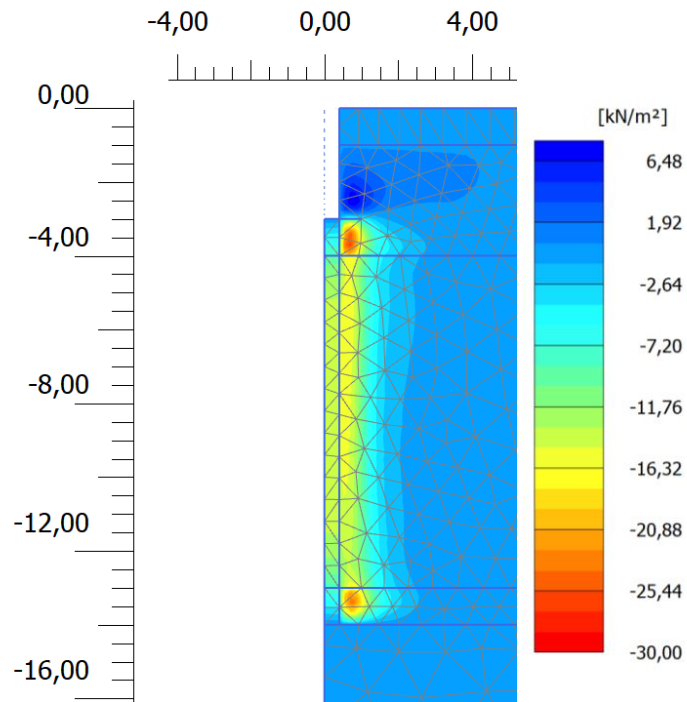
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max}=95,5\text{kPa}$

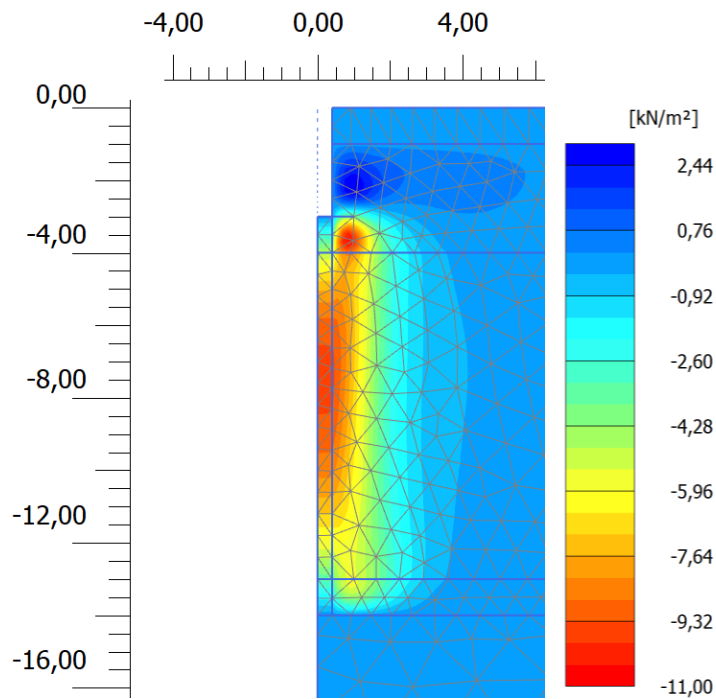


Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



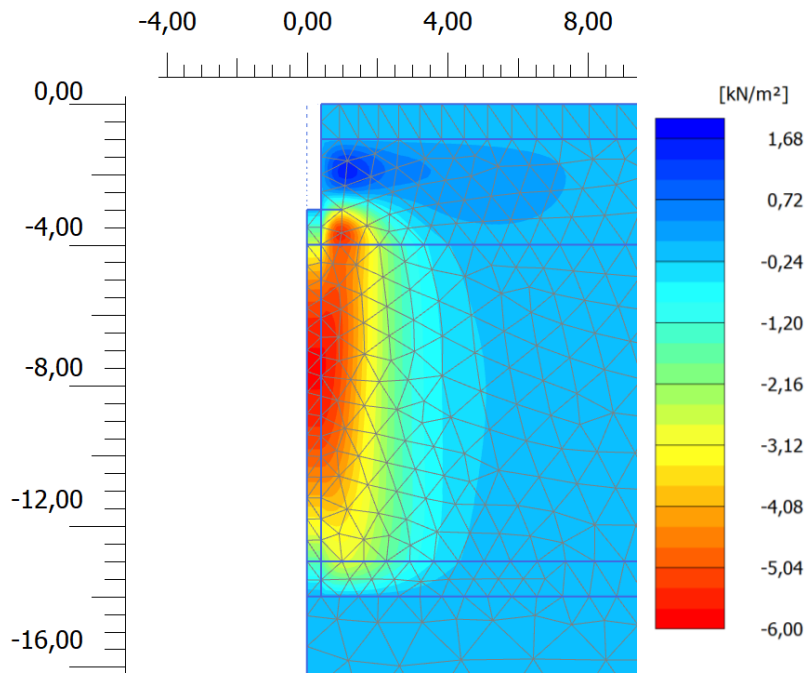
$\Delta u_{\max} = 26,3 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn



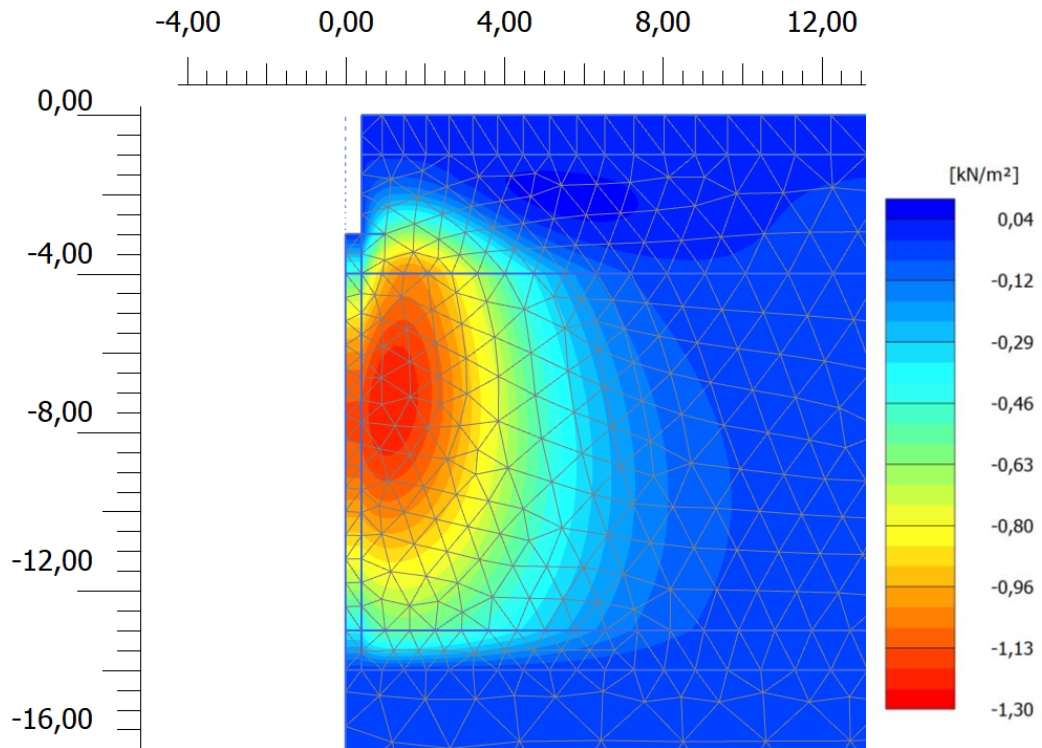
$\Delta u_{\max} = 10,6 \text{ kPa}$

Tilleggs poretrykk etter 10 døgn



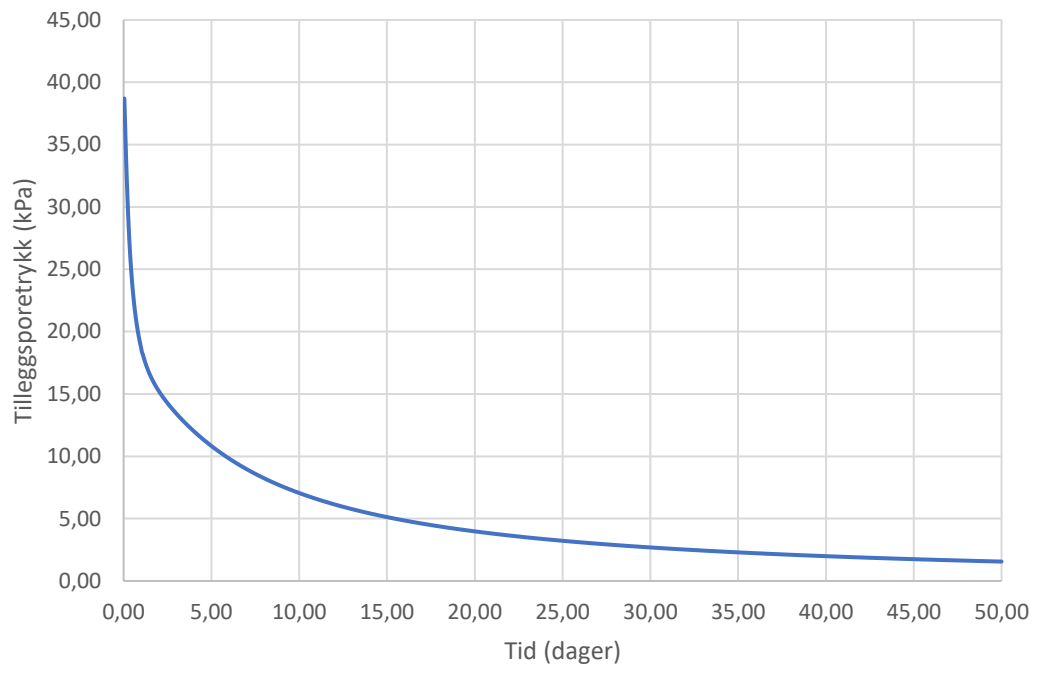
$\Delta u_{\max} = 5,7 \text{ kPa}$

Tilleggs poretrykk etter 50 døgn



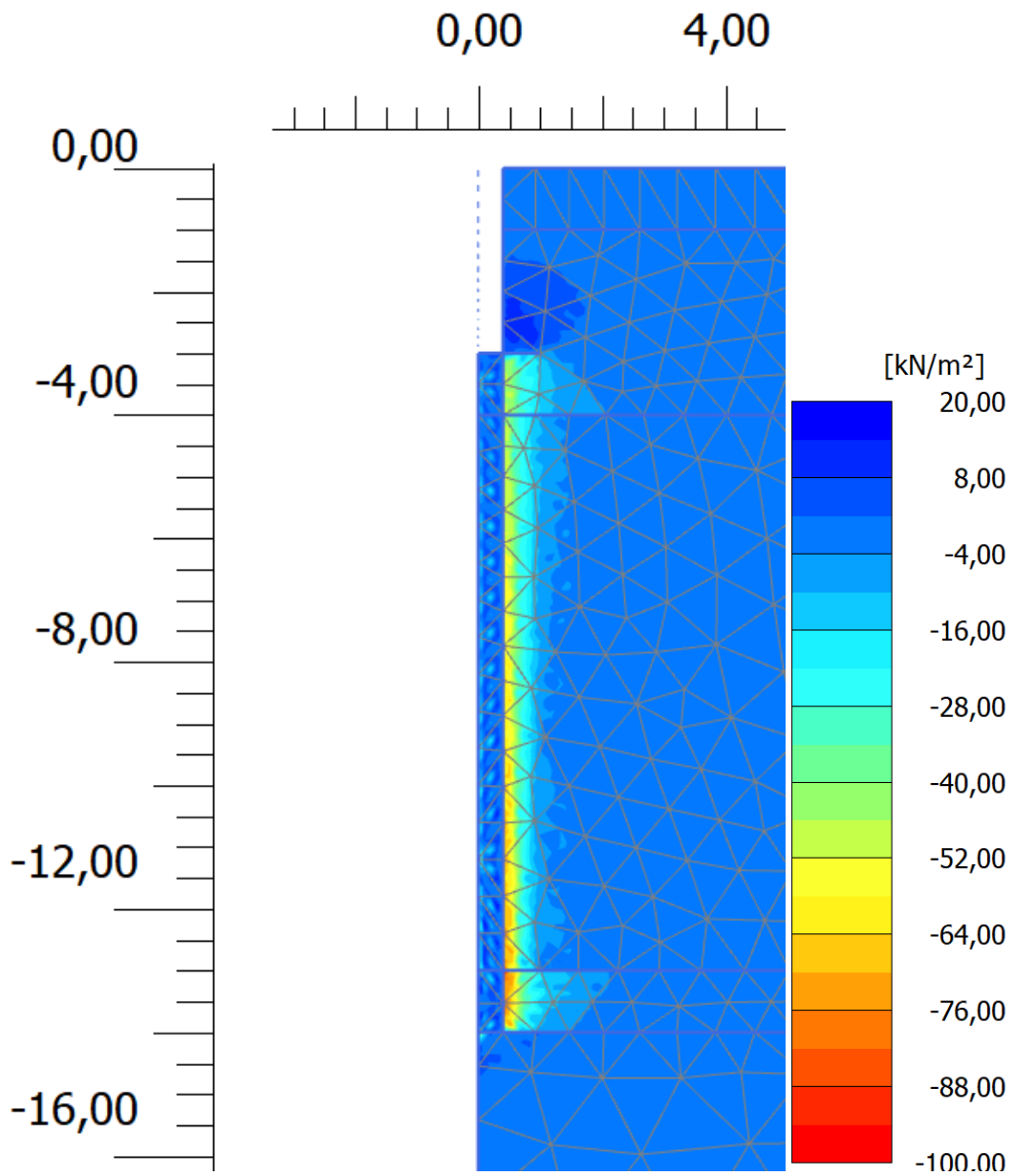
$\Delta u_{\max} = 1,2 \text{ kPa}$

Konsolidering 0-50 dager

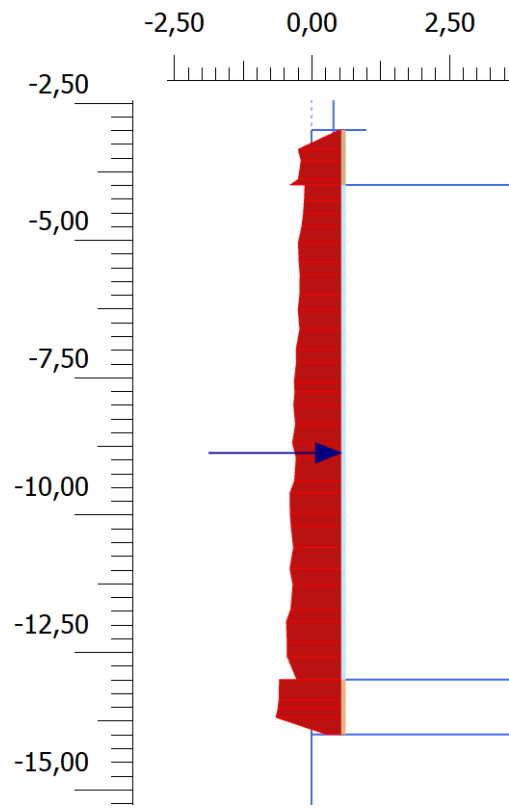


$\epsilon=3\%, \psi=-3^\circ$

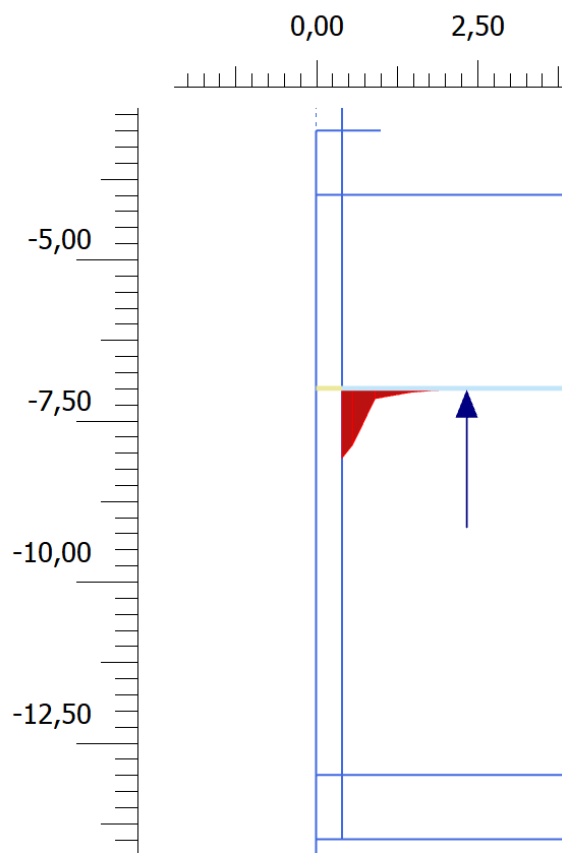
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max}=99,9\text{kPa}$

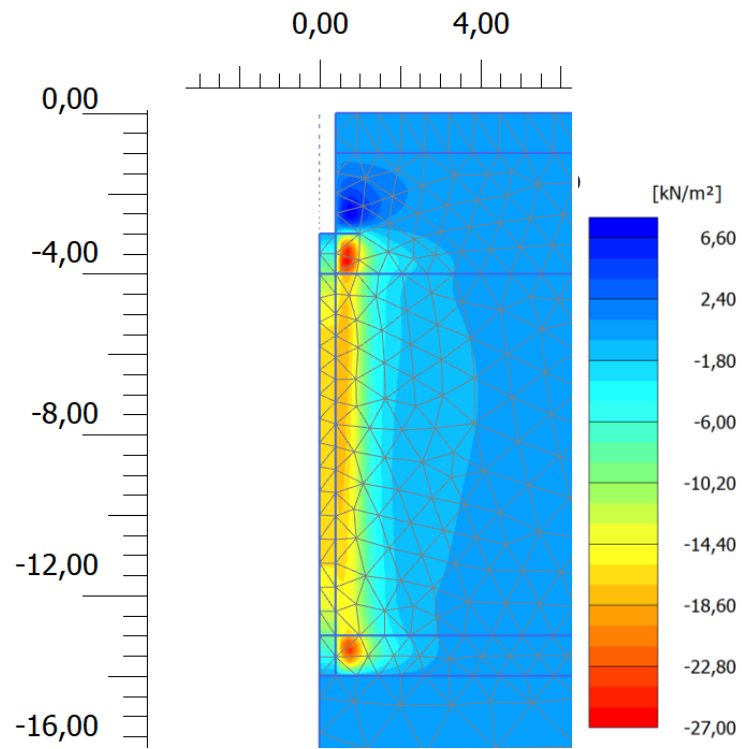


$\Delta u_{\max} = 61,2 \text{ kPa}$



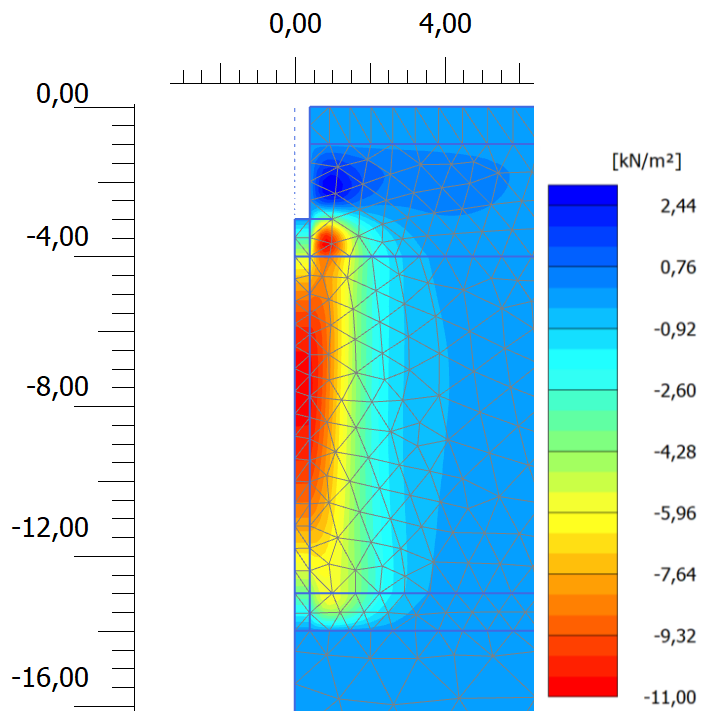
$\Delta u_{\max} = 54,2 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



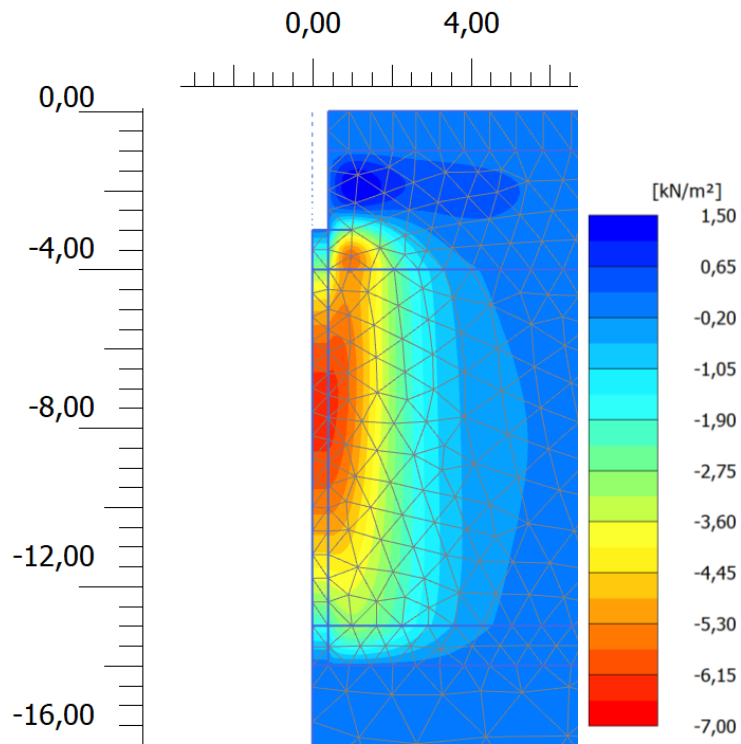
$\Delta u_{\max} = 26,8 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn



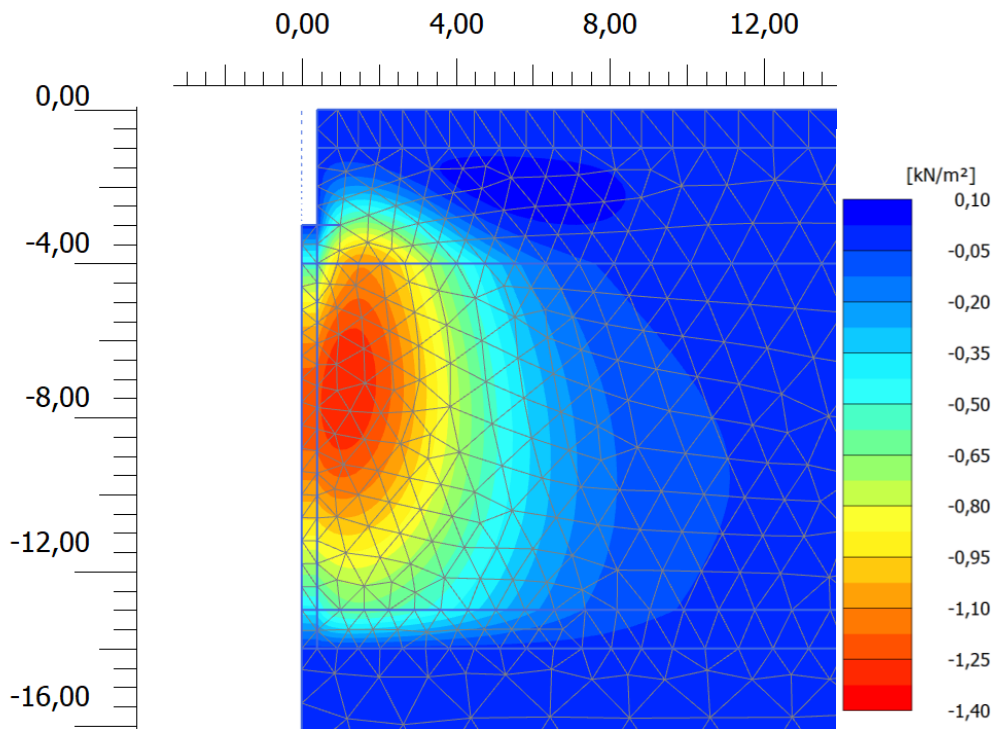
$\Delta u_{\max} = 10,8 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



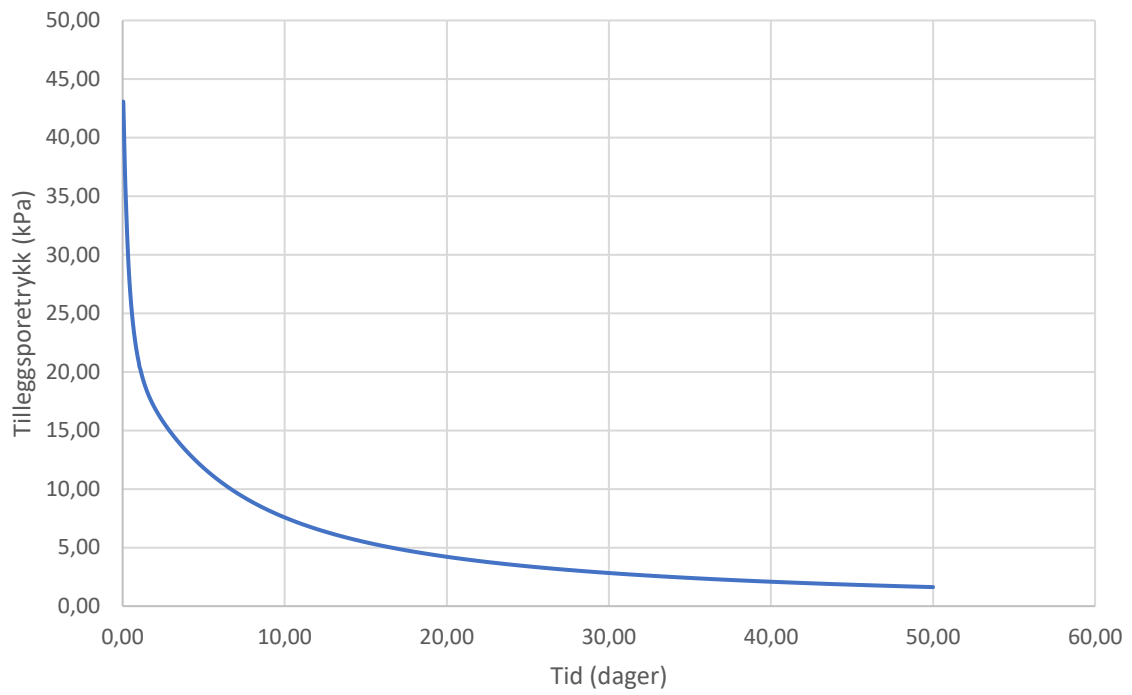
$\Delta u_{\max} = 6,3 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 50 døgn



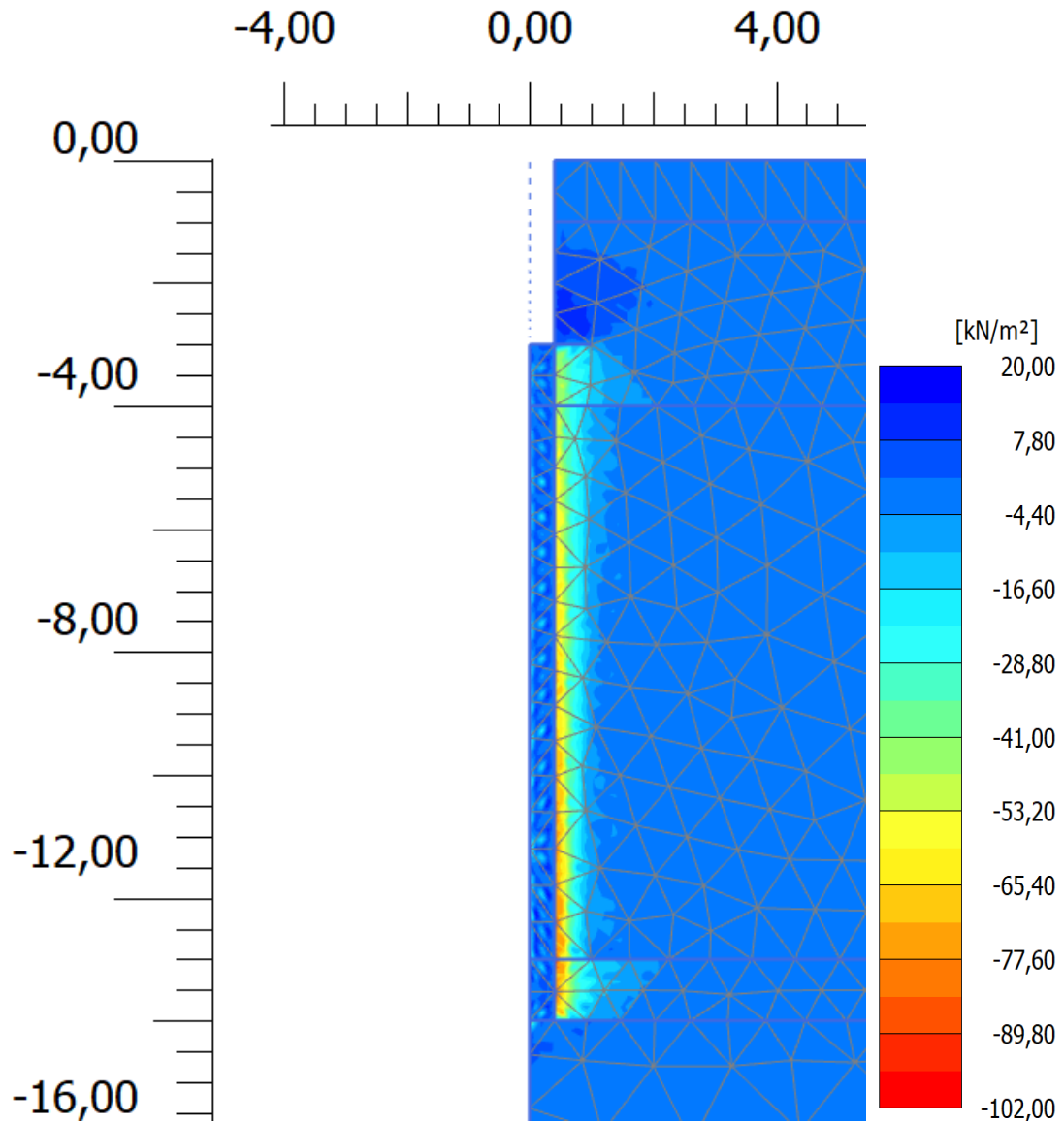
$\Delta u_{\max} = 1,3 \text{ kPa}$

Konsolidering 0-50 dager

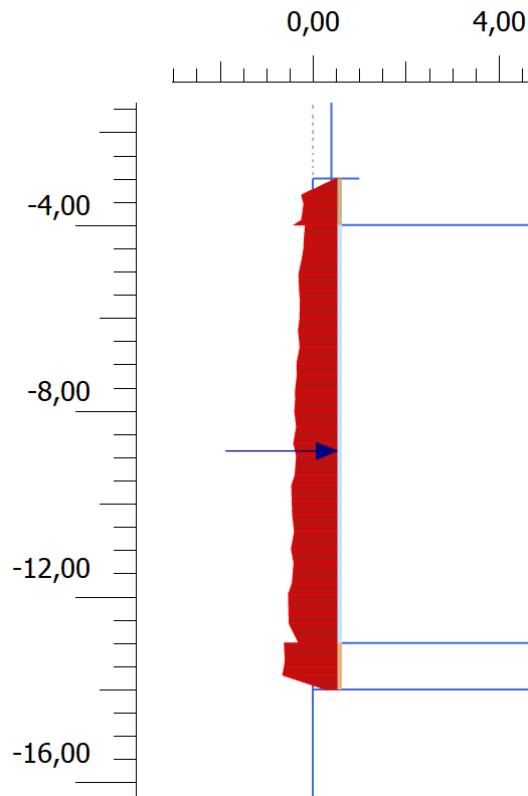


$\epsilon=3\%, \psi=-5^\circ$

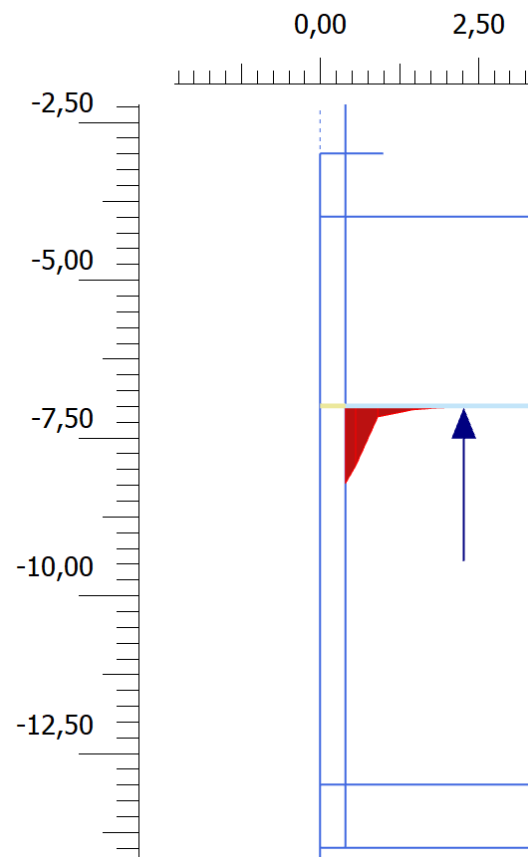
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max}=102,4\text{kPa}$

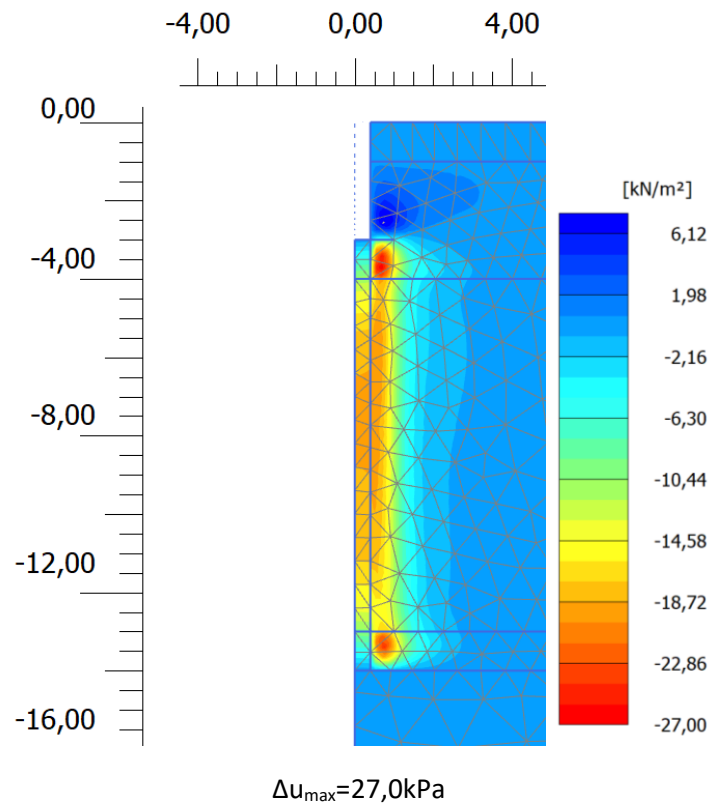


$\Delta u_{\max} = 61,4 \text{ kPa}$

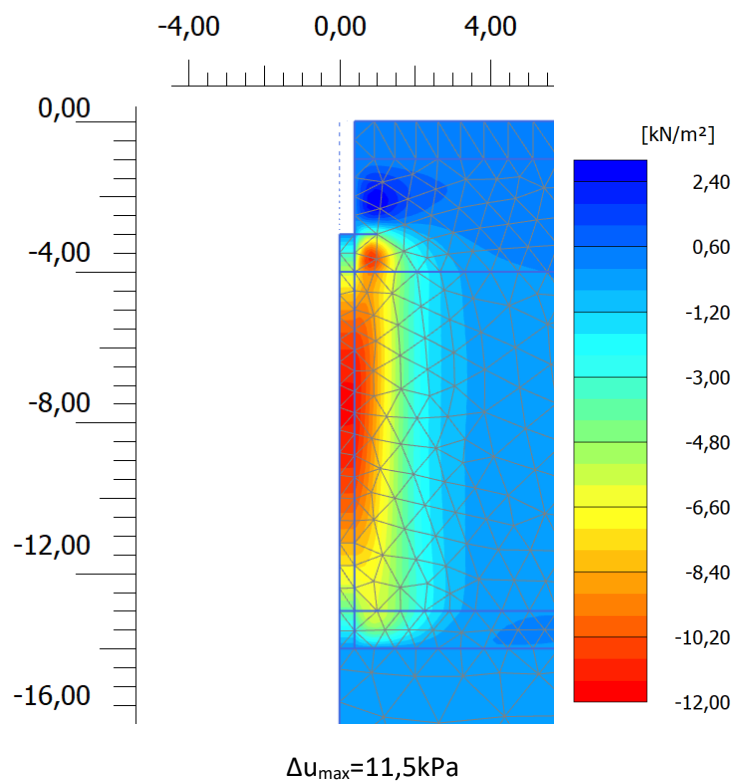


$\Delta u_{\max} = 61,5 \text{ kPa}$

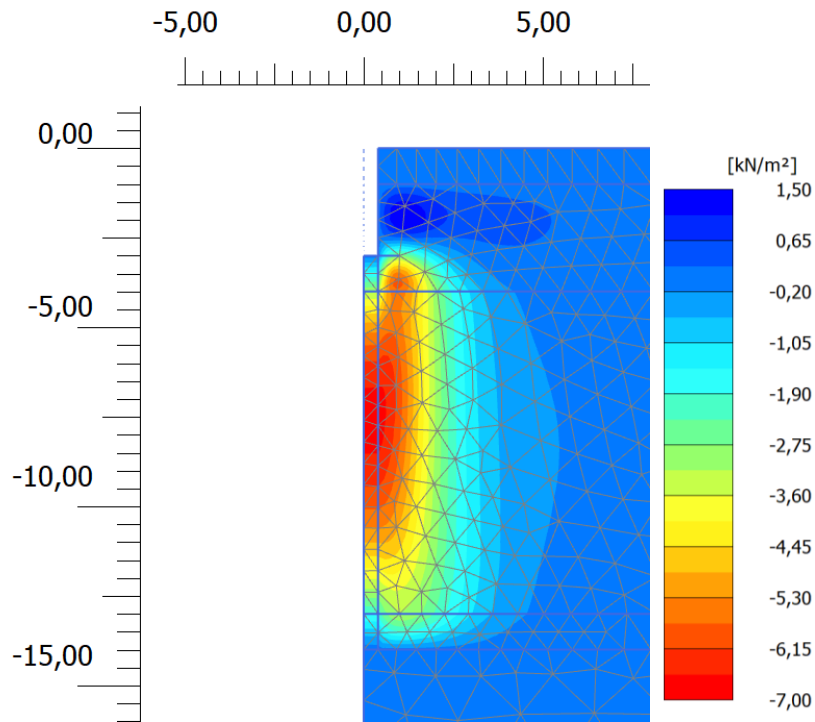
Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



Tilleggsporetrykk etter 5 døgn

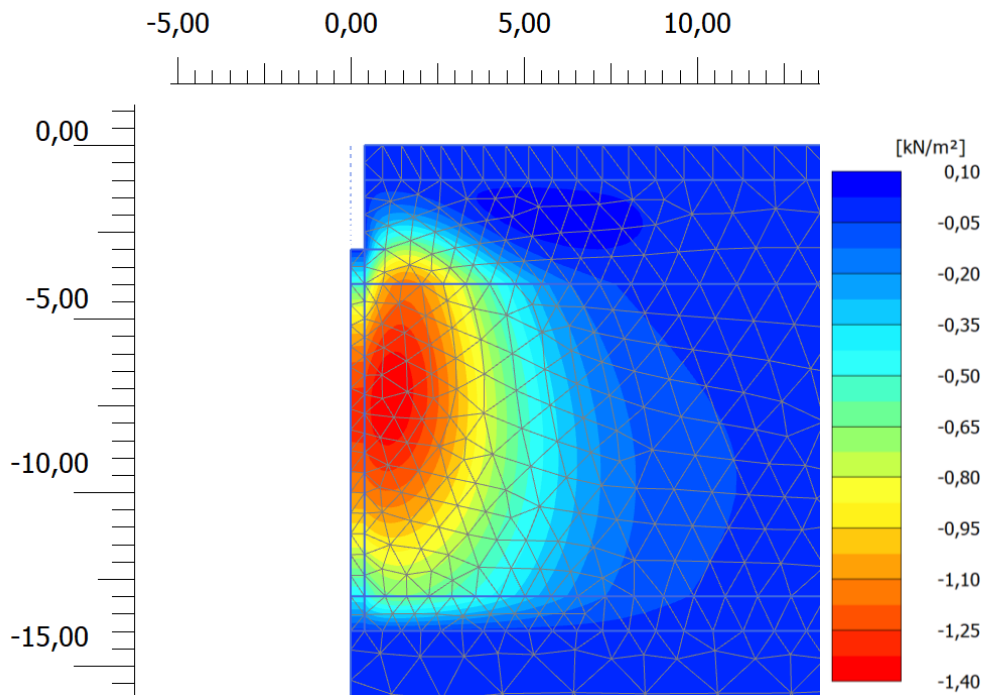


Tilleggs poretrykk etter 10 døgn



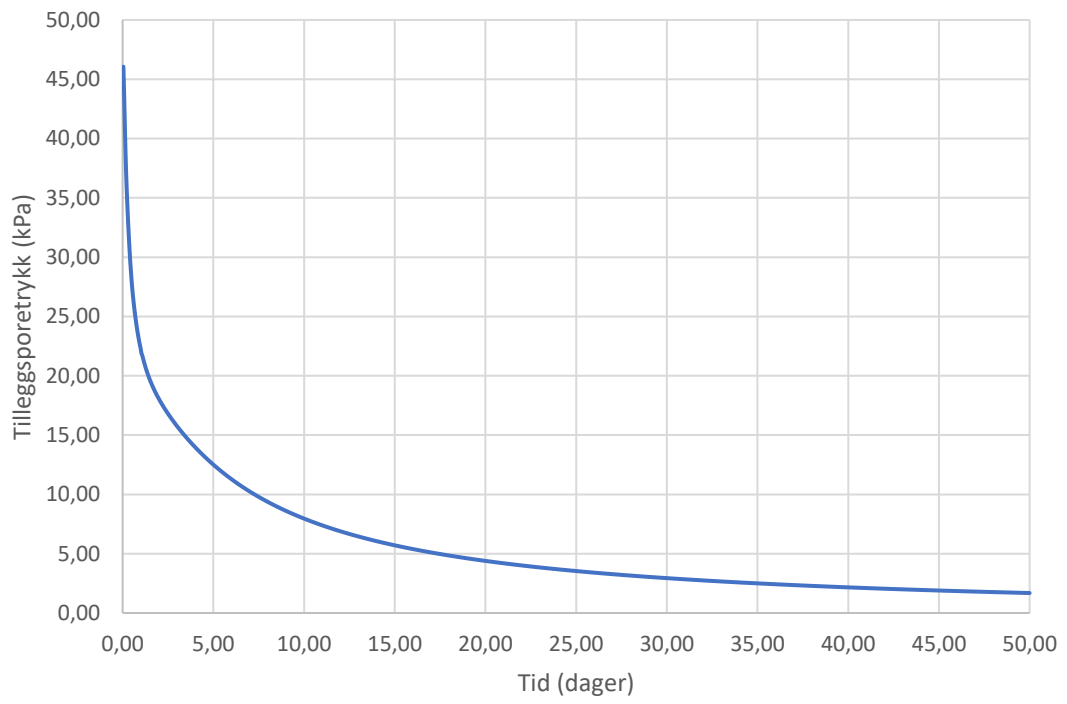
$\Delta u_{\max} = 6,8 \text{ kPa}$

Tilleggs poretrykk etter 50 døgn



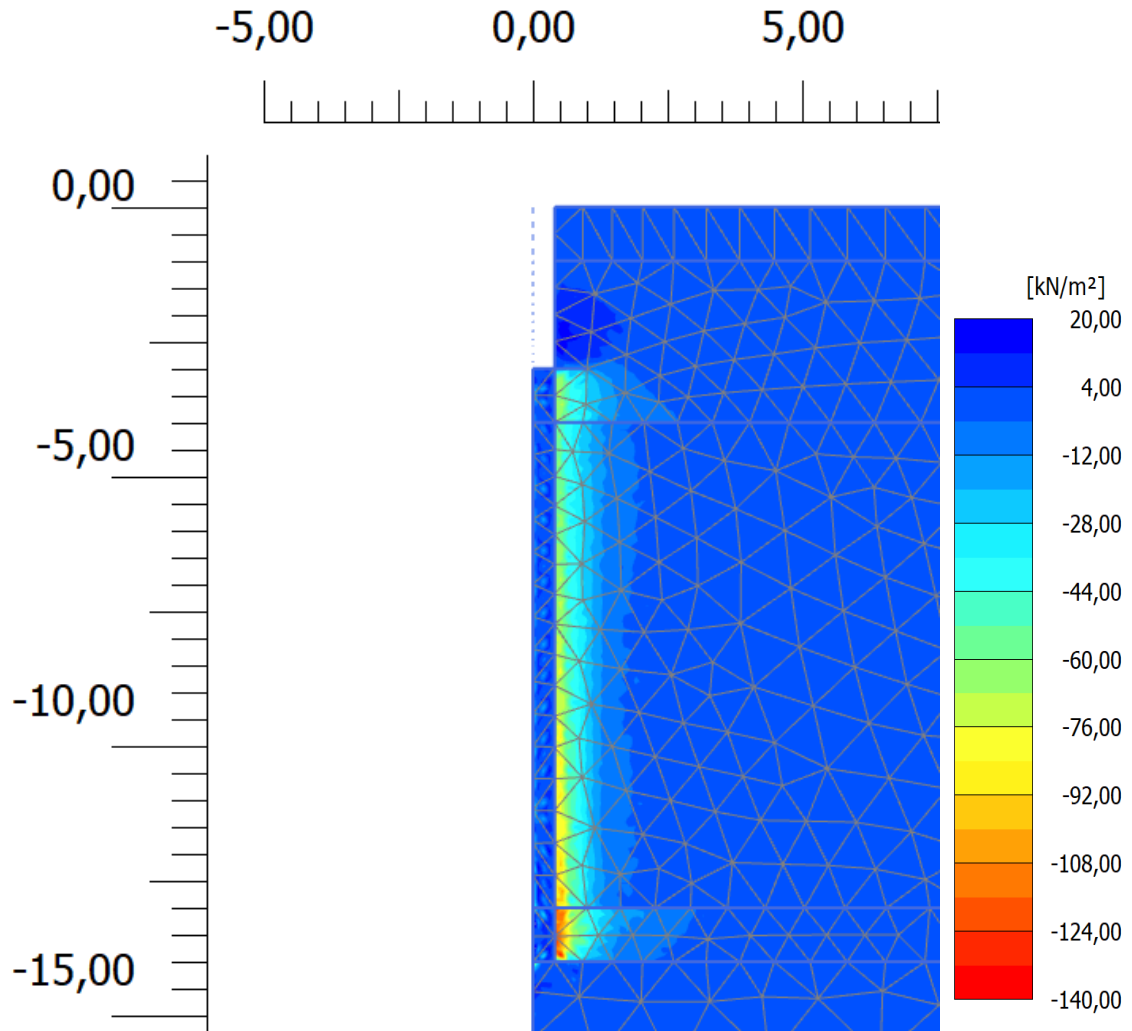
$\Delta u_{\max} = 1,4 \text{ kPa}$

Konsolidering 0-50 dager

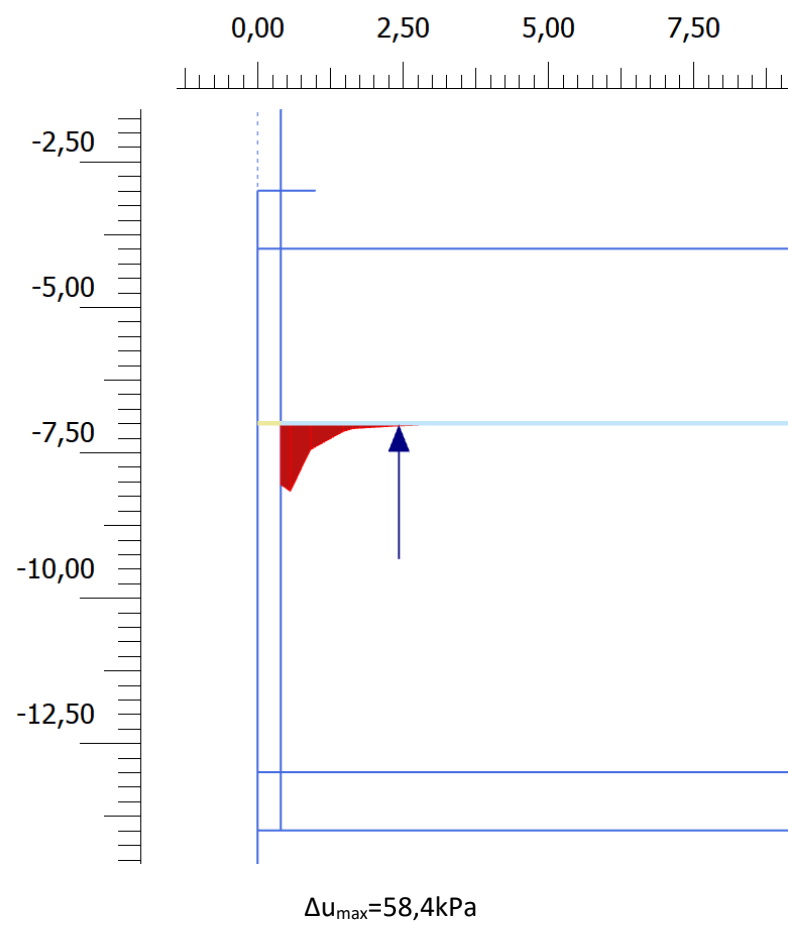
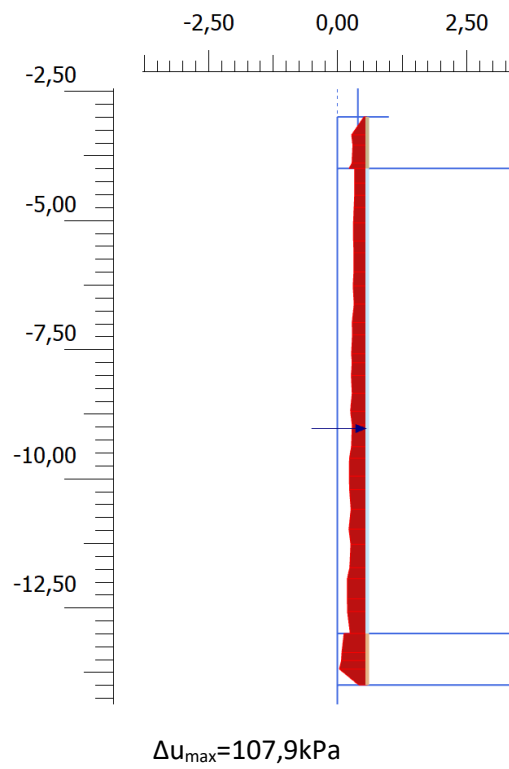


$\epsilon=5\%, \psi=0^\circ$

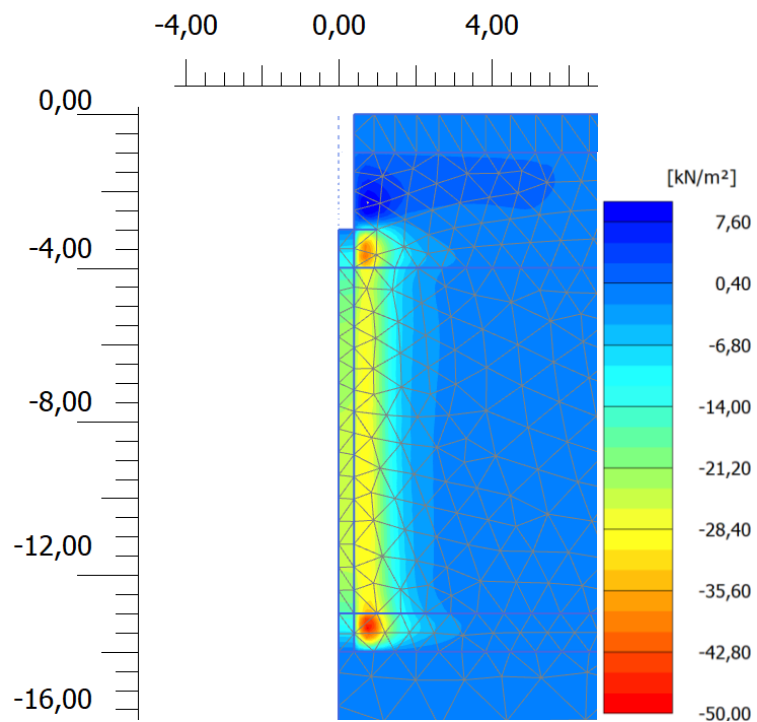
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max} = 139,4 \text{ kPa}$

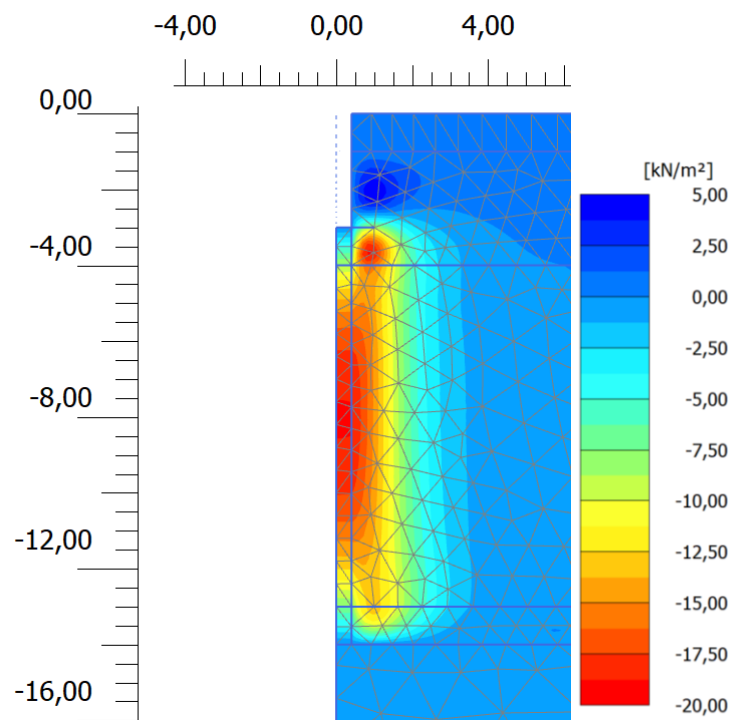


Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



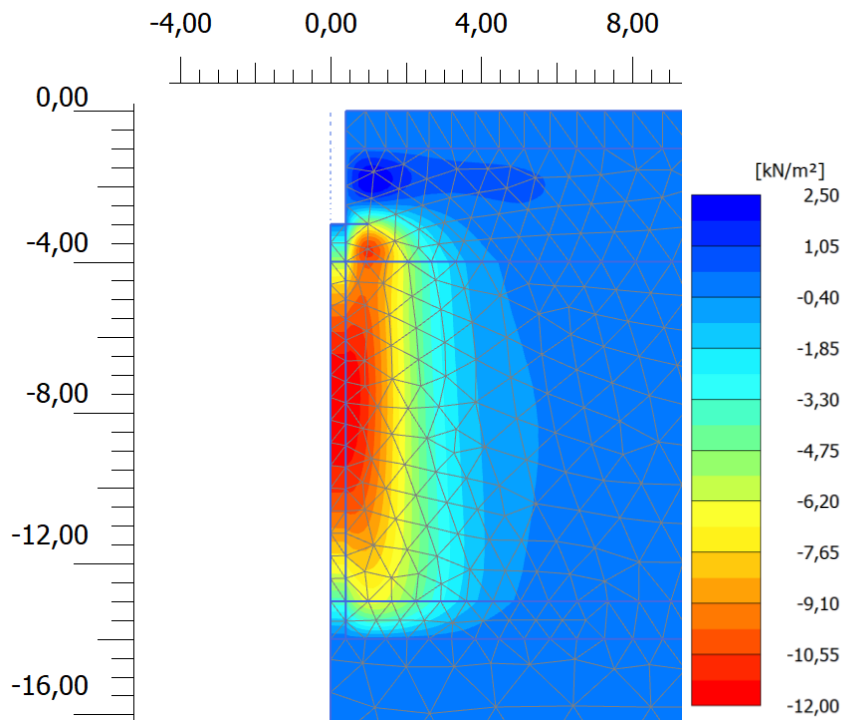
$\Delta u_{\max} = 48,6 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn

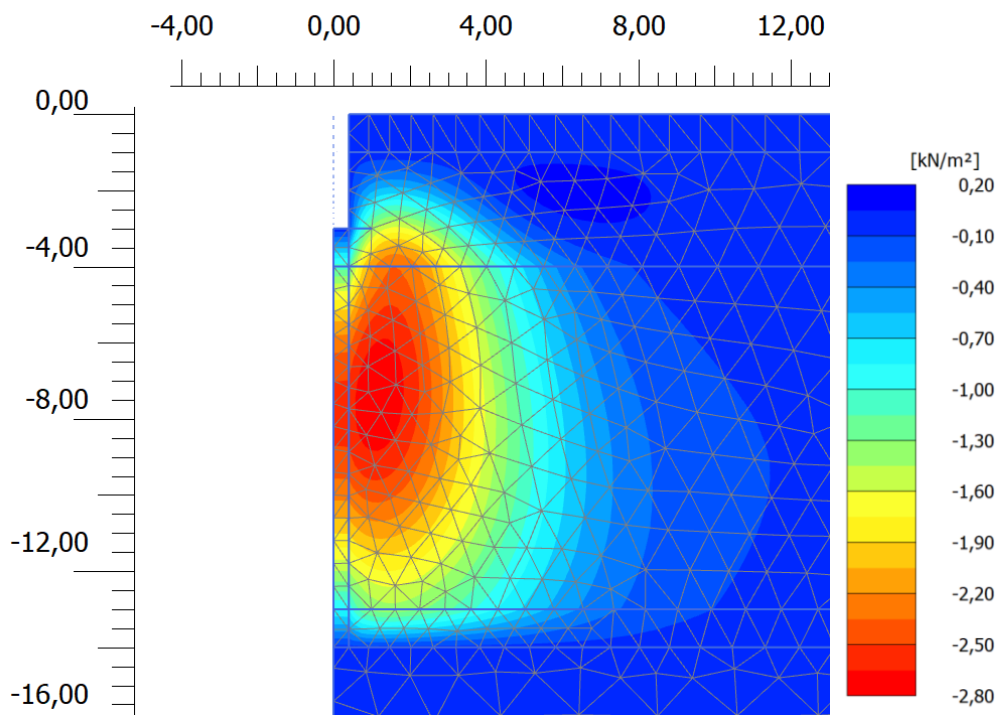


$\Delta u_{\max} = 19,0 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn

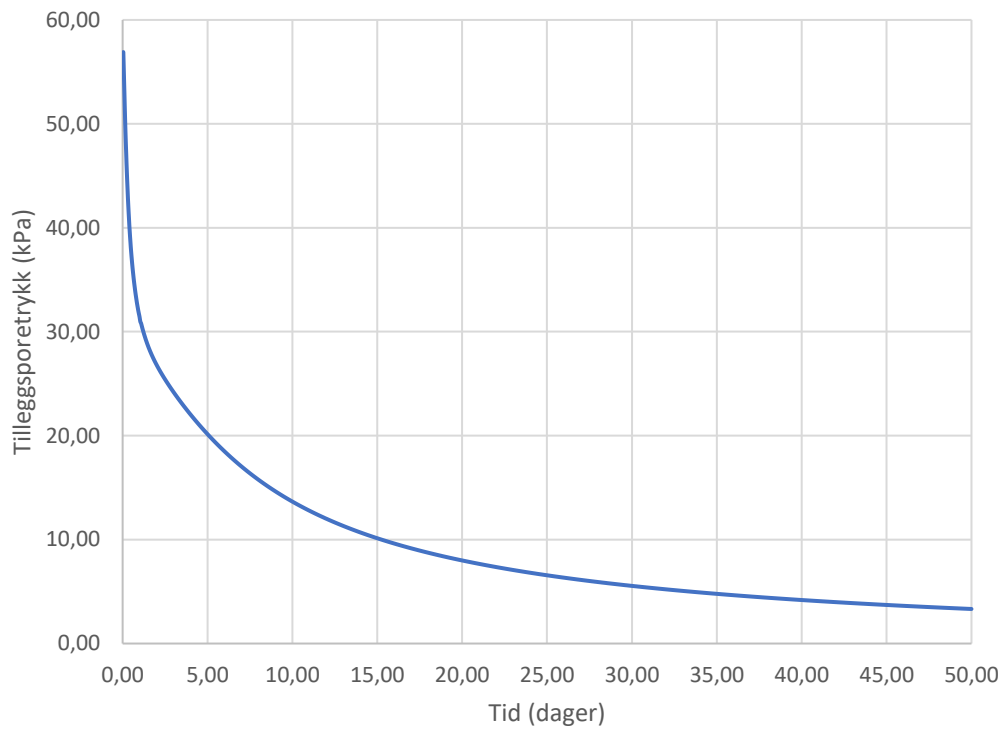


$\Delta u_{\max}=12,0\text{kPa}$



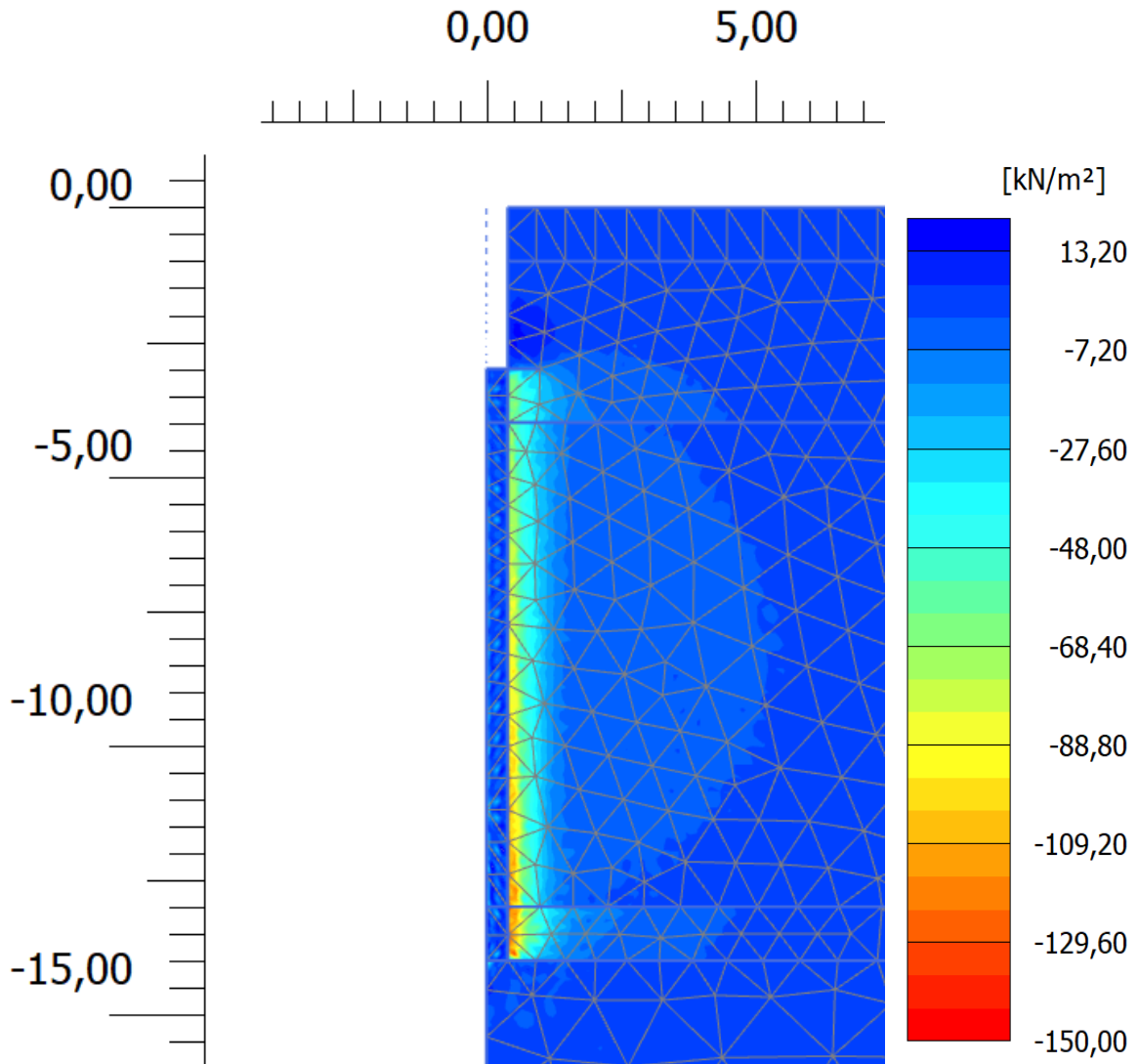
$\Delta u_{\max}=1,6\text{kPa}$

Konsolidering 0-50 dager

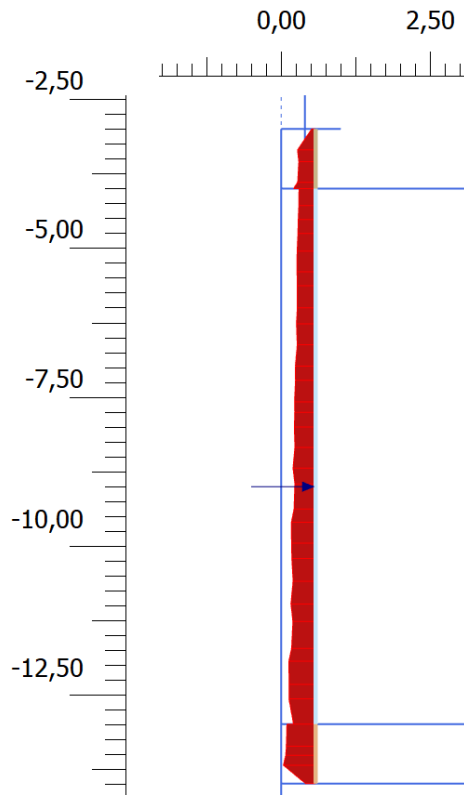


$\epsilon=5\%, \psi=-3^\circ$

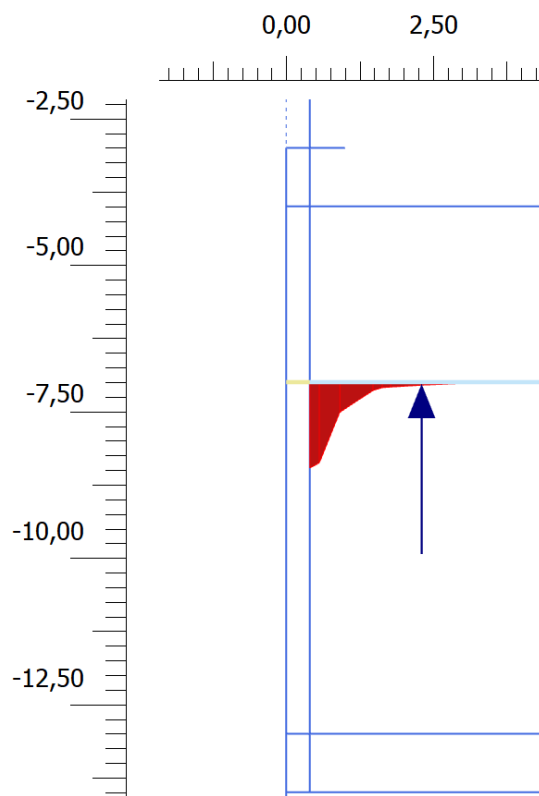
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max}=147,9\text{kPa}$

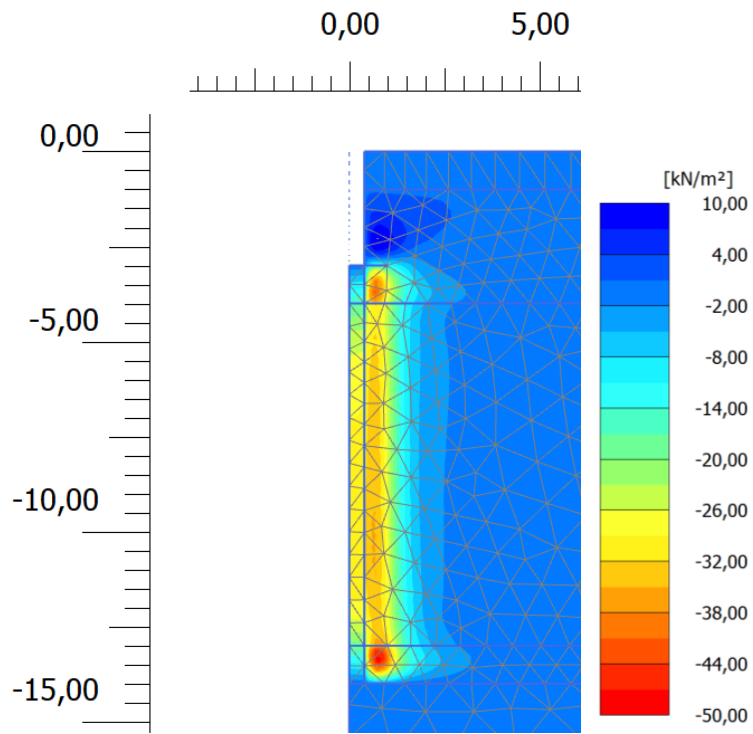


$\Delta u_{\max} = 108,1 \text{ kPa}$



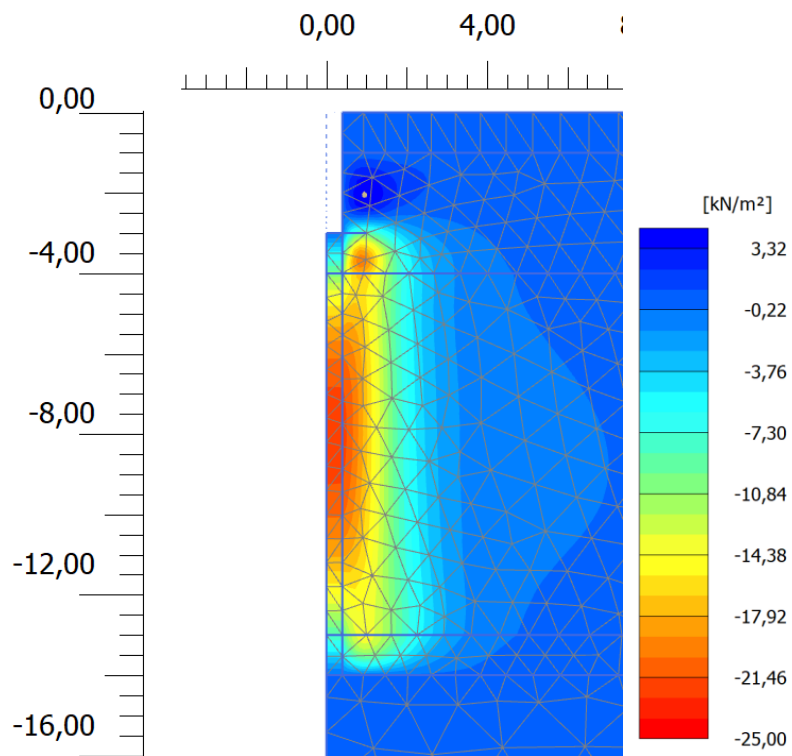
$\Delta u_{\max} = 73,4 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



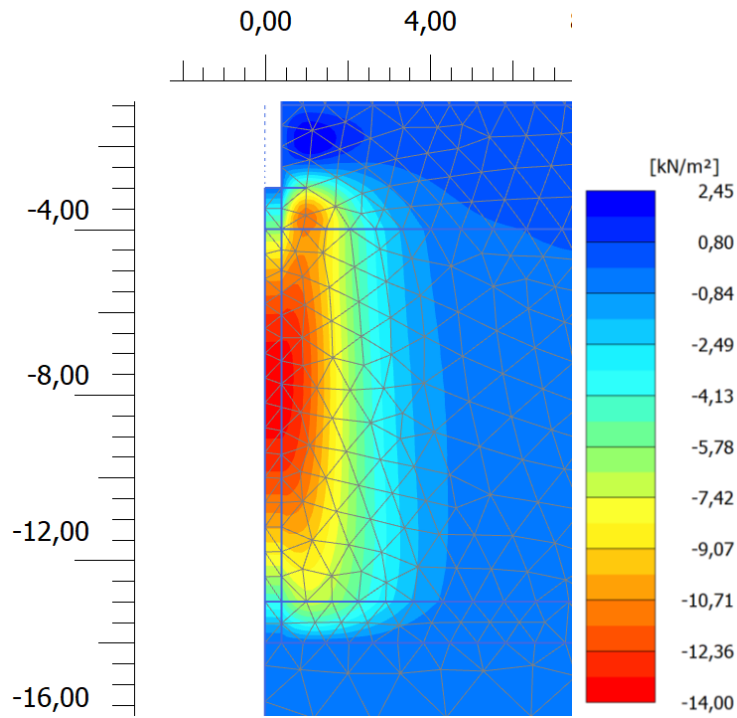
$\Delta u_{\max} = 49,6 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn



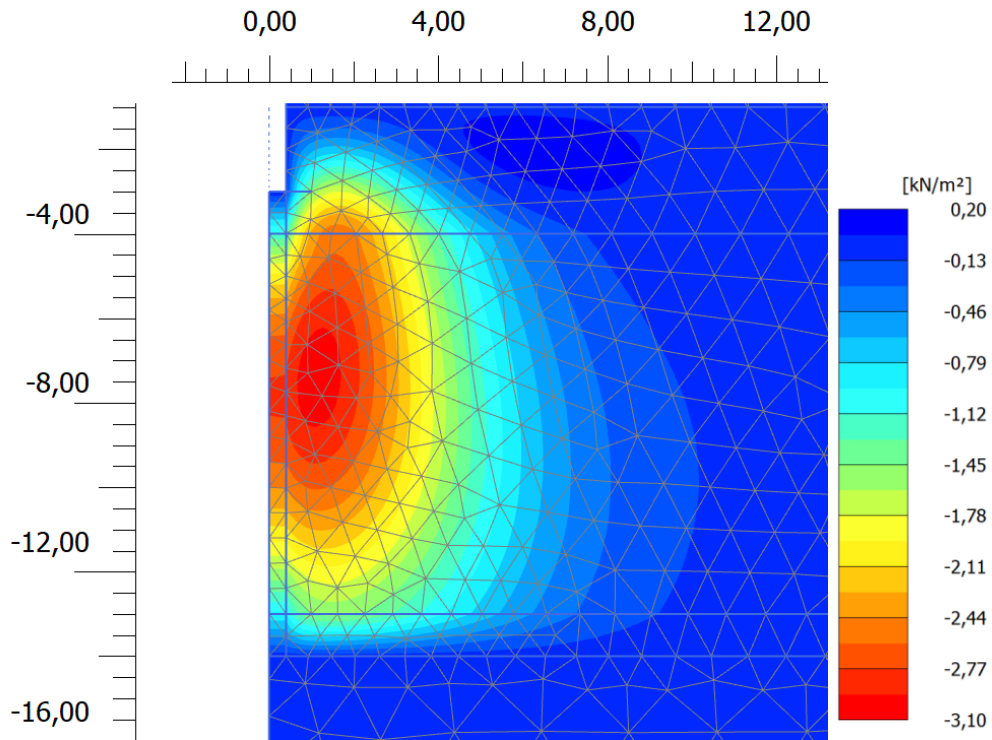
$\Delta u_{\max} = 22,1 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



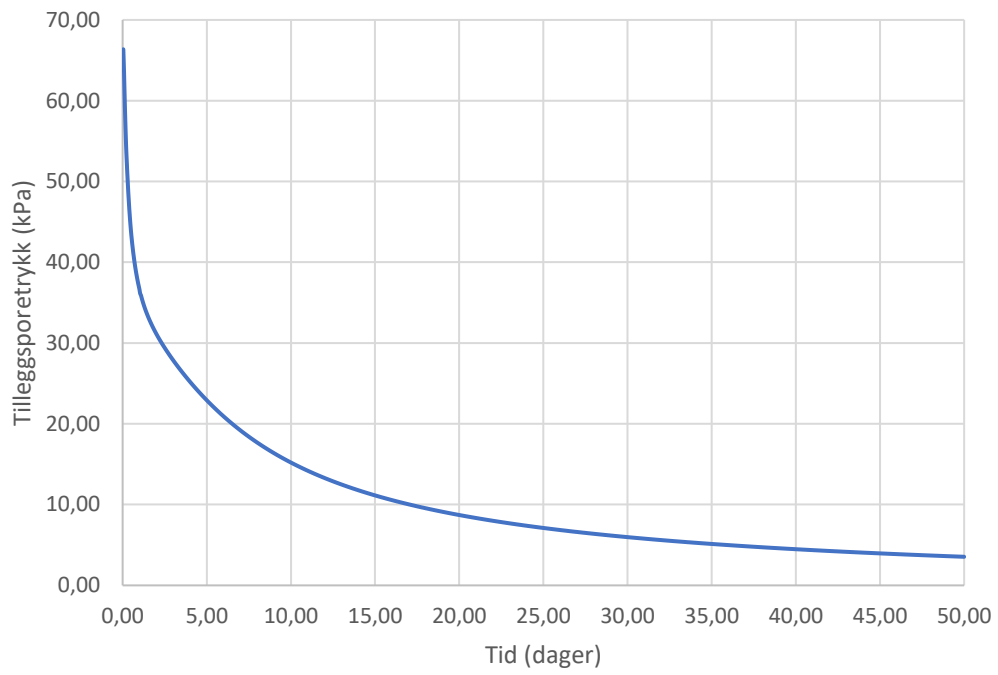
$\Delta u_{\max}=13,7\text{kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 50 døgn



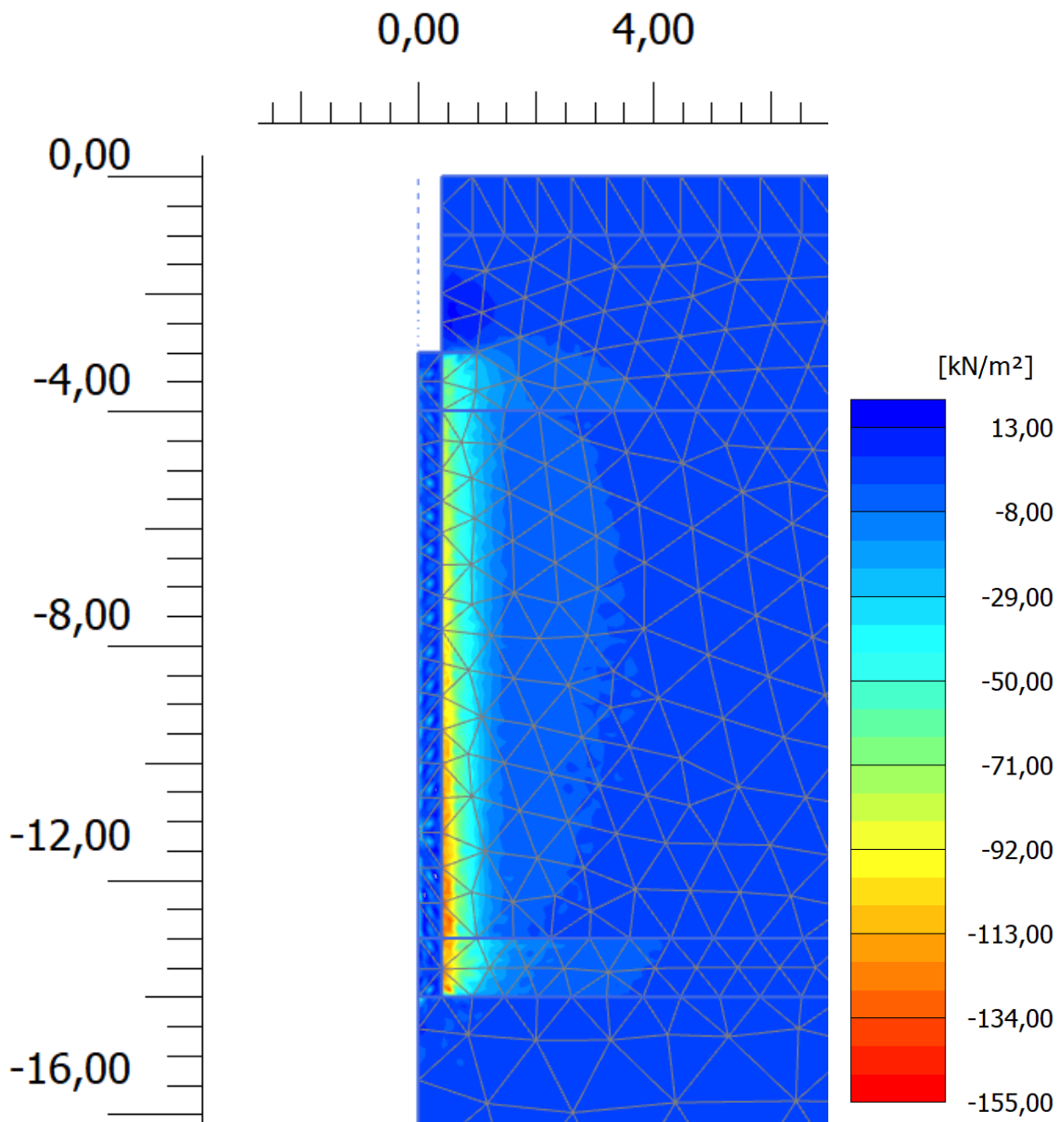
$\Delta u_{\max}=3,0\text{kPa}$

Konsolidering 0-50 dager

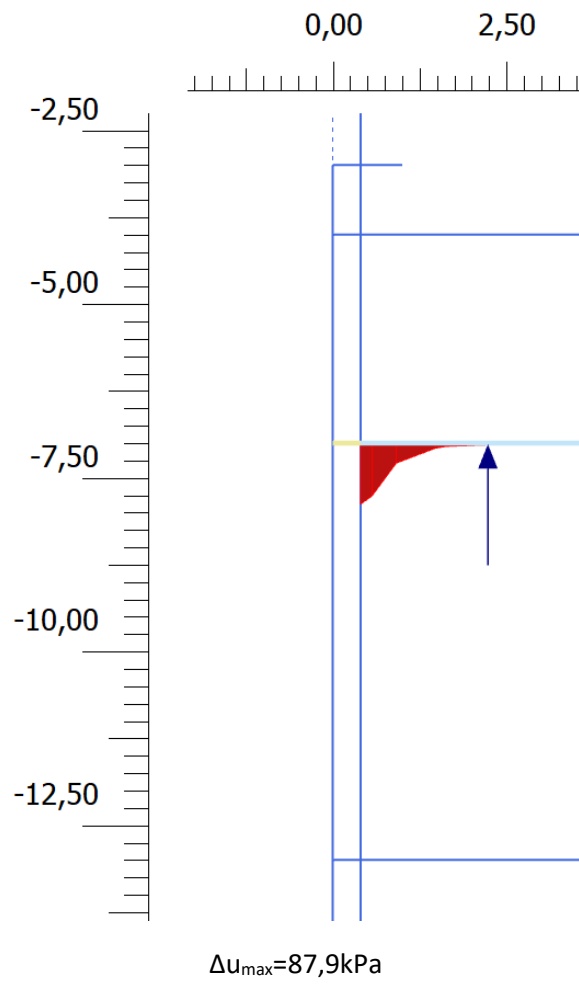
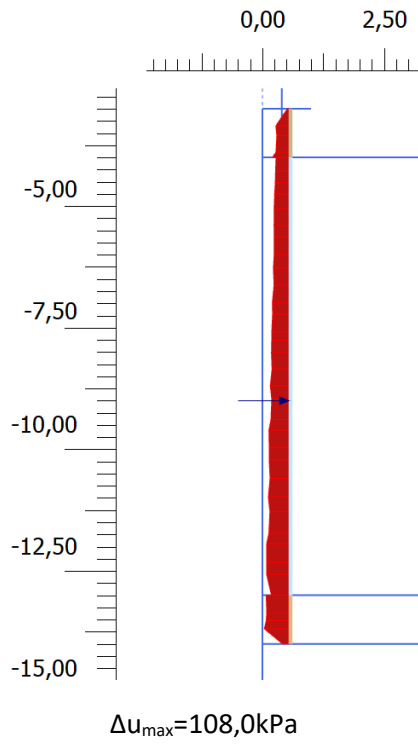


$\epsilon=5\%, \psi=-5^\circ$

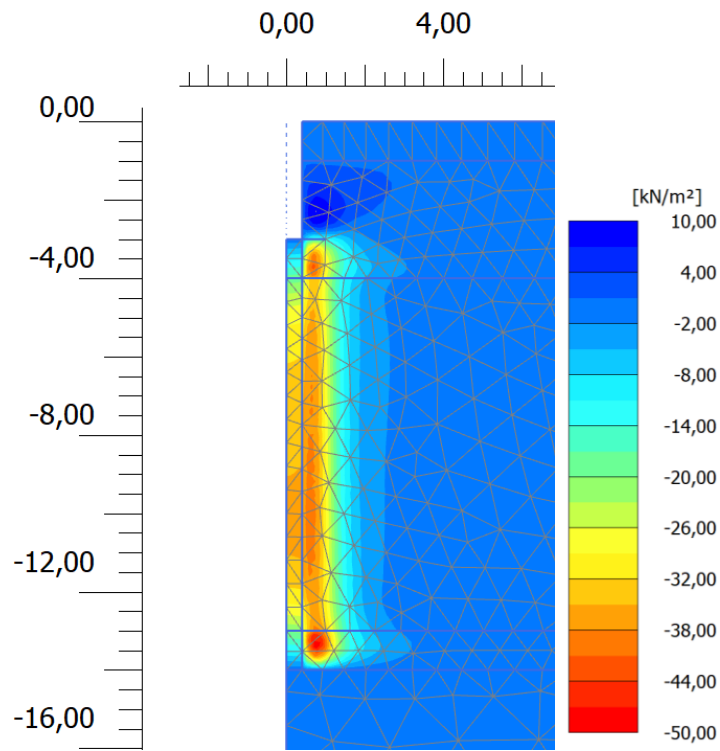
Momentant tilleggsporetrykk



$\Delta u_{\max}=152,7\text{kPa}$

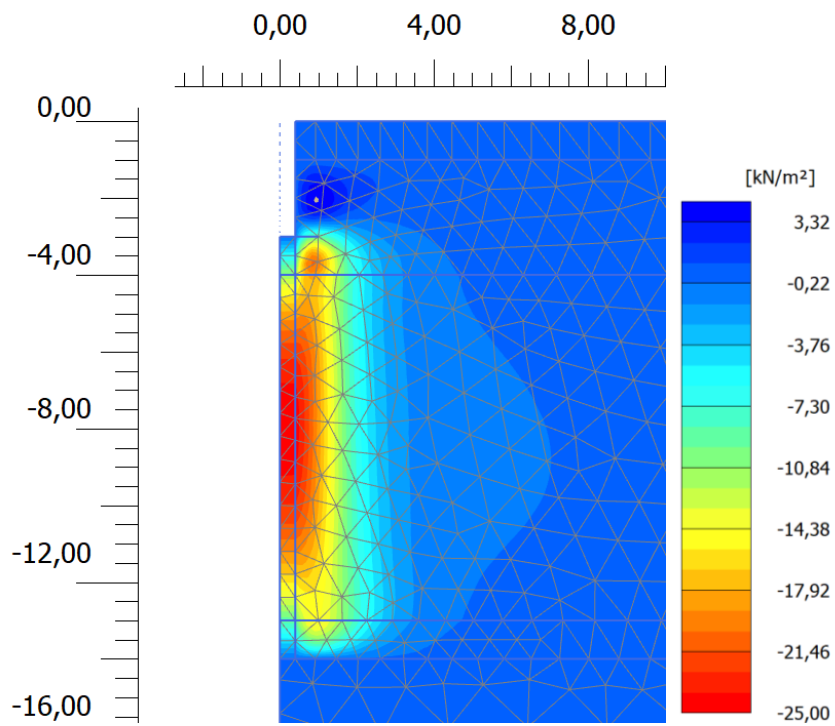


Tilleggsporetrykk etter 1 døgn



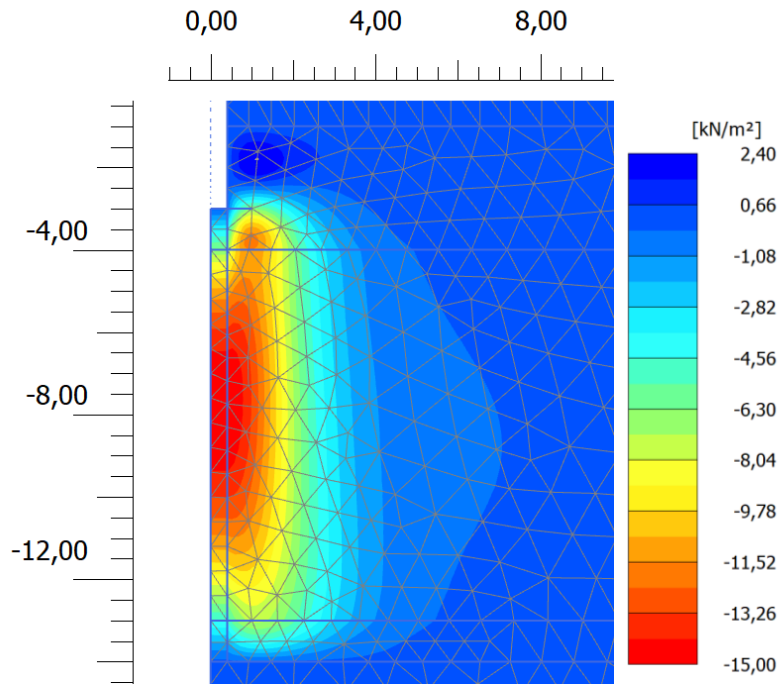
$\Delta u_{\max} = 50,2 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 5 døgn



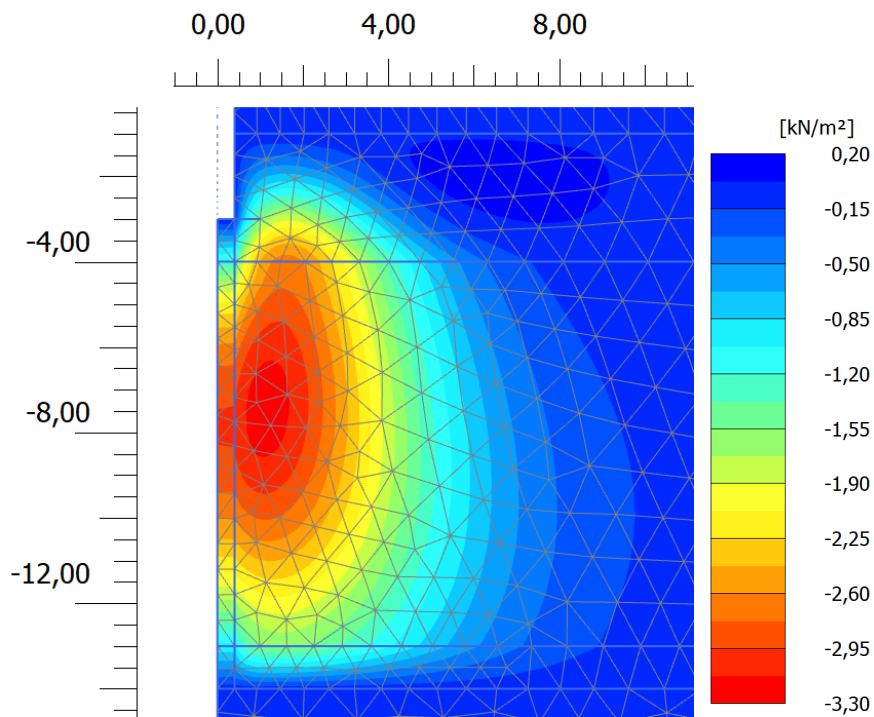
$\Delta u_{\max} = 24,6 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 10 døgn



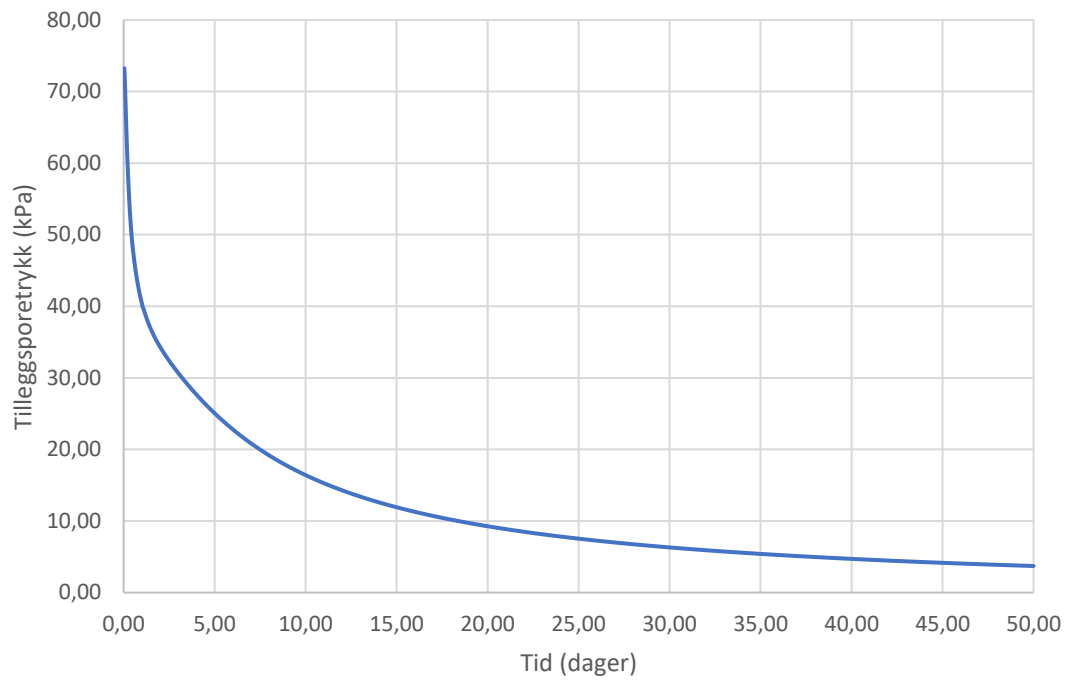
$\Delta u_{\max} = 15,0 \text{ kPa}$

Tilleggsporetrykk etter 50 døgn



$\Delta u_{\max} = 3,2 \text{ kPa}$

Konsolidering 0-50 dager



B.5. Tolkning av parametere for alle lag

Kvikkleire Mohr-Coulomb: undrained A

Tyngdetetthet: $\gamma=21\text{kN/m}^3$ (Fra parameterrapport direkte, innenfor normalområdet på 17-21kN/m³).

Stivhet: $G=4000\text{kN/m}^2$ (Gjennomsnittet av alle G_{50} fra treks i kvikkleirelaget i relevant område ved S9).

Stivhetsøkning med dybden: 0. (Ser ikke ut som stivhet øker med dybden i kvikkleirelaget ut fra data fra Treks i parameterrapport).

Friksjonsvinkel og udrenert styrke: $s_u=40\text{kPa}$ (fra tolket s_u -profil i parameterrapport). Tolket s_u -profil i parameterrapport gir ikke økning av s_u med dybden i kvikkleirelaget. For å finne friksjonsvinkel, er det tenkt at s_u øker jevnt med dybden, men fortsatt med middelvei 40kPa. I parameterrapport er det gitt friksjonsvinkel $\varphi=20^\circ$. Dette oppnås om $s_u=38,4\text{kPa}$ i topp kvikkleirelag og $s_u=41,6\text{kPa}$ i bunn kvikkleirelag. Sjekk dette med metode fra geoteknikk videregående kurs og får ca. 20° .

Kohesjon: $c=1,82$. ($a=5\text{kPa}$ gitt i parameterrapport)

Poissons tall: $\nu'=0,3$ Skal bruke lav verdi av ν , for å få rett forhold mellom E og G.

Permeabilitet: antar $k_x=k_y=c_v*\gamma_w/M=0,000026$. ($c_{v,OC}=38\text{m}^2/\text{år}$ og $M=4000\text{kPa}$ er gitt i parameterrapport). Bruker $c_{v,OC}$ fordi i -7m ser det ut til å være spenningsnivå under pc' (men ikke med god margin).

Hviletrykkskoeffisient: $K_0=0,7$ (Gitt i parameterrapport). OBS, får 0,8 hvis jeg bruker ligning gitt i Håndbok V220 fra Statens vegvesen.

Siltig leire (to lag) Mohr-Coulomb: undrained A

Tyngdetetthet: $\gamma=21\text{kN/m}^3$ (fra parameterrapport direkte)

Stivhet: $G=5000\text{kPa}$ for øvre lag (Litt høyere enn G for kvikkleirelaget) og 6000kPa for nedre lag (litt høyere pga. ligger dypere).

Stivhetsøkning med dybden: forenkler og velger at det ikke er stivhetsøkning med dybden.

Friksjonsvinkel: $\varphi=28^\circ$ (Gitt i parameterrapport)

Kohesjon: $c=2,65$. ($a=5\text{kPa}$ gitt i parameterrapport)

Dilatansvinkel: $\psi=0$ alltid.

Poissons tall: $\nu'=0,3$. Se over.

Permeabilitet: antar $k_x=k_y=c_v*\gamma_w/M=0,0000082$. ($c_{v,OC}=12\text{m}^2/\text{år}$ og $M=4000\text{kPa}$ er gitt i parameterrapport).

Hviletrykkskoeffisient: $K_0=0,7$ (Brukte samme som for kvikkleira)

Tørrskorpeleire: drained

Tyngdetetthet: 19kN/m^3 (Fra parameterrapport direkte).

Stivhet: $E'=6000\text{kPa}$ (Multiconsult, 2019a).

Stivhetsøkning med dybde: nei

Friksjonsvinkel: $\varphi=30^\circ$ (fra parameter rapport)

Kohesjon: $c=2,9$ (Fra parameter rapport (har $a=5$ og ϕ). Stemmer ikke overens med det Multi har brukt i spuntberegningen)

Dilatansvinkel: $\psi=0$

Poissons tall: $\nu=0,3$ (fordi drenert).

Permeabilitet: antar $k_x=k_y=0,1$. (Valgte en høy verdi).

Hviletrykkskoeffisient: $K_0=0,7$ (Antatt OCR og brukte Jakys ligning). Pga. $OCR>1$, $K_0>0,5$.

Sand og grus: drained

Tyngdetetthet: $\gamma=18\text{kN/m}^3$ (fra parameter rapport).

Stivhet: $E'=20000\text{kPa}$. ($E_{50}=E_{50}^{ref}*\text{sqrt}(\sigma_v/p_{ref})$). Antar $E_{50}^{ref}=50000\text{kPa}$).

Stivhetsøkning med dybden: nei

Friksjonsvinkel: $\varphi=35^\circ$ (fra parameter rapport).

Kohesjon: $c=0$ (Fra parameter rapport, $a=0$)

Dilatansvinkel: $\psi=0$

Poissons tall: $\nu=0,3$ (pga. drained)

Permeabilitet: $k_x=k_y=2,7\text{m}^2/\text{døgn}$ (Fra erfaringsverdier SVV, midt i intervallet, $k=1000\text{m}^2/\text{år}$)

Hviletrykkskoeffisient: $K_0=0,5$ (Antatt)

KS-pel: drained

Tyngdetetthet: $\gamma=22\text{kN/m}^3$ (Økes litt pga. tilfører masse, 60kg/m^3 basert på beregning av tilført masse)

Stivhet: $G=2800\text{kPa}$ (Info fra Multiconsult om egenskaper av installerte KS-peler etter 4 døgn, treaks).

Friksjonsvinkel: $\varphi=47^\circ$ (Fra info om KS-pel etter 4 døgn (rest), treaks).

Kohesjon: $c=11\text{kPa}$ (Info fra Multiconsult om KS-pel etter 4 døgn, $a=10\text{kPa}$, treaks)

Dilatansvinkel: $\psi=0$

Poissons tall: $\nu=0,3$ (fordi drained).

Permeabilitet: $k_x=k_y=0,0008\text{m}^2/\text{døgn}$ (1-100 ganger større enn for omkringliggende leire i følge KS-veileder).

Hviletrykkskoeffisient: $K_0=0,9$ (Info om KS-pel etter 4 døgn, treaks).

Kvikkleire Hardening Soil: undrained A

Tyngdetetthet: $\gamma=21\text{kN/m}^3$ (Fra parameterrapport direkte).

Stivhet: $E^{50}=12000\text{kN/m}^2$ ($3 \cdot G^{50}$)

Stivhetsøkning med dybden: 0. (Ser ikke ut som stivhet øker med dybden i kvikkleirelaget ut fra data fra Treaks i parameterrapport).

Friksjonsvinkel: $s_u=40\text{kPa}$ (fra tolket s_u -profil i parameterrapport). Tolket s_u -profil i parameterrapport gir ikke økning av s_u med dybden i kvikkleirelaget. For å finne friksjonsvinkel, er det tenkt at s_u øker jevnt med dybden, men fortsatt med middelvei 40kPa. I parameterrapport er det gitt friksjonsvinkel $\varphi=20^\circ$. Dette oppnås om $s_u=38,4\text{kPa}$ i topp kvikkleirelag og $s_u=41,6\text{kPa}$ i bunn kvikkleirelag. Sjekket dette med Steinars metode fra geo-vk og får ca. 20° da også.

Kohesjon: $c=1,82$. ($a=5\text{kPa}$ gitt i parameterrapport)

Poissons tall: $\nu_{ur}=0,2$ (Ofte mellom 0,1 og 0,2)

Permeabilitet: antar $k_x=k_y=c_v \cdot \gamma_w/M=0,000026$. ($c_{v,oc}=38\text{m}^2/\text{år}$ og $M=4000\text{kPa}$ er gitt i parameterrapport). Bruker $c_{v,OC}$ fordi i -7m ser det ut til å være spenningsnivå under p_c' (men ikke med god margin).

Hviletrykkskoeffisient: $K_0=0,7$ (Gitt i parameterrapport).

Siltig leire Hardening Soil: undrained A

Tyngdetetthet: $\gamma=21\text{kN/m}^3$ (Fra parameterrapport direkte).

Stivhet: $E^{50}=18000\text{kN/m}^2$ ($3 \cdot G^{50}$)

Stivhetsøkning med dybden: nei grunnet forenkling.

Friksjonsvinkel: $\varphi=28^\circ$ (fra parameterrapport)

Kohesjon: $c=1,82$. ($a=5\text{kPa}$ gitt i parameterrapport)

Poissons tall: $\nu_{ur}=0,2$ (Ofte mellom 0,1 og 0,2)

Permeabilitet: antar $k_x=k_y=c_v \cdot \gamma_w/M=0,0000082$. ($c_{v,oc}=12\text{m}^2/\text{år}$ og $M=4000\text{kPa}$ er gitt i parameterrapport).

Hviletrykkskoeffisient: $K_0=0,7$ (Gitt i parameterrapport).

$m=1$

Vedlegg C – Utrekninger

Håndberegning installasjonstrykk

$$\frac{\Delta U}{c_u} = \frac{\Delta p_c'}{c_u} - 2 \ln\left(\frac{r}{R_c}\right) - \ln\left(\frac{1+B_{rl}}{1+B_{rt}}\right) - B_{rt} + 0,816 \alpha_f$$

$$\Rightarrow \Delta p_c' = \Delta U + c_u \left(2 \ln\left(\frac{r}{R_c}\right) + \ln\left(\frac{1+B_{rl}}{1+B_{rt}}\right) + B_{rt} - 0,816 \alpha_f \right)$$

$$c_u = 40 \text{ kPa}, \quad r = 0,58 \text{ m}, \quad R_c = 0,4 \text{ m}, \quad T_a = \frac{c_u}{s_t} = \frac{40}{147} = 0,272$$

$$B_{rl} = \sqrt{1 - \left(\frac{T_a}{c_u}\right)^2 \cdot \left(\frac{R_c}{r}\right)^4} = \sqrt{1 - \left(\frac{0,272}{40}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,4}{0,58}\right)^4}$$

$$B_{rt} = \sqrt{1 - \left(\frac{T_a}{c_u}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{0,272}{40}\right)^2}$$

$$\Rightarrow \underline{\Delta p_c' = 164,75 \text{ kPa}}$$

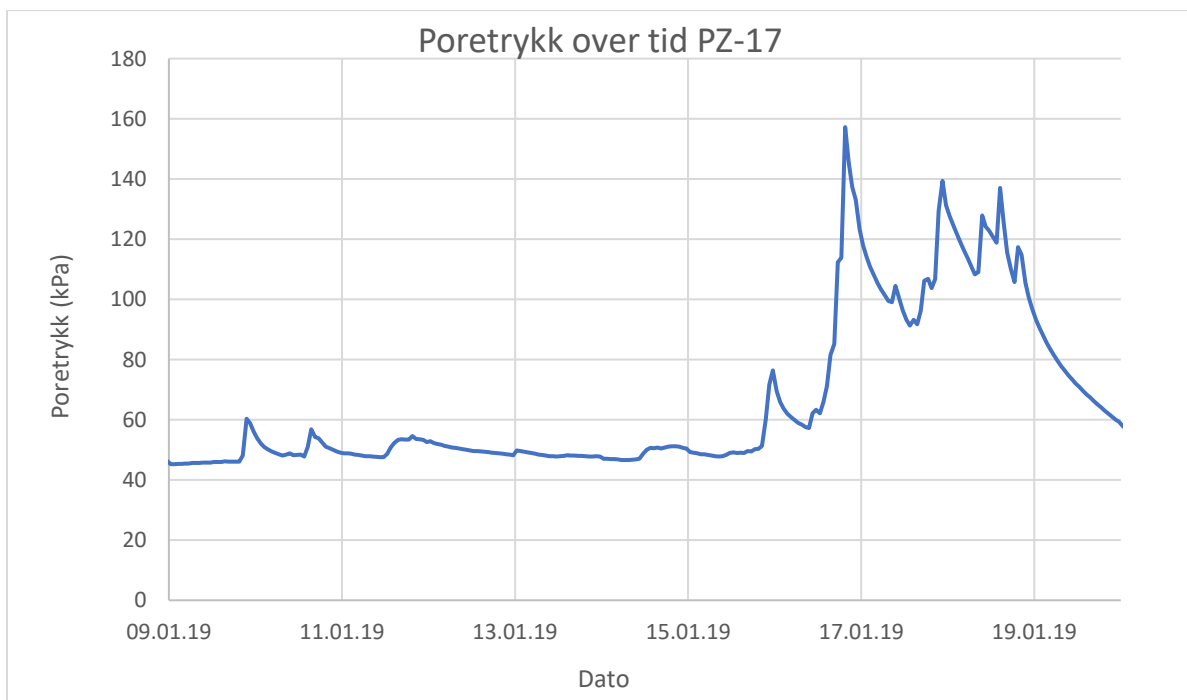
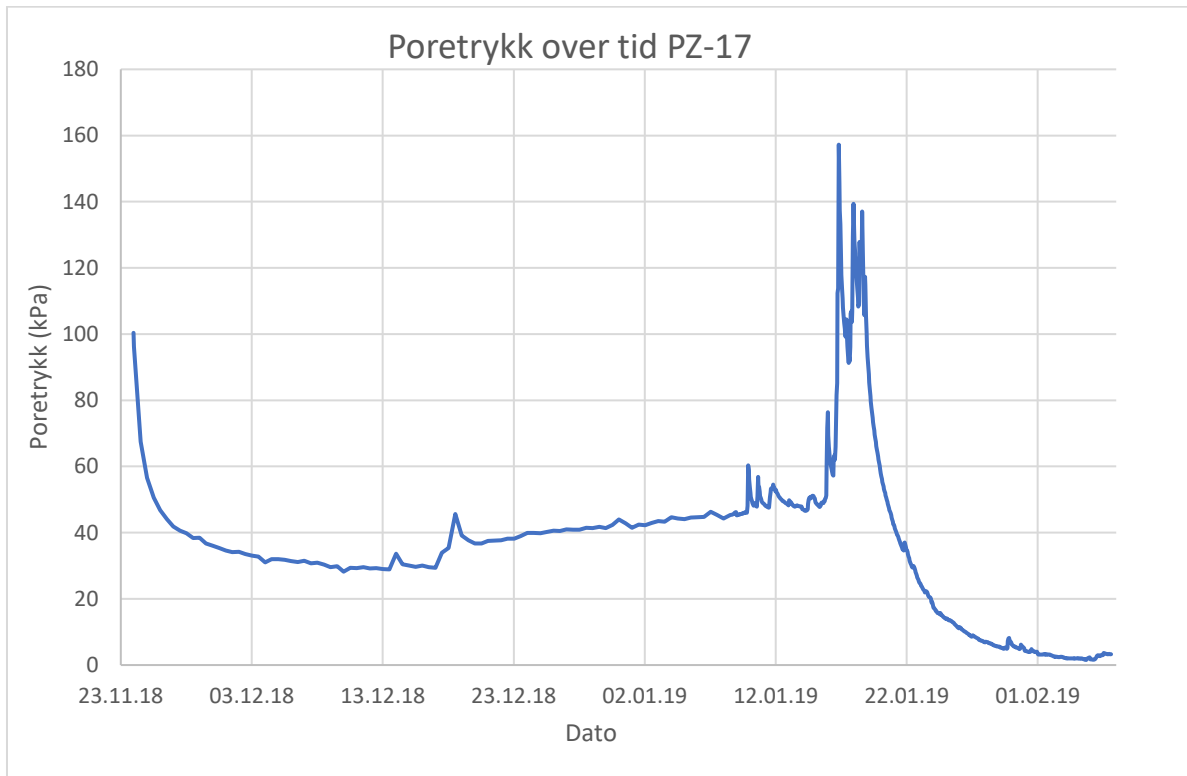
$$p_j = \Delta p_c' + p_0$$

$$p_0 = p_H = p_v \cdot K_0 = (1119 \text{ kN/m}^3 + 6 \text{ m} \cdot 21 \text{ kN/m}^3) \cdot 0,7 = 101,5 \text{ kPa}$$

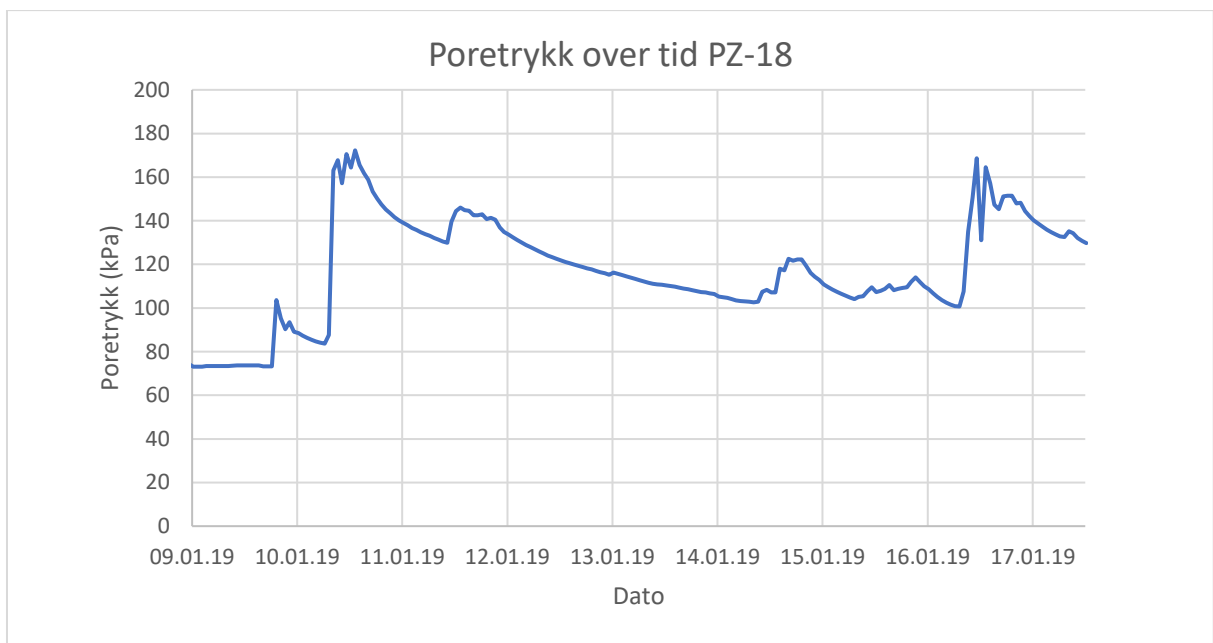
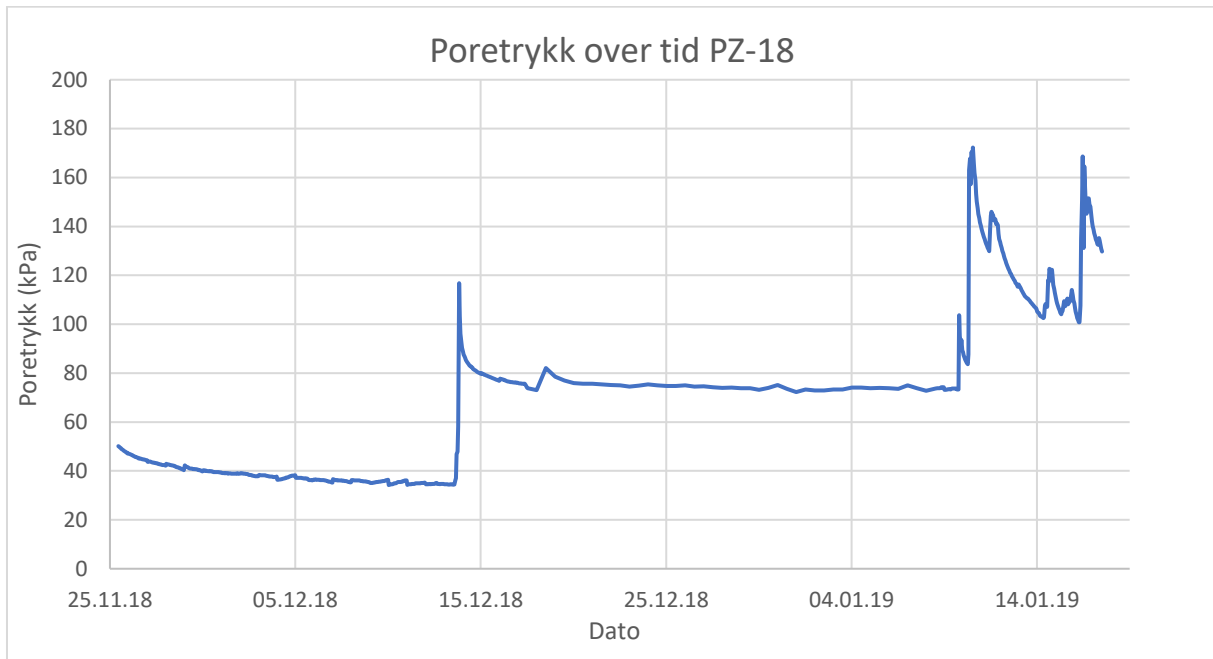
$$\Rightarrow \underline{p_j = 164,75 \text{ kPa} + 101,5 \text{ kPa} = 266 \text{ kPa}}$$

Vedlegg D – poretrykksmålinger

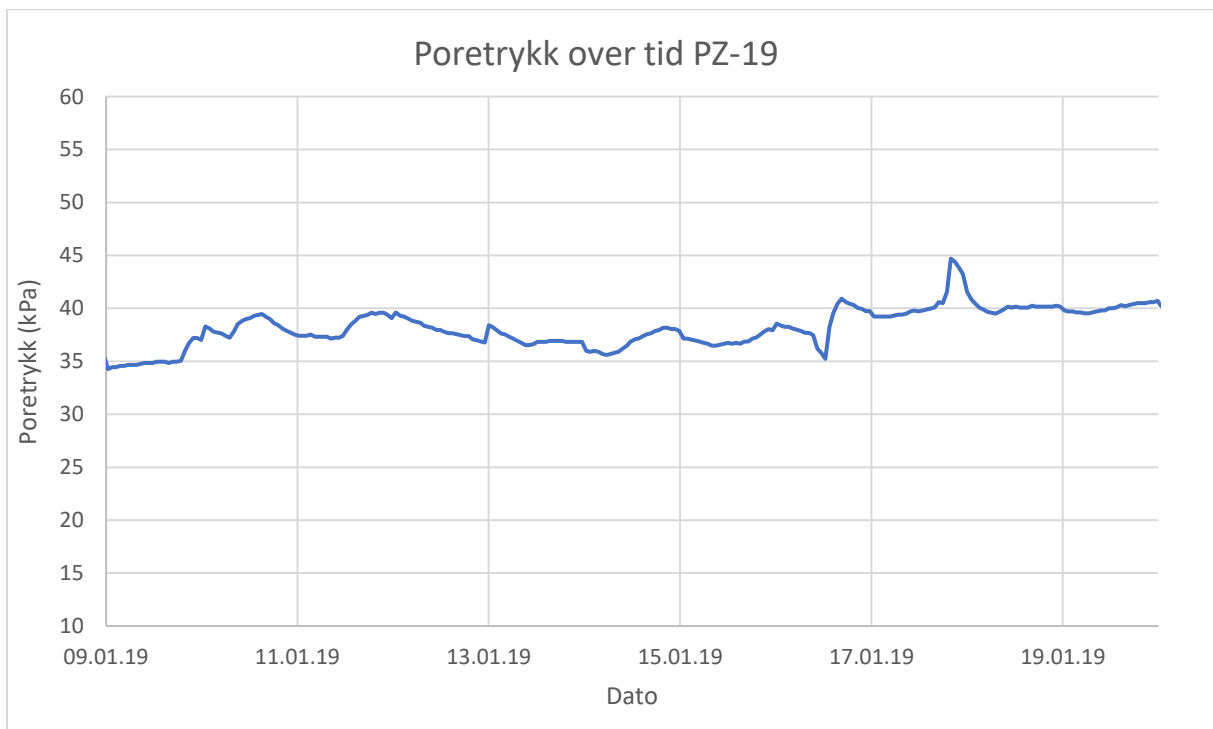
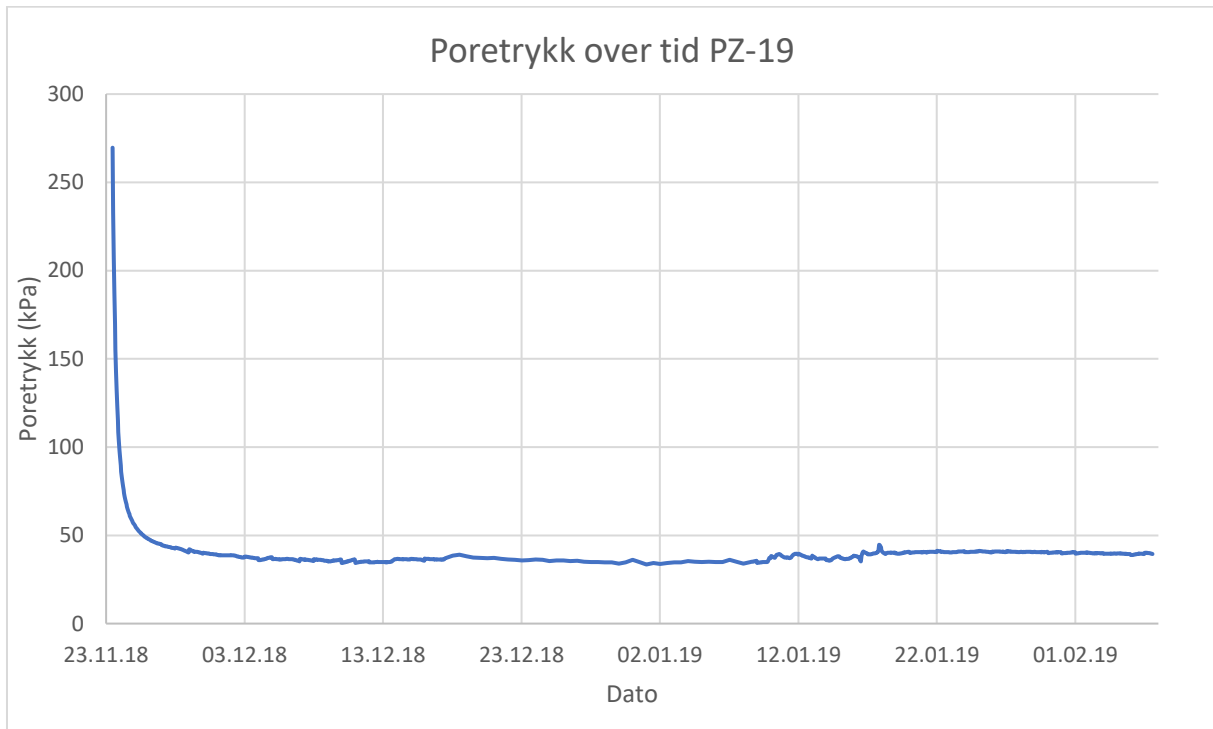
PZ-17



PZ-18



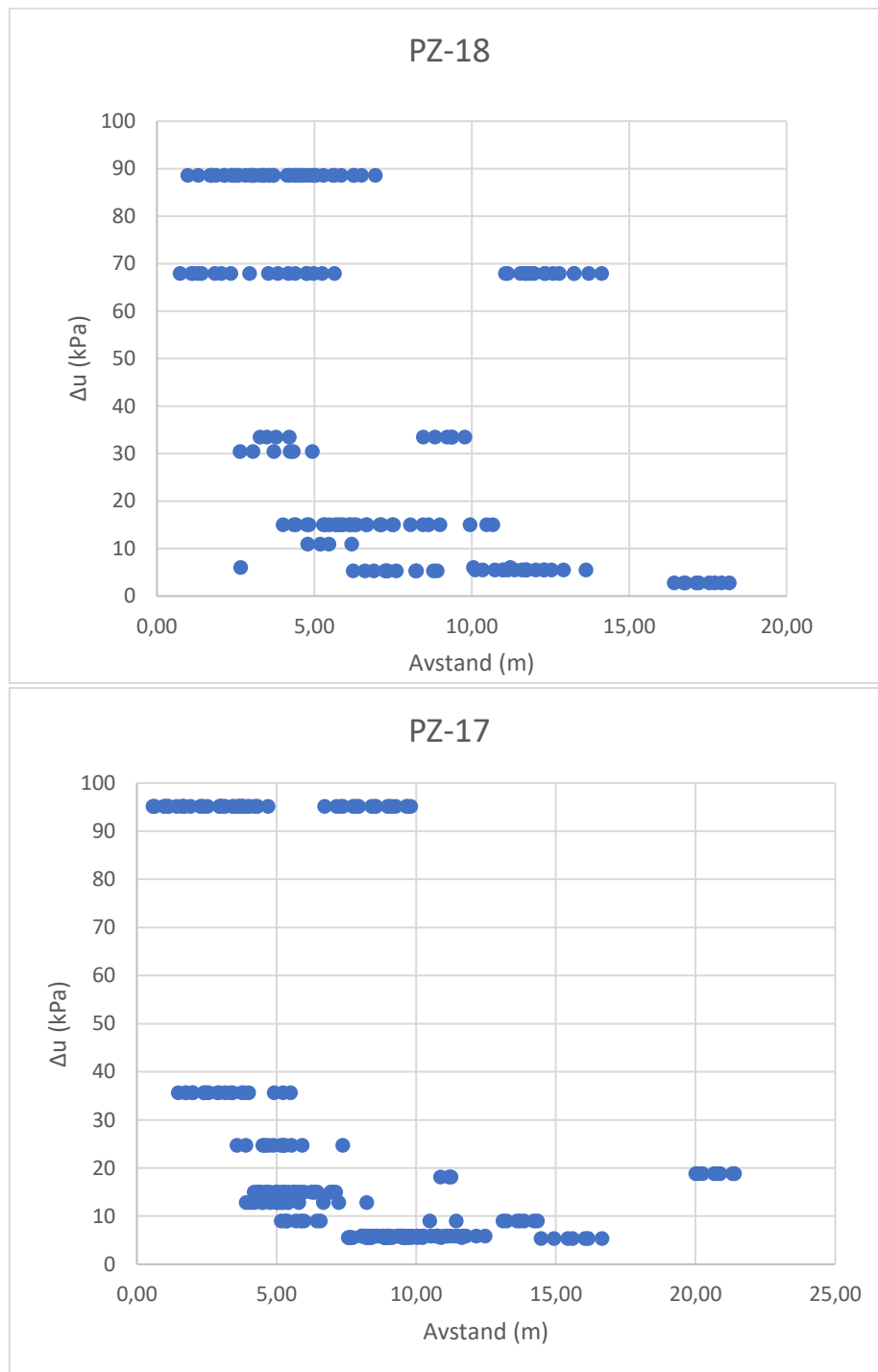
PZ-19



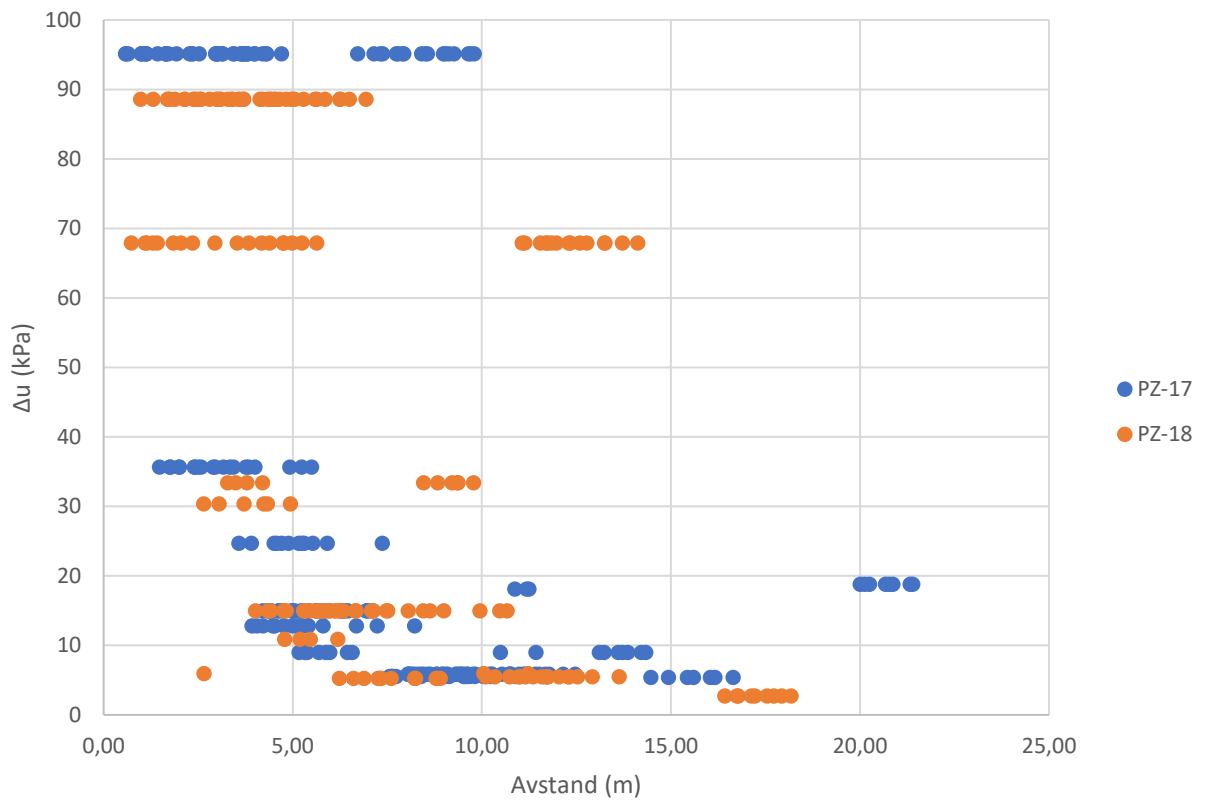
Vedlegg E – feltresultater

- E.1 Tilleggsporetrykk vs. avstand til nærmeste KS-pel. Grov oppløsning.
- E.2 Tilleggsporetrykk vs. avstand til nærmeste KS-pel. Fin oppløsning.
- E.3 PZ-19
- E.4 Tilleggsporetrykk vs. antall KS-peler. Grov oppløsning.
- E.5 Tilleggsporetrykk vs. antall KS-peler. Fin oppløsning.

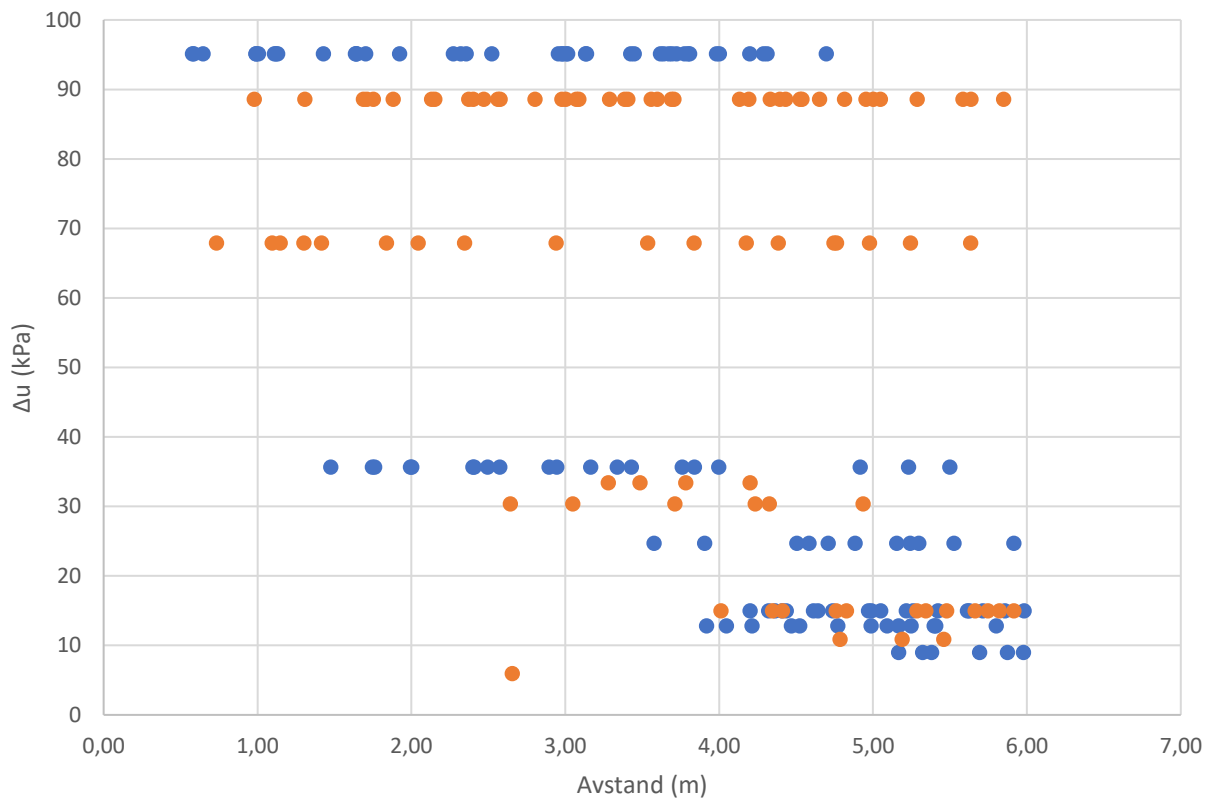
E.1. PZ-17 og PZ-18: Tilleggspretrykk vs. avstand til peler – grov oppløsning
Alle peler



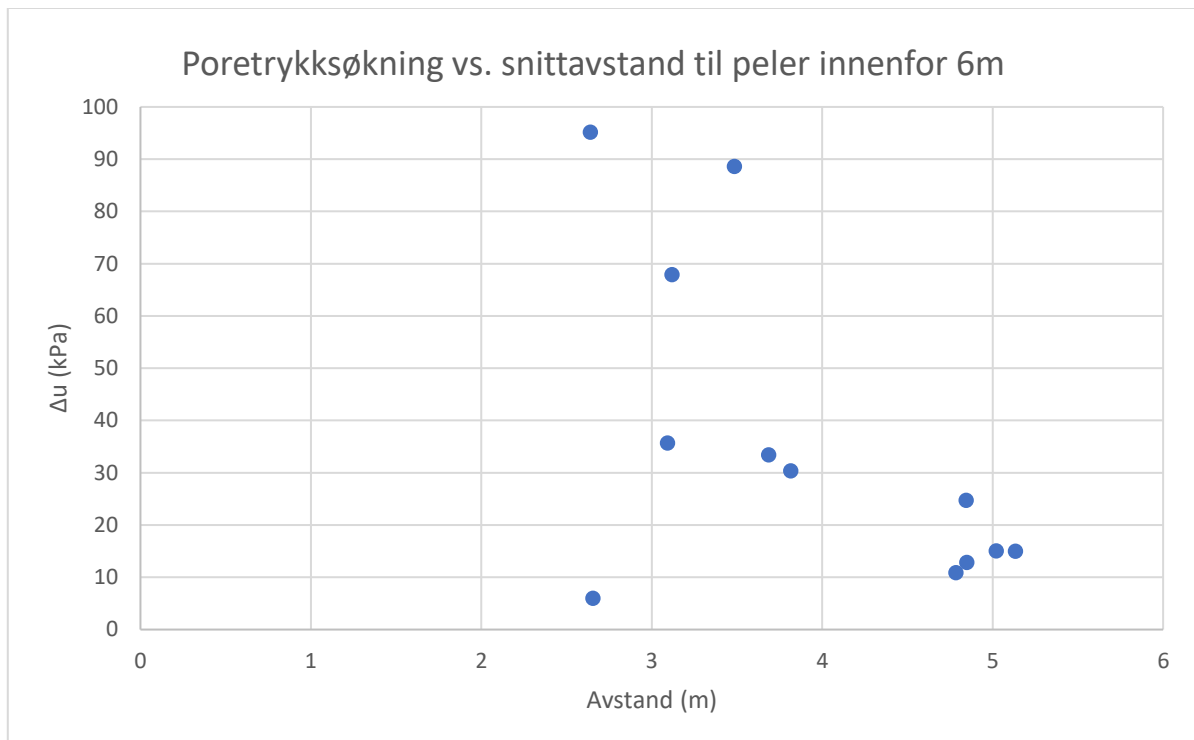
PZ-17 pg PZ-18



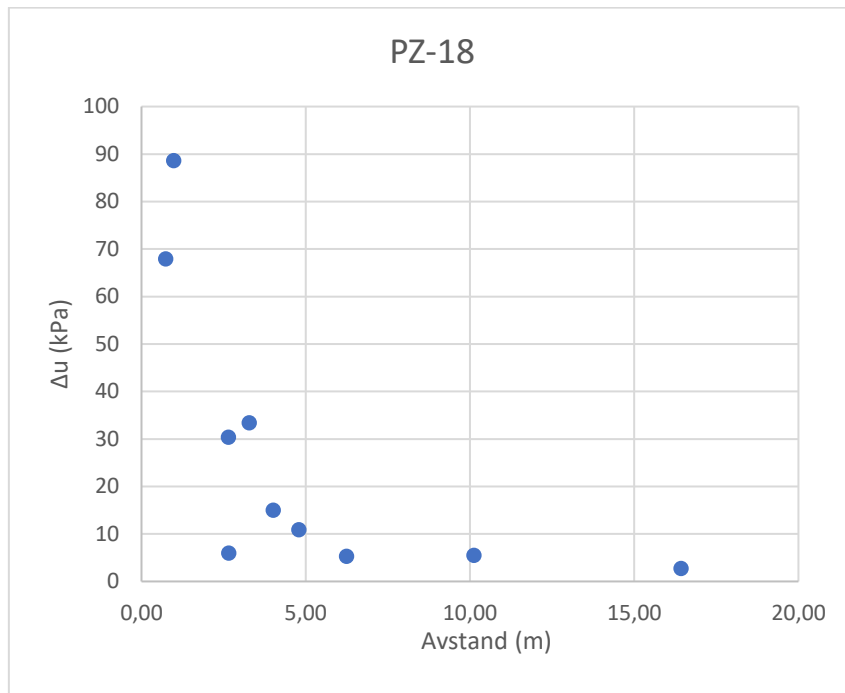
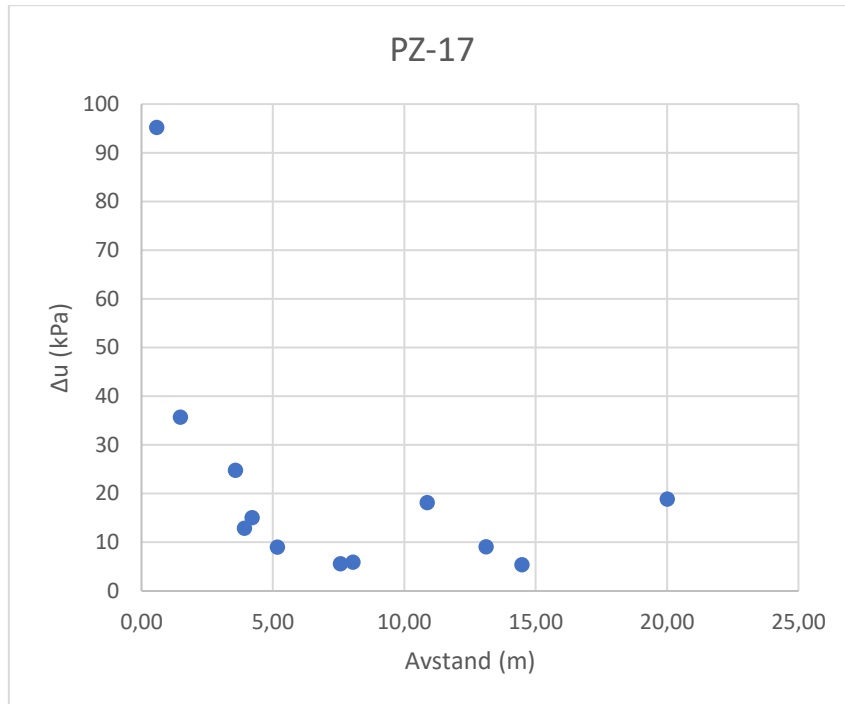
PZ-17 og PZ-18



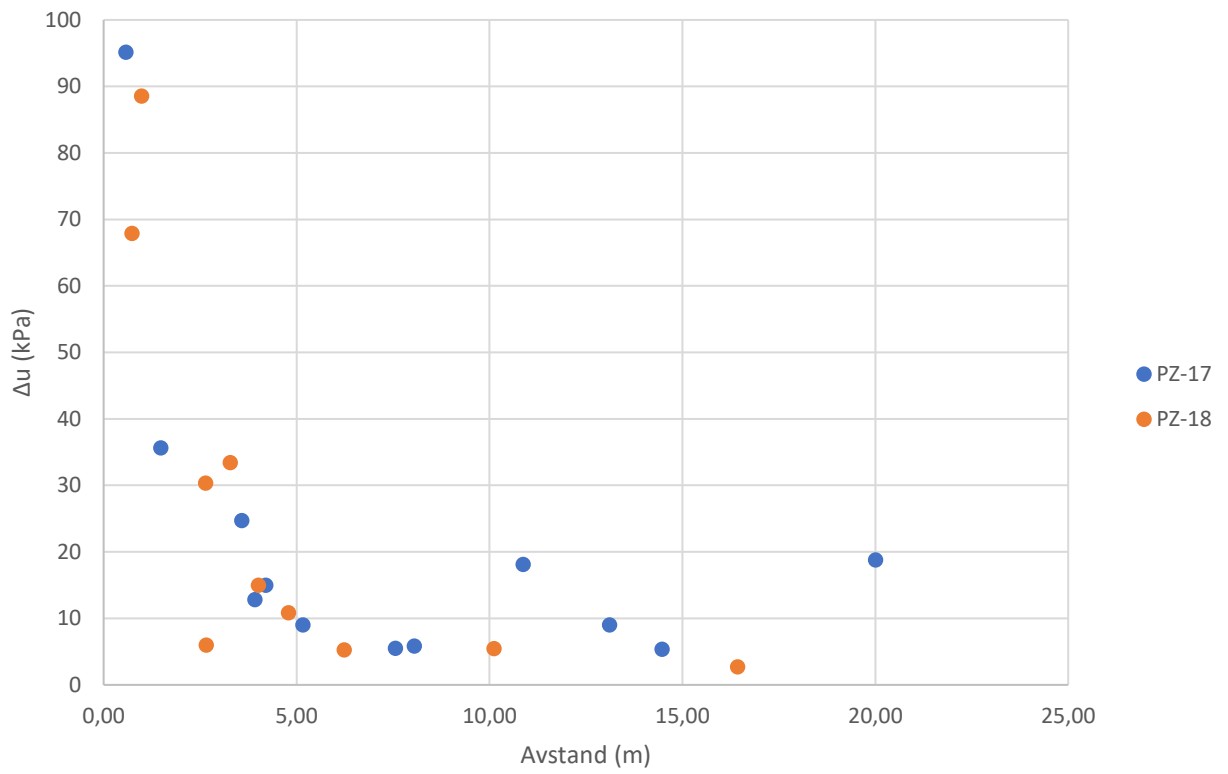
Gjennomsnittsavstand til peler nærmere enn 6m



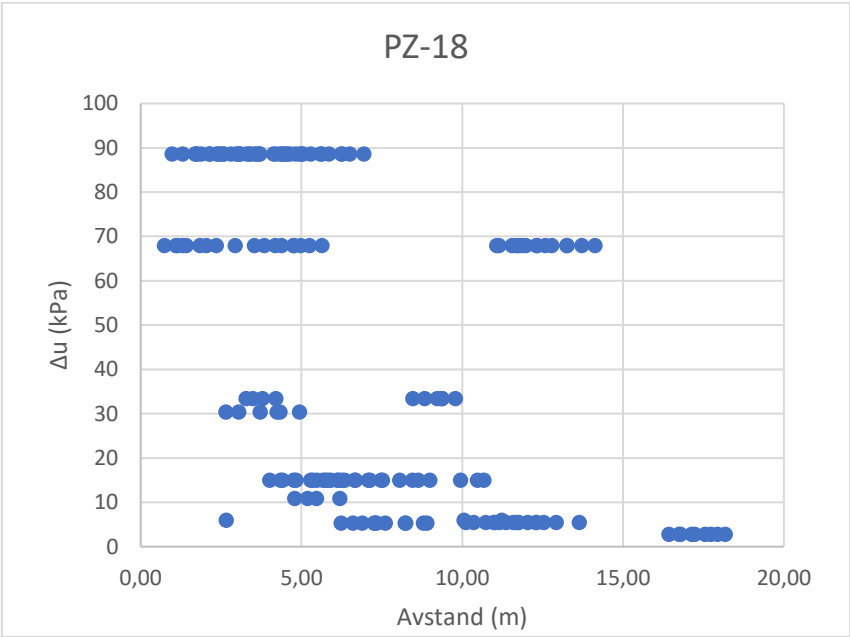
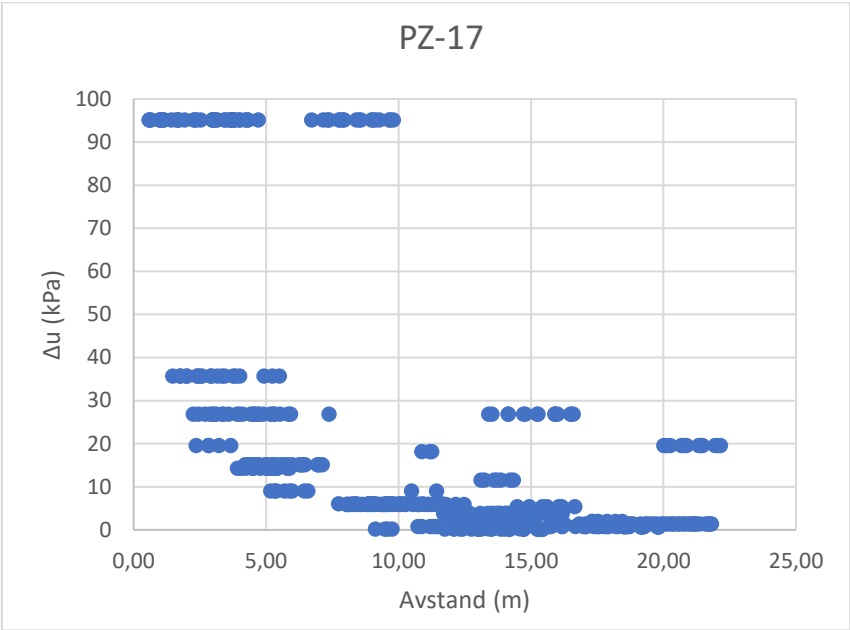
Nærmeste pel



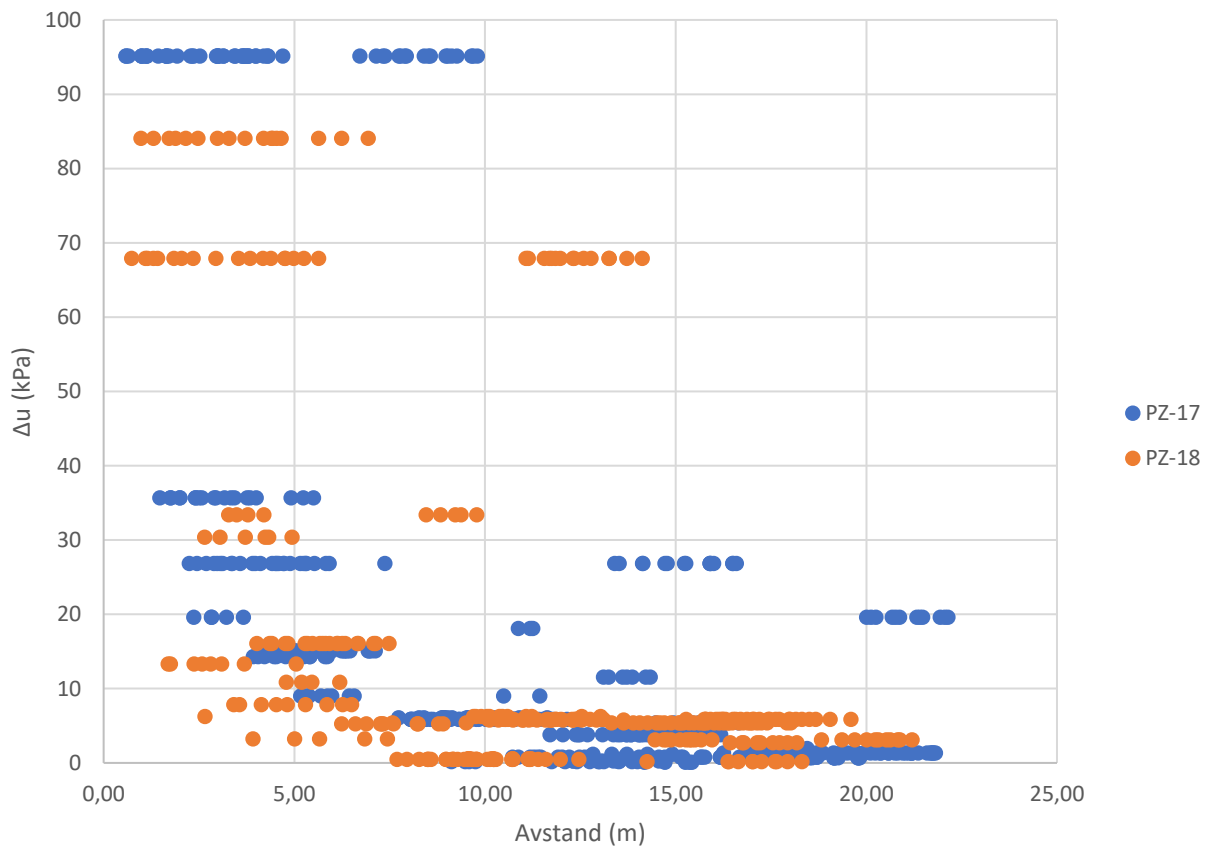
PZ-17 og PZ-18



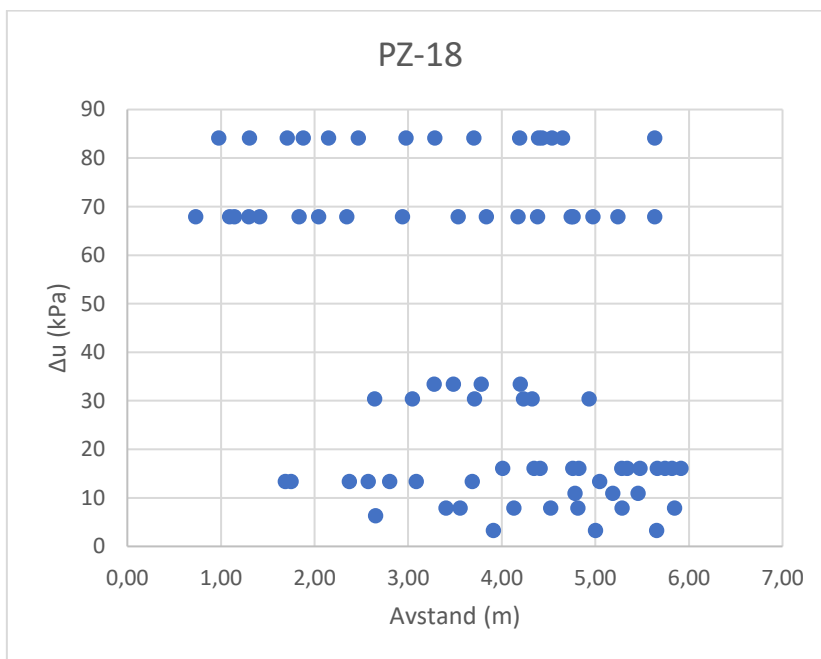
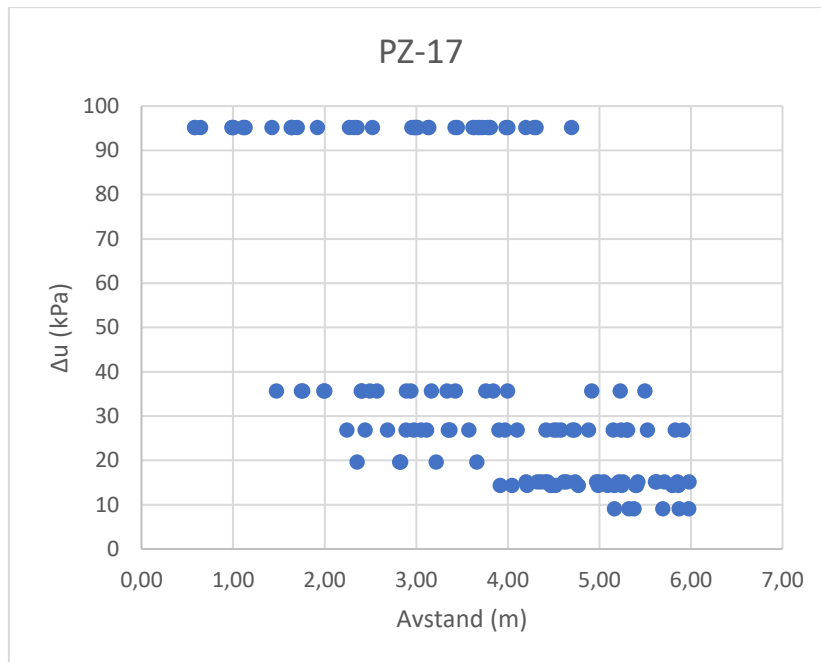
E.2. PZ-17 og PZ-18: Tilleggsporetrykk vs. avstand til peler – detaljert oppløsning
Alle peler



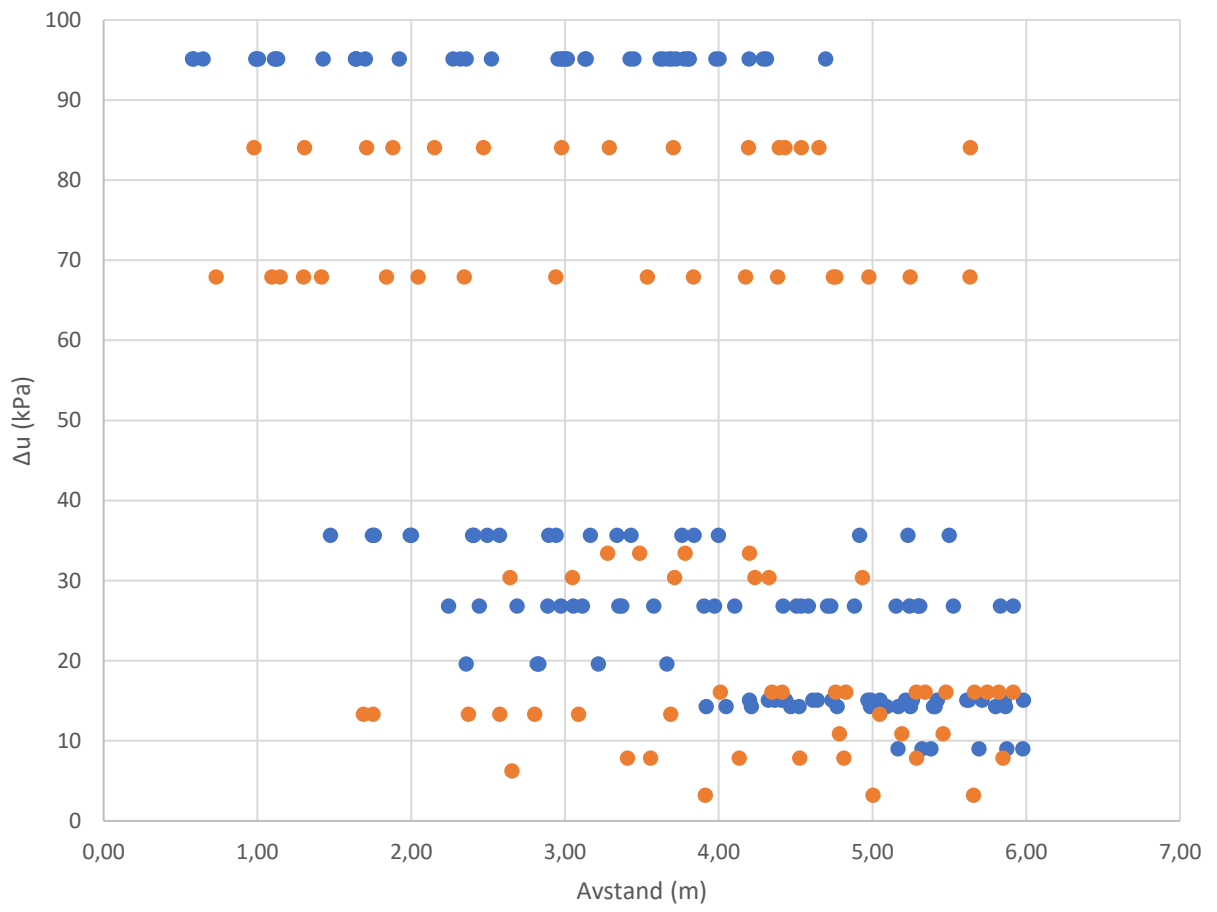
PZ-17 pg PZ-18



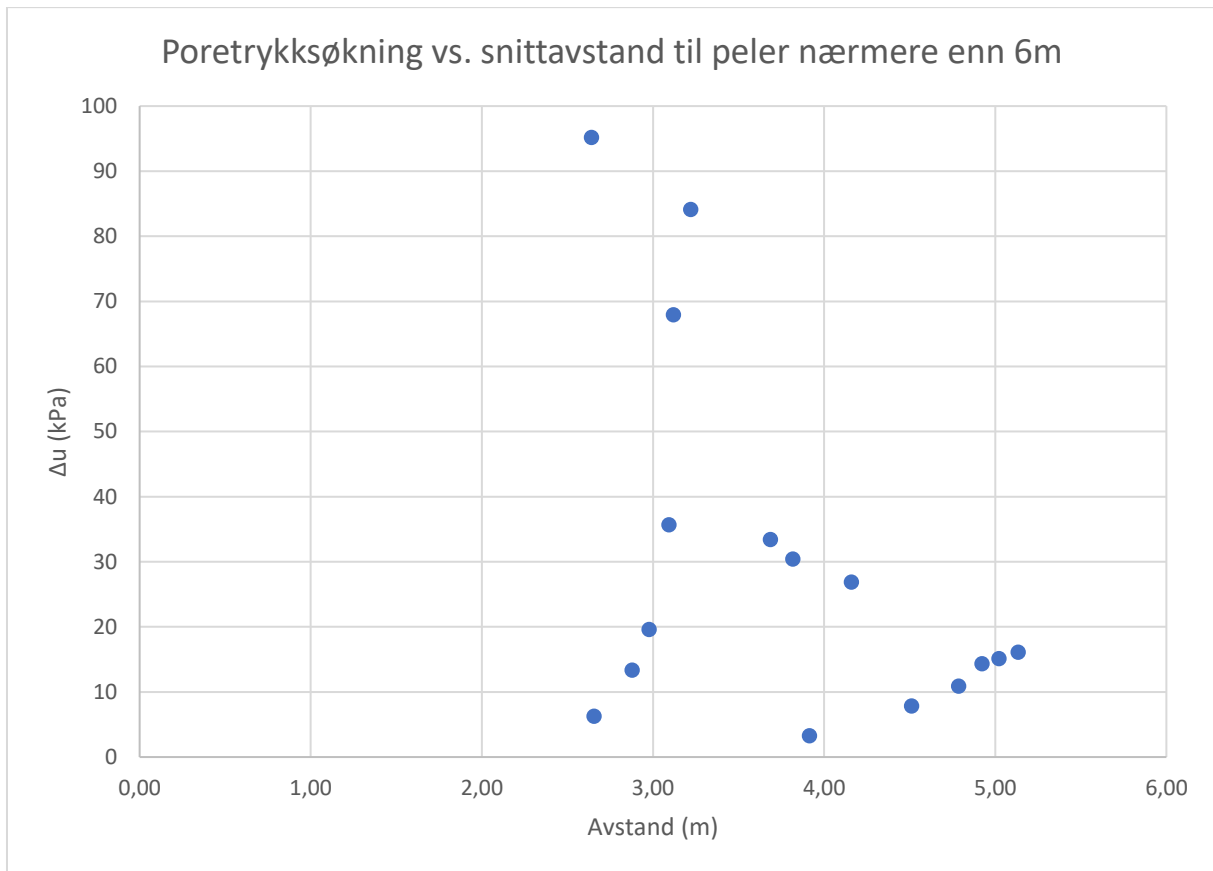
Alle peler innenfor 6m



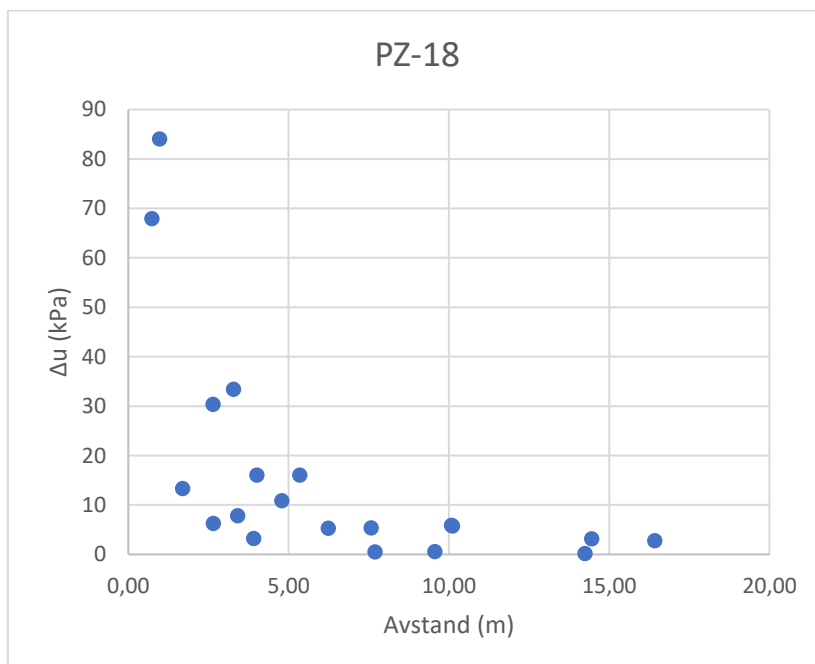
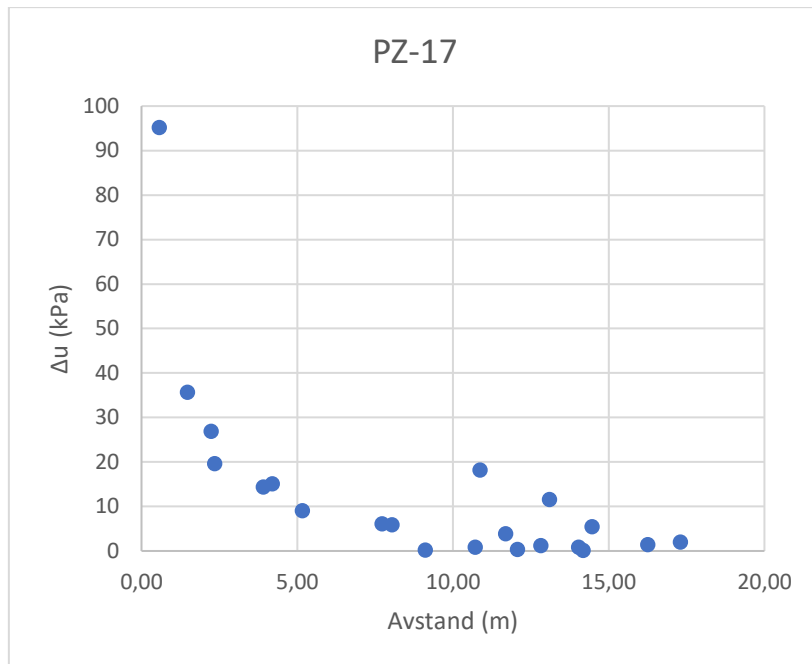
PZ-17 pg PZ-18



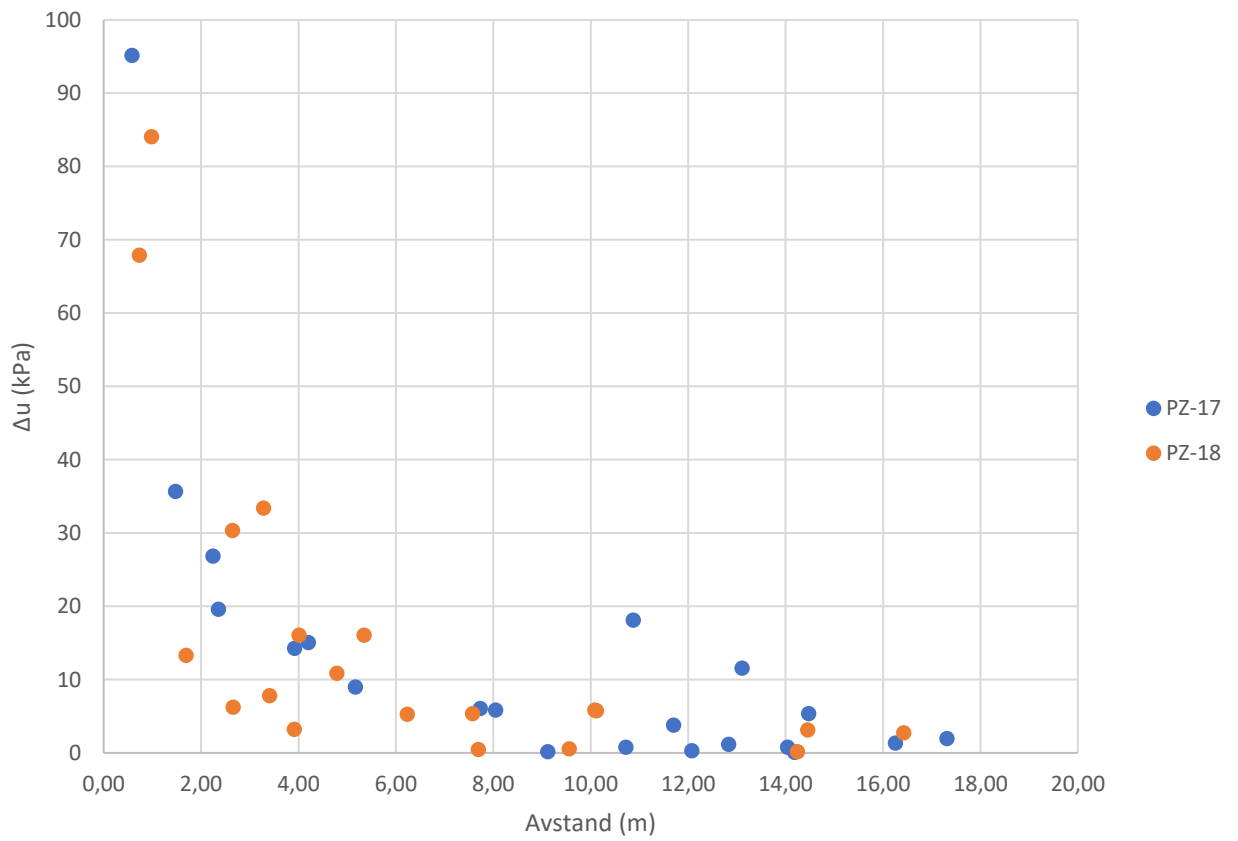
Gjennomsnittsavstand peler nærmere enn 6m



Nærmeste pel

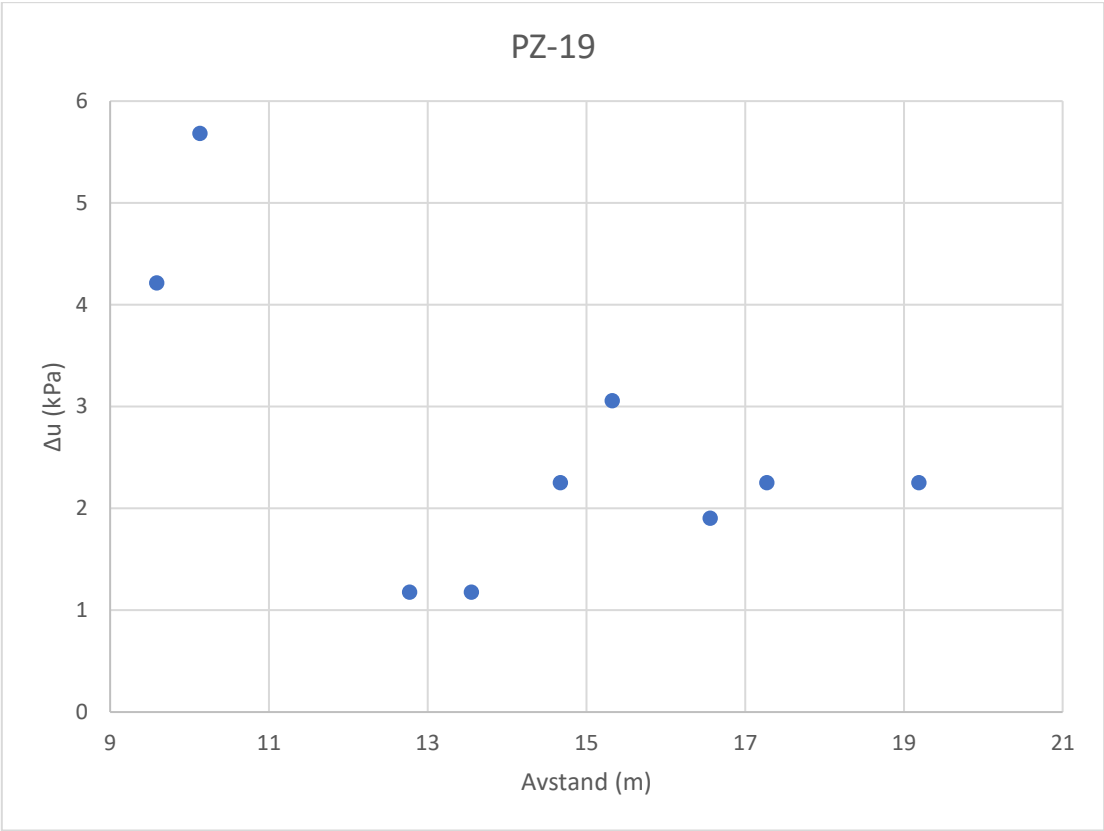


PZ-17 og PZ-18

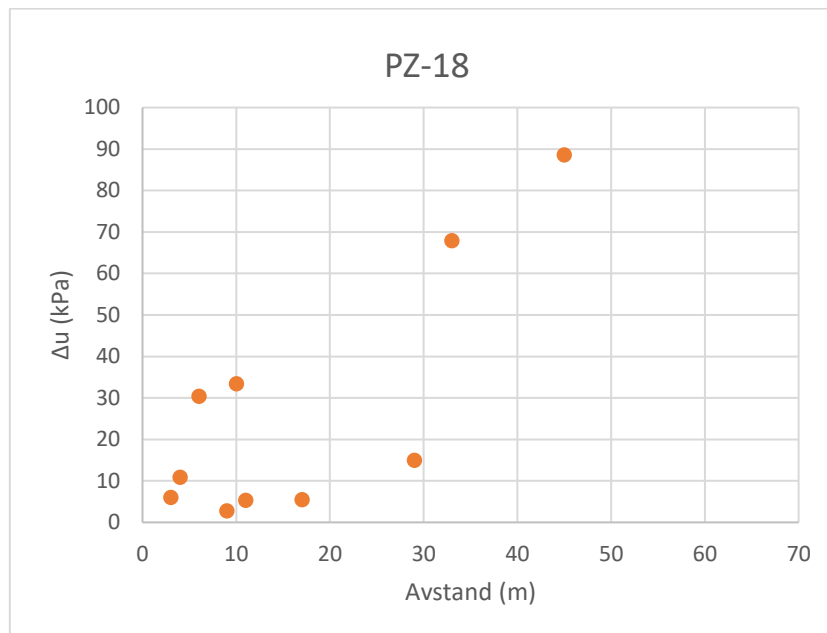
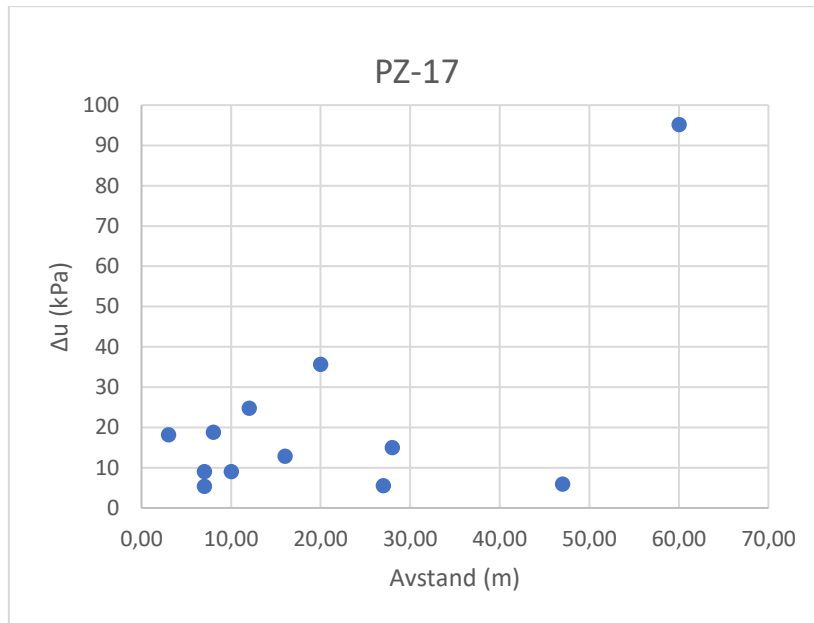


E.3. PZ-19: Tilleggsporetrykk vs. avstand til peler – grovt detaljnivå

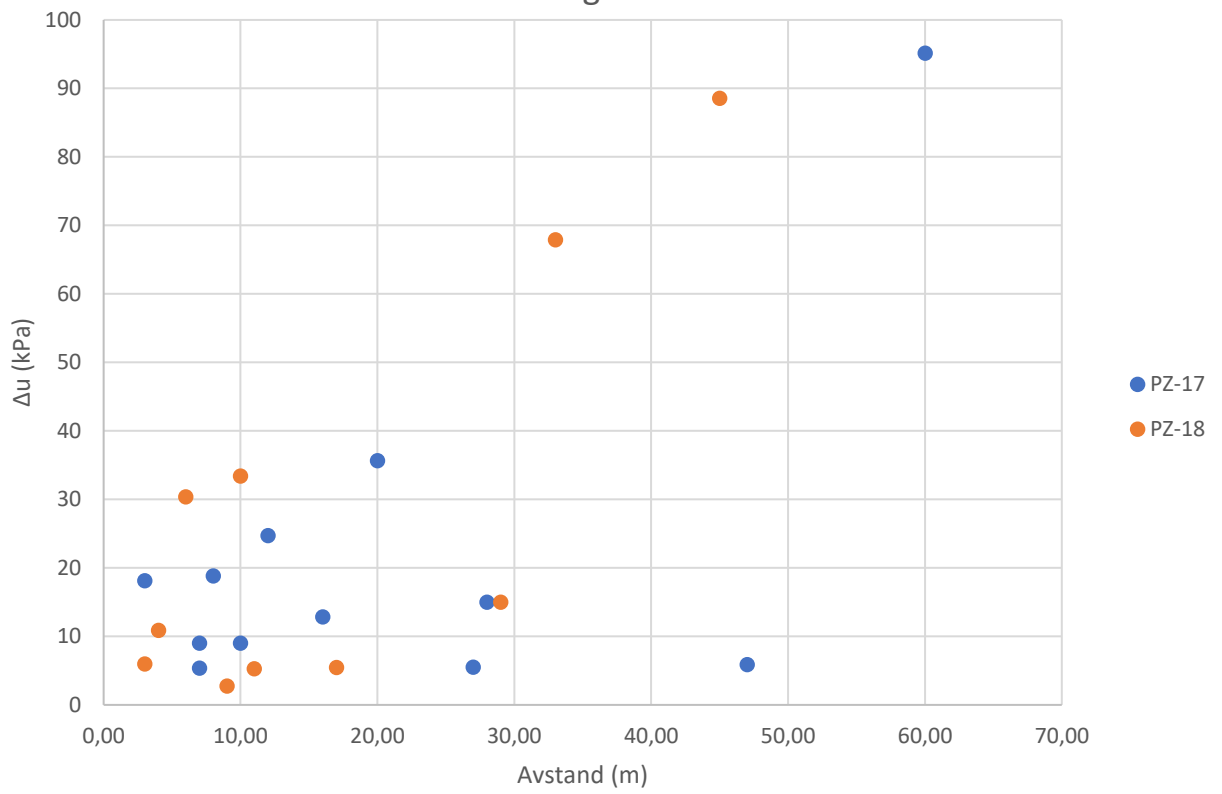
Nærmeste pel



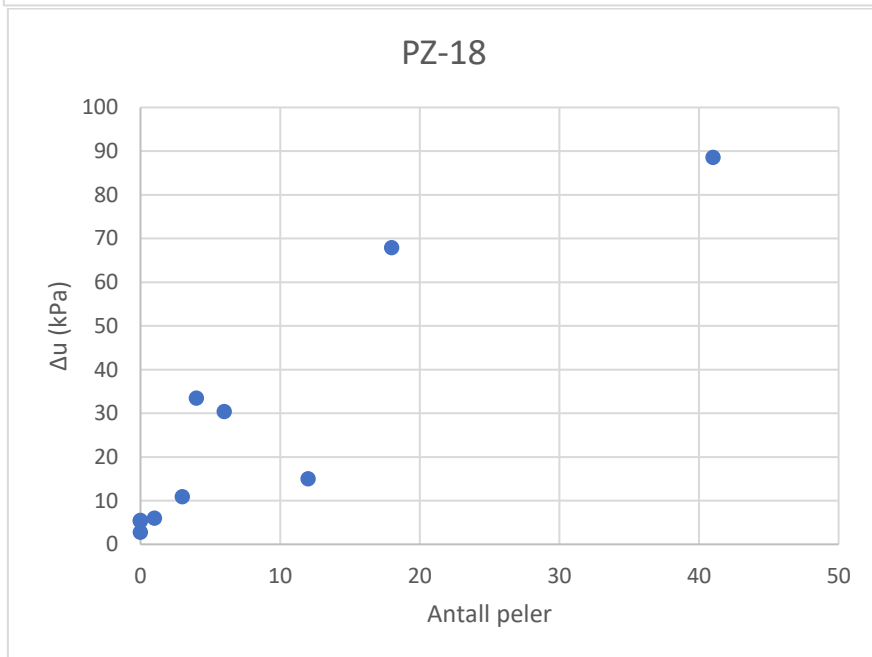
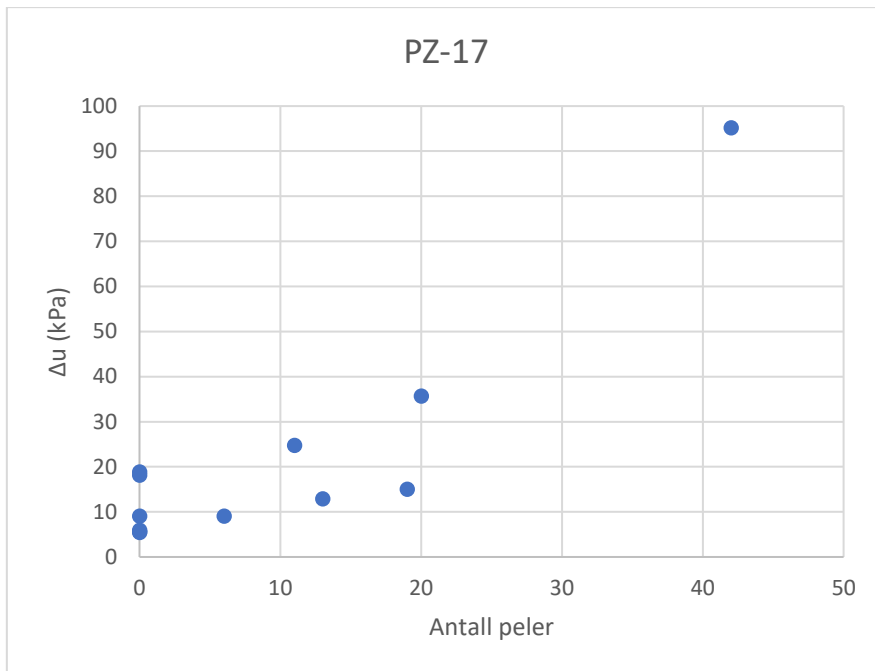
E.4. PZ-17 og PZ-18: Tilleggsporetrykk vs. antall peler – grov oppløsning
Alle peler



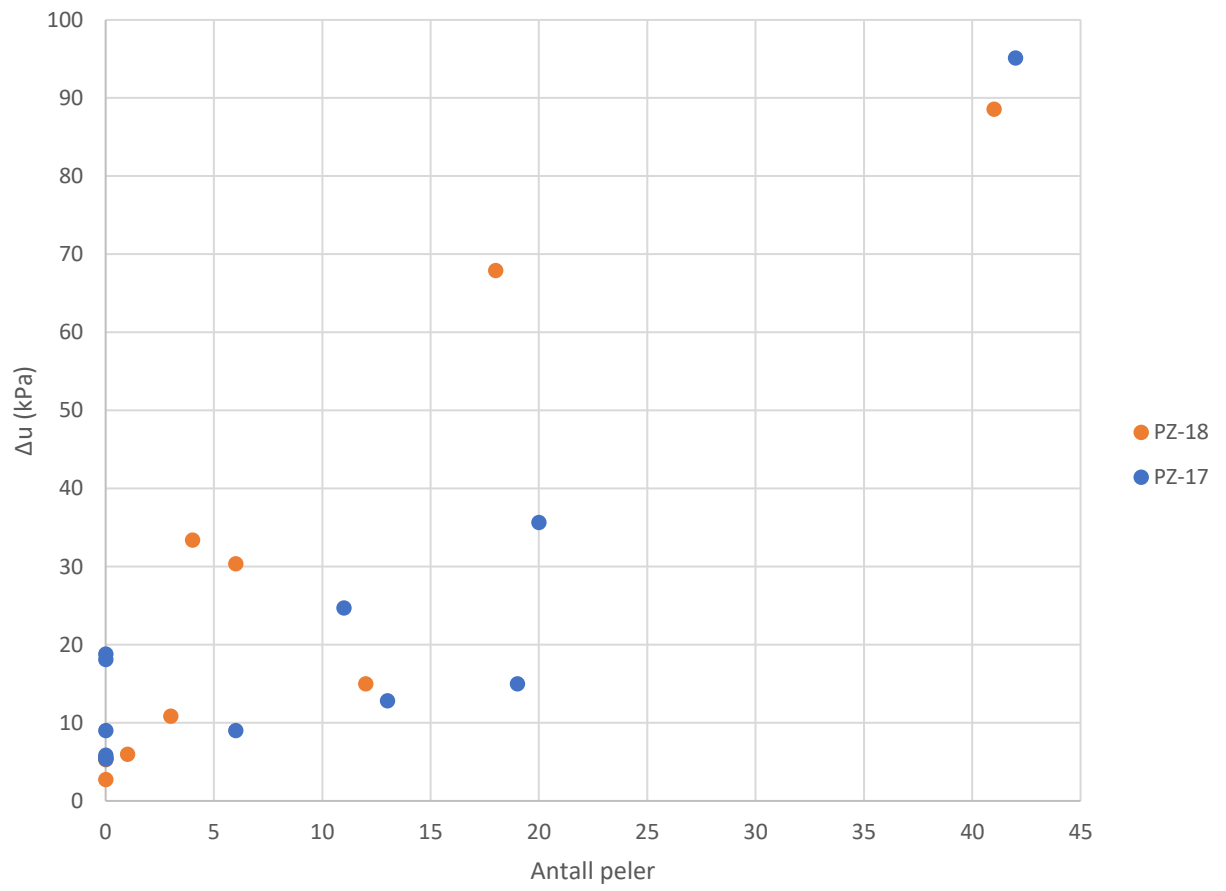
PZ-17 og PZ-18



Alle peler innenfor 6m

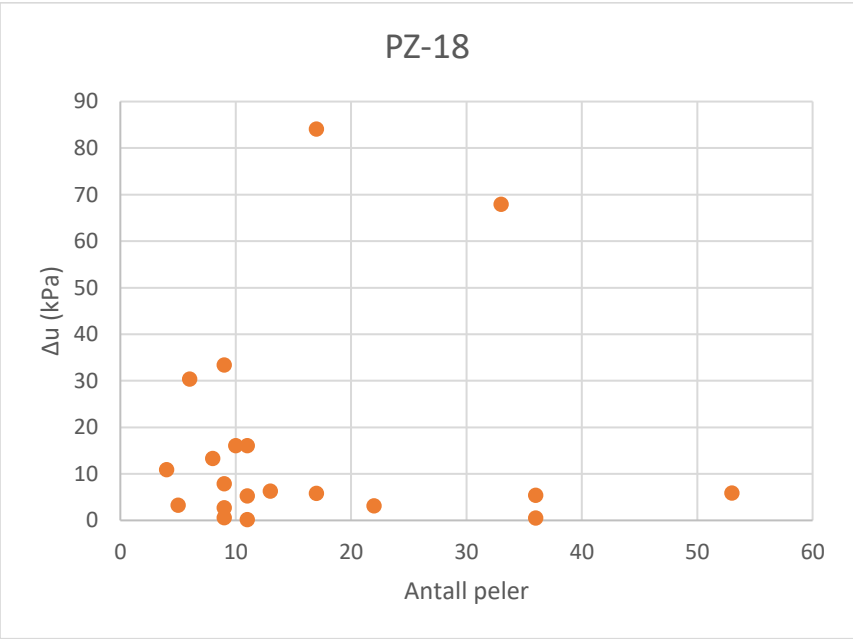
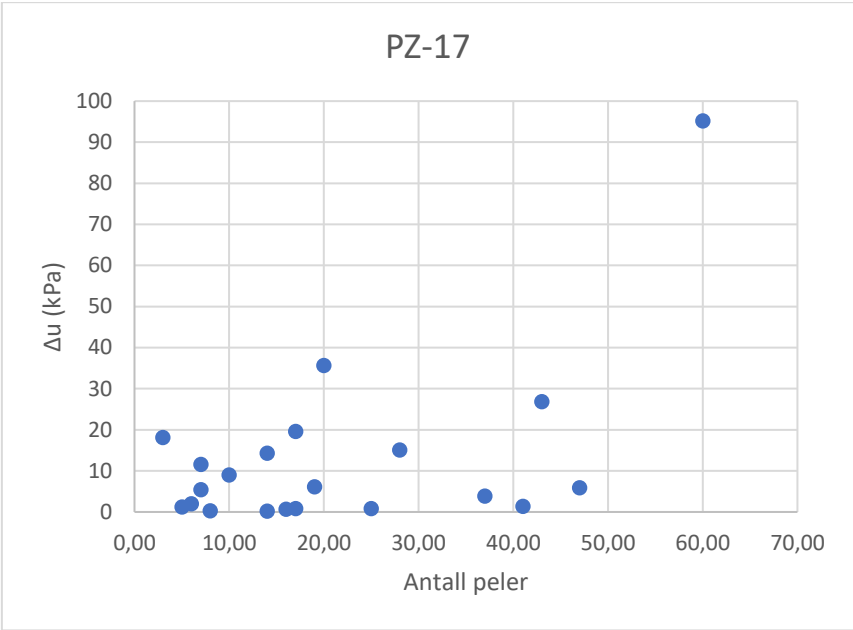


PZ-17 og PZ-18

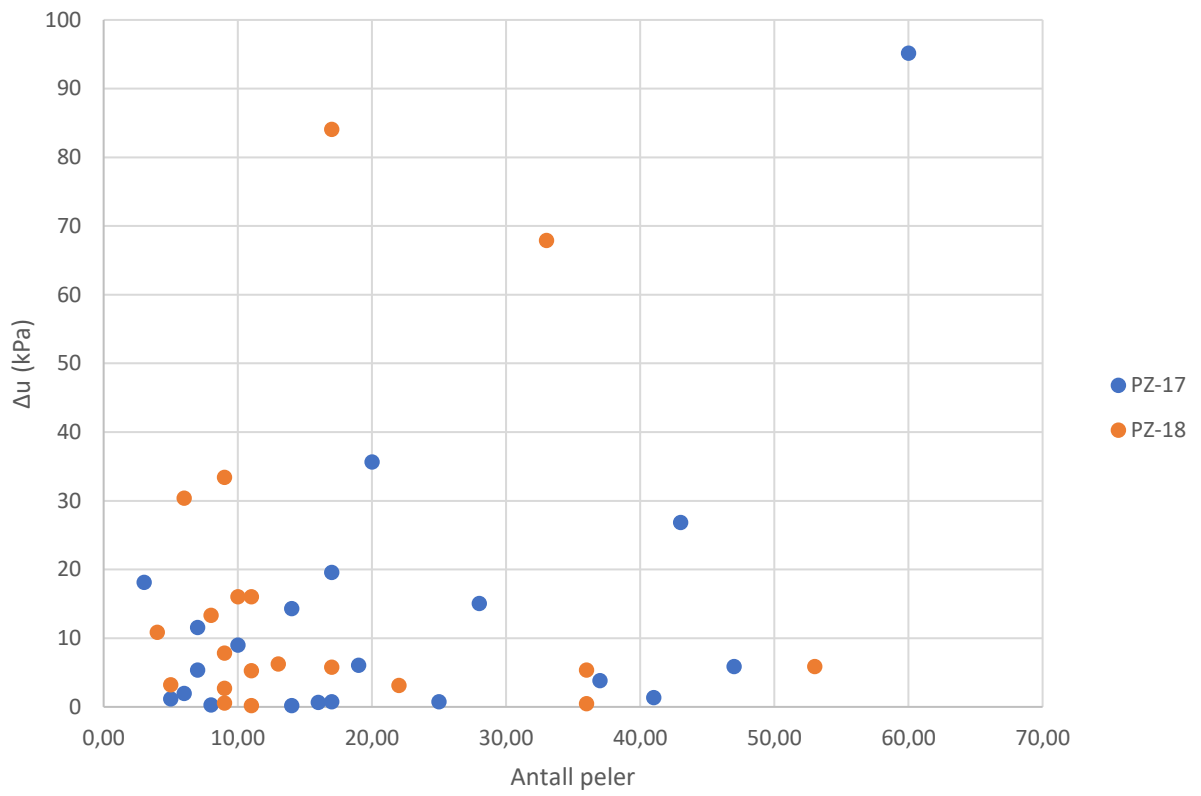


E.5. PZ-17 og PZ-18: Tilleggsporetrykk vs. antall peler – detaljert oppløsning

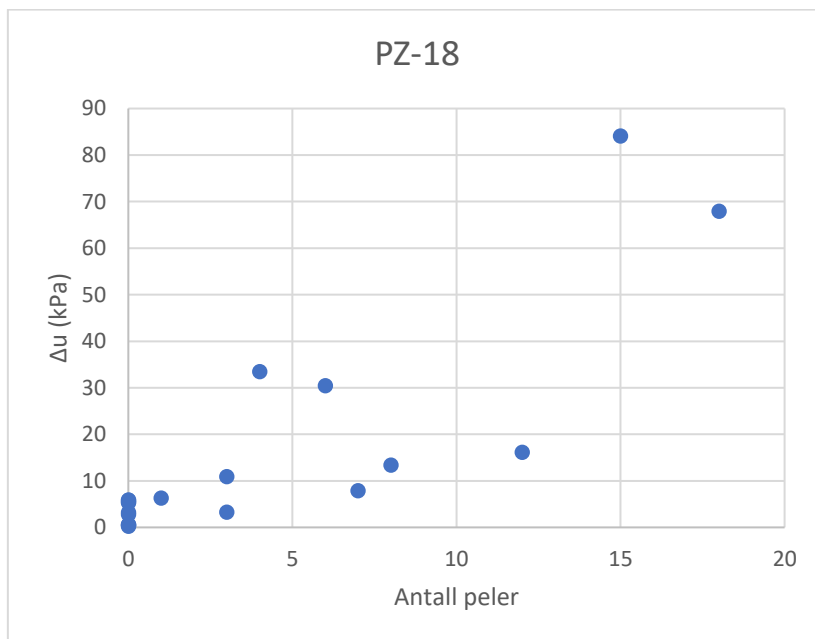
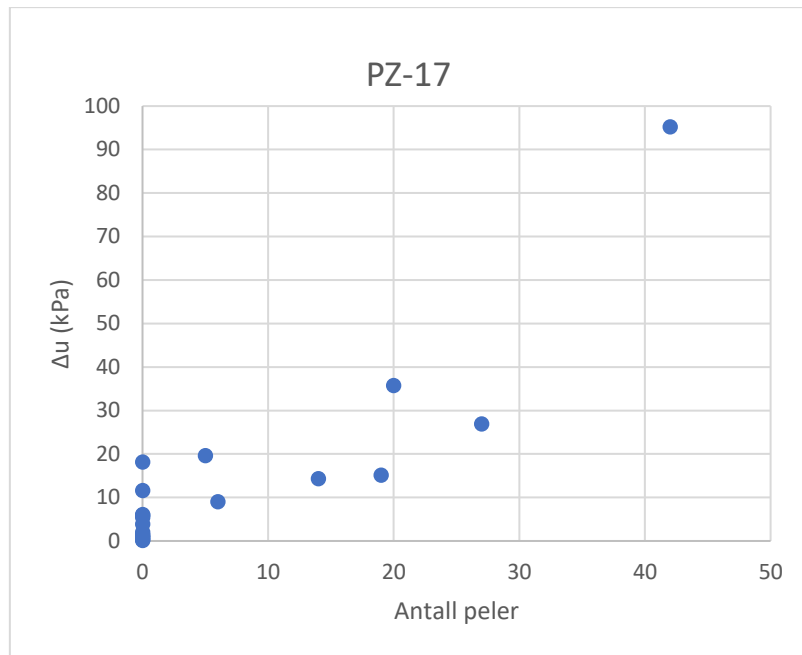
Alle peler



PZ-17 og PZ-18



Alle peler innenfor 6m



PZ-17 og PZ-18

