

Bjørn Skoglund Dahler

Konsolideringsanalyse av mudringsmasser deponert i sjø

Bruk av FEM-beregningsprogram for
konsolideringsanalyse av deponerte finmasser

Masteroppgave i Bygg og Miljøteknikk
Veileder: Gudmund Reidar Eiksund
Juli 2023

Bjørn Skoglund Dahler

Konsolideringsanalyse av mudringsmasser deponert i sjø

Bruk av FEM-beregningsprogram for
konsolideringsanalyse av deponerte finmasser

Masteroppgave i Bygg og Miljøteknikk
Veileder: Gudmund Reidar Eiksund
Juli 2023

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



Kunnskap for en bedre verden

Abstract

This is a master thesis, written for NTNU as the final delivery to complete my education. Professor Eiksund has acted as supervisor and has been a huge help in forming and completing the thesis.

In this thesis the main subject of discussion has been, how to design for suspension in materials using the finite element method program Plaxis. The example area is a project owned by Norconsult AS in Tromsø. They have been instrumental in the data gathering process and have also helped with discussions around the research questions.

In the thesis the main focus has been on the consolidation processes that occurs after depositing fine material in an ocean basin. The basin is restricted by a rubble mound breakwater that prevents the finest of materials to be dispersed into the ocean. A section of the basin will be used for polluted materials, and it is therefore important to limit the spread of materials. The basin will be filled with materials dredged from the local seabed.

During the construction of the model in Plaxis, it was made an attempt to give every new layer a lower density, first with a density of 10 kN/m^3 . This ended up going to failure in every phase. Therefore it was increased to 12 kN/m^3 . After further investigation it was discovered that this would have no effect on the consolidation processes.

Calculations are done by hand, and with FEM-program. The hand calculations were done to create limit values for the consolidation and settlements. The results from all calculations are found in chapter 6. There is an assumption that the consolidation time is between three months and one year. And permeabilities and deformation coefficients are calculated from this.

In conclusion the uncertainty in permeability and stiffness of the deposited materials makes it difficult to predict the resulting deformation and excess pore pressure. It could be advantageous to install pore pressure meters to monitor the progress. The use of vertical draining is discussed in the thesis. The uncertainties in permeability and bearing capacity makes the economic gains to uncertain to make an informed decision. One reason for this comes from a hypothesis that the sedimentation processes creates a stratification that will give the material the permeability of silty sand, but the stiffness of clay.

Forord

Denne rapporten utgjør masteroppgaven som er siste arbeidskrav for å oppnå sivilingeniørgrad i geoteknikk. Rapporten er skrevet for NTNU og i samarbeid med Norconsult Tromsø som har stilt seg til disposisjon for diskusjoner og rådgivning ved behov. Veileder for masteroppgaven er Gudmund Reidar Eiksund.

De siste månedene av arbeidet med denne oppgaven ble jeg diagnostisert med kreft, dette har vært en stor ekstra påkjenning og behandlingen begynner like etter at denne oppgaven er levert. Håper ikke dette har vært for ingenting.

Oppgaven har jeg opplevd veldig krevende og er derfor svært takknemlig til kjæreste, venner og familie.

Innhold

Abstract.....	i
Forord.....	ii
Innhold	iii
Figurer.....	vi
Tabeller	vi
Vedlegg.....	vii
Kapittel 1.....	1
1. Innledning.....	1
1.1. Bakgrunn.....	1
1.2. Områdebeskrivelse	2
1.3. Problemstilling	3
Kapittel 2.....	4
2. Metode.....	4
2.1. Plaxis.....	4
2.1.1. Utforming av modell.....	4
2.1.2. Bruk av Plaxis	4
2.2. Veiledning	5
2.2.1. Veileder.....	5
2.2.2. Norconsult.....	5
2.3. Litteratur.....	6
Kapittel 3.....	7
3. Teori.....	7
3.1. Deponering.....	7
3.2. Setninger.....	7
3.3. Kornfordeling.....	8
3.3.1. Permeabilitet	9
3.4. Jordparametere	11
3.4.1. Mohr Coulomb.....	11
3.4.2. Hardening soil	12
3.4.3. Soft soil	12
3.5. Sedimentering.....	12
3.6. Konsolidering.....	14

3.7. Vertikale dren.....	14
Kapittel 4.....	16
4. Laboratoriums resultater.....	16
4.1. Kornfordeling.....	18
4.2. Treaksialforsøk.....	19
4.3. Ødometerforsøk.....	20
Kapittel 5.....	22
5. Beregninger.....	22
5.1. Utgangspunkt.....	22
5.2. Ødometertest.....	22
5.2.1. Deformasjonsmodulus [M].....	22
5.2.2. Permeabilitet [k].....	23
5.2.3. Konsolideringskoeffisienten [Cv].....	26
5.3. Treaksialforsøk.....	27
5.4. Håndberegninger for fyllmassene.....	29
5.4.1. Tidsavhengig konsolideringskoeffisient.....	29
5.4.2. Permeabilitet.....	29
5.4.3. Setninger fra sprengsteinfylling.....	30
5.5. Plaxis beregninger.....	31
5.5.1. Modell.....	31
5.5.2. Styrkeparametere.....	34
5.6. Setninger.....	37
Kapittel 6.....	38
6. Resultater.....	38
6.1. Håndberegninger.....	38
6.1.1. Forventet konsolideringstid.....	38
6.1.2. Permeabilitet utfra forventet konsolideringstid.....	38
6.1.3. Setninger etter steinfylling.....	38
6.2. FEM-beregningsprogram.....	39
6.2.1. Poreovertrykk.....	39
6.2.2. Setninger.....	40
6.2.3. Effekt av vertikale dren, setninger.....	42
Kapittel 7.....	44
7. Diskusjon.....	44
7.1. Bruk av Plaxis.....	44

7.1.1.	Fordeler	44
7.1.2.	Problemer	45
7.2.	Plaxis-modellen	45
7.2.1.	Grunnforhold og Plaxis-profil.....	45
7.2.2.	Bygging av modell.....	47
7.2.3.	Grunnvannstrømning	48
7.3.	Beregningsmodeller	49
7.4.	Vertikale dren	50
7.5.	Resultater fra FEM-beregning.....	51
Kapittel 8.....		53
8.	Konklusjon.....	53
8.1.	Modellere deponering og suspensjon i Plaxis	53
8.2.	Erfaringsverdier mot Plaxis.....	53
8.3.	Vertikale dren.....	54
8.4.	Veien videre	54
Referanseliste.....		56

Figurer

Figur 1.1 Kart over Tromsø og Kai 24 (FINN kart, 2021)	2
Figur 3.1 klassisk konsolideringsteori	8
Figur 3.2 definisjon av kornstørrelser	9
Figur 3.3 Porøsitet og drenerbart vann i forskjellige fraksjoner	10
Figur 3.4 Typiske intervaller for permeabilitet for de forskjellige fraksjonene	11
Figur 3.5 Sammenheng mellom S_u og vanninnhold	14
Figur 4.1 Oversiktskart over prøveboringer	16
Figur 4.2 Kornfordeling fra havbunn i prosjektområdet	18
Figur 4.3 Triaksial forsøk skjærspenning mot effektiv radially spenning	19
Figur 5.1 Densitet og vanninnhold for havbunnen	23
Figur 5.2 Permeabilitetsmåling fra ødometerforsøk	25
Figur 5.3 CPTU fra borehull 102	25
Figur 5.4 Cv kurve fra ødometertest	26
Figur 5.5 Håndberegning av deformasjon fra sprengsteinfylling	31
Figur 5.6 Skjerm bilde av Plaxismodellen	32
Figur 5.7 Faseoppbygning hvor fase 30 og 31 kjøres parallelt	34
Figur 5.8 Konsolideringsfase uten vertikale dren	34
Figur 5.9 konsolideringsfase med vertikale dren	34
Figur 6.1 Poreovertrykk $t_p = 3$ måneder	39
Figur 6.2 Poreovertrykk $t_p = 6$ måneder	39
Figur 6.3 Poreovertrykk $t_p = 1$ år	40
Figur 6.4 Visualisering av $ u $ (5:1)	40
Figur 6.5 Setninger $t_p = 3$ måneder, uten drenering maks-verdi = 0,94m	41
Figur 6.6 Setninger $t_p = 6$ måneder, uten drenering maks-verdi = 1,08m	41
Figur 6.7 Setninger $t_p = 1$ år, uten drenering maks-verdi = 1,27m	41
Figur 6.8 Setninger $t_p = 3$ måneder, med drenering maks-verdi = 1,56m	42
Figur 6.9 Setninger $t_p = 6$ måneder, med drenering maks-verdi = 1,78m	42
Figur 6.10 Setninger $t_p = 1$ år, med drenering maks-verdi = 1,95m	43
Figur 7.1 CPTU fra borehull 108	46
Figur 7.2 Totalsondering fra borehull 118	46
Figur 7.3 Modellprofil fase 0	47
Figur 7.4 Første fase med ferdigbygd molo og utfylt masse til opprinnelig høyde	47
Figur 7.5 Røntgen av tverrsnittet til havdeponi i Barcelona havn	49

Tabeller

Tabell 1 Antall prøver tatt	17
Tabell 2 Håndberegning av permeabilitet gitt konsolideringstid	30
Tabell 3 Nøkkel til figur 5.6	32

Vedlegg

- Vedlegg 01

Kapittel 1

1. Innledning

Masteroppgaven er et studium av deponerte masser i sjø, hvilke karakteristikk som er relevante og hvordan de utvikler seg. Hovedformålet til oppgaven er å se på hvordan en kan modellere deponering av finmateriale i sjø med Plaxis. Et annet formål er å se på hvor lang tid konsolideringen bruker for å komme til et punkt der det er mulig å bygge ut området. Grunnundersøkelser og laboratorieundersøkelser gjort i området, samt erfaringsbaserte vurderinger fra lokale geoteknikere er datagrunnlaget som benyttes i denne masteroppgaven.

1.1. Bakgrunn

Utgangspunktet for oppgaven er en diskusjon i forbindelse med sommerjobb ved Norconsult i Tromsø der det ble gitt uttrykk for at det var for lite kunnskap om hvordan deponert materiale opptrer. Materialet som skal benyttes som fyllmasse i prosjektet er mudret fra området rundt prosjektet. Og inneholder derfor signifikante mengder med leir og silt. Hvordan vil dette påvirke deponiet?

Verden er i en stor urbaniseringsprosess der storbyer opplever enorm befolkningsvekst som igjen gir plassmangel. Spesielt i kystbyer, som er knutepunkter for verdenshandel, er veksten i befolkningstallet stort. For å unngå å bruke av allerede sårbar kystnatur har mange metropoler valgt å bygge byen ut i havet. Dette har de gjort ved å deponere masser i strandsonen for så å bygge på det nye landet (Sengupta et al., 2018). Tomter ved kysten er ofte høyt prissatt og gir god avkastning for utbygger.

Denne utviklingen kan også sees i Norge. Den norske kysten er i stor grad forskjellig fra kystlinjer i andre land og domineres av bratte skråninger, postglasiale avsetninger som kvikkleir. Dette bidrar til at det er store tilleggsutfordringer med landgjenvinning i Norge. I Norge er også store deler av befolkningen bosatt ved kysten og byer har ofte begrenset areal til utbygging. Naturvern står sterkt i den norske befolkningen som ytterligere bidrar til motvilje ved utbygging i urørt natur eller friluftsområder (Brænd et al., 2023).

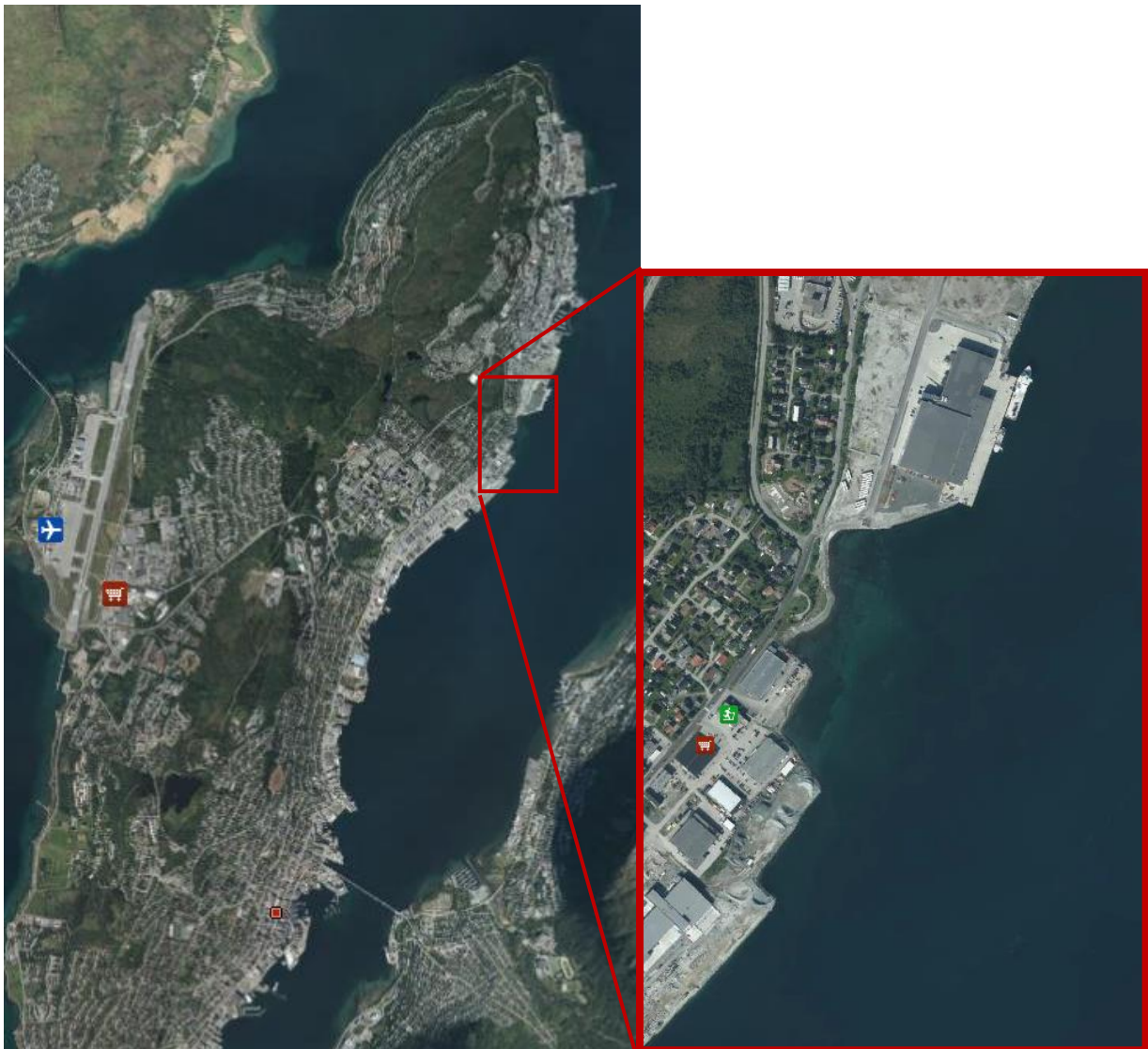
I denne oppgaven blir et pågående prosjekt eid av Norconsult Tromsø brukt som eksempel. Prosjektet heter Kai 24 og er et oppdrag gitt av Tromsø havn. I dette prosjektet skal det

etableres en molo i to seksjoner der det skal fylles inn masser. I den ene seksjonen skal det fylles ut forurensede mudringsmasser og i den andre seksjonen uforurensede mudringsmasser.

Som modelleringsprogram er Plaxis valgt, dette med bakgrunn i at dette modelleringsprogrammet er blitt brukt i undervisning ved NTNU og på grunn av at det er et etterspurt program i næringa, som trenger kompetanse på dette området. I Plaxis ligger også de viktigste jordmodellene som er nødvendig for beskrivelsen av de forskjellige materialene.

1.2. Områdebeskrivelse

Det aktuelle prosjektet ligger på østsiden av Tromsøya i Troms og Finnmark fylkeskommune vist på kartet i Figur 1.1, [69,685°N; 19,01°Ø]. Området er i dag strandsone og omkringliggende land er regulert som industriområde (Tromsø Kommune, 2023). Det er lagt ved en geoteknisk datarapport fra Multiconsult [2022] i Vedlegg 01.



Figur 1.1 Kart over Tromsø og Kai 24 (FINN kart, 2021)

1.3. Problemstilling

Dette prosjektet gir mulighet til mange forskjellige problemstillinger og det er derfor viktig å begrense oppgaven slik at en ikke ender opp i en situasjon der oppgaven blir uhåndterlig. For denne masteroppgaven er det derfor fokusert på konsolideringen til de utfylte massene, og hvordan en kan bruke Plaxis for å beregne poreovertrykk, deformasjoner og konsolideringstid.

- Hvordan modellere deponering av fin-materiale i sjø med Plaxis?
- Hvilke utfordringer oppstår ved modellering av materiale i suspensjon i Plaxis?
- Hvordan sammenlikner resultatene fra Plaxis med erfaringsbaserte verdier fra områder i nærheten?
- Er det fordeler ved å benytte vertikale dren?

Kapittel 2

2. Metode

I dette kapitlet redegjøres det for hvordan oppgaven er utført, og hvilke valg som er tatt underveis i prosjektet og beslutningsgrunnlaget bak de valgene.

2.1. Plaxis

Plaxis er et modelleringsprogram som benytter seg av FEM (endelig elementmetode) for å modellere geotekniske prosjekteringer. Plaxis blir i stor grad brukt av kommersielle bedrifter og er ettertraktet kompetanse i byggenæringen.

I emnet Geoteknikk, videregående kurs [TBA4116], ble Plaxis brukt som undervisningsprogram og er derfor et naturlig valg av beregningsprogram i denne masteroppgaven.

2.1.1. Utforming av modell

For å skape en modell som er i stand til å representere den faktiske situasjonen og forholdene underveis og til slutt i prosjektet har boredata fra området blitt brukt for å skape en representativ profil. Havnivået i profilen er satt til 0 meter jamfør NN2000.

Kildematerialet for oppbygningen til modellen er hentet fra data- og prosjekteringsrapporter fra Multiconsult og Norconsult. Rapportene er overlevert fra Norconsults kontor i Tromsø. I tillegg til rapportene er det også vært samtaler med nøkkelpersoner i Norconsult, samt veileder fra NTNU.

2.1.2. Bruk av Plaxis

Som nevnt tidligere er Plaxis et FEM-beregningsprogram, dette gjør at Plaxis er i stand til å beregne og illustrere endringer i spenning og tøyning i profilet. Plaxis er også i stand til å beregne tidsutvikling av poreovertrykk ved konsolideringsanalyser. Konsolideringstiden er avhengig av jordens stivhet og permeabiliteten som er input parametere i programmet.

I oppgaven blir resultater og illustrasjoner fra Plaxis-modellen brukt til å beskrive prosjektet før, i løpet av og etter av prosessen. Plaxis er med på å skape grunnlaget for prosjektets framgang og hvilke valg som bør gjøres i byggefasen.

Som alle andre beregningsprogram er det viktig å ha et kritisk blick på hvilke resultater som kommer ut av beregningene. Et vulgært men godt uttrykk som ofte er brukt i denne

sammenhengen er «*shit in, shit out*». Dette uttrykket illustrer på en god måte hvordan programmer som Plaxis er helt avhengig av kompetente brukere og riktig informasjon. Plaxis er ikke i stand til å forstå hva en tenker, bare det en legger inn eller ikke legger inn i programmet. Det er derfor det er viktig med en kritisk sans til resultatene, samt det en selv legger inn som parametere for utregning. Dette blir videre utdypet i diskusjonskapitlet.

For å kunne ha en god forståelse av hvilke resultater som er utenfor forventningen er det viktig med erfaringsbasert kritisk tenkning, samt god kommunikasjon med fagpersoner innenfor fagfeltet. I denne sammenhengen har det derfor vært samtaler og diskusjoner med erfarne geoteknikere og professorer. Det er også gjort håndberegninger for å skape et godt inntrykk av størrelsen av de forskjellige resultatene. Håndberegning er også grunnlaget for input-parameterne til Plaxis, og er hentet fra laboratorieundersøkelsene som er utført av Multiconsult i datarapportene.

2.2. Veiledning

I arbeidet med masteroppgaven har det vært viktig med veiledning og diskusjonspartnere, disse omfatter i hovedsak: prof. Gudmund Reidar Eiksund (veileder), Keren Schwartz og Greger Wian i Norconsult, og medstudenter ved NTNU.

2.2.1. Veileder

Universitetet stilte med veileder for oppgaven ved prof. Gudmund Reidar Eiksund. Gjennom flere møter med ham i semesteret er det utarbeidet ramme for oppgave og veiledning i oppgaven. Mange av ideene og valgene tatt i denne oppgaven er gjort i samarbeid med professor Eiksund. Professor Eiksund har også vært viktig for hvordan Plaxis er blitt brukt, hvilke beregningsmetoder som skal benyttes, samt valg av parametere.

Veiledningen har for det meste bestått av fysiske møter, men også digitale møter over teams de gangene det ikke var mulig med fysisk oppmøte.

2.2.2. Norconsult

Norconsult er eier av prosjektet, som denne oppgaven skrives om. De har derfor vært helt nødvendige samarbeidspartnere for å kunne framstille en god oppgave. Fra Norconsults side har det i hovedsak vært to nøkkelpersoner, nevnt ovenfor. Disse to utgjør den geotekniske avdelingen til Norconsult i Tromsø.

Deres bidrag ligger hovedsakelig i at de har stilt opp med data og rapporter fra området. Disse dataene og rapportene er i enkelte tilfeller unntatt offentlighet og er dermed ikke mulig å

overføre digitalt utenfor Norconsults egne systemer. Derfor er samarbeidet og viljen til å finne løsninger viktig for utviklingen av oppgaven og Plaxis-modellen.

I perioder har det vært nødvendig at jeg er i Alta eller Tromsø, da har Norconsult vært behjelpelig med å stille opp med kontorplass slik at arbeidet kunne fortsette uavbrutt. Dette har ført til at jeg har hatt tettere kontakt med fagpersoner i bedriften og gitt mulighet til å diskutere aspekter av oppgaven med andre enn de allerede nevnt.

2.3. Litteratur

Litteraturgrunnlaget i denne oppgaven består i hovedsak av faglitteratur som er brukt i undervisning ved NTNU. Dette utgjør i stor grad kompendier i fagene: Geoteknikk, felt- og laboratorieundersøkelser [TBA4110], Teoretisk geoteknikk [TBA5100], Geohazards and risks [TBA5150], Fundamentering og skråningsstabilitet [TBA5155], Hydrogeologi [TGB4205], Kyst og havnefasiliteter [TBA4145] og Geoteknikk, videregående kurs [TBA4116].

Utenom den faglige litteraturen fra undervisningen ved NTNU er det hentet rapporter, masteroppgaver, og andre fagfelleverderte utgivelser fra ORIA, universitetsbibliotekets søkemotor for bibliotekets samling av bøker og elektroniske utgivelser. Ved behov er det også hentet utvalgte artikler fra aktuelle tidsskrifter, og forskningsartikler fra andre universiteter i utlandet.

Kapittel 3

3. Teori

I dette kapitlet presenteres den teorien som er relevant for oppgaven og er med på å skape det grunnlaget som skal til for å gjøre beslutninger. For denne masteroppgaven er det antatt en viss grad av forkunnskaper geoteknikk og geologi.

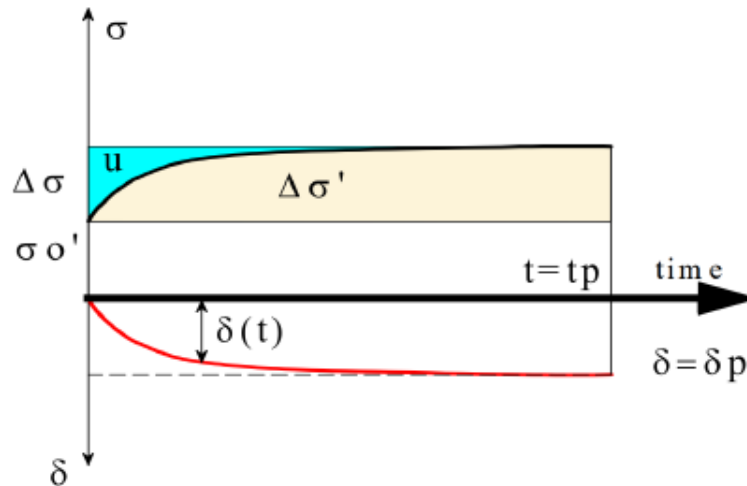
3.1. Deponering

Når en skal deponere finmateriale i hav er det i hovedsak to metoder som blir benyttet, slippe masser fra lektere som kan åpnes i bunnen eller å spyle ut i form av slam. Når områdestabiliteten tillater det, kan det også benyttes maskiner fra land.

Det er også mulig å deponere fra over vannoverflaten eller føre rør ned til bunnen og deponere massene direkte. Sistnevnte metode er i hovedsak bruk til å deponere forurensede materialer for å forhindre spredning av miljøgifter. Ved deponering av finstoffer vil det ta tid før alt materialet er falt ned til bunnen (Thoresen, 2014). Her spiller både kornstørrelse og korn form inn. Prosessen som beskriver hvordan sedimenter faller mot havbunnen heter sedimentering. Dette begrepet er videre forklart og beskrevet senere i kapitlet.

3.2. Setninger

Setninger i grunnen oppstår når den blir utsatt for større effektivspenninger enn den tidligere har vært utsatt for. Disse spenningene kan være en konsekvens av fyllinger, aktivitet eller bygninger. Det økte spenningsnivået i grunnen vil føre til poreovertrykk, over tid vil dette overtrykket utlignes. Dette vil redusere porevolumet og dermed også det totale volumet til jordsegmentet. Denne volumendringen vil forårsake en deformasjon som på overflaten vil gi setninger. Dette ble først beskrevet av Terzaghi i 1943 (Terzaghi, 1943). Figur 3.1 illustrere hvordan denne prosessen foregår.



Figur 3.1 Klassisk konsolideringsteori

Verdien t_p beskriver hvor lang tid det tar før poreovertrykket u , poretrykk utover det hydrostatisk, er utliknet. På samme måte er δ_p verdien for deformasjon ved tiden t_p . For å bestemme t_p benyttes formelen under, hvor H er dreneringsveien for porevannet og C_v er konsolideringskoeffisienten til materialet.

$$t_p = \frac{H^2}{C_v}$$

Hvordan setningene vil forekomme avhenger av kornfordelingen i grunnen. Dette er fordi det er kornfordelingen som legger grunnlaget for hvor permeabel jorda er, og hvor fort vannet kan dreneres ut. Jordarter med høy permeabilitet som grus vil kunne drenere ut vannet betraktelig fortere enn jordarter med lav permeabilitet, som leir (Brattli, 2009).

3.3. Kornfordeling

Sedimenter er et begrep som omfatter alt bergmateriale fra fraksjonen leir til blokk. Selv om alle kan omtales som sedimenter er det store forskjeller i egenskapene til de forskjellige fraksjonene. For å kunne snakke om de med en større forståelse er de derfor delt opp etter kornstørrelse og de forskjellige størrelsene har fått egne navn. I Figur 3.1 er klassifikasjonene oppgitt på engelsk med kornstørrelsen i millimeter (Sandven et al., 2017).

Fractions		Grain size
Principal denotation	Sub-denotation	(mm)
Block	-	> 600
Cobbles	-	600 - 60
Gravel	Coarse gravel	60 - 20
	Medium gravel	20 - 6
	Fine gravel	6 - 2
Sand	Coarse sand	2 - 0.6
	Medium sand	0.6 - 0.2
	Fine sand	0.2 - 0.06
Silt	Coarse silt	0.06 - 0.02
	Medium silt	0.02 - 0.006
	Fine silt	0.006 - 0.002
Clay	-	< 0.002

Figur 3.2 Definisjon av kornstørrelser

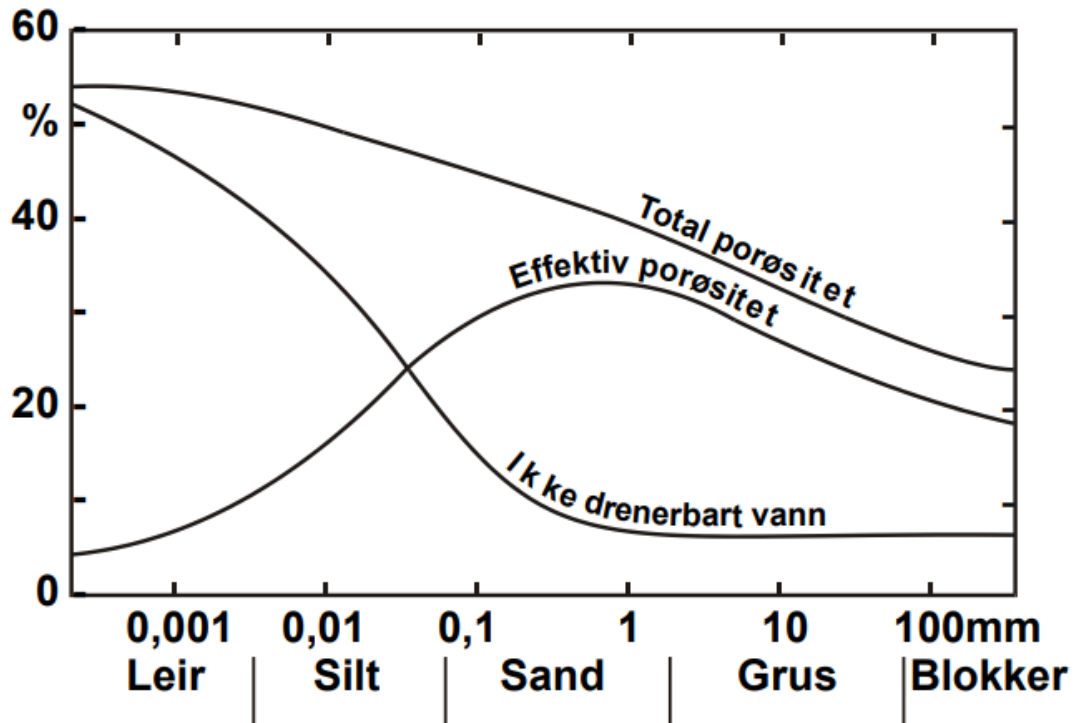
Oppdelingen er gjort slik at de forskjellige hovedgruppene har generelt forskjellige egenskaper. De største forskjellene er i friksjonsvinkel, attraksjon, permeabilitet og kapillaritet. En kornfordelingskurve kan brukes til å sette navn og klassifisere materialer. En viktig definisjon er at alt materiale med 15 til 30 % leir skal benevnes som leire med de andre materialene som suffikser. Over 30% innhold skal materiale kun benevnes med leire og ved under 15% leire skal det nevnes som et suffiks [leirig].

3.3.1. Permeabilitet

Permeabilitet beskriver et mediums evne til å lede væsker. Enheten for permeabilitet [k] er (m/s). Permeabilitet må ikke forveksles med porøsitet som beskriver porevolum over totalvolum. Permeabilitet er en fysisk størrelse som er avhengig av hvilken veske som strømmer gjennom mediet. Siden det i geoteknikk nesten utelukkende er vann som strømmer gjennom sedimenter er det derfor gjort en forenkling der en kaller det som opprinnelig er hydraulisk konduktivitet for permeabilitet. Derfor vil det som egentlig er hydraulisk konduktivitet bli beskrevet som permeabilitet i denne oppgaven.

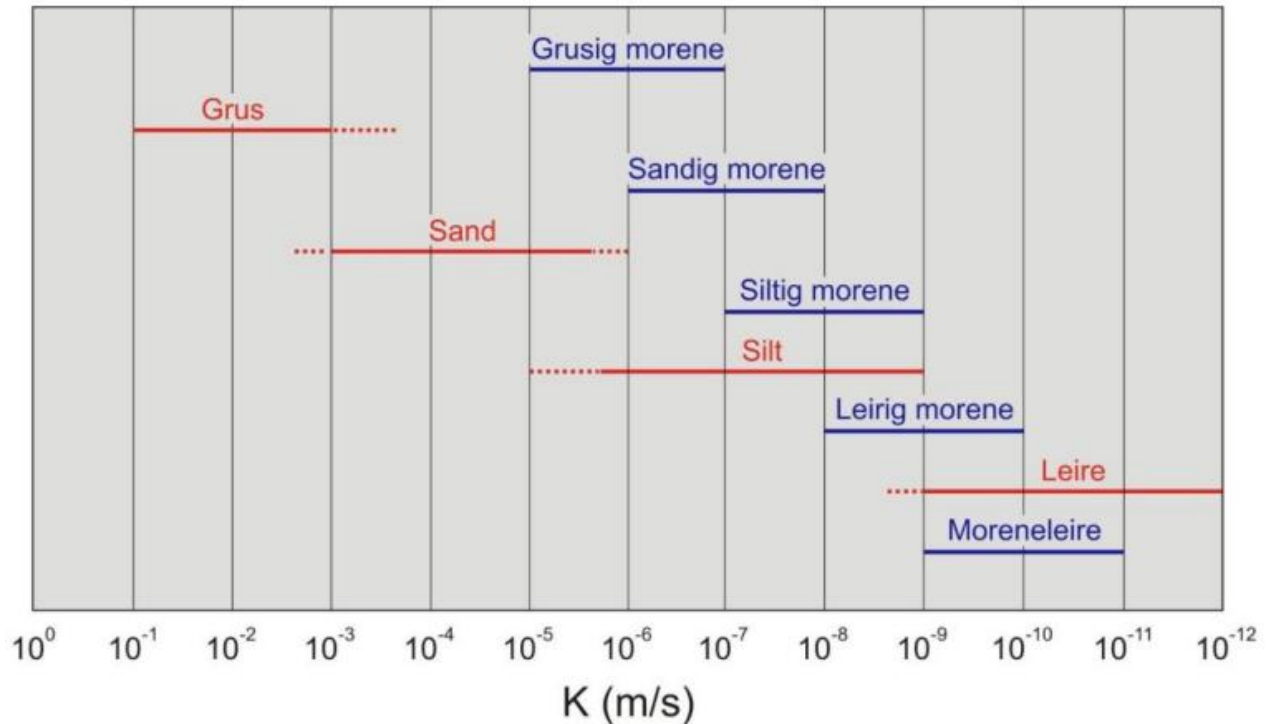
For forskjellige sediment-sammensetninger i jorda vil dermed permeabiliteten ha store endringer. Stort porevolum i sand og grus øker gjennomstrømningskapasiteten for vann, og gjør at denne typen material er svært drenerbar. I silt og leir er det totale porevolumet større enn hos grus og sand, og kan dermed beskrives som mer porøse. Porerommene er derimot svært

trange, og vannet kan ikke lett dreneres ut. På Figur 3.3 viser porøsiteten til de forskjellige fraksjonene, men også den reelle evnen til å lede vann, dette illustrerer hvordan for eksempel leir kan ha høy porøsitet, men lav permeabilitet (Brattli, 2009).



Figur 3.3 Porøsitet og drenerbart vann i forskjellige fraksjoner

I Figur 3.4 er den typiske permeabiliteten for de forskjellige jordtypene. Denne figuren forklarer godt hvordan permeabiliteten øker med kornstørrelsen. Kornfordelingen i jorda er ikke alltid ensgradert og materialer kan derfor unngå fra det denne figuren viser (Brattli, 2009).



Figur 3.4 Typiske intervaller for permeabilitet for de forskjellige fraksjonene

3.4. Jordparametere

For at det skal være mulig å beskrive jorda og dens egenskaper på en måte som gjør at det er mulig for Plaxis og andre beregningsmetoder og representere virkeligheten, er det behov for flere forskjellige beregningsmodeller. Disse beregningsmodellene har til dels forskjellige input-parametere. Grunnen til at det er etablert flere beregningsmodeller for jord kommer av at *kritiske* egenskaper for de forskjellige fraksjonene er forskjellige, og det er dermed nødvendig at en regner en type jord annerledes enn en annen. Beregningsmodellene har også forskjellige egenskaper som gjør de bedre egnet til å beregne stabilitet, eller konsolidering. I dette underkapitlet presenteres de forskjellige beregningsmetodene som er brukt i oppgaven.

3.4.1. Mohr Coulomb

Mohr coulombmodellen er en modell som antar at jord er lineærelastisk og perfekt plastisk, og er som regel den første beregningsmodellen en bruker når en lærer geoteknikk. Teorien som ligger bak Mohr Coulomb modellen er Hookes lov for den lineærelastiske delen, og Mohr Coulomb bruddkriteriet for perfekt plastisk deformasjon. Selv om modellen ser på jord som lineærelastisk reflekterer ikke dette virkeligheten. Modellen er generelt uegnet til å gjøre beregninger på spennings- og tøyningssendringer før brudd, men fungerer godt når den benyttes

til å undersøke brudd. Mohr Coulomb trenger to stivhetsparametere og tre styrkeparametere. Stivhetsparametere som ofte blir brukt er Youngs modulus [E_{ref}] og Tverrkontraksjon [ν], men skjærmodulus [G] og ødometermodulus [E_{oed}] kan også benyttes. Styrkeparameterne er kohesjon [c], friksjonsvinkel [ϕ] og dilatansvinkelen [ψ]. I Norge og på NTNU er det vanlig å benytte seg av attraksjon istedenfor kohesjon, dette er ikke en stor endring, men siden Plaxis benytter seg av kohesjon framfor attraksjon er dette et naturlig valg (*Bentley Communities*, 2020).

$$kohesjon = attraksjon * \tan(\text{friksjonsvinkel})$$

3.4.2. Hardening soil

Hardening soil eller herdende jord, er i motsetning til Mohr Coulomb ikke lineærelastisk. Stivheten er ikke konstant, men endrer seg utfra hvordan jorda er blitt herdet med skjærherding eller kompresjonsherding. Denne modellen er derfor bedre egnet til å beskrive hvordan et materiale vil endre seg og få endret stivhet etter spennings- og tøyningendring. *Hardening soil* benytter seg av det samme bruddkriteriet som Mohr Coulomb.

Viktige inputparametere for hardening soil er spenningsavhengig stivhet [m], plastisk tøyning fra initial deviatorisk last [E_{50}^{ref}], plastisk tøyning fra initial komprimering [E_{oed}^{ref}], elastisk avlasting [E_{ur}^{ref} og ν_{ur}]. Bruddparameterne er som tidligere nevnt de samme som i Mohr Coulomb: kohesjon, friksjonsvinkel og dilatansvinkel (*Bentley Communities*, 2020).

3.4.3. Soft soil

Soft soil modellen, eller «myk jord» modellen, er bygd opp for å beskrive jord som har stor kompressibilitet. Dette er for eksempel: leir, leirig silt og organisk materiale. Modellen passer best med tilnærmet normalkonsolidert materiale med en $E_{oed} = 1$ til 4 MPa. Modellen er basert på *CAM-clay* modellen og bruker «swelling-index» [κ] og «compression index» [λ] som sine stivhetsparametere samt tverrkontraksjon [ν]. For å beregne brudd med *soft soil* modellen benyttes Mohr Coulomb bruddmekanisme. Derfor er det også nødvendig med kohesjon og friksjonsvinkel (*Bentley Communities*, 2020).

3.5. Sedimentering

Sedimentering beskriver hvordan suspendert partikler oppfører seg i flytende medium, i denne oppgaven er det mest relevant å benytte begrepet i sammenheng med jordpartikler suspendert i sjøvann. Sjøvann har en større tetthet enn destillert vann og inneholder 34,8g salt per kg sjøvann (*Saltvann - Institutt for biovitenskap*, 2021).

For en generell forståelse av sedimentering og sedimenteringshastigheten til de forskjellige kornstørrelsene benyttes Stokes formel for terminalhastigheten til sfæriske partikler, vist under.

$$v = \frac{2(\rho_s - \rho_w)}{9\eta} gR^2$$

v = Terminalhastigheten til partikkel.

ρ = Tyngdetetthet til (s)oilds og (w)ater

η = Viskositet

g = Gravitasjons akselerasjon

R = Radius av partikkel

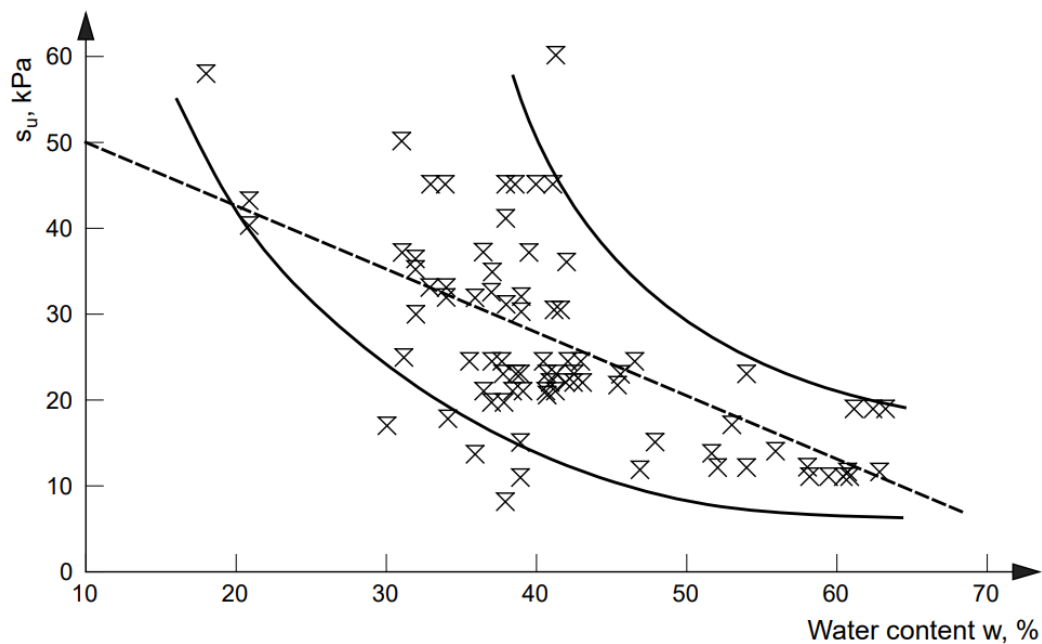
Denne formelen beskriver et ideelt tilfelle der alle partikler er sfæriske og er suspendert i stillestående væske. Til praktiske formål vil ikke alle partikler være sfæriske, det vil derfor oppstå turbulens bak partikkelen når den synker ned mot bunnen. Denne turbulensen vil skape et sug som vil bremse partikkelen. Strømforhold i væsken vil også påvirke hastigheten suspenderte partikler vil synke med (Chakraborti & Kaur, 2014).

På grunn av den større tettheten til saltvann vil det ifølge Stokes formel, ta lengere tid for partikler å sedimentere, Sjøvann har også en noe høyere viskositet, dette tilsier også at sedimenteringen vil ta lengre tid (*Fresh Water and Seawater Properties*, 2011). Det kan likevel observeres at sedimentering av fin-partikler i sjøvann går raskere enn i ferskvann. Dette kommer av de elektromagnetiske egenskapene til sjøvann som skaper statisk-elektriske bindinger. Disse prosessene er veldig avhengige av vannets innhold av løse kationer og anioner og vannets pH-verdi. I sjøvann er pH rundt 8,1 som gir gode forhold for fnokking (Zhang et al., 2022). Fnokking beskriver hvordan suspenderte leirpartikler fester seg til hverandre og skaper en større klump av partikler som gir den større evne til å falle mot bunnen (*Geologisk ordliste, NGU*, 1995).

På grunn av den typiske formen på leirpartikler vil dette skape en korthusstruktur der strukturen er holdt på plass med både friksjonskrefter og elektromagnetiske krefter. Dette vil utgjøre en stabil kornstruktur inntil saltet som forårsaker de elektromagnetiske bindingene er vasket ut av grunnvannstrømmer. Det er denne prosessen som skaper kvikkleir. På grunn av leiras lave permeabilitet vil denne prosessen ta lang tid og ikke være til bekymring de neste tusen årene (Solberg, 2022).

3.6. Konsolidering

Jord ligger i lag under bakken og vil være utsatt for forskjellige overlagingstrykk bestemt utfra hvor langt under terrengoverflaten den ligger. Som Figur 3.5 viser er det en klar sammenheng mellom vanninnhold og udrenert skjærstyrke. Figuren viser også at styrken til et materiale vil øke gjennom konsolideringstiden. Derfor vil en kunne styrke et material ved å utsette den for overtrykk (Janbu et al., 2021).



Figur 3.5 Sammenheng mellom S_u og vanninnhold

Som grafen i Figur 3.5 viser er det en sterk korrelasjon mellom udrenert skjærstyrke og vanninnhold. Dette er grunnen til at en ser en større styrke med dybden. Det skilles mellom to typer konsolidering, normal- og overkonsolidering. Metoden for å skille mellom disse to er ved bruk av ødometer. I et ødometer måles materialets stivhet, denne stivheten blir uttrykt ved en modulus M .

3.7. Vertikale dren

Som tidligere beskrevet i kapittel 3.2 Setninger, er distansen porevann må drenere en avgjørende faktor for hvor lang tid setningen vil ta. Dette kommer av formelen for t_p , t_p er tidligere forklart og er tiden det tar før poreovertrykket er utliknet i jorda. Om det er mulig å redusere H i formelen for t_p er det tydelig at dette vil ha stor påvirkning, for eksempel vil en endring i H fra 10 til 1 meter bety at t_p reduseres til 0,01 av opprinnelig tid. Det er dette

prefabrikkerte vertikale dren ønsker å oppnå. Den beste bruken av prefabrikkerte vertikale dren er derfor i tykke sammenhengende leirelag, der de vertikale drenene vil redusere H betraktelig.

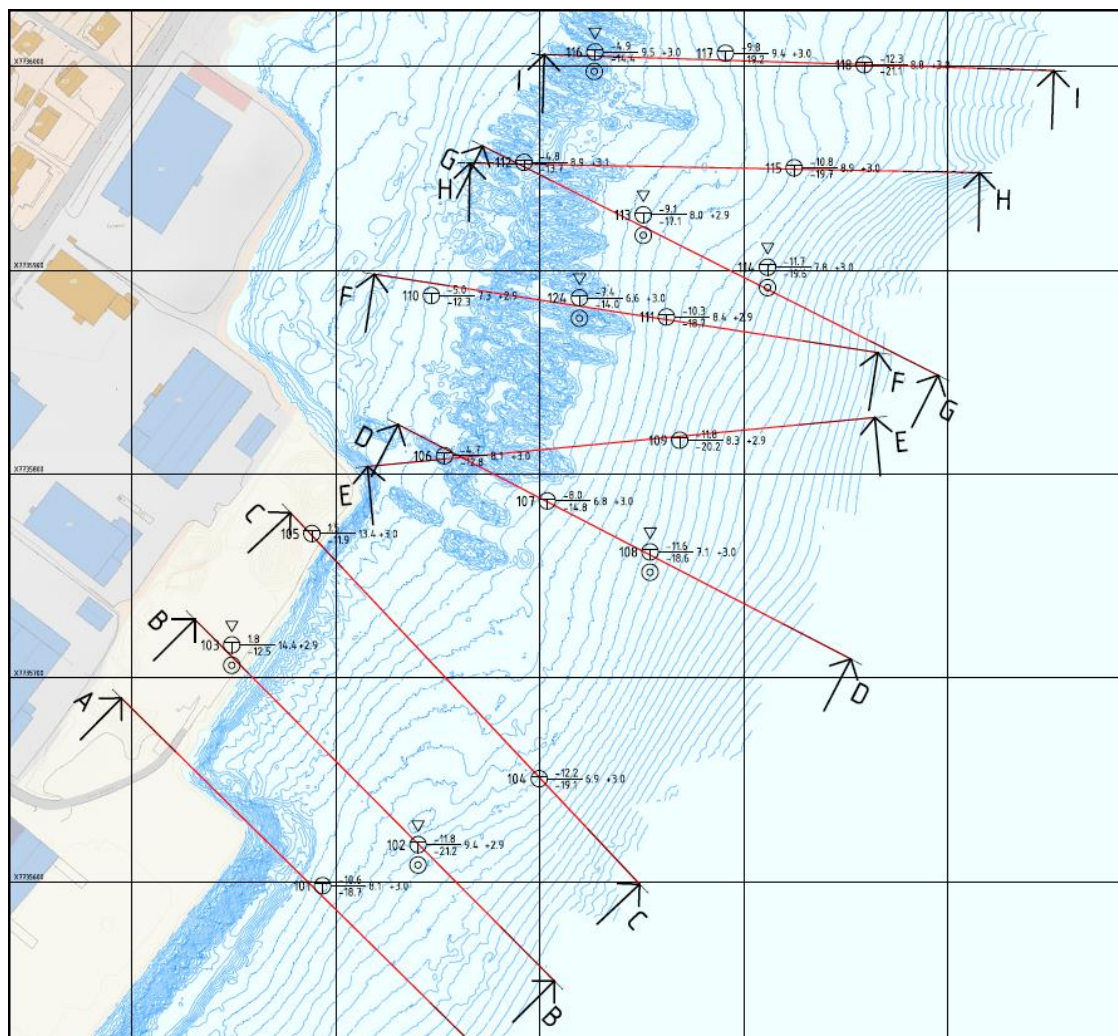
Prefabrikkerte dren blir installert ved hjelp av et stålrør som settes ned i jorden. Drenet blir ført ned sammen med stålprofilet med et anker på enden. Dette ankeret blir utløst og stålet trekkes opp med det prefabrikkerte drenet liggende igjen i bakken. For å installere slike vertikale dren er det behov for store maskiner, dette kan skape utfordringer om grunnen er bløt (Holtet, 2022).

Alternativet til prefabrikkerte vertikale dren er tradisjonelle vertikaldren som utføres på liknende måte. Når en skal lag disse drenene bores et hull, og fylles med sand. Denne metoden kan være effektiv, men er sårbar for tetting. Denne tettingen skjer ved at leir- og silt-partikler setter seg i porene til sanden.

Kapittel 4

4. Laboratoriums resultater

De geotekniske undersøkelser for dette prosjektet er utført av Multiconsult. Oversiktskart over borepunkt og tester utført er vist i Figur 4.1. En oversikt over utførte tester vises i Tabell 1. I dette kapitlet blir relevante og illustrerende resultater vist fram. Full datarapport vil bli lagt ved i Vedlegg 01



TEGNFORKLARING:

- DREIESONDERING
- ENKEL SONDERING
- ▼ RAMSONDERING
- ▽ TRYKKSONDERING
- ⊕ TOTALSONDERING

- ⊙ PRØVESERIE
- PRØVEGROP
- ⬇️ DREIETRYKKSONDERING
- ⊠ SKRUPLATEFORSØK
- + VINGEBORING

- ⊖ PORETRYKKMÅLING
- ⊗ KJERNEBORING
- ⚙️ FJELLKONTROLLBORING
- ⚓ BERG I DAGEN

KARTGRUNNLAG:
 KOORDINATSYSTEM:
 HØYDEREFERANSE:

DIGITALT KART FRA KUNDE/GEINORGE
 EUREF89, sone 33
 NN 2000

EKSEMPEL:

⊕ TERRENGKOTE/SJØBUNNKOTE BORET DYBDE + BORET I BERG
 ANTATT BERGKOTE

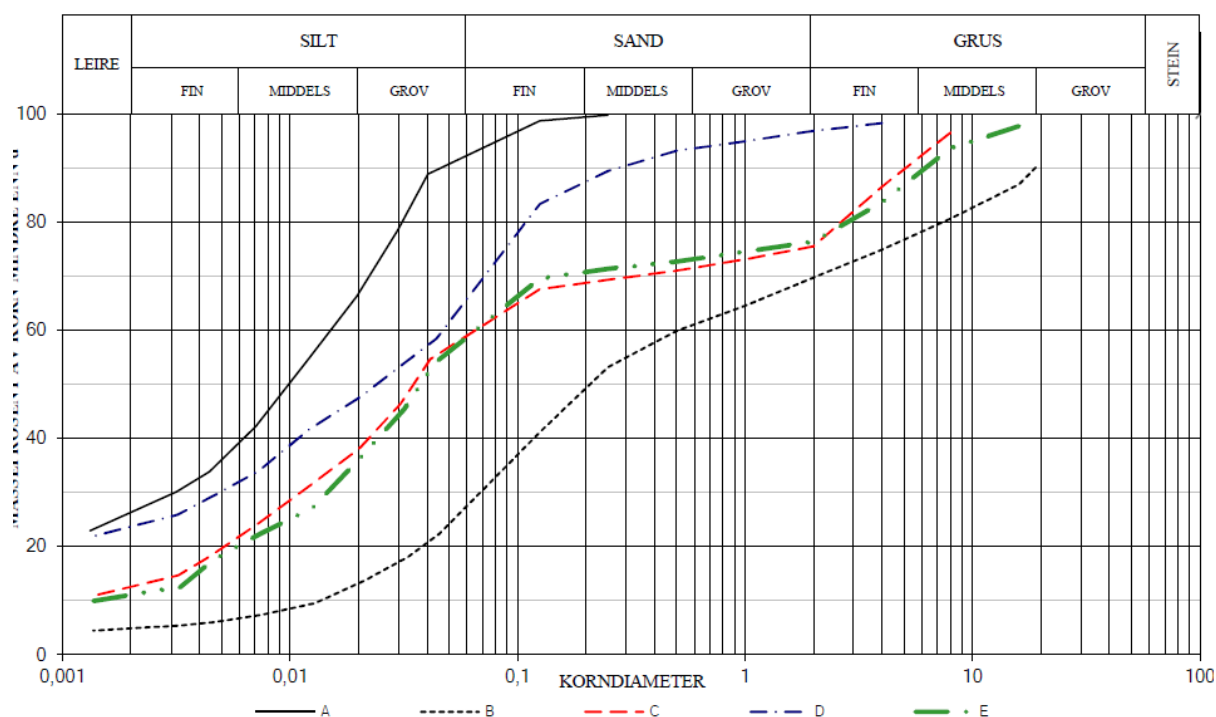
Figur 4.1 Oversiktskart over prøveboringer

Tabell 1 Antall prøver tatt

Tester	Antall utført
Rutineundersøkelser av prøveposer	2
Rutineundersøkelser av 54mm sylinterprøver	23
Korngraderingsanalyser	11
Konsistensgrenser i sylinterprøver	10
Treaksialtest	2
Ødometertest	1

4.1. Kornfordeling

Som skrevet i teorikapitlet er kornfordelingen til et jordlag viktig for å kunne bestemme hvilken beregningsmodell en skal benytte. Permeabiliteten vil også avhenge av hvordan kornfordelingen ser ut. Det er derfor det å kjenne kornfordelingen til de forskjellige lagene er nyttig for en geoteknikker. For å illustrer kornfordelingen i havbunnen er derfor Figur 4.2 valgt. Den gir et godt bilde over hvilke forskjellige materialer som ligger under havbunnen.



SYM BOL	SERIE NR.	DYBDE (kote)	BESKRIVELSE	ANMERKNINGER	METODE		
					TS	VS	HYD
A	113	3,2-4,0 m	LEIRE, siltig			x	
B	114	4,2-5,0 m	MATERIALE, sandig, grusig, siltig	x	x	x	
C	116	1,7-2,5 m	SILT, grusig, leirig	korall- og skjellrester			
D	116	3,02-3,5 m	LEIRE, siltig, sandig			x	
E	122	1,2-2,0 m	SILT, grusig, leirig	korall- og skjellrester			

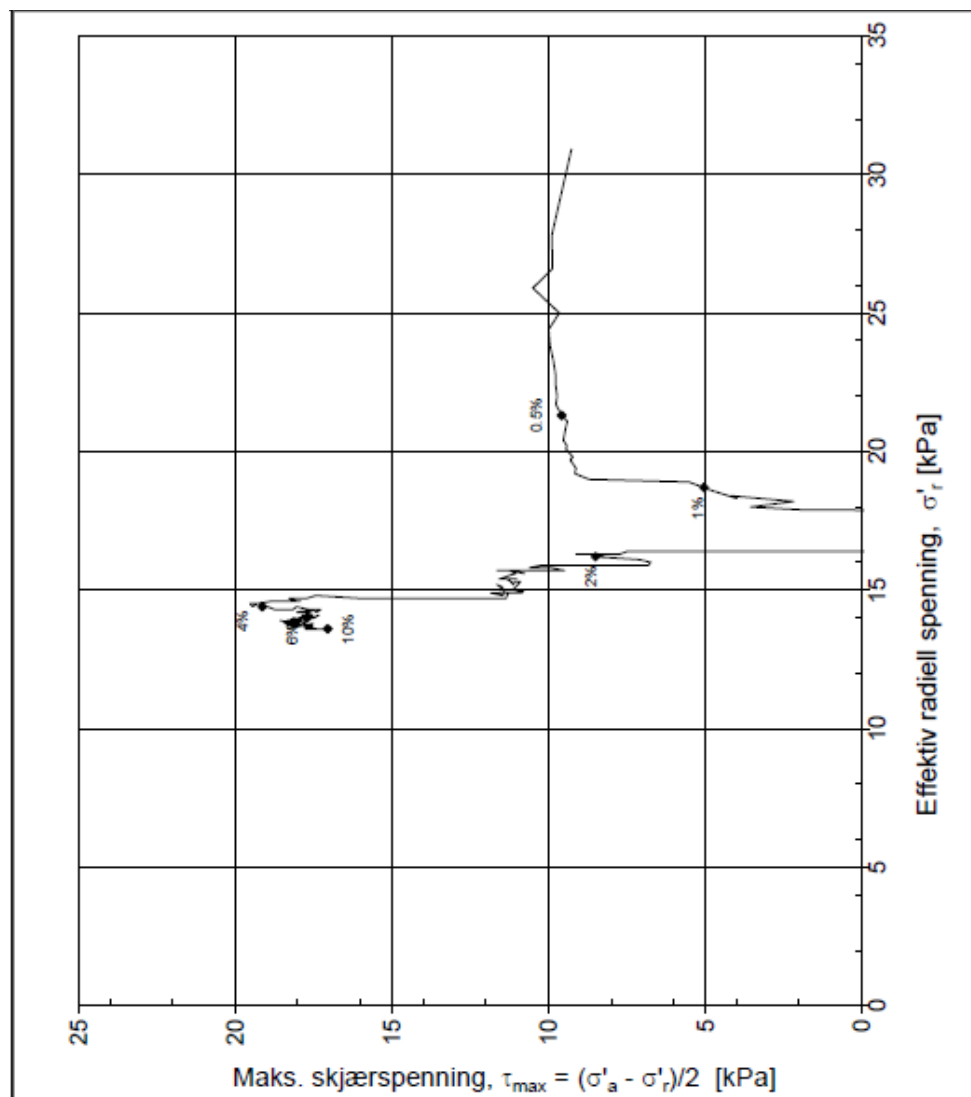
Figur 4.2 Kornfordeling fra havbunn i prosjektområdet

Av kornfordelingskurvene er det tydelig at materialene er sammensatt av forskjellige fraksjoner og i liten grad er sorterte. For materialer som er hentet fra dypere enn tre meter [A og D] er det tydelig at den er leir, men med en stor siltandel.

4.2. Treksialforsøk

Det ble utført to treksialforsøk på to forskjellige prøver. Den ene fra borehull 108 og den andre fra borehull 113. På henholdsvis -5,65 og -4,70 meter. Prosedyren som er fulgt er CAUa. Dette står for aktiv udrenert anisotropisk kompresjonstest, og er en test som ofte er brukt på leir, silt og leirig morene. Det er produsert $p - q$, $\tau_{\max} - \sigma_3$ og $\tau_{\max} - (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ plott. I Figur 4.3 vises $\tau_{\max} - \sigma_3$ plottet. Fra dette plottet er det mulig å beregne friksjonsfinkel $[\varphi]$ for den aktuelle leira. Utrengningen for dette er gjort i Kapittel 5, Beregninger.

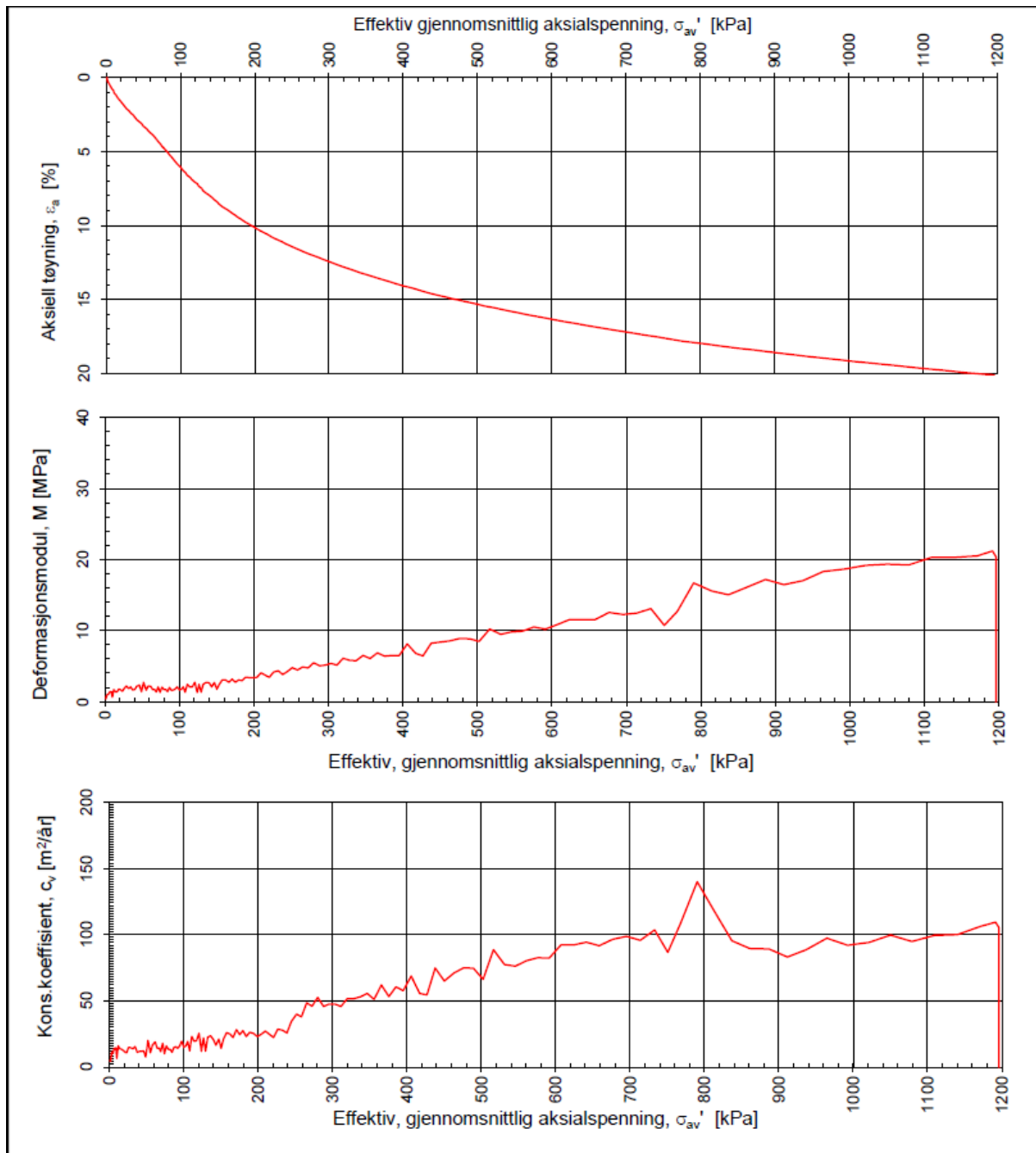
I tillegg til disse plottene er det også logget aksiall tøyning $[\varepsilon_a]$ mot poretrykk $[u]$, maks. skjærspenning $[(\sigma_1 - \sigma_3)/2]$ og mobilisert friksjon $[\tan(\rho)]$. Samt utpresset porevann $[\Delta V]$ og volumtøyning $[\varepsilon_{vol}]$ i konsolideringsfase mot roten av tid $[\sqrt{t}]$. Resultatene fra treksialforsøkene er fra side 33 til 42 i Vedlegg 01.

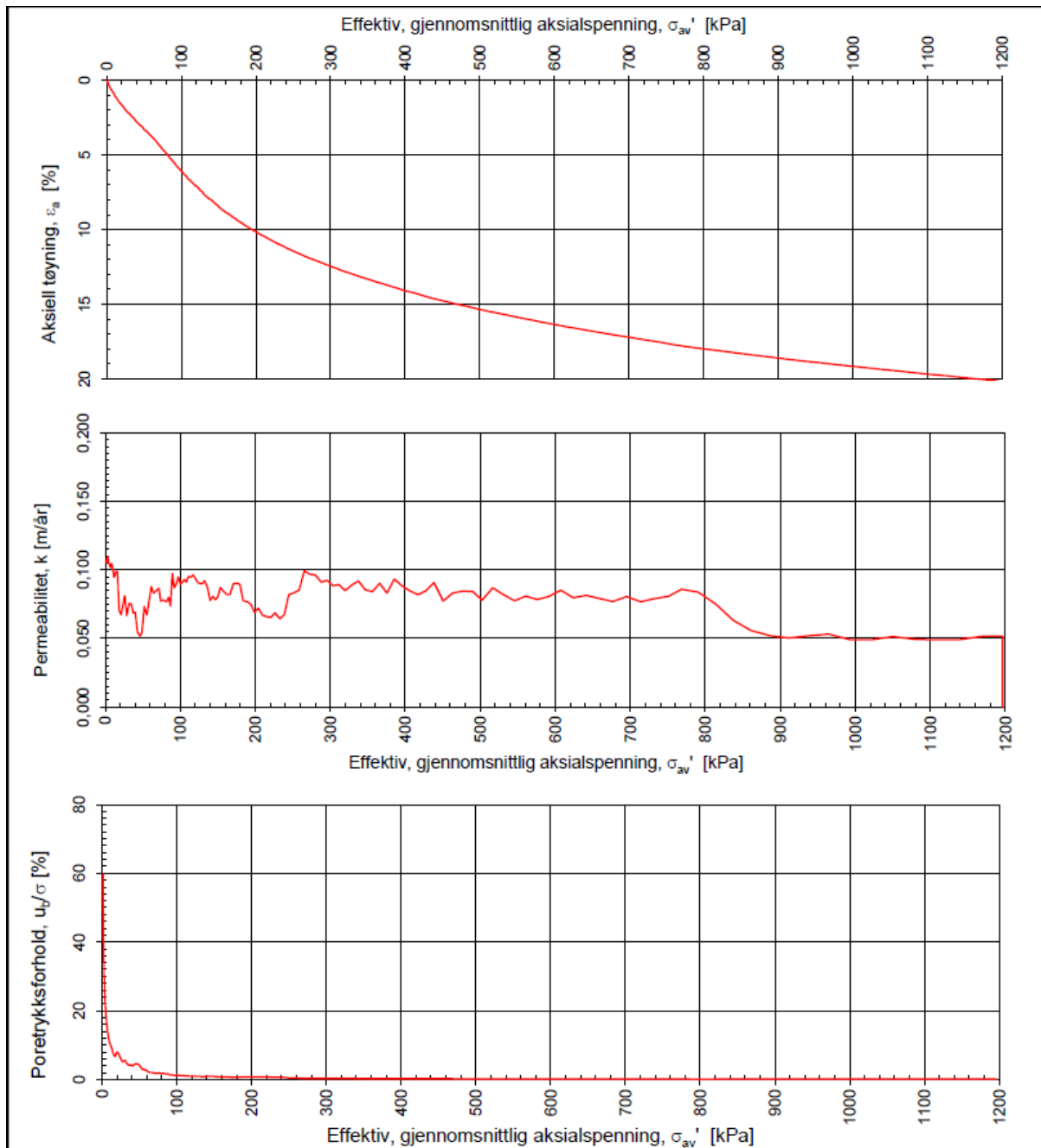


Figur 4.3 Triaksial forsøk skjærspenning mot effektiv radiall spenning

4.3. Ødometerforsøk

Fra området er det gjort kun et ødometerforsøk, denne ble gjort fra borehull 124 ved -5,73 meter. For forsøket er det blitt brukt CRS prosedyre. Dette vil si at det er brukt kontinuerlig tøyningssrate på prøven. Fordelen ved denne prosedyren er at den tar mye kortere tid, rundt 8-10 timer. I motsetning vil et trinnvis ødometerforsøk ta opp mot en uke.





Tromsø Havn KF				Tegningens filnavn:	
Molo Nygård Isrenna - Supplerende grunnundersøkelser				10243104-RIG-TEG-400	
Kontinuerlig ødometerforsøk, CRS-rutine. Plott B: $\sigma_{av}' - \epsilon_a$, k og u_v/σ .					
MULTICONSULT AS Kvaløyvegen 156 9013 TROMSØ Tlf: 77 62 26 00	Forsøksdato:	Dybde, z (m):	Borpunkt nr.:		
	02.05.2022	5,73	124		
	Forsøknr.:	Tegnet av:	Kontrollert:	Godkjent:	
1	MARTM	SR	JRS		
Oppdrag nr.:	Tegning nr.:	Prosedyre:	Programrevisjon:		
10243104-01	RIG-TEG-400.2	CRS	00.01.1900		

Kapittel 5

5. Beregninger

5.1. Utgangspunkt

Prosjektet skal gjennomføres på naturlig havbunn, som består av tre til fire meter skjellsand over tre til fire meter leire. Siden tykkelsene på de to lagene har små variasjoner anslås de til å være 3,5 meter tykke hver. På leira er det blitt utført både triaksialtest og ødometertest av Multiconsult. Det er resultatene i den datarapporten som legger grunnlag for videre beregninger i dette prosjektet.

5.2. Ødometertest

Ødometer testen er gjort på en prøve tatt 5,73 meter under havbunnen, og det er benyttet CRS-metoden for å gjennomføre denne testen. Både diagrammene for tøyning mot aksialspenning og deformasjonsmodulus mot aksialspenning viser tydelig en normalkonsolidert leire, med tanke på at prøven kan være noe forstyrret kan en anta en liten overkonsolidert oppførsel. Modulustallet $[m]$ kan bergenes fra $M - \sigma'_{av}$ diagrammet og er $9000/450 = 20$. Dette kan klassifiseres som en middels til stiv leire.

Med modulustallet er også stivhetsmodulusene for soft soil modellen κ [kappa] og λ [gamma] gitt ved:

$$\lambda^* = \frac{1}{m} = 0,05$$

$$\kappa^* \approx \frac{\lambda^*}{5} = 0,01$$

Denne stivheten danner også grunnlaget for stivheten i den ferdigkonsoliderte fyllmassen.

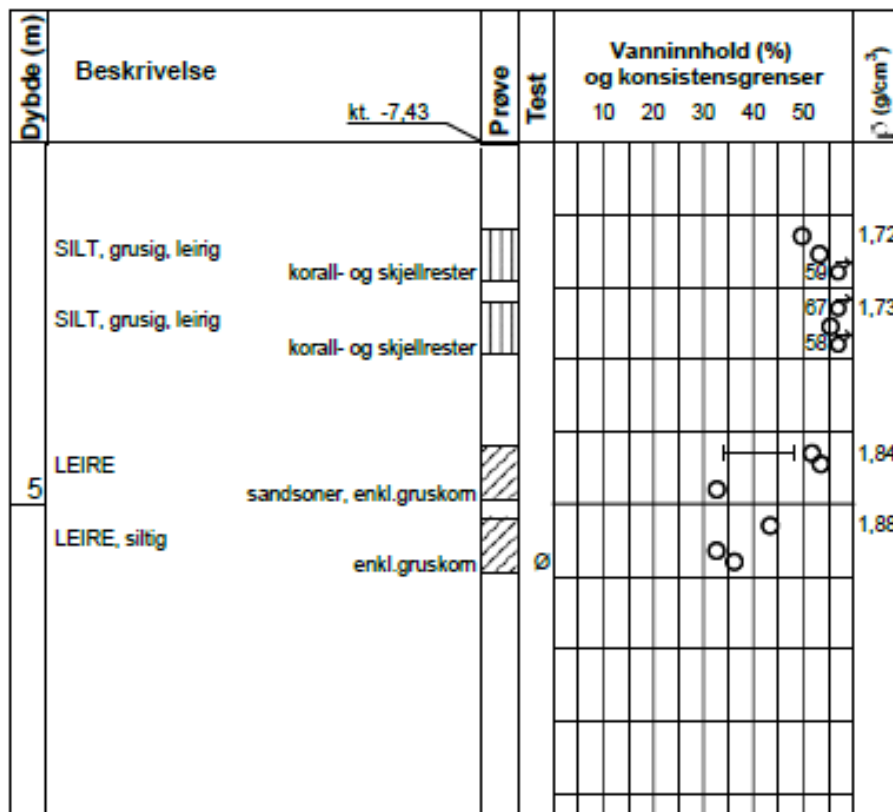
5.2.1. Deformasjonsmodulus [M]

Fra ødometertesten er det gitt en graf over deformasjonsmodulus $[M]$ mot effektiv aksialspenning $[\sigma'_{av}]$. Fra denne er det mulig å bestemme stivheten til jordmaterialet. For å få riktig verdi for deformasjonsmodulus er det nødvendig å vite insitu effektivspenning $[\sigma'_{v0}]$ og legge til antatt endring i effektivspenning $[\Delta\sigma'_v]$.

$$\sigma'_v = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v$$

For langsiktig deformasjon i grunnen er det leira som er mest sensitiv, det er også i leira ødometer testen er gjennomført. Laget med korallsand har en mektighet på 3 meter, det vil si at det ligger omtrent 2,73 meter med leire over testpunktet. I Figur 5.1 er densiteten til det forskjellige materialene gitt. Det øverste sand-laget har en densitet på $\approx 1,73$ som tilsvarer en egenvekt på $17,3 \text{ kN/m}^3$, leira har en egenvekt på $18,6 \text{ kN/m}^3$.

Dette betyr av $\sigma_{v0}' = 3\text{m} \times 17,3 \text{ kN/m}^3 + 2,73\text{m} \times 18,6 \text{ kN/m}^3 - 5,73\text{m} \times 10 \text{ kN/m}^3 = \underline{45 \text{ kPa}}$. Med denne spenningssituasjonen vil deformasjonsmodulusen [M] være 2 MPa. Fyllingen som skal legges over havbunnen har en mektighet på omtrent 10 meter og vil utgjøre en $\Delta\sigma_v'$ på $\approx 70 \text{ kPa}$. Dette gir en $\sigma_v' = 45 \text{ kPa} + 70 \text{ kPa} = 115 \text{ kPa}$. Mellom 45 kPa og 115 kPa er det ikke endring i deformasjonsmodulusen og det er hensiktsmessig å fortsette med en M = 2 MPa.



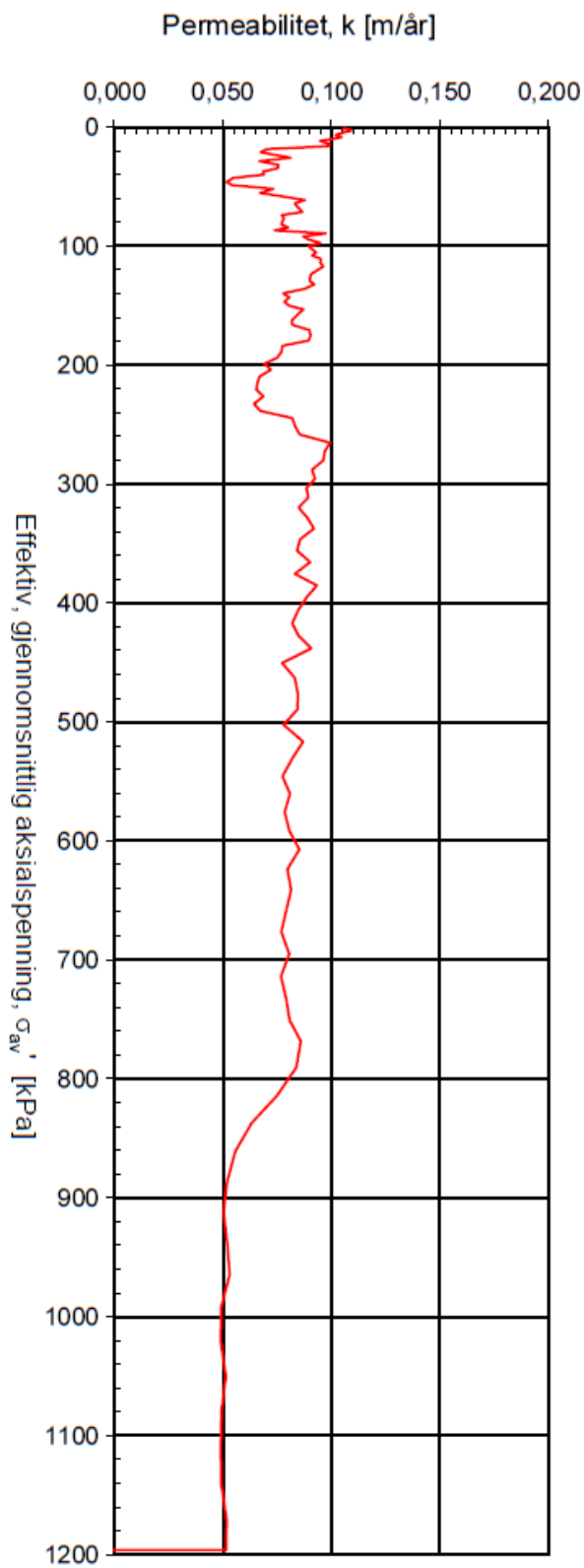
Figur 5.1 Densitet og vanninnhold for havbunnen

5.2.2. Permeabilitet [k]

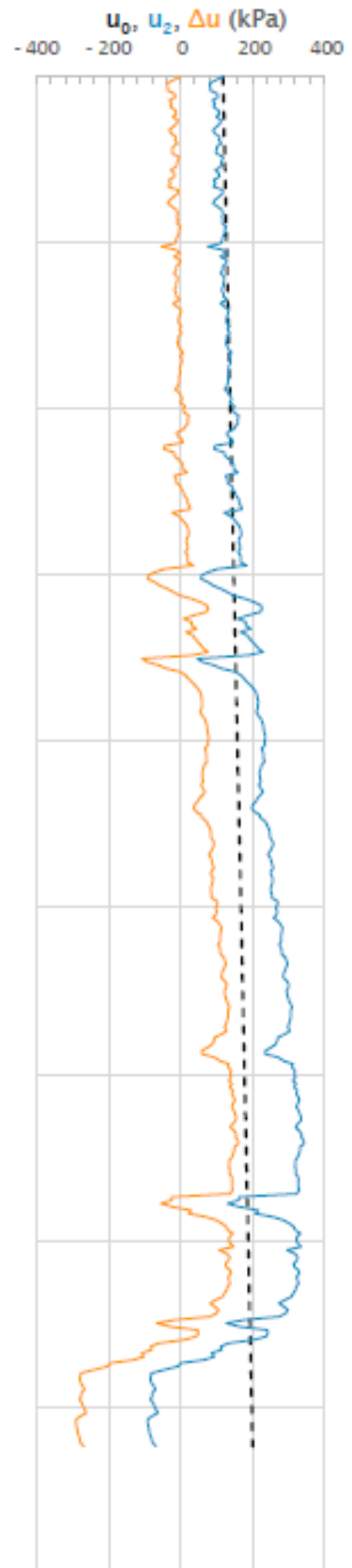
For å kunne skape et bilde over hvor fort en leire vil deformere er det viktig å vite hvor permeabel den er. Dette vil beskrive hvor fort vannet som er lagret i porevolumet til leira vil presses ut. Leira i prosjektområdet ligger på antatt berg, og under sand. I følge ødometerforsøket som er gjennomført er leira tilnærmet normalkonsolidert, altså har den ikke

blitt utsatt for større spenning enn den er nå. Siden leira kan ses på som normalkonsolidert vil porøsiteten være større og vil åpne for større gjennomstrømning enn en overkonsolidert leire. Dette betyr at det er naturlig at denne leira har en høy permeabilitet sammenliknet med andre leirer.

Fra ødometertesten gjennomført av Multiconsult er permeabiliteten målt, se Figur 5.2. Det er også gjort en CPTU på stedet som viser at det er poreovertrykk ved 5,7 meter, se Figur 5.3. Dette samsvarer godt med håndutregning av effektivspenning $\approx (17,2 \text{ kg/m}^3 \times 3\text{m} + 18,5 \text{ kg/m}^3 \times 2,7\text{m}) - 57 = 44,5 \text{ kPa}$. Fra Figur 5.2 kan en lese at permeabiliteten [k] er rundt 0,08 [$\text{m}/\text{år}$]. Permeabiliteten holder seg bortimot konstant fram til 790 kPa hvor den plutselig avtar til 0,05 [$\text{m}/\text{år}$]. Antatt grunn til kraftig nedgang i permeabilitet etter er at strukturen i den marine leiren kollapser. En spenning på over 790 kPa er derimot ikke realistisk og denne reduksjonen i permeabilitet er derfor ikke relevant. Siden permeabiliteten er bortimot konstant ved økt spenning vil det ikke være behov for videre beregninger for permeabiliteten til leira.



Figur 5.2 Permeabilitetsmåling fra ødometerforsøk



Figur 5.3 CPTU fra borehull 102

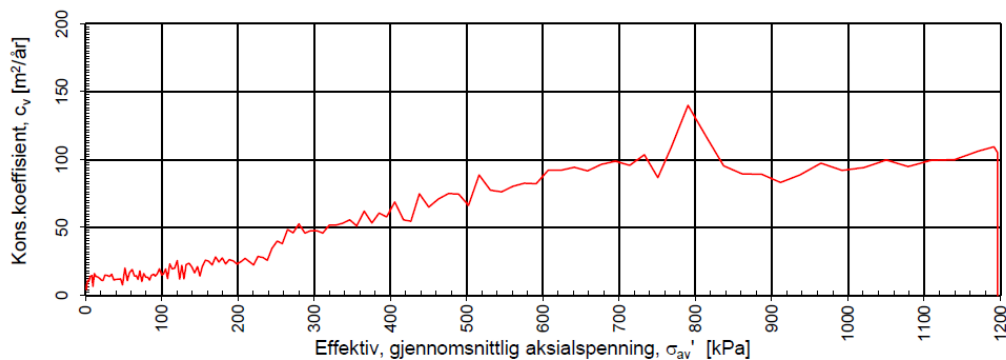
Gjennomsnittlig Spenningsendring vil være fra 9 meter fyllmasse og topplag fordelt utover et større område så spenningendringen kan ses på som konstant med dybden. Dette vil da medføre en $\Delta\sigma_v = 9\text{ m} * 8 \text{ kN/m}^3 + 2 \text{ m} * 19 \text{ kN/m}^3 = \underline{110 \text{ kPa}}$. En økning i effektivspenning på 110 kPa vil ikke påvirke permeabiliteten til leira betydelig.

5.2.3. Konsolideringskoeffisienten [C_v]

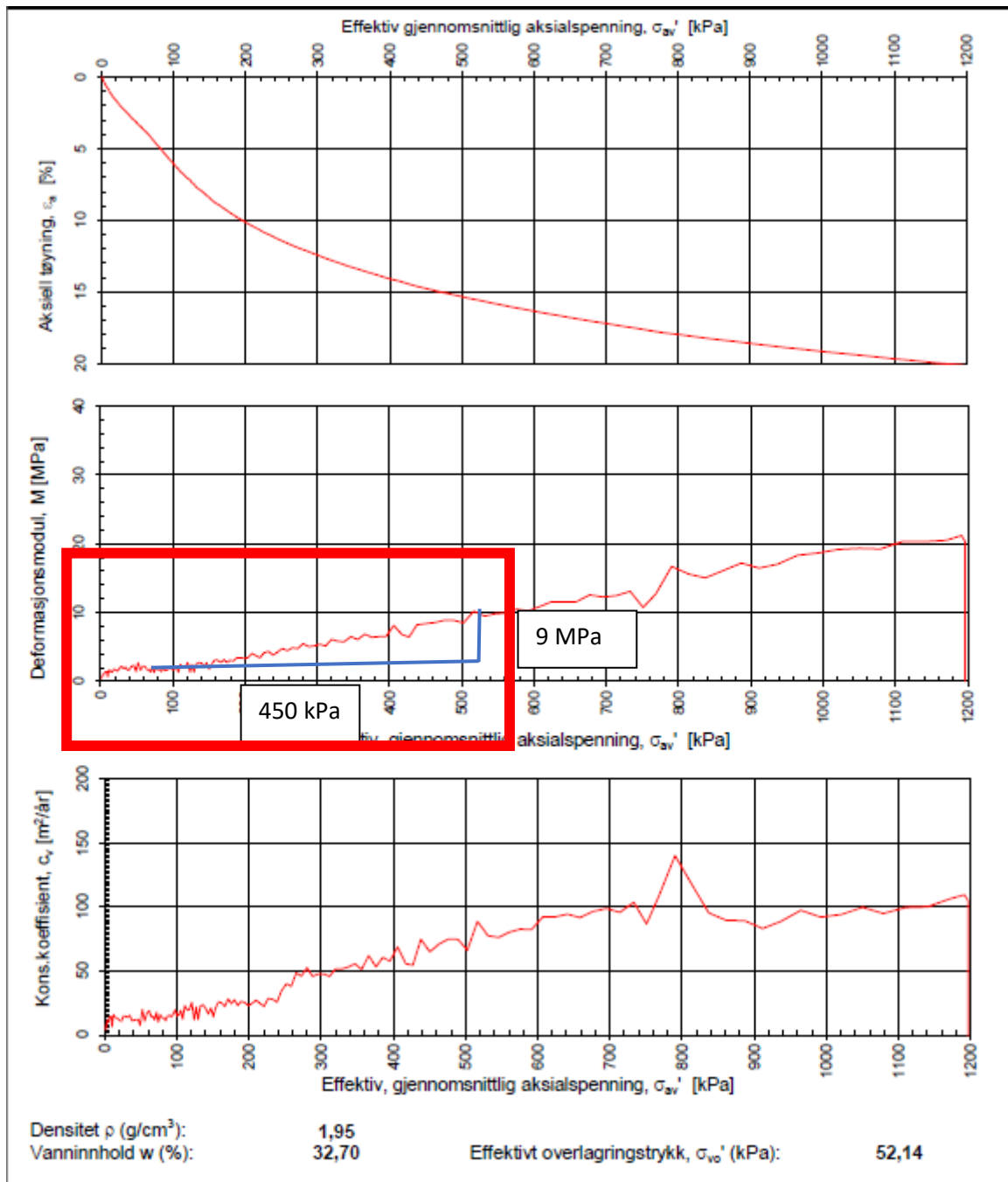
For å kunne beregne setninger over tid og tidsbestemme progresjonen for konsolideringen er det nødvendig å beregne C_v fra målingene i ødometertesten. Siden dette er deponering i hav vil γ_w være $10,03 \text{ kN/m}^3$.

$$C_v = k \frac{M}{\gamma_w} = 0,08 \frac{\text{m}}{\text{år}} \times \frac{2,0 \text{ MPa}}{10,03 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}}$$

Med de verdiene beregnet tidligere vil dette tilsvare en $C_v = 19,4 \text{ m}^2/\text{år}$. Dette samsvarer godt med målt verdi i Figur 5.4.



Figur 5.4 C_v kurve fra ødometertest



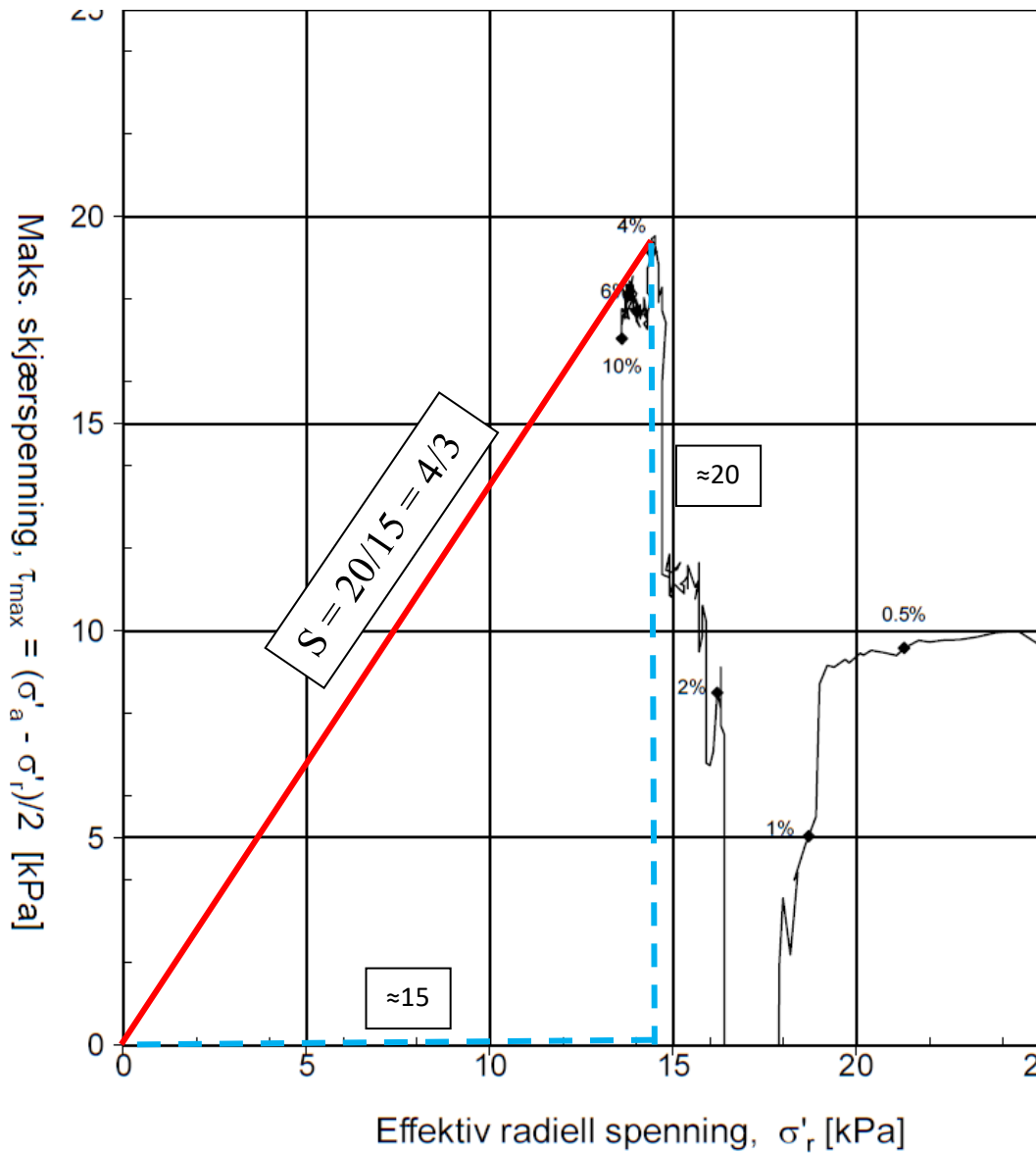
5.3. Treksialforsøk

Fra treksialforsøket som er vist i kapittel 4.2. kan en beregne friksjonsvinkelen til leira. Friksjonsvinkelen er viktig for å beskrive bruddmekanismene i leira, og for den generelle stabiliteten for området. For å utføre denne beregningen benyttes formel 3.5 i kompendiet for [TBA4116] (Nordal, 2020).

$$S = \frac{\sin \rho}{1 - \sin \rho}$$

Denne formelen kan løses for $\sin(\rho)$ og blir dermed:

$$\sin \rho = \frac{S}{S + 1}$$



Ut fra dette treaksialforsøket vil leira ha en friksjonsvinkel på:

$$\rho = \varphi = \sin^{-1} \frac{S}{S + 1} \approx 35^\circ$$

Denne vinkelen er noe høy, og det kommer av at det i utregningen ikke er tatt høyde for attraksjon. Om en antar en attraksjon på 10 kPa vil friksjonsvinkelen reduseres til 26 grader og en kohesjon på $4,87 \approx 5$ kPa.

5.4. Håndberegninger for fyllmassene

Håndberegninger er en god måte å teste om svarene fra Plaxis er i riktig størrelsesorden. Beregningsmetodene er alle hentet fra pensum i teoretisk geoteknikk [TBA5100] og geoteknikk videregående kurs [TBA4116] ved NTNU.

5.4.1. Tidsavhengig konsolideringskoeffisient

Det er gode grunner til å tro at t_{90} ligger mellom tre og seks måneder. Dette kommer fra erfaringsverdier for slike fyllinger i nærområdet. Derfor vil en t_p som er mye større enn et år være merkelig. konsolideringstiden regnes ut ved å bruke C_v og korteste dreneringsvei. Den størst mulige dreneringsveien vil være fra midten av fyllingen, denne distansen utgjør omtrent 9 meter. Det må tas i betraktning at dette er nylig deponert materiale og vil opptre som svært bløt og det forventes derfor en svært høy konsolideringskoeffisient $C_v > 100$.

Raskest antatt konsolideringstid er tre måneder. Dette vil resultere i:

$$t_p = \frac{H^2}{C_v} \Rightarrow C_v = \frac{81 \text{ m}^2}{\frac{1}{4} \text{ år}} = 324 \frac{\text{m}^2}{\text{år}}$$

Midlere grense for forventningsverdi seks måneder:

$$C_v = \frac{81 \text{ m}^2}{\frac{1}{2} \text{ år}} = 162 \frac{\text{m}^2}{\text{år}}$$

Øverste grense for ferdig konsolidering er et år:

$$C_v = \frac{81 \text{ m}^2}{1 \text{ år}} = 81 \frac{\text{m}^2}{\text{år}}$$

5.4.2. Permeabilitet

For å finne den permeabiliteten som best beskriver fyllingsmassene er det mulig å benytte seg av en annen definisjon for C_v :

$$C_v = M \frac{k}{\gamma_w}$$

For å kunne benytte denne formelen må M beregnes for 9 meter under terrengoverflaten. Dette kan enkelt regnes ved bruk av:

$$M = \frac{1}{\lambda^*} \sigma'$$

Verdien $[\lambda]$ er allerede regnet ut tidligere i kapitlet og er lik 0,05. Effektivspenningen er definert under.

$$\sigma' = \gamma' z = 8 \frac{kN}{m^3} * 9m = 72 kPa$$

Setter en dette sammen vil en ende opp med:

$$M = \frac{1}{0,05} * 72 = 1440 kPa$$

Dermed kan en snu om på formelen for konsolideringskoeffisienten og får:

$$\frac{C_v \gamma_w}{M} = k$$

Tabell 2 Håndberegning av permeabilitet gitt konsolideringstid

Tid	C_v	k [m/år]	k [m/dag]
3 måneder	324	2,25	0,00616
6 måneder	162	1,125	0,00308
1 år	81	0,5625	0,00154

I ødometerforsøket for permeabilitet som ble utført på den uomrørte leira under sjøbunnen ga en permeabilitet på mellom 0,05 og 0,1 m/år se Figur 5.2. Disse verdiene for permeabilitet fungerer som nedre grense for permeabilitetstallet, siden permeabiliteten ikke kan være lavere. Dette kommer av at leire blir omrørt og blandet med sandig silt, som vil gi den høyere vannledningsevne.

5.4.3. Setninger fra sprengsteinfylling

I en tenkt situasjon der konsolideringen av fyllingsmassene er ferdig før en legger på sprengsteinfyllingen, vil en kunne se hvor stor del av deformasjonen er forårsaket av den. En slik beregning vil kunne sette en absolutt nedre verdi for deformasjon i prosjektet. Laget med sprengstein blir lagt ut jevnt over hele området, derfor kan en se på spenningsendringen som konstant med dybden. Det endelige svaret er oppgitt i meter se Figur 5.5.

z	$\sigma'v0$	$\sigma'v1$	ϵ	δ
1	8	46	0,0875	0,074
2	16	54	0,0608	0,054
3	24	62	0,0475	0,043
4	32	70	0,0391	0,036
5	40	78	0,0334	0,031
6	48	86	0,0292	0,028
7	56	94	0,0259	0,025
8	64	102	0,0233	0,022
9	72	110	0,0212	0,020
10	80	118	0,0194	0,019
11	88	126	0,0179	0,017
12	96	134	0,0167	0,016
13	104	142	0,0156	0,015
14	112	150	0,0146	0,014
15	120	158	0,0138	0,013
16	128	166	0,0130	0,013
17	136	174	0,0123	0,012
18	144	182	0,0117	<u>0,45</u>

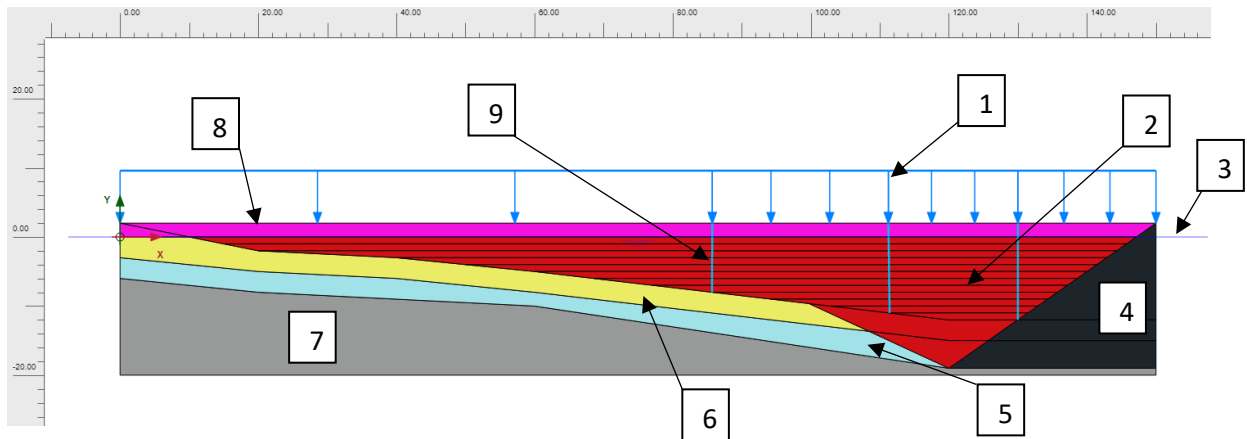
Figur 5.5 Håndberegning av deformasjon fra sprengsteinfylling

5.5. Plaxis beregninger

For å bestemme setningene i prosjektet er det bygd en Plaxis-modell som representerer grunnforholdene i området og illustrerer byggeprosessen steg for steg med innlagte konsolideringsperioder. Siden denne oppgaven primært ser på hvordan en skal modellere for suspenderte masser i Plaxis, og hvordan setningsutviklingen for deponiet opptrer er moloen i enden av modellen satt til svært stiv. Moloen skal bygges av sprengstein, og vil ikke bli påvirket av den bløte leira. Berg blir også definert til svært stivt og inkompressibelt.

5.5.1. Modell

Modellen er tegnet 1:1, måleenheten oppgitt på x- og y-akse er i meter. Figur 5.6 viser modellen slik den er brukt i FEM-beregningen. Nøkkelen til figuren ligger under Figur 5.6 i Tabell 3.



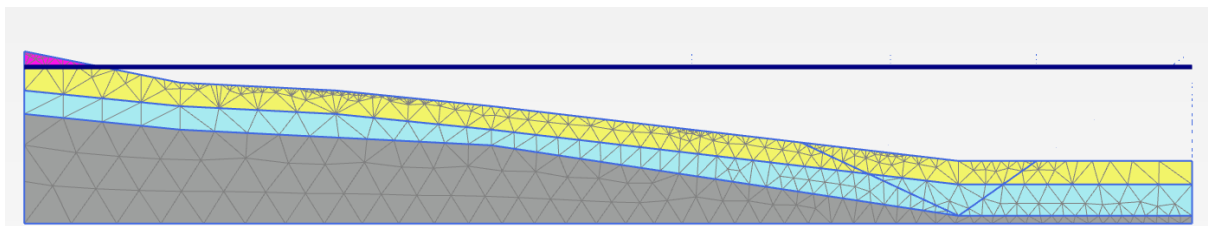
Figur 5.6 Skjermbilde av Plaxismodellen

Tabell 3 Nøkkel til figur 5.6

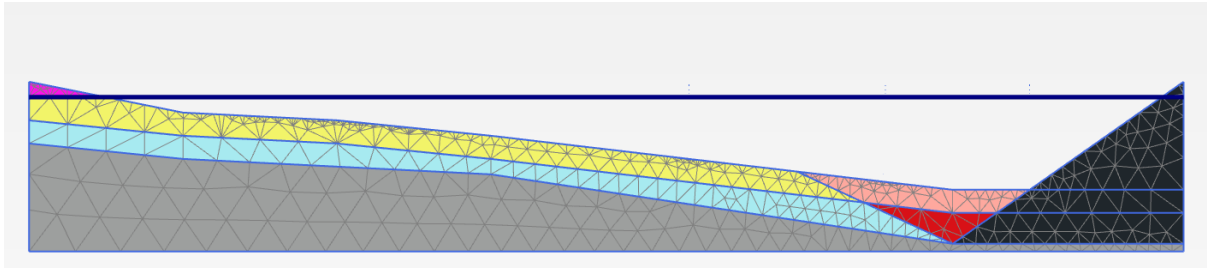
Nøkkel	Beskrivelse
1	Trafikk-/anleggslast 16 kPa
2	Fyllingsmasser
3	Havnivå 0 (NN2000)
4	Molo
5	Marin siltig leire
6	Korallsand siltig
7	Berg
8	Sprengsteinfylling
9	Prefabrikkerte vertikale dren

Som tidligere nevnt er moloen og berg satt til svært stiv. Siden denne oppgaven ikke ser på skråningsstabilitet ved bygging av moloen, er denne fasen hoppet over. Derfor er fase 1 bygging av molo og fylling av utgraving.

Fase 0 Initialfasen

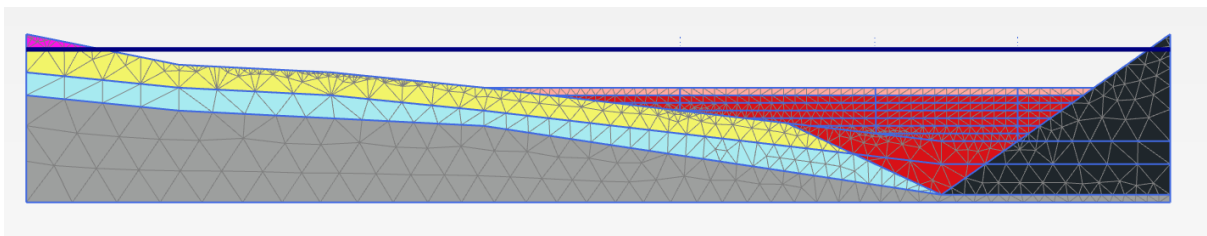


Fase 1 Bygging av molo



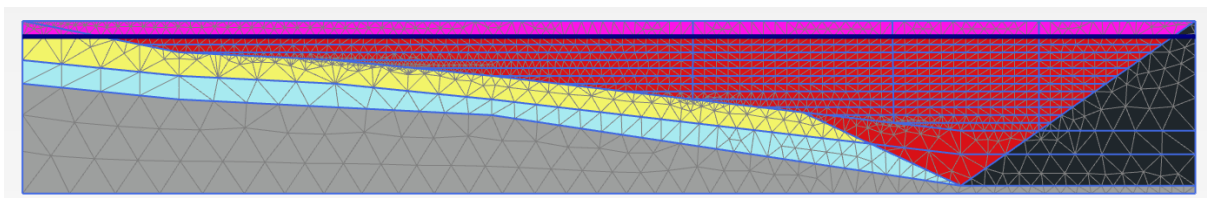
Det som er viktig å legge merke til er at øvre lag av fyllmassene har en lysere rød-farge. Den lysere rødfargen indikerer delvis suspendert fyllmasse. Det vil si at den har en lavere tyngdetetthet og stivhet. Denne blir omgjort til standard fyllmasse i påfølgende fase med en ukes konsolidering.

Fase 15 Oppfylling av deponiet



Fyllmassene blir lagt ut i lag på en meter i uka, med syv dager konsolideringstid imellom. Dette utgjør totalt tolv lag etter bygging av molo.

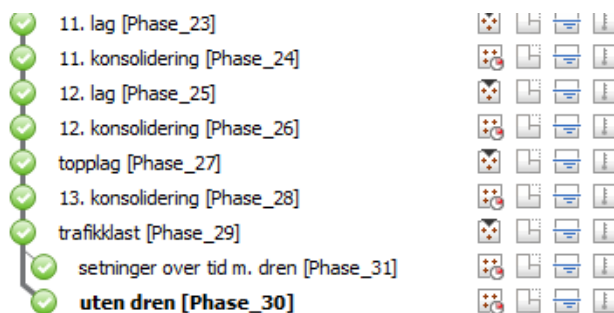
Fase 27 Ferdig utfyllt



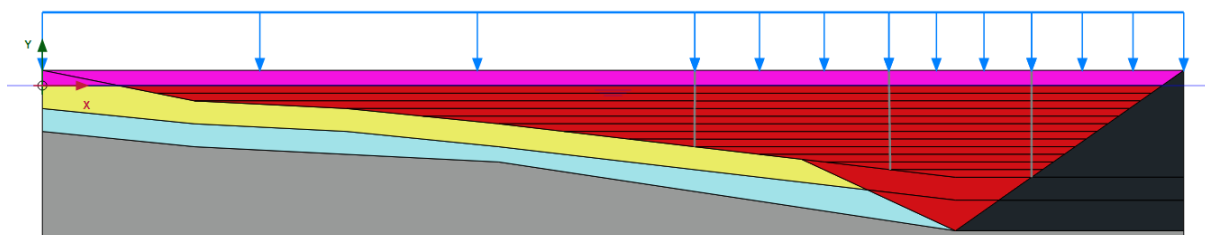
Etter det er lagt ut tolv lag blir de siste to meterne lagt med sprengstein.

Fase 30 og 31

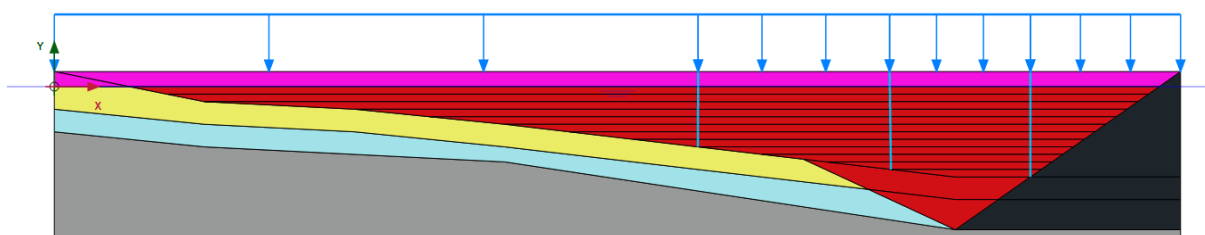
Disse fasene er de hvor konsolideringstiden t_p blir lagt inn for å beregne de resulterende setningene. Verdier for t_p og korresponderende permeabilitet er beskrevet tidligere i kapitlet. Fase 30 og 31 er beregnet parallelt, Figur 5.7. 30 uten vertikale dren, Figur 5.8, og 31 med Figur 5.9.



Figur 5.7 Faseoppbygning hvor fase 30 og 31 kjøres parallelt



Figur 5.8 Konsolideringsfase uten vertikale dren



Figur 5.9 konsolideringsfase med vertikale dren

5.5.2. Styrkeparametere

Det er seks forskjellige materialer brukt i Plaxis. En stor del av oppgaven har godt til å bestemme styrkeparametere til de forskjellige materialene. Siden store deler av prosjektet skjer under havoverflaten [NN2000] så er forskjellene mellom γ og γ_{sat} neglisjert. På grunn av at denne oppgaven ser på setninger i fyllmassene, vil berg og molo som nevnt bli sett på som veldig stivt.

Korallsandig silt

Dette er et meget løst lagret materiale som inneholder store mengder silt, men også koraller i sand fraksjon. Det medfører at materialet er lett og har høyere permeabilitet enn annen silt. For å beskrive materialet er det brukt hardening soil drenert.

$$\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$$

$$E_{50}^{\text{ref}} = 12000 \text{ kN/m}^2$$

$$E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = 12000 \text{ kN/m}^2$$

$$\nu = 0,2$$

$$c' = 0,1$$

$$\varphi = 30$$

Siltig leire

For å beskrive denne siltige leiren er det valgt å bruke «soft soil» modellen udrenert A. utregningen og vurderingen av parametere er diskutert tidligere

$$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$$

$$\lambda = 0,05$$

$$\kappa = 0,01$$

$$\nu = 0,15$$

$$c' = 5$$

$$\varphi = 26^\circ$$

$$k_x = k_y = 2,7 \times 10^{-4} \text{ m/dg.}$$

Fyllmasser

Fyllmassene som skal benyttes til å fylle inn bak moloen er fra mudring i nærheten, dette har skapt problemer ved å definere styrken til materialet. Siden disse massene er mudret fra nærområdet, er naturlig å tenke at de vil ha like egenskaper som materialet under havbunnen etter primærkonsolideringen. Materialet er en blanding mellom siltig leir og korallsand. Den er antatt godt blandet derfor er det naturlig å tenke at γ for fyllmasser ligger et sted imellom sand- og leirelaget. Dette materiale er svært mykt og har høy grad av kompressibilitet, derfor er *Soft soil* valgt som beregningsmetode framfor *hardening soil*.

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$$

$$\lambda = 0,05$$

$$\kappa = 0,01$$

$$\nu = 0,15$$

$$c' = 5 \text{ kN/m}^2$$

$$\varphi = 28^\circ$$

$$k_x = k_y = \text{se håndberegninger Tabell 2}$$

Sprengstein

Mohr- Coulomb drenert

$$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$$

$$E'_{\text{ref}} = 20\,000$$

$$\nu = 0,2$$

$$c' = 0$$

$$\varphi = 40^\circ$$

5.6. Setninger

Setninger i prosjektet blir beregnet ved hjelp av Plaxis. For å få et noenlunde presist svar er det viktig at de inputparameterne som velges er representative for materialet. Det er tydelig at de store og betydelige setningene skjer i de utfylte massene, som også er det som ble antatt på forhånd. På grunn av stor usikkerhet i hvor stor permeabiliteten i materialet er og hvordan styrken til materialet utvikles, er det vanskelig å kunne komme med nøyaktige verdier. For å vite om det resultatet som kommer fra Plaxis-modellen er riktig eller innenfor forventningene, er det nødvendig å støtte seg på erfaring fra området.

Ut fra det som er blitt fortalt fra Norconsult Tromsø, er det forventet at setningstiden er på rundet 3 måneder, og at den totale setningen ikke overskrider 10% av mektighet som for dette prosjektet vil være 1,8 meter.

Kapittel 6

6. Resultater

6.1. Håndberegninger

Resultatene fra håndberegningene er brukt for å skape en ramme og grenseverdier for de resultatene som er beregnet i FEM-programmet Plaxis.

6.1.1. Forventet konsolideringstid

Disse resultatene er i utgangspunktet ikke fra beregninger, men fra erfaringsverdier i området, ifølge Norconsult Tromsø. De skaper betingelser for resultatene senere i kapitlet og for håndberegningene i kapittel 5.

	Lav	Middels	Høy
t_p [år]	1/4	1/2	1

6.1.2. Permeabilitet utfra forventet konsolideringstid

Basert på de forskjellige verdiene for t_p er det regnet ut en C_v som er benyttet for å finne den korresponderende permeabiliteten dette er samme tabell som Tabell 2 i kapittel 5.

Tid	C_v	k_{xy} [m/år]	k_{xy} [m/dag]
3 måneder	324	2,25	0,00616
6 måneder	162	1,125	0,00308
1 år	81	0,5625	0,00154

6.1.3. Setninger etter steinfylling

Fra regnearket i Figur 5.5 er setningene som følge av sprengsteinfyllingen over fyllmassene 0,45 meter. Det må presiseres at dette er kun setningene som er en følge av sprengsteinfyllingen over ferdigkonsolidert masse. Det vil si at det forventes at setningene er over 0,45 meter.

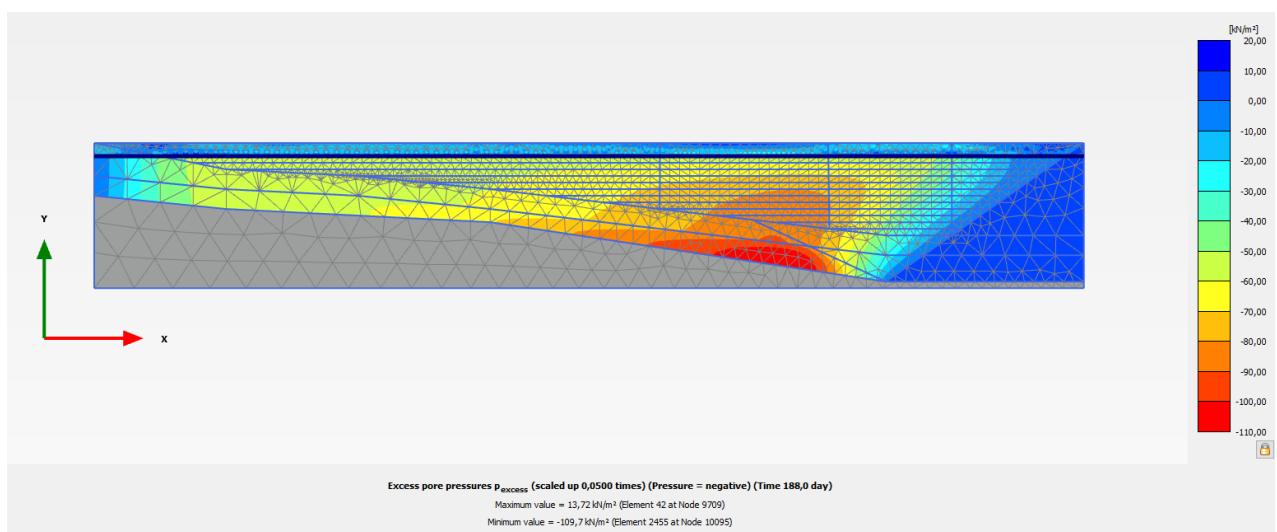
6.2. FEM-beregningsprogram

For å få resultatene fra FEM-beregning er det benyttet Plaxis. Det er lagt inn 7 dager konsolidering mellom alle lag, og den totale tiden blir derfor $t_p + 7 \text{ dager} * 14 \Rightarrow t_p + 98 \text{ dager}$.

6.2.1. Poreovertrykk

$t_p = 3 \text{ måneder}$

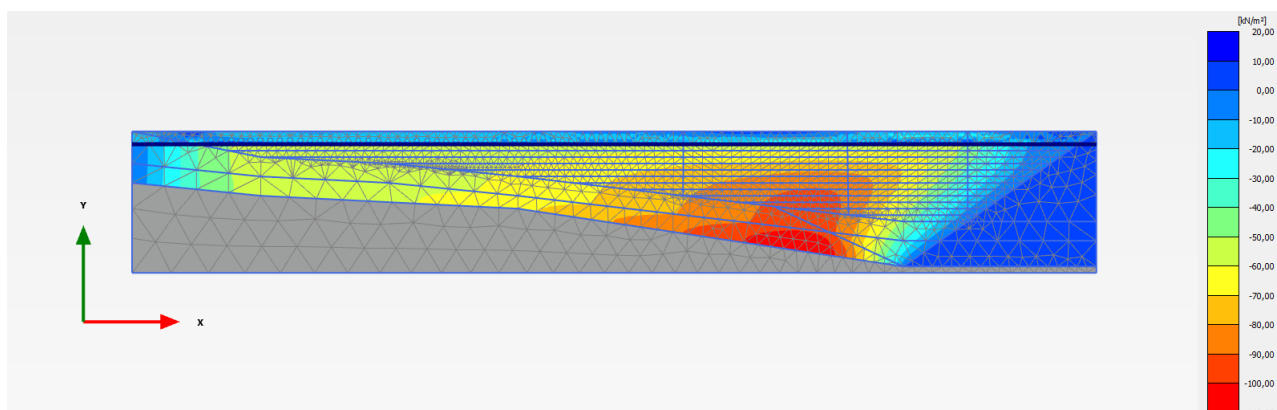
en ser at det fortsatt er et poreovertrykk i fyllmassene, men det største overtrykket er i leira under deponiet. Denne leira er ikke like sensitiv for komprimering som fyllmassene og det forventes derfor ikke store videre deformasjoner på grunn av dette.



Figur 6.1 Poreovertrykk $t_p = 3 \text{ måneder}$

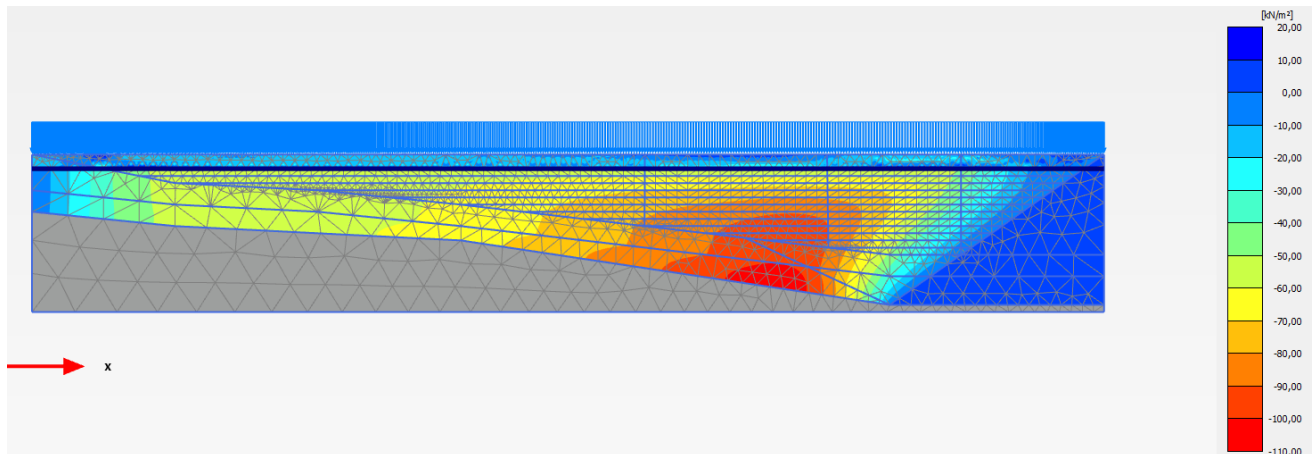
$t_p = 6 \text{ måneder}$

På samme måte som i resultatet for poreovertrykk for $t_p = 3 \text{ måneder}$ er det tydelig at det største poreovertrykket ligger i den minst permeable leira under deponiet.



Figur 6.2 Poreovertrykk $t_p = 6 \text{ måneder}$

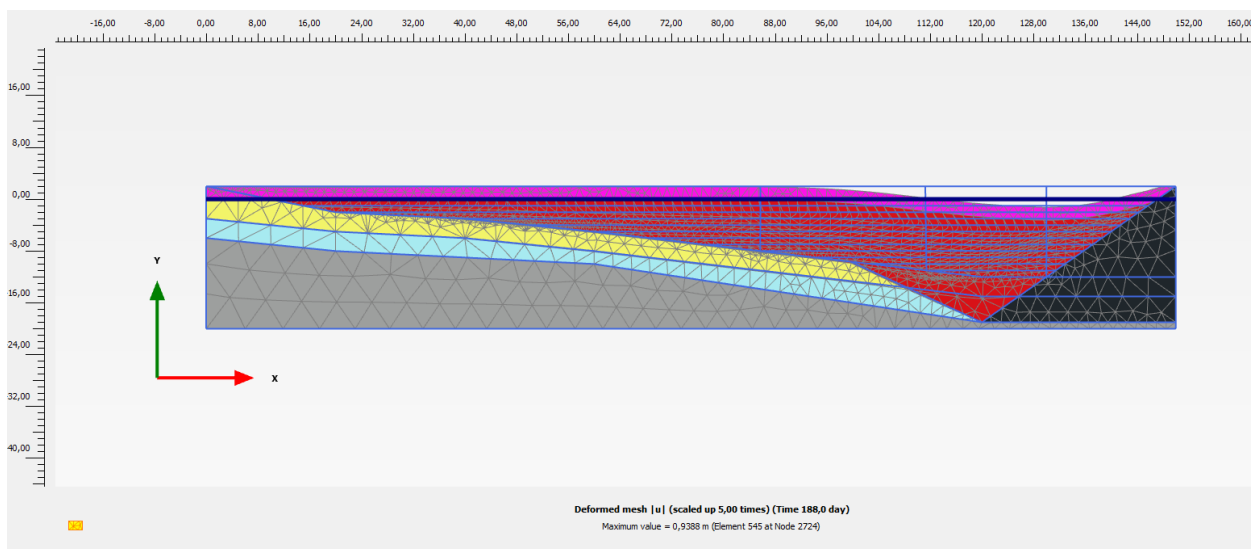
$t_p = 1 \text{ år}$



Figur 6.3 Poreovertrykk $t_p = 1 \text{ år}$

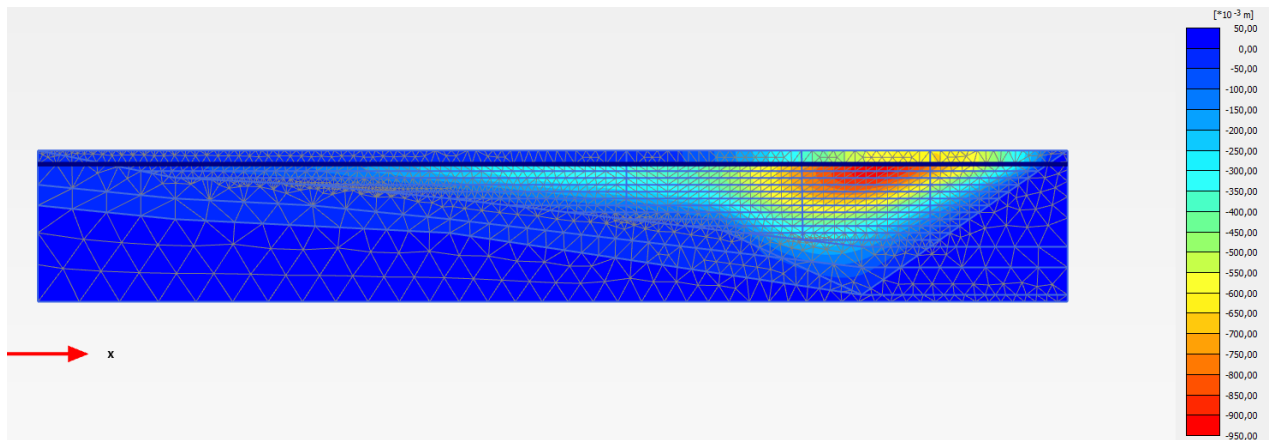
6.2.2. Setninger

I resultatene fra beregningsprogrammet Plaxis for setninger er det tydelig at det er oppstått en beregningsfeil for setninger i topplaget. Det er ikke mulig at lag under topplaget konsoliderer mer enn laget over. Dette er en opplagt «bug» og siden det ikke forventes setninger innad i sprengsteinfyllingen kan en anta at maksimalverdien for setninger i y-retning inne i fyllingen er representativ nok. Det ble gjort forsøk på å kjøre modellen med svært lav permeabilitet for de vertikale drenene for å komme rundt denne «buggen», men det ga ingen forbedring. Deformasjonsnett for en typisk beregning er vist i Figur 6.4, dette viser at sprengsteinlaget følger deformasjonen til lagene under, og danner ikke en luft-/vannlomme imellom. Forskjellen i setninger mellom 3 måneder og 1 år er rundt 30 cm.



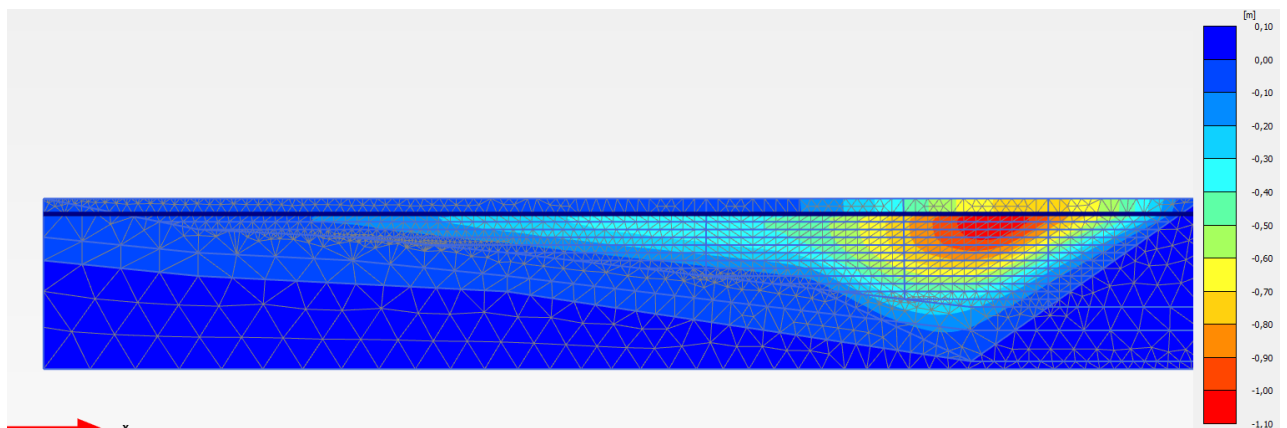
Figur 6.4 Visualisering av $|u|$ (5:1)

$t_p = 3$ måneder



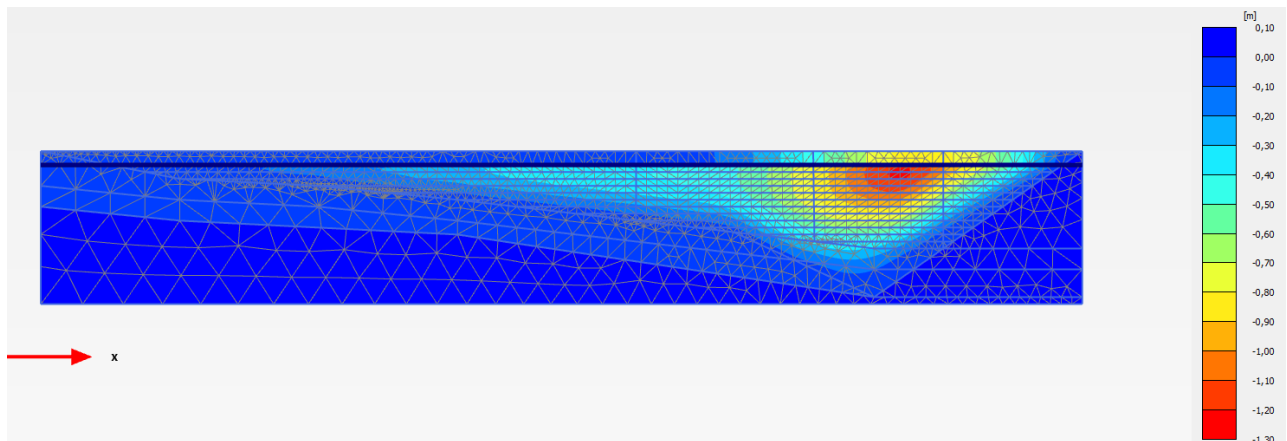
Figur 6.5 Setninger $t_p = 3$ måneder, uten drenering maks-verdi = 0,94m

$t_p = 6$ måneder



Figur 6.6 Setninger $t_p = 6$ måneder, uten drenering maks-verdi = 1,08m

$t_p = 1$ år

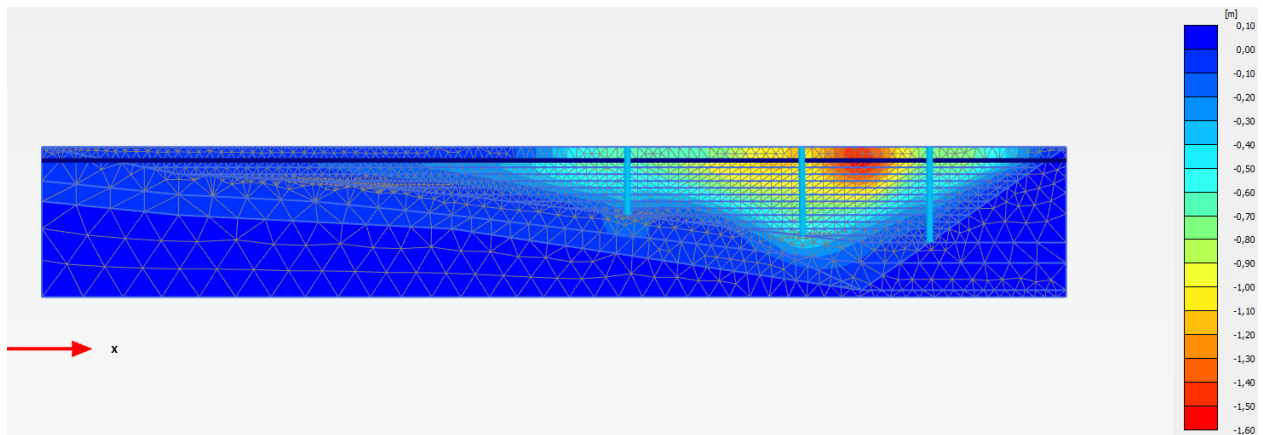


Figur 6.7 Setninger $t_p = 1$ år, uten drenering maks-verdi = 1,27m

6.2.3. Effekt av vertikale dren, setninger

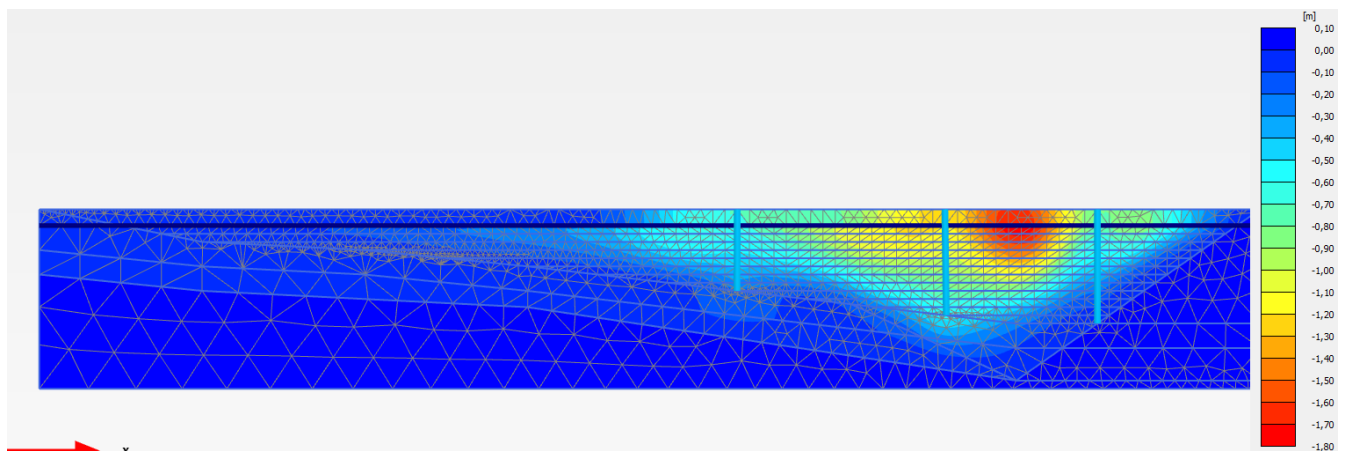
Det er tydelig av resultatet for beregningen med vertikale dren er noe høyere, rundt 60 til 70 cm. Resultatet for konsolideringstid på $t_p = 1$ år er svært nært 10% av fyllingen, noe som ifølge erfaring er noe høyt. Det er også tydelig at mesteparten av setningene er skjedd etter 3 måneder.

$t_p = 3$ måneder



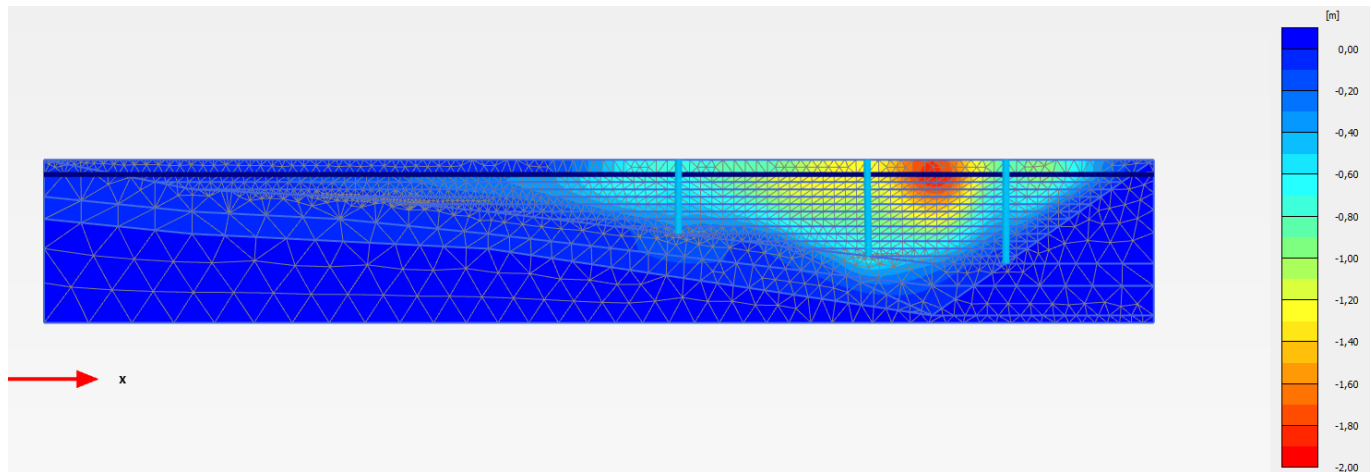
Figur 6.8 Setninger $t_p = 3$ måneder, med drenering maks-verdi = 1,56m

$t_p = 6$ måneder



Figur 6.9 Setninger $t_p = 6$ måneder, med drenering maks-verdi = 1,78m

$t_p = 1 \text{ år}$



Figur 6.10 Setninger $t_p = 1 \text{ år}$, med drenering maks-verdi = 1,95m

Kapittel 7

7. Diskusjon

I kapittel 1 er formålet med denne oppgaven lagt fram:

- Hvordan modellere deponering av fin-materiale i sjø med Plaxis?
- Hvilke utfordringer oppstår ved suspensjon av materialet i Plaxis?
- Hvordan sammenlikner resultatene fra Plaxis med erfaringsbaserte verdier fra områder i nærheten?
- Er det fordeler ved å benytte vertikale dren?

Tre av fire punkter handler om bruk av Plaxis og det er derfor denne oppgaven har hatt så stort fokus på Plaxismodellen som er bygd i forbindelse med oppgaven. Utfylling i sjø for å bygge nytt land er stadig i vekst og bruk av ideelle materialer er ikke alltid mulig eller økonomisk gunstig. Derfor er det nyttig med en vurdering av hvordan en kan prosjektere dette i beregningsprogrammer som er relevante.

7.1. Bruk av Plaxis

Plaxis utgjør en stor del av oppgaven. Som et FEM-program er den i stand til å gjøre store beregninger på spenning- og tøyningssendringer som er nødvendig i denne typen problemstillinger. Plaxis er et viktig verktøy for enhver geotekniker og er svært ettertraktet i byggenæringa.

Som alle beregningsprogrammer er brukeren den største kilden til feil, men Plaxis er som alle andre programmer ikke nødvendigvis helt perfekt så det kan også oppstå datafeil «bugs».

7.1.1. Fordeler

Fordeler av å benytte seg av Plaxis fremfor andre beregningsprogram er den oppbygde kompetansen fra undervisning og den generelle kjennskapen til programmet blant professorer og fagfolk. Programmet benytter seg av FEM (endelig elementmetode). Som for hånd ville vært en uoverkommelig beregning, men for en datamaskin går relativt fort. Denne måten å beregne på skaper et mer nøyaktig resultat.

Plaxis gir også et totalbilde av hele prosessen, og en kan se og overvåke hva som skjer underveis. Hvordan Modellen blir bygget kan også i stor grad gjenspeile hvordan en faktisk

byggeprosess vil se ut. Måten en skaper modellen i Plaxis gir også stor frihet til bruker. Prisen for denne friheten er at det krever høy kompetanse.

Det er ikke kun spenning- og tøyningssendringer som beregnes i Plaxis, men også grunnvann. I denne oppgaven er grunnvannet, poretrykk og grunnvannstrømning viktige parametere, både med tanke på setningsberegning og suspensjon og hvor vidt vertikale dren i fyllingsmassen vil være formålsnyttig.

7.1.2. Problemer

Som beskrevet i kapitlet om «Fordeler» er Plaxis et veldig nøyaktig program. Dette kan skape en falsk trygghet eller falsk sikkerhet i resultatene som kommer fra utregningene. Igjen er uttrykket «shit in, shit out» relevant. Dette kommer av at en får et nøyaktig svar selv om en bruker unøyaktige parametere i input. Derfor er det viktig å ikke ta alle svar som sannheter, men bruker samme grad av usikkerhet ovenfor svarene gitt av Plaxis som en har for inputparameterne. Det kan med andre ord være lett å bli lurt av sin egen usikkerhet.

Et annet problem som har oppstått i byggingen av modellen er at Plaxis gir opp utregningene etter at den har oppdaget brudd. For å simulere suspensjon ble det valgt en tyngdetetthet for utfyllingsmassen lik 10 kN/m^3 . Dette gikk umiddelbart til brudd, siden materialet ble lagt under vann og endte opp med å flyte som igjen skapte brudd i Plaxis og stoppet beregningen.

Plaxis som alle andre programmer er like godt som personen som bruker det.

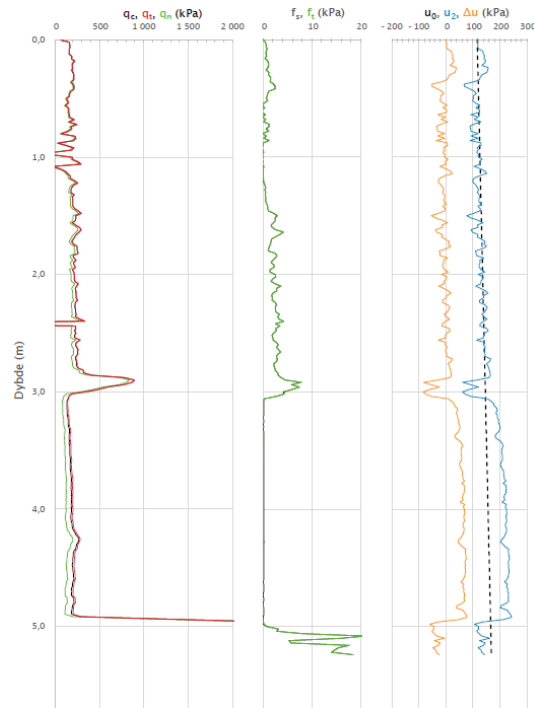
7.2. Plaxis-modellen

Modellen skal representere et stort område og vil derfor måtte inneholde en del unøyaktigheter. For å skape et så representativt profil som mulig, har høydeverdiene blitt hentet fra profil G med små praktiske endringer, se oversiktskart over boreprofiler i Figur 4.1 i Kapittel 4.

7.2.1. Grunnforhold og Plaxis-profil

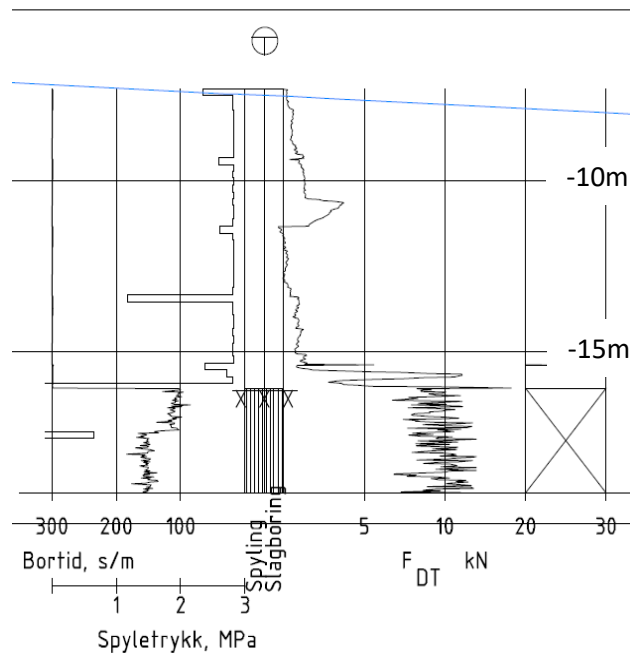
Etter å ha undersøkt totalsonderinger og CPTUer for området er det tydelig to forskjellige lag. Dette er også stadfestet gjennom korngraderingsanalyse ved forskjellige høyder. I Figur 7.1 er det et tydelig poreovertrykk ved -3 meter samt at spissmotstanden gir et utslag i overgangen til nytt materiale og er veldig lav og konstant deretter. Det som også er verdt å legge merke til er at linjen som går gjennom det øverste laget er «taggete» dette tyder på at det er et mer grovkornet materiale enn laget under. Det samme kan observeres i Figur 7.2, hvor totalsonderingen øker før den gir et utslag og motstanden synker raskt. Alle totalsonderinger

som er overlevert i forbindelse med denne masteroppgaven har påvist berg, det vil si at de har boret tre meter uten å finne nye løsmasser.



Figur 7.1 CPTU fra borehull 108

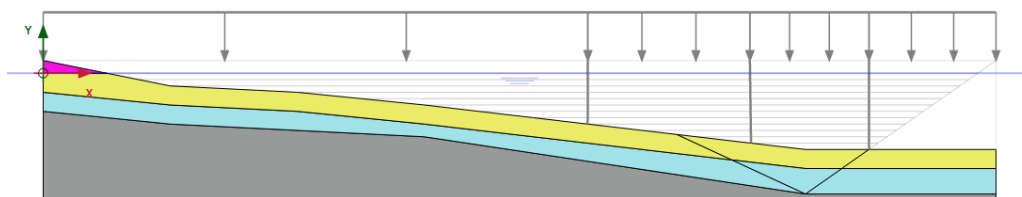
118



Figur 7.2 Totalsondering fra borehull 118

Ut fra de totalsonderingene, CPTUene og kornfordelingene som er utført i prosjektområdet er det dermed mulig å danne et godt bilde over grunnforholdene under prosjektet.

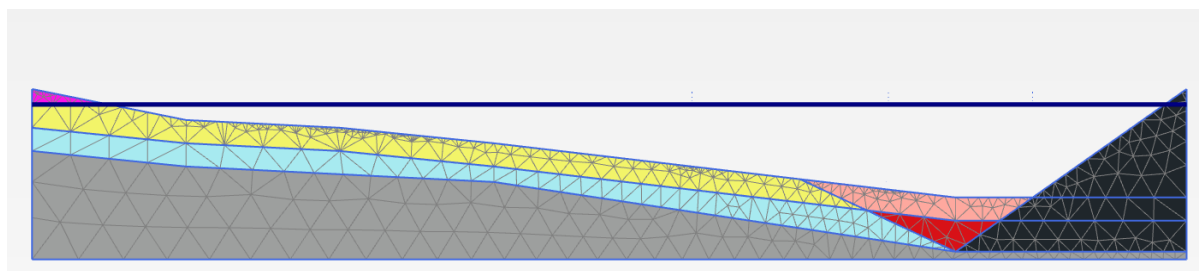
Informasjonene gitt i teksten over er gjengitt i Plaxis-modellen. Havnivået er lagt ved 0 meter og representerer havnivå null etter NN2000. Det er også planlagt større utbygging av fylkesveg på land, bak prosjektet. Dette er representert ved den rosa jord-polygonen helt til venstre i modellen Figur 7.3. Veiprojektet er ikke satt i gang ved nåværende tidspunkt, men vil kunne ha effekt for prosjektet.



Figur 7.3 Modellprofil fase 0

7.2.2. Bygging av modell

Etter problemer med stabiliteten under mudring før bygging av molo ble første fase bestemt etter ferdigbygging av moloen. De stabilitetsproblemene som oppsto utgjorde ingen større trussel for prosjektet, og foregikk i tåa av den utgravde skråningen. For å ikke bruke for mye tid på modellen og for å få framgang i Plaxis-beregningene ble derfor utgraving og etablering av molo tatt som 1. fase, Figur 7.4 og vil ikke bli videre kommentert.



Figur 7.4 Første fase med ferdigbygd molo og utfylt masse til opprinnelig høyde

Etter at initialfasen og fase 1 er gjort starter deponeringsfasene. I deponeringsfasene blir lag på lag med 1 meter mektighet lagt ut. For å skape et godt bilde av hvordan de deponerte massene vil være suspendert før de etter en tid setter seg, blir alltid det nye laget lagt ut med redusert tyngdetetthet. Etter at materialet er lagt ut endres tyngdetettheten til materialet og omdannes til fast utfyllingsmasse istedenfor suspendert. I etterkant av beregningene ble det gjort en ny

vurdering der en så at denne prosessen ikke hadde noe innvirkning på det endelige resultatet og kan derfor ses bort ifra.

For å etterlikne virkeligheten er det lagt inn 7 dager med konsolidering etter hvert nytt lag er lagt ut. Dette vil også gi tid til de minste fraksjonene til å sette seg sammen med resten av materialet. Etter konsolideringen settes forskyvninger til null før neste lag med jord fylles opp til angitt kote. Denne prosessen gjentas fram til fyllmassene når havoverflaten eller kote 0. Over fyllmassene er det lagt 2 meter sprengstein for å danne en god overflate for annen anleggsarbeid. Sprengsteinen vil også fungere som en akselerator for setningene i fyllmassene.

Området som bygges opp skal brukes som havn. Det betyr at det i framtida skal være mulig å bygge lagerbygg, terminalbygg, samt anleggstrafikk og annen infrastruktur. Det er derfor lagt til en trafikk/bygningslast jevnt fordelt på 16 kPa. I tidlig fase kan dette også ses som en overlaging av 84cm sprengstein.

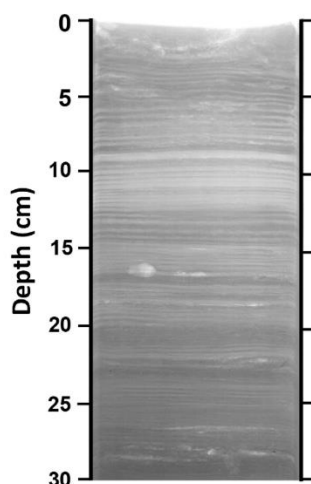
Et av problemstillingene i oppgaven er om hvor vidt det er hensiktsmessig å benytte seg av vertikale dren, som kan minke setningstiden. De vertikale drenene vil kunne transportere bort porevann fra dypt nede i fyllmassene, og dermed korte ned strømningsveien for det overflødig poretrykket som oppstår under utfylling.

7.2.3. Grunnvannstrømning

For at modellen skal kunne representere den virkelige verden best mulig er grunnvannstrømningene satt til å være frie gjennom alle jordtyper. Berg er satt til å være stengt siden det ikke kan garanteres at det er sprekke-dannelser i berget som kan føre vannet bort fra prosjektområdet.

Et stort tema i denne oppgaven er hvor stor en kan anta at permeabiliteten til den utfylte massen er. Det er naturlig å tenke at permeabiliteten vil være svært høy de første dagene etter deponering, men avta ettersom kornene sedimenterer og konsoliderer.

Fyllmassene er en blanding av de to naturlige lagene i profilet. En blanding mellom disse to vil kunne defineres som en siltig sandig leir eller en leirig sandig silt. Materialet vil også bli deponert fra havoverflaten som vil gjøre at sandpartikler vil sedimentere raskere enn silt, og silt raskere enn leir. Dette kan resultere i at en får tynne lag med veldig drenerbar sand mellom lagene med mindre drenerbar silt og nesten tett leir. En slik stratifisering er observert i havnen i Barcelona i forbindelse med deponering av mudringsmasse (Palanques et al., 2022) se Figur 7.5.



Figur 7.5 Røntgen av tverrsnittet til havdeponi i Barcelona havn

Dette kan føre til at materialet har en permeabilitet som likner mer på sand enn leir. Om dette stemmer vil konsolideringen gå mye raskere, og en kan benytte seg av området lenge før enn om det kun ble lagt ut leir. Dette støttes av den lokale erfaringen om slike masser. Der forventningstiden er rundt tre måneder fra ferdig utfylt område til anleggsaktivitet kan starte.

Det var raskt tydelig at å velge en permeabilitet nær permeabiliteten for leira ga unaturlige store setninger, over 10%. Det ville kun vært mulig om fyllmassene fortsatt var delvis suspenderte etter nytt lag ble lagt over.

7.3. Beregningsmodeller

For å beskrive grunnen på en god måte er det etablert flere forskjellige beregningsmodeller som alle har sine styrker og svakheter. Noen er veldig kompliserte og krever inngående kunnskap om geoteknikk og mekanikk for å bruke. Disse er ofte brukt i store komplekse problemer. Det er også beregningsmetoder som er enklere, men da også mer unøyaktig. Det er også beregningsmodeller som er bedre egnet til å beregne tøyning- og spenningendringer i bløte materialer, eller bruddmekanismer i granulære materialer.

For å bestemme beregningsmodell for de forskjellige materialene har det vært god støtte i professor Eiksund og nøkkelpersoner i Norconsult. De har vært nyttige i diskusjoner om hva som er mest hensiktsmessig.

For molo og sprengstein er det mest naturlig å bruke Mohr-Coulombs lineærelastiske beregnings- og bruddmodell. Dette er på grunn av at moloen og sprengstein ikke vil være utsatt for store plastiske endringer. I modellen er moloen satt til uendelig stiv så i teorien er det ikke

så viktig hvilken beregningsmodell en bruker. Sprengsteinen er ikke utsatt for store spennings-
tøyningsendringer siden den blir brukt på overflaten a utfyllingen.

Først ble Mohr-Coulomb også brukt for sandlaget i havbunnen. Men dette viste seg å gi
merkelige lineære kompresjoner av laget i hver fase av Plaxis-modellen. Derfor etter samtale
med professor Eiksund og input fra Wian i Norconsult ble denne omgjort til «hardening soil».
Som er bedre på å beskrive hva som skjer i sanden under fyllmassene. *Hardening Soil* benytter
seg av Mohr-Coulombs brudd mekanisme så dette endrer kun modellen fra en lineærelastisk
kompresjon til en elastoplastisk. Dette vil gjøre at sandlaget ikke får en lineær kompresjon ved
på lastning, men vil bli *herdet* eller får økt stivhet etter hvert som på-lastingen foregår.

For leira som ligger under sanden sto valget mellom soft soil eller hardening soil. Hardening
soil vil i større grad kunne beregne stivhetsendring i leira, og har relativt enkle input
parametere. Soft soil derimot er ypperlig til å beregne setninger for bløte materialer. Utfra
Ødometertesten gjort på leira, er det tydelig at leira er tilnærmet normalkonsolidert, den har
også svært lav omrørt skjærfasthet på under 0,5 kPa, se Vedlegg 01. Dette tyder på at leira er
svært kompressibel og siden det er deformasjoner vi ser etter og ikke styrkeutvikling i leira, så
ble det valgt *soft soil* som materialmodell.

I fyllmassene som legges ut er det utelukkende setningsutviklingen som er av interesse for
denne oppgaven. Fyllmassen vil også gå fra suspendert materiale til fast materiale, det vil
derfor skje store setninger i starten av utleggingen av masse. Av disse grunnene er det derfor
valgt å bruke *soft soil* for disse massene.

Det største problemet for denne oppgaven har vært å finne ut hvordan stivhetsendringen i
fyllmassene påvirker permeabiliteten. Det er store mengder porevann som blir fanget i den løst
lagrede fyllmassen som trenger å komme ut. Som nevnt tidligere er det et argument for at
permeabiliteten vil likne mer på permeabiliteten til sandig silt enn leir. men samtidig vil
stivhetene og deformasjonene likne mer på leir. Dette gjøre slike utfylte masser til en spesiell
og ny type material, som har høy grad av stratifisering mellom sand og leir, og kan ikke kun
beskrives gjennom kornfordelingskurve.

7.4. Vertikale dren

Vertikale dren skal i teorien korte ned konsolideringstiden for masser med lav permeabilitet.
Dette gjør de ved å redusere effektiv distanse [H] som er den viktigste faktoren for
konsolidering. Det er behov for tunge maskiner for å sette disse ned og det kan skape

utfordringer om grunnen er bløt. Å leie slike maskiner er en stor kostnad og spesielt når de skal transporteres opp til Nord-Norge. Det er derfor viktig at en avgjørelse for å bruke vertikale dren er godt begrunnet økonomisk og geoteknisk.

I dette prosjektet er det en usikkerhet ved permeabiliteten til fyllmassene, dette medfører at det kan være vanskelig å forutse de geotekniske fordelene ved å bruke vertikale dren. Om antagelsen at måten fyllmassene blir deponert på vil føre til tynne lag med sand mellom silt lag og leir lag, vil [H] kunne reduseres til under en meter, som er mer effektivt enn det vertikale dren har mulighet til å oppnå. Det vil skape horisontale lag med høy permeabilitet. I dette prosjektet vil horisontal drenering være effektiv, siden det er svært permeable masser på begge sidene av utfyllingen.

I Plaxis er effekten av vertikale dren store om en bruker lav permeabilitet for fyllmassene. Dersom en øker permeabiliteten vil effekten som forventet minke. Etter erfaring fra slike prosjekter i nærområdet, vil konsolideringstiden være langt kortere enn det Plaxis foreslår ved lav permeabilitet. Det kan derfor antas at permeabiliteten for disse lagene er langt høyere enn antatt. Når permeabiliteten er økt ser en at det fortsatt er effekt av vertikale dren, men en del mindre.

7.5. Resultater fra FEM-beregning

Ved å bruke de permeabilitetene som ble regnet ut for hånd sammen med antatt konsolideringstid ser en at resultatene for poreovertrykk er svært like. Setningene er derimot forskjellige, men alle er større enn det setningene fra topplaget ville vært alene. Dette er å forvente da permeabilitet og styrke henger sammen i konsolideringsberegninger.

Modultallet som er brukt for å beregne permeabilitet for de forskjellige konsolideringstidene er hentet fra stivheten til den marine leira som ligger under sandlaget i modellen. Den vil derfor kunne være noe høy, med tanke på den omrørte fyllmassen. Modulen er også avhengig av effektivspenningen, denne ble hentet fra midt i fyllingen, 9 meter. Av resultatene fra Plaxis er det tydelig at de største setningene skjer over -9 meter. Begge disse to verdiene spiller inn. Et høyere modul vil gi an lavere permeabilitet, og høy effektivspenning vil gi et høyere modul. Dette kan bli sett på som en sikkerhet, men kanskje noe stor.

Poreovertrykket i profilet er veldig likt for de forskjellige konsolideringstidene. Dette er som forventet da permeabilitet er regnet ut fra stivheten som gir korresponderende konsolideringstid. Mye av usikkerheten i denne oppgaven kommer fra usikkerhet rundt hvor

permeabel fyllmassene er. Som en blanding av sandig silt og siltig leir vil en kunne anta en permeabilitet mellom 10^{-8} og 10^{-6} m/s. det vil potensielt være enda større på grunn av stratifiseringen beskrevet tidligere i kapitlet. For å få en god oversikt over utviklingen til poreovertrykket kan det være hensiktsmessig å installere poretrykksmålere underveis i prosjektet. Dette vil ikke bare gi en indikasjon på når konsolideringen er ferdig, men også bygge erfaring for liknende prosjekter i fremtiden, og i hvor stor grad stratifisering vil påvirke permeabiliteten.

For setninger i y-retning uten bruk av vertikale dren ser en av fyllmassene under har større setninger enn sprengsteinene over, se Kapittel 6.2.2. Dette er umulig og er et resultat av en «bugg» eller feil i Plaxis.

Kapittel 8

8. Konklusjon

Utgangspunktet for denne oppgaven er å finne en god løsning for bruk av FEM-programmet Plaxis i modellering av utfylling av finmateriale i sjø. Hvilke utfordringer oppsto og hvordan kan disse løses? Oppgaven har også vurdert effekten av vertikale dren, og om de er gunstige eller ikke

8.1. Modellere deponering og suspensjon i Plaxis

For å kunne modellere og danne en god representasjon av virkeligheten i Plaxis er nøkkelen å bygge modellen på en måte som simulerer byggeprosessen. Dette er gjort i denne oppgaven ved å legge massene ut i 1 meter tykke lag med konsolideringsfaser imellom.

I starten av oppgaven ble det forsøkt å legge de nye lagene med tilnærmet lik tyngdetetthet som vann. Tanken var at om en ga materialet lav tetthet ville den bedre illustrere hva som faktisk skjedde. Etter hvert i arbeidet med oppgaven ble det konkludert at dette ikke hadde noen effekt på beregningene og ble fjernet i modellen for å begrense beregningstiden. Problemet med å gjøre det på den måten var at materialet veldig raskt gikk til brudd, siden det ble deponert i hav. For å få framgang i beregningene ble det derfor bestemt at materialet fylles ut som det er, og lar *soft soil* modellen utvikle stivheten.

I oppgaven er det antatt at deponering skjer fra havoverflaten og at partiklene sedimenterer mot bunnen på egenhånd. Deponeringen skjer bak en molo så en kan også anta at vannet har minimalt med strømminger. På grunn av dette vil en få sortering i finmassene ved at de sedimenterer med forskjellig fart. Derfor kan en anta høyere permeabilitet i x-retning for finmaterialer som er deponert med denne metoden.

8.2. Erfaringsverdier mot Plaxis

Av erfaring fra liknende prosjekter gjennomført i Nord-Norge er konsolideringstiden kortere enn det en kunne anta fra kornfordelingen til fyllmassene. Kornfordelingen viser somregel en sandig, siltig leir, som ville hatt en lav permeabilitet. Dette betyr at i disse situasjonene vil ikke tradisjonelle metoder for å beregne permeabilitet fungere tilstrekkelig, og undervurdere den faktiske verdien.

Siden Plaxis ser på et jord-polygon som en uniform masse vil den kunne streve med å illustrere hvordan indre sortering vil opptre. En løsning på dette er at det er mulig å ha forskjellig

permeabilitet i x- og y-retning. Dette er ikke testet i denne oppgaven, hvor en har sett på gjennomsnittlig permeabilitet.

Permeabiliteten henger også tett sammen med styrken til materialet og gir derfor stor usikkerhet ved deformasjonsberegning. Derfor har erfaringen fra erfarne geoteknikere i Norconsult vært viktig for å sette rammebetingelser i oppgaven. Dette har hjulpet med å se hvilke resultater som ikke har vært sannsynlige og luket bort opplagte feil.

8.3. Vertikale dren

For denne typen utfylling der forventet konsolideringstid er mellom 3 og 6 måneder vil installasjon av vertikale dren ikke være økonomisk eller geoteknisk hensiktsmessig. Dette kommer av at Nord-Norge ligger langt fra resten av Norge og transport av maskiner og utstyr vil ha en stor ekstra-utgift. De vertikale drenene vil heller ikke gjøre at ytterligere byggeprosess vil kunne starte signifikant tidligere.

Som nevnt tidligere i kapitlet vil fyllmassene ha en høy permeabilitet i forhold til andre materialer med lik kornfordeling, på grunn av metoden den er deponert på. Dette vil skape en stratifisering der en får veldig permeable lag mellom silt og leir lag. Det vil begrense H_{\max} til 0,5 meter. En verdi som vertikale dren ikke kan oppnå. Vertikale dren er best brukt i uomrørt leir der konsolideringstiden og dreneringsveien er svært høy.

8.4. Veien videre

Denne oppgaven har vært begrenset til å se på konsolidering og setninger i fyllmasser deponert i sjø. Det betyr at det er mange interessante og viktige temaer som er hoppet over eller neglisjert. For det videre arbeidet med denne tematikken og dette prosjektet er det store muligheter.

I oppgaven er ikke skråningsstabiliteten kommentert, men det er likevel noe som må undersøkes. I leira under havoverflaten er det registrert svært lav omrørt skjærstyrke, ikke så lavt at en kan mistenke kvikke egenskaper, men på grensen til sprøbrudds-materiale. Dette kan påvirke byggefasen ved at det kan gå ras i utfyllingsområdet. Med tanke på at moloen skal bygges direkte på berg etter mudring. Vil denne typen ras ikke kunne være til fare for havet utenfor eller mennesker som oppholder seg i anleggsområdet, men gjøre utfyllingen uforutsigbar. Det vil også kunne påvirke konsolideringstiden og kunnskapen om grunnforholdene. Et lite ras i utfyllingsbassenget vil kunne være tilbakegripende å påvirke skråningsstabiliteten på land, hvor det er påvist kvikkeleir i lommer under fylkesvegen.

Området som blir bygget skal benyttes som havneområdet og er derfor avhengig av at det er mulig å bygge terminalbygg, lagre og anleggstrafikk. I Plaxismodellen for denne oppgaven ble det lagt til en jevnt fordelt last på 16 kPa for å illustrer dette. For bygg som skal konstrueres på dette området anbefales det å benytte pælefundamentering. Det vil fortsatt være behov for å analysere bæreevnen for hele det utfylte området med tanke på trafikk.

For å kunne overvåke og kunne logge utviklingen i konsolideringen anbefales det å installere poretrykksmålere i grunnen. Dette vil kunne vise hvor fort konsolideringen foregår, og når en kan anse området som ferdigkonsolidert, eller konsolidert nok for utbygging. Det vil også kunne bekrefte eller avkrefte teorien om tynne permeable lag i fyllmassene. og sammen likne poretrykksutviklingen med den som er beregnet i Plaxis.

Referanseliste

- Bentley Communities*. (2020, mars 5). <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/46137/manuals---plaxis>
- Brattli, B. (2009). *Fysisk og kjemisk hydrogeologi*. NTNU.
- Brænd, T. J., Olerud, K., Halleraker, J. H., & Tjernshaugen, A. (2023). Natur- og miljøvern. I *Store norske leksikon*. https://snl.no/natur-_og_milj%C3%B8vern
- Chakraborti, R. K., & Kaur, J. (2014). Noninvasive Measurement of Particle-Settling Velocity and Comparison with Stokes' Law. *Journal of Environmental Engineering*, 140(2), 04013008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000790](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000790)
- Fresh Water and Seawater Properties*. (2011).
- Geologisk ordliste, NGU*. (1995). <https://www.ngu.no/side/geologisk-ordliste>
- Holtet, A. K. (2022, oktober 14). *Gjerdrum Rasgrop*. Keller Geoteknikk. <https://www.keller-geoteknikk.no/prosjekter/gjerdrum-rasgrop>
- Janbu, N., Nordal, S., Grande, L., Emdal, A., Grimstad, G., & Eiksund, G. (2021). *Kompendium TBA5100*. Geotechnical division NTNU.
- Nordal, S. (2020). *kompendium geoteknikk v.k. NTNU TBA4116*.
- Palanques, A., Guillén, J., Puig, P., & Durán, R. (2022). Effects of long-lasting massive dumping of dredged material on bottom sediment and water turbidity during port expansion works. *Ocean & Coastal Management*, 223, 106113. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106113>
- Saltvann—Institutt for biovitenskap*. (u.å.). Hentet 23. februar 2023, fra <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/s/saltvann.html>
- Sandven, R., Senneset, K., Emdal, A., Nordal, S., Janbu, N., Grande, L., & Amundsen, H. A. (2017). *Geotechnics Field and Laboratory Investigations*.

- Sengupta, D., Chen, R., & Meadows, M. E. (2018). Building beyond land: An overview of coastal land reclamation in 16 global megacities. *Applied Geography, 90*, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.12.015>
- Solberg, I.-L. (u.å.). *KVIKKLEIRE, SKRED OG KARTLEGGING AV KVIKKLEIRE*.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics* (1. utg.). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470172766>
- Thoresen, C. A. (2014). *Port designer's handbook, third edition* (3. ed.). ICE publisher.
- Tromsø Kommune. (u.å.). *Reguleringsplan, Tromsø*. Hentet 14. februar 2023, fra <https://kommunekart.com/klient/tromso/publikum?urlid=b75175af-0820-41f7-a0d9-8b22429e3b6f>
- Zhang, X., Liu, X., Zhang, W., Yang, A., & Xu, Y. (2022). Sedimentation of the fine-grained dredged slurry in the marine environment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81*(5), 173. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02680-5>

Vedlegg 01

Molo Nygård Isrenna – Supplerende grunnundersøkelser

