



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 60 stp

Fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning

Grunnvannsmodellering som et verktøy for å estimere setninger rundt byggegrop

Helene Stav

Miljø og naturressurser

FORORD

«Grunnvannsmodellering som et verktøy for å estimere setninger rundt byggegroper» er en masteroppgave skrevet i forbindelse med M60-MINA, *Miljø og naturressurser*, ved universitetet NMBU. Jeg kom først borti fagfeltet hydrogeologi når jeg startet på NMBU. Faglæreren er Helen Kristine French, en inspirerende lærer som skapte mye engasjement rundt faget. Dette førte til at jeg ville fordype meg i hydrogeologi, og når denne oppgaven dukket opp var det ikke vanskelig å velge oppgave, på tross av lite erfaring på fagfeltet.

Jeg vil takke mine veiledere, Helen Kristine French (NMBU) og Mats Kahlström (NGI) for god veiledning og faglig innspill. Begge har bidratt med mange gode ideer og løsninger på hvordan denne oppgaven kunne løses. Jeg vil også takke Jenny Langford (NGI) som har vært god støtte på det faglige og vært en god diskusjonspartner.

Underveis i dette studie har det vært mange lange dager hvor motivasjon og humør har gått opp og ned. Det har vært veldig motiverende å ha gode medstudenter som har vært gode diskusjonspartnere og bidratt til å skape godt humør. Disse skal ha en stor takk.

Under denne turbulente situasjonen hvor Covid-19 begynte å herje var det godt med god støtte hjemme. Jeg vil takke mine foreldre og søsken for oppbakking, og min samboer Jostein Hals for å ha vært en god diskusjonspartner og stått sammen med meg når det har vært vanskelig.

Under kartleggingen av Jong fikk jeg en studentlisens av Seequens, hvor jeg fikk tilgang til Leapforg Work, med hydrogeologisk pakke og veiledning.

Ås, 2020

Helene Stav

SAMMENDRAG

Dette studie har sett på usikkerheter og verdien av å bruke grunnvannsmodellering som et verktøy under en planleggingsfase til et byggeprosjekt hvor det skal gjennomføres omfattende grunnarbeid. Motivasjonene bak oppgaven er prosjektet «Begrens skade II/Remedy». Det er et prosjekt hvor det gjøres en vurdering av forskjellige verktøy og tiltak som kan benyttes for å redusere omfanget av setningsskader. I sammenheng med dette prosjektet har det blitt samlet erfaringer og undersøkelser fra prosjekter der det har oppstått setningsskader på grunn av omfattende grunnarbeid. Det ene byggeprosjektet som ble kartlagt var Skøyen-Asker prosjektet, der en sekvens av det nye jernbanesporet ble lagt i en løsmassetunnel over Jongsjordet. Skøyen -Asker prosjektet er utgangspunktet for grunnvannsmodelleringen i denne masteroppgaven.

Tilnærmingen i oppgaven var å først kartlegge geologiske og hydrogeologiske forhold, basert på tidligere grunnundersøkelser. Basert på kartleggingen ble det etablert en 2D grunnvannsmodell. Denne modellen er et forenklet utsnitt av området på Jong. Dette er gjort for å minske feilkilder slik at påvirkningen av modellens geometri, parametere og grensebetingelser kan studeres nærmere.

Resultatene fra kartleggingen viser at løsmassene på Jong består av et morenedekke som ligger over berggrunnen med overliggende leire. Dette resulterer i at det er en lukket akvifer rett over berggrunnen, hvor det er lite nydannelse av grunnvann som fører til et sensitivt system ovenfor en drenering. Modelleringen av forskjellige scenarioer viste en rask drenering i morenelaget som etter hvert drenerte det overliggende leirelaget. Størrelsesordenen på responsen viser store variasjoner ved ulike scenarioer der det blir variert med hydraulisk konduktivitet, lagtykkelse og grensebetingelser, hvor hydraulisk konduktivitet er den parameteren som fører til størst usikkerhet i modellen. Grensebetingelsen som definerer senkningen av grunnvannsstanden i byggegropen kan føre til en overprediksjon, men for å få en mer detaljert grense kan det være nødvendig med mer informasjon om hvor mye vann som potensielt kan dreneres gjennom lekkasjepunktene.

En lignende grunnvannsmodellering vil være et godt verktøy for å gjøre en enkel risikovurdering i planleggingsfasen. Den vil ikke gi presise prediksjoner, men vil gi en god forståelse av akviferens respons, tidsforløpet og potensiell påvirkningsradiusen i området.

ABSTRACT

In this thesis the uncertainty in a groundwater model has been studied, and the value of using models as a tool to evaluate the risk of draining the area surrounding a deep excavation is discussed. The motivation behind this thesis is the project “Begrens skade II/Remedy”. This project is evaluating different tools and measures that can be used to reduce damages that can occur because of comprehensive groundwork. In an earlier study, several building projects have been mapped and evaluated to identify why this damage is occurring. One of the building projects that was mapped is “Skøyen-Asker”, where a new tunnel was built in the sediments at Jong. This project is used in this thesis to make a 2D groundwater model and for a further discussion about the value of using a simplified model.

The approach to this issue was to start mapping the geology and the hydrogeology, based on former ground investigation. The investigation was visualized in QGIS and a numeric visualizing program, Leapfrog Work. Based on this mapping, the groundwater model was defined. The model is a simplified 2D model of Jong, where different parameters, boundary conditions and geometry were studied.

The sediments are mainly marine clay with underlying moraine, making it a confined aquifer system. The amount of freshly formed groundwater is small, that will mean that this aquifer is sensitive when it comes to drainage. Results from the modelling shows a quick response in the moraine, where a drainage of the overlying clay is starting after a while. The sensitivity study shows that several of the parameter and boundary conditions are affecting how quick the aquifer is responding and how big the affected area is at the end of the simulation. The parameter that will contribute with the largest range of results within the expected domain is hydraulic conductivity. Other uncertainties, such as specific storage and thickness of the moraine will also contribute to uncertainty, but the model is not as sensitive to this as hydraulic conductivity. The boundary condition that is set for the excavation can give an overprediction, even though this is not the case at Jong. To define this boundary condition differently it is necessary to have more information about the flux at the leakage points.

This study is showing that an equivalent groundwater model can be a good tool to evaluate the risk of a drainage. The results will not be accurate, but it will contribute with a good understanding of the aquifers response, time perspective and how big the affected area can be.

INNHALDSFORTEGNELSE

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Innholdsfortegnelse	iv
Forkortelser og uttrykk	vi
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Oppgavens formål	3
1.3 Fremgangsmåte	3
1.4 Skøyen-Asker prosjektet, Jongsjordet	4
2 Teori	9
2.1 Hydrogeologiske kretsløp	9
2.2 Grunnvann	10
2.3 Setninger	14
3 Områdebeskrivelse	18
3.1 Hydrologi	18
3.2 Geologiske forhold	18
3.3 Hydrogeologiske forhold	19
4 Videre analyse basert på eksisterende data	21
4.1 Vannbalanse	21
4.2 Etablering av geologisk modell og Geologisk tolkning	21
4.3 Grunnvannsstrømning og senkning	24
5 Metode	27
5.1 Numerisk modellering	27
5.2 Setningsberegninger	33
5.3 Sensitivitetsanalyse	34
6 Resultater	36
6.1 Grunnvannsmodellering	36
6.2 Setningsberegning	41
6.3 Sensitivitetsstudie	43
7 Diskusjon	53
7.1 Beregningsmodellens kompleksitet	53
7.2 Modellusikkerheter og kvantifisering av usikkerhetens betydning	54

Innholdsfortegnelse

7.3	Setningsberegning og risikoanalyse	59
7.4	Modelleringens nytteverdi	59
7.5	Programvare.....	60
8	Konklusjon.....	62
	Forslag til videre arbeid.....	63
	Referanser.....	64
	Vedlegg A - Feltdata fra NEVINA.....	67
	Vedlegg B - Tolkninger av totalsonderinger.....	68
	Vedlegg C - Data fra poretrykksmålinger	76
	Vedlegg D - Simuleringsresultat	77
	Vedlegg E - Setningsberegninger.....	83
	Vedlegg F – Flopy.....	86

FORKORTELSER OG UTTRYKK

Matematiske uttrykk

Q	Strømningsrate	m ³ /s
q	Strømningshastighet	m/s
K	Hydraulisk konduktivitet	m/s
S	Magasinkoeffisient	-
S _y	Effektiv porøsitet	-
S _s	Spesifikk lagring	-
i	Hydraulisk gradient	-
h	Hydraulisk trykkehøyde	moh, kote
ε	Tøyning	-
δ	Setning	mm
M	Deformasjonsmodulus	MPa
m	Modultall	-
OCR	Overkonsolideringsgrad	-
C _v	Konsolideringskoeffisienten	m ² /år
γ	Tyngdetetthet	kN/m ³

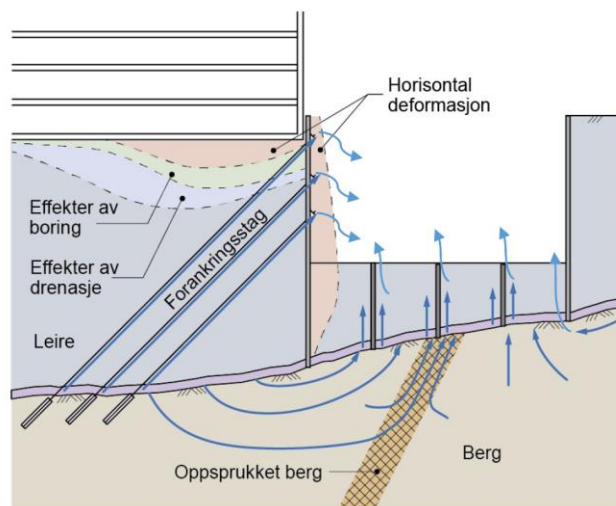
Ordforklaring

Akvifer	En enhet eller en sammensetning av flere enheter som har en tilstrekkelig porøsitet og permeabilitet slik at grunnvannet kan strømme gjennom eller utvinnes (NGU, 2019a).
Akvitard	En formasjon med lavere permeabilitet som ikke gir utvinnbare grunnvannsmengder.
Artesisk	I en lukket akvifer der vanntrykket står over toppen av akviferen. Dette kan oppstå i en akvifer som ligger mellom to tette/akvitarde lag, samtidig som den tilføres vann fra høyereliggende områder.
Setninger	Et mekaniske begrepet som brukes ved kompresjon av jordmasser (NGU, 2019b).
OC-leire/ NC-leire	Tilstanden i jorden i forhold til tidligere belastningsforhold. OC-leire er en tilstand hvor vertikalspenningen er lavere enn et tidligere belastningsforhold. NC-leire er en tilstand hvor vertikalspenningen er høyere enn tidligere belastningsforhold.

1 INNLEDNING

1.1 BAKGRUNN

Samfunnet i dag er i vekst, noe som fører til en fortetning av bebyggelse. Dette resulterer i at nye byggeprosjekt gjennomføres tett på eksisterende bebyggelse, med mulighet for å påvirke rundt liggende bygg og infrastruktur. For å kunne vurdere framgangsmåte, utførelsesmetoder og tiltak for å redusere risikoen for skader i nye byggeprosjekter har det blitt samlet erfaringer og kunnskap fra tidligere prosjekter. Dette har blitt gjort i prosjektet «Begrens skade» (NGI, 2012-2015). I delprosjekt 1+2 har flere byggeprosjekter hvor det har oppstått setningsskader som følge av omfattende grunnarbeid blitt kartlagt (Karlsrud et al., 2015). Denne kartleggingen viser en korrelasjon mellom setningsskader og etablering av byggegroper. Konklusjonen viser til tre viktige årsaker til setningsskader som følge av avstivede byggegroper (Baardvik et al., 2016). Horisontalforskyvning av spuntvegg eller annen støttekonstruksjon som anvendes, byggegropens drenerende virkning og effekten av boring for stag og/eller peler (Figur 1).



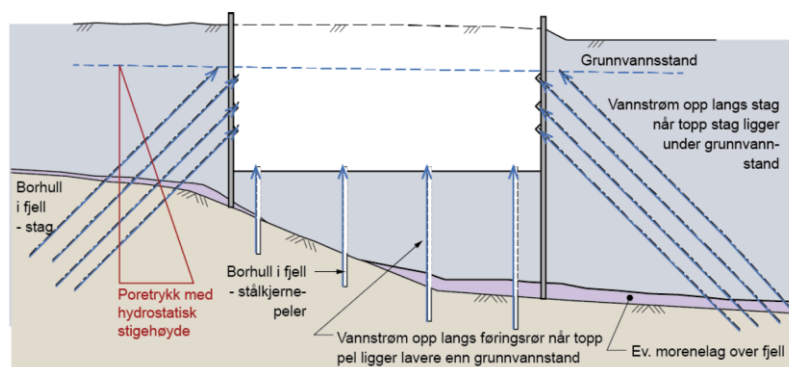
Figur 1 Illustrasjon av årsaker til forventede deformasjoner i forbindelse med byggegroper: horisontalforskyvning av støttekonstruksjon, setninger som følge av boring av forankringsstag og/eller peler samt drenering til byggegropen (Baardvik et al., 2016).

«Begrens skade II/Remedy» er et prosjekt som bygger på «Begrens skade». Prosjektet ble startet i 2015 med det formål å etablere nye metoder, teknikker og undersøkelser for å minske risikofaktoren for skader i forbindelse med byggeprosjekter (NGI, 2017a). Dette forskningsprosjektet består av flere delprosjekt hvor forskjellige faktorer blir undersøkt nærmere for å skape sikrere og billigere utbyggingsprosjekter. I denne masteroppgaven blir det sett nærmere på delprosjekt WP3 (NGI, 2017b). Delprosjektet handler om å utvikle metoder for å kalkulere drenering til byggegroper og risikoen for setninger. Utgangspunktet

Innledning

for dette var at det er observert poretrykksreduksjon i sedimentene rundt etablerte byggegroper (Baardvik et al., 2016). Disse poretrykksreduksjonene samsvarer med målte setninger, og blir dermed sett på som en årsak til skadene som kan oppstå på eksisterende bebyggelse rundt et byggeprosjekt med omfattende grunn- og fundamenteringsarbeid. De forskjellige dreneringsveiene til byggegroper er oppsummert i Figur 2 og omfatter (Baardvik et al., 2016):

- Gjennom utette spuntlåser, staggjennomføringer eller riss i spunten
- I glippen mellom spunt og berg, spesielt når det er grovere masse over bergoverflaten eller skrått berg
- Gjennom oppsprukket berg i såle og bergskjæringer
- Lekkasje ved stagboring, opp langs foringsrør eller opp av borehullet (før stagsetting)
- Lekkasje ved boring for peler, langs foringsrør eller opp av borehullet



Figur 2 Mulige lekkasjesenarioer til en byggegrop ((Baardvik et al., 2016)).

Det ene byggeprosjektet som er kartlagt og vurdert er utbyggingen av jernbanespor mellom Skøyen og Asker (Langford et al., 2016). Under dette byggeprosjektet ble det etablert et nytt dobbelt jernbanespor mellom 2001 til 2005 på Jongsjordet hvor en strekning går gjennom en løsmassetunnel (Braaten et al., 2004). Under arbeidet ble det gjort observasjoner med poretrykksmålinger, setningsbolter, infiltrasjonsbrønner og besiktelser av bygninger. I løpet av det første året ble det observert en reduksjon av poretrykket i sedimentene, og senere ble det observert setninger i størrelsesorden 50 til 150 mm nærme byggegroper og 13 til 14mm i en radius på 300 til 400 meter ut fra byggegroper (Braaten et al., 2004). På grunnlag av hva som skjedde på Jong vil denne situasjonen og observasjonene bli brukt for å vurdere muligheten for å bruke en enkel grunnvannsmodellering som et verktøy i planleggingsfasen.

1.2 OPPGAVENS FORMÅL

Formålet med oppgaven er å vurdere verdien av grunnvannsmodellering som et verktøy i planleggingsfasen basert på erfaringsdata fra Skøyen-Asker prosjektet. Hovedmålet er å etablere en forenklet numerisk grunnvannsmodell, bygd opp på informasjon fra tidligere grunnundersøkelser og vurdere hvor relevant modellens beregninger vil være i forhold til virkeligheten. Ved å sammenligne de innsamlede dataene og erfaringer fra byggeprosjektet på Jong med resultatene fra den numeriske grunnvannsmodellen vil usikkerhetene rundt forenklingene og antagelsene i modellen bli vurdert.

1.3 FREMGANGSMÅTE

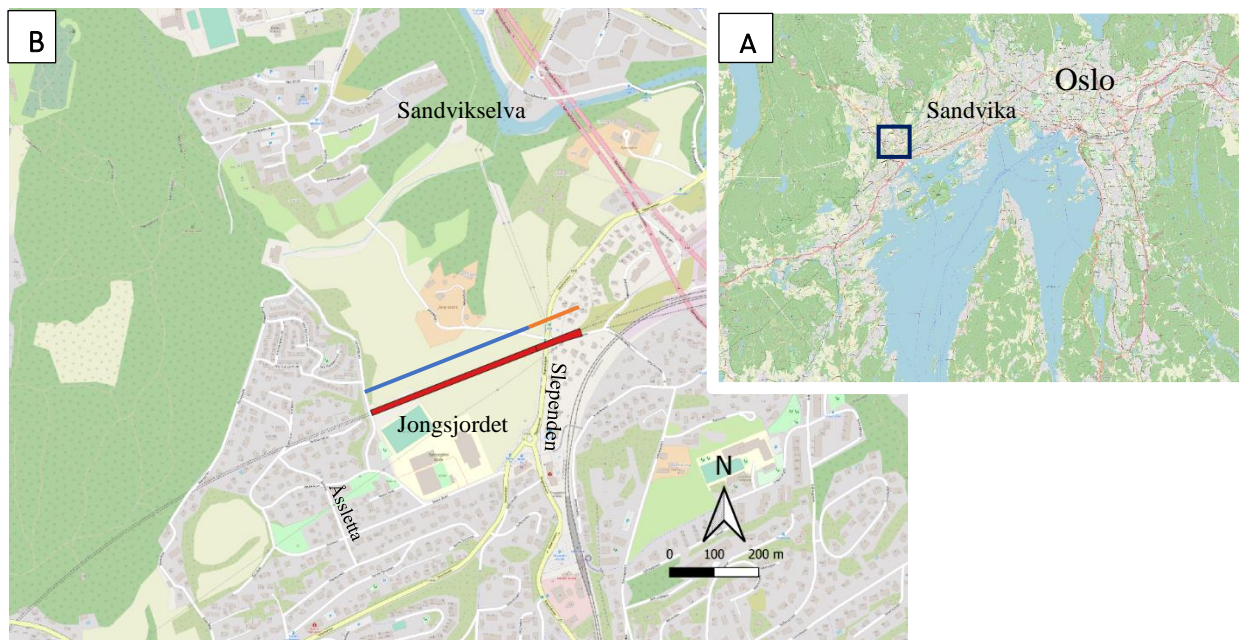
Fremgangsmåten i denne master oppgaven er basert på "The soil mechanism triangle", utarbeidet av Burland (Manoliu & Radulescu, 2008). Triangelen består av fire komponenter som er grunnleggende faktorene i all type geomodellering. De forskjellige faktorene er geologisk forståelse, sedimentenes egenskaper, innsamling av erfaringer og analyser, og utprøving av teorier. Tilnærmingen i denne oppgaven startet med å samle informasjon fra prosjektets utbygningsforløp. Dette innebærer informasjon angående framgangsmåten, tidsforløp og hvilke tiltak som ble iverksatt. For å danne grunnlaget for modelleringen ble det gjort en sammenstilling og tolkning av utførte geologiske og hydrogeologiske undersøkelser. Data fra undersøkelsene ble tolket og systematisert i QGIS (QGIS Development Team) og Leapfrog Work(Seequent, 2019). Dette er gjort for å få en oversikt over geologisk lagdeling og grunnvannets strømningsmønster, samt grunnlag for vurdering av parametere. Dette ble videre sett i sammenheng med setninger og byggegroppen som ble etablert på Jong. Undersøkelsene blir beskrevet og resultatene blir presentert fortløpende i oppgaven, siden dette er grunnlaget for oppsettet av modellen.

De geologiske og hydrogeologiske undersøkelsene er gjort i 3D, basert på disse er beregningsmodellen i Modflow forenklet til et 2D-snitt. Grunnvannsmodelleringen er gjennomført i Modelmuse (Winston, 2009) som grafisk grensesnitt og Modflow-2005(Harbaugh, 2005) som numerisk grunnvannsprogram. Resultatene fra simuleringene er sammenlignet med innhentet data og erfaringer som ble gjort på Jong. Setningsberegninger er utført basert på resultatet fra grunnvannsmodelleringen. For å teste modellens sensitivitet på valgte parameterne, er det testet med forskjellige verdier innenfor realistiske rammer. Basert på disse resultatene er modellens usikkerheter rundt forenklinger og antagelser diskutert, samt en kvantifisering av usikkerhetenes betydning for modelleringsresultatene.

1.4 SKØYEN-ASKER PROSJEKTET, JONGSJORDET

Jong ligger i Bærum kommune, Akershus fylke, ca. 2 km fra Sandvika. I dette området ligger Jongsjordet, der omfattende grunnarbeid ble gjennomført i forbindelse med planlegging for å etablere en løsmassetunnel (Figur 3). Jongsjordet ligger på et relativt flatt område, med kote 31 til 25. I områdene rundt er det en del knauser av fjell og bratte fjellvegger (80 til 140 moh.). Nord til nordøst for Jongsjordet går Sandvikselva som munner ut i Sandviksbukta.

Detaljeplanfasen til Skøyen-Asker prosjektet startet i 1999, hvor byggeteknisk prosjektering ble utført av Aas-Jakobsen AS med Geovita AS som geoteknisk konsulent (Braaten et al., 2004). I denne fasen ble det etablert poretrykksmålere og utført sonderinger. Sommeren 2001 startet byggefase 1 på Jong (Figur 3, blå sekvens). Dette innebar etablering av byggegrop langs den 400 meter lange traseen som går over Jordet. Denne fasen sluttet i Januar 2002, da byggefase 2 ble igangsatt. Fase 2 omfatter etablering av byggegrop på strekningen som går gjennom et boligfelt ved Slependen, 300 meter lang strekke (Figur 3, oransje sekvens). Prosjektet skulle stå ferdig i 2005. (Braaten et al., 2004).



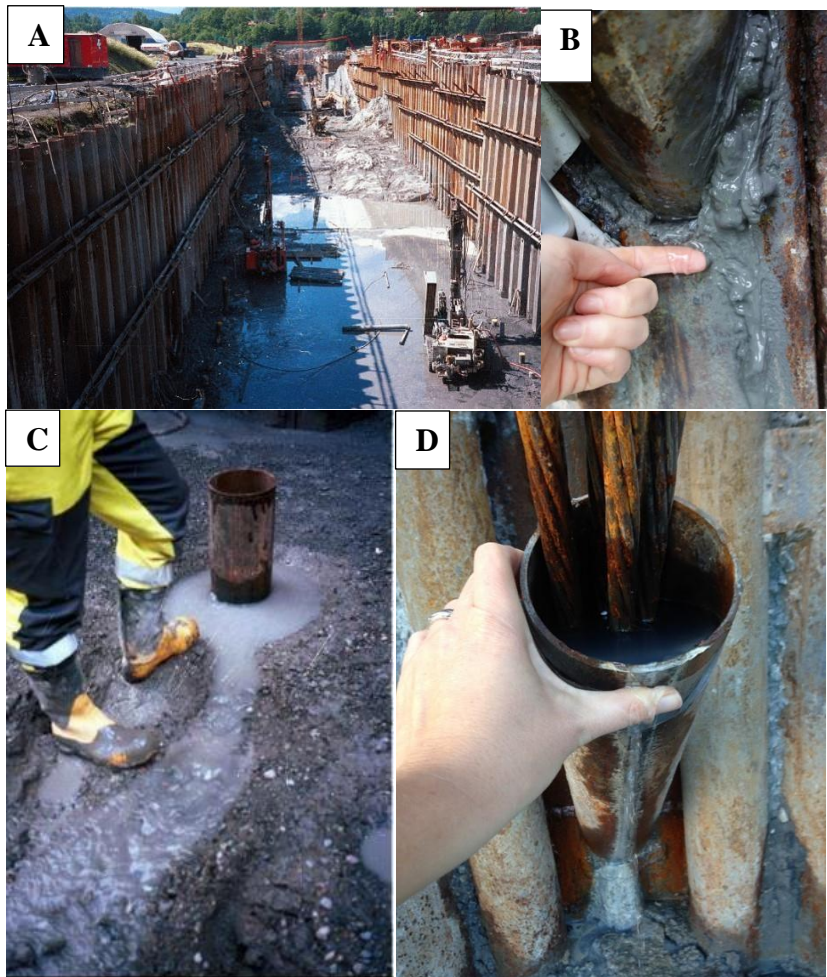
Figur 3 Kart over undersøkelsesområde dannet i QGIS. A) viser hvor Jongs jordet er lokalisert. B) kart over Jongs jordet med importert fil hvor byggegropen er illustrert (Fil fra byggegrop er fra NGI). Blå linje illustrerer fase 1 og oransje linje illustrerer fase 2

Byggegropen på Jong er 700 meter lang og orientert nordøst – sørvest (Figur 3)(Braaten et al., 2004). På Jong er det store variasjoner i fjellnivåene, dette førte til at det ble tatt bort 60 000 m³ leire og 20 000m³ fjell for å danne byggegropen (Baardvik G & Braaten A, 2002).

Byggegropen ble sikret med spuntvegger med bakforankrede stag i inntil fire nivåer (Karlsruud et al., 2015). Under etableringen av spuntten ble det brukt 1400 stag, i tillegg ble det installert

Innledning

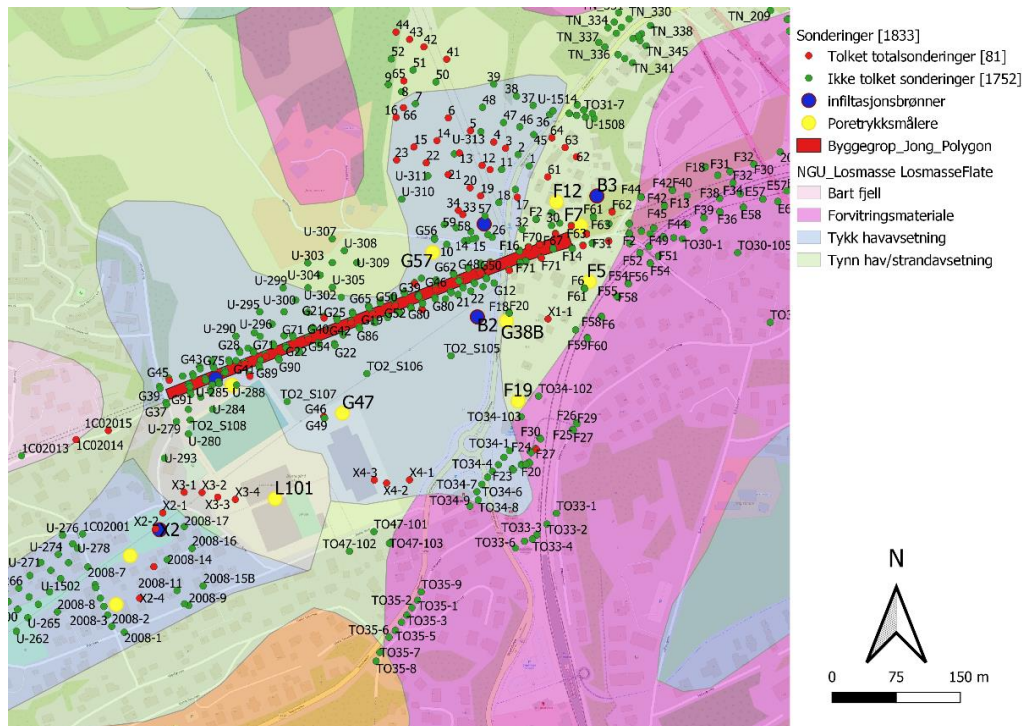
600 borede stålkjernepeler for fundamentering av kulverten (Braaten et al., 2004). Pelers er brukt der byggegropen ikke har direkte kontakt med berggrunnen. I sluttrapporten til Begrens skade er det beskrevet flere årsaker til at det kan oppstå lekkasje i byggegropen (Figur 2). I byggegropen på Jong oppsto det betydelig lekkasje mellom foringsrørene for stag og spunten, samt foringsrørene til stålkjernepeler (Figur 4 A, B, C og D) (Langford et al., 2016).



Figur 4 Bilder fra byggegropen på Jong, som illustrerer lekkasjepunktene. A) er et bilde fra byggegropen på Jong, B, C og D) viser lekkasje mellom foringsrørene for stag og spunten, samt foringsrørene til stålkjernepeler (Bilder tatt av Jernbaneverket)

Det ble gjennomført 1833 sonderinger i form av totalsonderinger og dreiesonderinger i forbindelse med byggeprosjektet (Figur 5). Grunnundersøkelsen er utført av Jernbaneverket ingeniørtjeneste og Norges geotekniske institutt (Aas-Jakobsen, 1999). Løsmassene over berggrunnen var i hovedsak morene med overliggende leire, der tykkelsen på morenelaget varierte lokalt, men er stort sett tilstedeværende over hele området (Braaten et al., 2004). Fra NGU sine karttjenester ligger det marin leire, hav/strandavsetninger, fyllmasser og en god del forvittringsmateriale på Jongs jordet (Figur 5).

Innledning

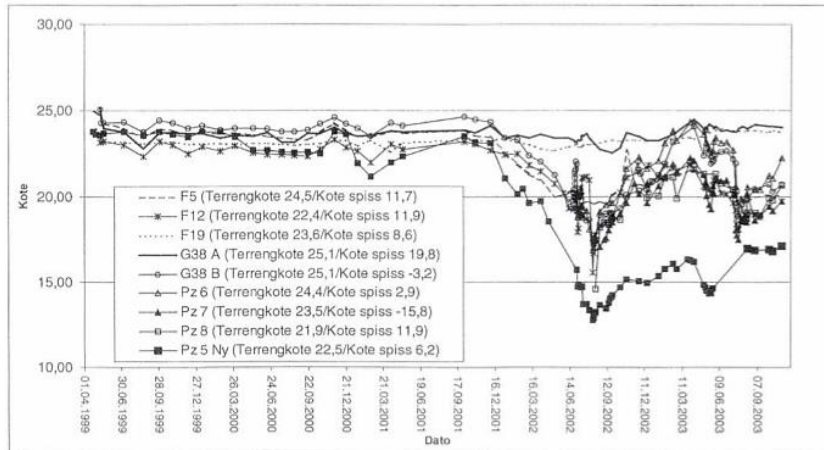


Figur 5 Kvartærgeologisk kart (modifisert etter NGU (2020b)) med lokasjoner for hvor sonderinger er gjennomført (Punkter fra NGI). Kartet er sammenstilt i QGIS.

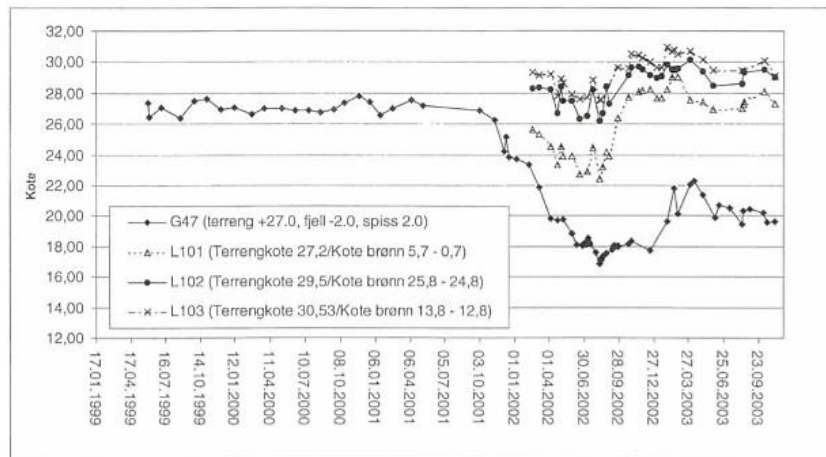
I planleggingsfasen ble det installert 12 poretrykksmålere (Figur 5) langs hele traséen, hvor disse ble supplert med flere målere underveis i byggeprosjektet (Braaten et al., 2004). NGI hadde som oppdrag å følge opp poretrykksmålingene på Jong og rapportere tilbake til Jernbaneverket utbygging som sammenstilte målingene sammen med målinger som ble gjennomført av Jernbaneverket selv. Med bakgrunn av vurderinger under byggeplanfasen ble det montert setningsbolter på alle utsatte bygninger i anleggets influensområde (Braaten et al., 2004). Omfanget ble utvidet underveis i byggeperioden.

I desember 2001 ble det registrert poretrykksfall i området rundt byggegruppen (Figur 6) og de første setningene ble registrert i slutten av mai 2002 (Figur 8) (Klevland, 2005). I juni 2002 ble det registrert en setningsutvikling ved Åssletta, lokalisert 400 meter unna byggegruppen (Figur 7). På grunn av dette ble det installert infiltrasjonsbrønner. Infiltrasjonsbrønn X2 ble igangsatt i september 2002, hvor vanntilførselen ble regulert med stoppekran (Klevland, 2008). Vannmengden som ble innfiltrert varierte mellom 10 til 34 L/min (Klevland, 2008). Dette førte til forbedring ved Åssletta, men hadde ikke påvirkning på områder nærmere byggegruppen. Brønn B4 ved byggegruppen ble derfor igangsatt på nyåret i 2003 (Kleven, 2007).

Innledning



Figur 6 Sammenstilling av målte poretrykksmålinger nær byggegruppen (Braaten et al., 2004). Grafen viser utviklingen av poretrykksnivå plottet som stighøyde «kote» (høyden i vannsøyle referert til moh, betegnet som kote).

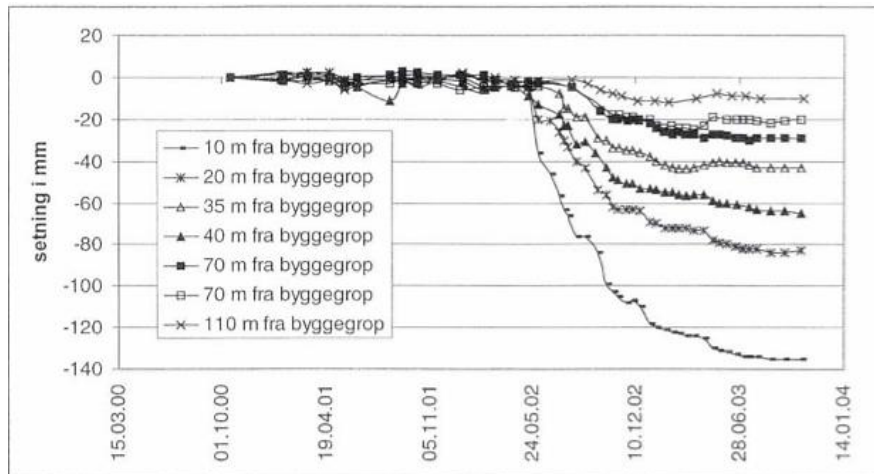


Figur 7 Sammenstilling av poretrykksmålinger i område sør for byggegruppen (Braaten et al., 2004) Grafen viser utviklingen av poretrykksnivå plottet som stighøyde «kote» (høyden i vannsøyle referert til moh, betegnet som kote).

Forventet setningsstørrelse var i størrelsesorden 50-150 mm innenfor en radius på 50 meter, og basert på erfaringsmessig begrensninger ble det antatt at bygninger innenfor en radius på 100 meter kunne få setninger i størrelsesorden 10-40 mm (Braaten et al., 2004). Blom Oppmåling AS hadde som oppdrag å utføre setningsmålingene på utvalgte bygninger på Jong (Braaten et al., 2004). Sammenstilling av målingene vist i Figur 8 viser at setningsutviklingen ved boligområdet nærme byggegruppen startet 24.05.2020. I løpet av ca. ett år hadde det oppstått setninger med i størrelsesorden mellom 50 til 150 mm. På området ved Slepndveien som er nærme byggegruppen er setningsmålingene godt kartlagt (Optimal Geoteknikk, 2009) og har dannet grunnlaget for en metode for risikoanalyse for setningsskader (Piciullo et al., 2020). I løpet av sommeren/høsten 2002 ble det også målt setninger ved Åssletta, 400 meter unna byggegruppen. I løpet av byggeperioden før

Innledning

vanninfiltrasjon ble igangsatt, oppsto det setninger i størrelsesorden på 13 – 14 mm ved Åssletta, men setningsraten avtok fort etter vanninfiltrasjon ble satt i gang.

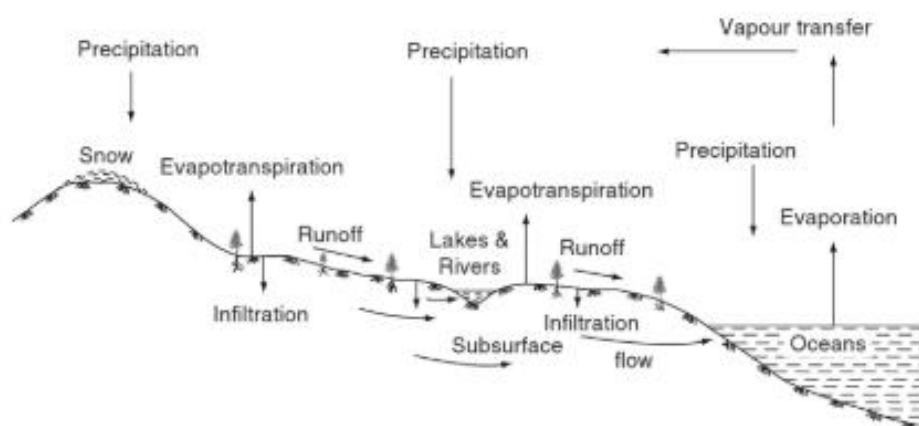


Figur 8 Viser setningsutviklingen ved forskjellig avstand til byggegropen (Braaten et al., 2004).

2 TEORI

2.1 HYDROGEOLOGISKE KRETSLØP

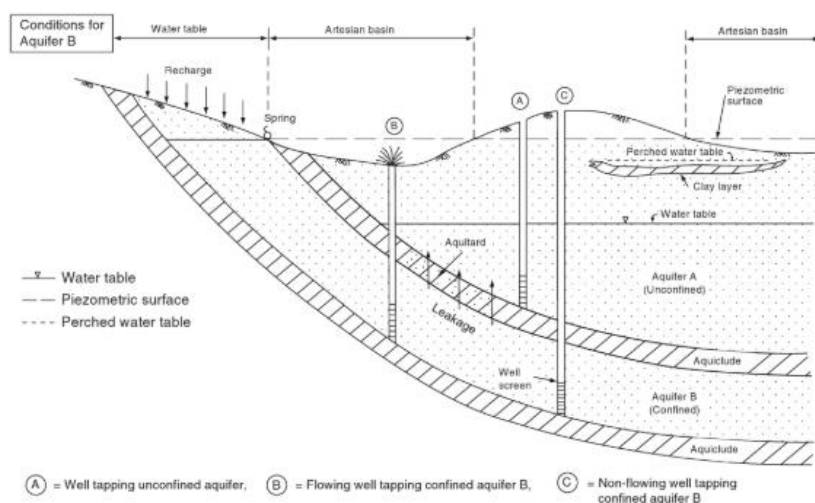
Det hydrologiske kretsløpet kan beskrives som vannets sirkulasjon mellom havet, atmosfæren og land (Singhal & Gupta, 2010, Kap. 1). Vannet fra havet vil fordampe og bli videre fraktet med vinden inn over kontinentet. Når denne vanddampen blir avkjølt i atmosfæren vil dampen kondensere og vil komme ned som regn eller snø. På land kan vannet renne bort på overflaten og videre ned til havet igjen eller infiltrere i bakken og danne grunnvann. En del av vannet som siger ned i bakken vil kunne gå gjennom et kort kretsløp der vannet vil fordampe eller bli brukt av vegetasjon. Dette er omtalt som evapotranspirasjon. Vannet som er igjen vil sige lengre ned i grunnen hvor det vil kunne danne grunnvann (Singhal & Gupta, 2010). Nydannelse av grunnvann vil være mellom 2 til 50 % (kan være så lite som 1% i fjell (Henriksen & Dale, 2018)) av nedbøren (Karlsruud et al., 2003). En kvantifisering av nydannelsen av grunnvann kan være utfordrende på grunn av alle faktorene som påvirker infiltrasjonen. Faktorer som vil påvirke infiltrasjonen er jordtype, geologi og hydrogeologi, nedbør (mengde, type, intensitet, snøsmelting), jordfuktighet før nedbør, avrenning, topografi, vegetasjon og fordampning (Karlsruud et al., 2003). Hydraulisk ledningsevne til materialet ved overflaten vil ha stor betydning. I urbane strøk hvor det er bebyggelse og asfalt med lav konduktivitet, vil føre til lav infiltrasjon. Det samme gjelder løsmasser med lav hydraulisk konduktivitet som leire (Karlsruud et al., 2003). Grunnvannet vil omsider strømme ut i elver, innsjøer eller havet hvor kretsløpet startet.



Figur 9 Illustrasjon over hydrologisk kretsløp (Singhal & Gupta, 2010).

2.2 GRUNNVANN

Geologiske enheter er bygd opp forskjellig og har forskjellige egenskaper. Hvis en enhet eller en sammensetning av flere enheter har en tilstrekkelig porøsitet og permeabilitet slik at grunnvannet kan strømme gjennom eller utvinnes kalles det en akvifer (NGU, 2019a). En akvifer kan være åpen eller lukket, bestemt av hvordan lagdelingen over det permeable laget er (Hendriks, 2010 S.55-58). Inneholder den geologiske lagdelingen en formasjon eller et lag med en betraktelig lavere permeabilitet vil akviferen være lukket eller semi lukket. Dette kommer an på hvor tette de begrensende lagene er (Hendriks, 2010 S.55-58). Disse begrensende lagene kalles akviklude eller akvitard (NGU, 2019a)). Den potensiometriske overflaten (Piezometric surface, Figur 10) i en luket akvifer vil være høyere enn akviferens øverste grense, og kan føre til artesisisk vanntrykk (Hendriks, 2010 S. 55-58). En illustrasjon av forskjellig geologiske formasjoner og akvifere med grunnvannsspeil og potensiometriske overflater er illustrert i Figur 10.



Figur 10 Illustrasjon av type akvifere og hydrogeologiske forhold (Singhal & Gupta, 2010).

Grunnvannet vil kunne forflytte seg gjennom en enhet ved å strømme mellom porerommene. Grunnvannsspeilet og strømningsmønsteret vil kunne følge regional eller lokal topografi, hvor vannet vil forflytte seg fra høyt til lavt trykk (Hendriks, 2010). Denne strømmingen blir beskrevet ved Darcy's lov (Likning 1). Forutsetningene for å bruke Darcy's lov er laminær strømming (Schwartz & Zhang, 2003, S.46).

$$Q = -K Ai \quad (\text{Likning 1})$$

Q = volum fluks (m^3/s)

K = Hydraulisk konduktivitet (m/s)

Teori

A = Areal vinkelrett på strømningsretningen (m^2), ved en lukket akvifer vil dette være tverrsnittets arealet av akviferen.

i = Hydraulisk gradient, kan også skrives $h_2 - h_1/L$, Hvor h er hydraulisk trykkehøyde og L er lengden mellom h_2 og h_1 .

Grunnvannsstrømningen i et tredimensjonalt domene kan defineres med (Likning 2) (Schwartz & Zhang, 2003, Kap.5). Denne likningen er basert på prinsippene til massebevaringsloven (likning 3) og Darcy's lov (likning 1). $K_{(x,y,z)}$ er hydraulisk konduktivitet i x , y , z retning, S er magasinkoeffisienten (storativity), h er hydraulisk trykkehøyde og t er tid. (Schwartz & Zhang, 2003, S.129). Grunnvannets strømningsretning er videre bestemt av grensebetingelsene, heterogenitet og den regionale formen.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Likning 2})$$

$$Q_{inn} - Q_{ut} = \text{forandring av masse lagret over tid} \quad (\text{Likning 3})$$

Ved en drenering av grunnvannet vil det oppstå flere faser. Den første perioden der dreneringen starter vil det være et flyktig grunnvannsspeil (transiente tilstander). Dette vil si at retningen på grunnvannsstrømningen eller mengde vann som dreneres forandres over tid (Hendriks, 2010, S.55). Når systemet kommer i balanse og det oppstår stasjonære tilstander vil grunnvannsspeilet være stabilt og dreneringen vil ha en tilførsel av vann som er utenfor den påvirkede radiusen (Schwartz & Zhang, 2003, S.221). Likningen 4 og 5 viser forskjellen på stasjonær og transient grunnvannsstrømning.

$$\text{Stasjonær: } Q_{inn} = Q_{ut} \quad (\text{Likning 4})$$

$$\text{Transient: } Q_{inn} \pm \text{lagring} = Q_{ut} \quad (\text{Likning 5})$$

Ved en grunnvannstrømning mellom to enheter med forskjellig konduktiviteten vil det skje en refraksjon, basert på tanget loven (Hendriks, 2010, S.77-79). Dette vil føre til et retningsskifte på grunnvannsstrømningen i overgangen mellom lagene. Strømningsretningene kan beregnes og defineres ved likning 6. Basert på denne vil det bli antatt at strømningsretningen i et aquitarde lag vil være vertikal (endimensjonal strømning) mens retningen i den lukkede akviferen vil ha en todimensjonell strømningsretning som er horisontal (Hendriks, 2010 S.77-79).

$$K_1 \frac{\cos\theta_1}{\sin\theta_1} = K_2 \frac{\cos\theta_2}{\sin\theta_2} \quad (\text{Likning 6})$$

2.2.1 Hydraulisk konduktivitet

Hydraulisk konduktivitet (K) er en proporsjonalitetskonstant som relaterer vannstrømningsraten gjennom et medium til trykkgradienten og vil variere med vannets og mediets egenskaper (NGU, 2019a). Typiske K verdier til forskjellig materiale er oppgitt i Tabell 1 (Schwartz & Zhang, 2003, S.51). Morenemateriale (Till) som inneholder fraksjoner fra leire til blokk har et veldig bredt intervall. En grusig morenen vil ha en K som tilhører det øvre siktet, mens en moreneleire vil være i det nedre siktet (Dagestad et al., 2003).

Tabell 1 Hydraulisk konduktivitet til forskjellig materialer (Schwartz & Zhang, 2003, S.51).

Materiale	Hydraulisk konduktivitet (m/s)
Leire	1E-11 - 4.2E-9
Marin leire	8E-13 - 2E-9
Silt(loess)	1E-9 - 2E-5
Fin sand	2E-7 - 2E-4
Medium sand	9E-7 - 5E-4
Grov sand	9E-7 - 6E-4
Grus	3E-4 - 3E-2
Till	1E-12 - 2E-6

Hydraulisk konduktivitet kan bestemmes ved empirisk estimering, tester i felt eller lab. Ved empirisk estimering basert på kornfordelingsanalyse kan Hazen`s likning brukes (Bøyum, 1992). Hazen empiriske formel (Likning 7) beskriver sammenhengen mellom kornstørrelse og hydrauliske konduktivitet i vannmettet materiale. Denne metoden fungerer best med d10 mellom 0.1 og 3mm (Tømmerdal, 2017), og når $d_{60}/d_{10} < 5$ (Bøyum, 1992).

$$K = CH \times d_{10}^2 \quad (\text{Likning 7})$$

CH = 0.01157 (en konstant, ved vanntemperatur på 10 °C)

d10 = kornstørrelsen (mm) ved 10 prosent i kornfordelingsanalysen.

2.2.2 Magasinkoeffisient

Magasinkoeffisienten (S) sier noe om volum vann som avgis eller lagres per enhet overflateareal ved endring av trykkhøyden med en meter (NGU, 2019a).

Magasinkoeffisienten defineres ved likning 8 og er dimensjonsløs (Schwartz & Zhang, 2003). Den består av effektiv porøsitet (Sy) og spesifikk lagring (Ss) gange lagets bredde (b). Denne parameteren vil være forskjellig for en lukket og åpen akvifer. I en lukket akvifer vil Sy være

Teori

tilnærmet lik null, hvilket fører til at S_s er den parameteren med størst påvirkning på grunnvannets oppførsel (Schwartz & Zhang, 2003). Verdier for effektiv porøsitet til forskjellige avsetninger er listet i Tabell 2 sammen med porøsiteten.

$$S = S_y + S_s \times b \quad (\text{Likning 8})$$

Tabell 2 Oversikt over porøsitet og effektiv porøsitet til forskjellig avsetninger (modifisert etter Morris og Johnson (1967))

Materiale	Porøsitet (%)	Effektiv porøsitet (%)
Grov grus	24 - 36	23
Fin grus	25 - 38	25
Grov sand	31 - 46	27
Fin sand	26 - 53	23
Silt	34 - 61	8
Leire	34 - 60	3
Till, dominert av silt		6
Till, dominert av sand		16
Till, dominert av grus		16

Spesifikk lagring er en parameter som relaterer hvor mye vann som løslates ved en kompresjon med korresponderende forandring i hydraulisk trykkehøyde (Acworth et al., 2017). Typiske verdi i en lukket akvifer vil ha en størrelsesorden mellom 10^{-7} og 10^{-5} , og er betydelig mindre enn i en åpen akvifer (Acworth et al., 2017). Beregningen av spesifikk lagring kan gjøres ved likning 9 (Schwartz & Zhang, 2003).

$$S_s = \rho v \times g(\beta_p + n\beta_w) \quad (\text{Likning 9})$$

ρv = tettheten til vann

β_p = vertikal kompressibilitet av massene

β_w = kompressibilitet av vann

n = porøsitet

Den vertikale kompressibiliteten til forskjellige materialer og vann kan bli funnet ved labforsøk (Schwartz & Zhang, 2003). Ifølge Acworth et al. (2017) er det effektiv porøsitet som skal brukes som n . Denne parameteren har standardverdier oppgitt i intervaller i Tabell 2. I Persson (2007, S.24) er det satt opp en tabell som viser forholdet mellom hydrogeologiske og geotekniske parametere, og hvordan disse kan omregnes til de ønskede parametere.

2.3 SETNINGER

Setninger er det mekaniske begrepet som brukes ved kompresjon av jordmasser (NGU, 2019b). Dette kan oppstå ved at det blir tilført en ekstern last på massene eller at poretrykket minker. Jorden består av tre materialer (fast stoff, vann og luft) som vil reagere på spenningsforandringer i jorden. Kornskjelettet vil bli presset sammen, mens porevannet vil motvirke kompresjonen (Jernbanekompetanse, 2016). I alle geotekniske problemstillinger hvor man tilfører en last eller reduserer grunnvannstrykket (for eksempel utbygging av veg og jernbane, utgraving av byggegrop for bygninger og tunneler) må det utføres setningsberegninger, for å vurdere om deformasjonene som forventes å oppstå er akseptable (vegvesen, 2018).

Effektivspenningsprinsippet beskriver forholdet mellom spenningene som bæres av kornskjelettet og trykket fra porevannet. Effektivspenning(P') er den delen av totalspenningen som bæres av kornskjelettet og poretrykket (u) er trykket i porevannet som er motkraften til effektivspenningen (Likning 10)(vegvesen, 2014, Kap 14).

$$P' = P - u \quad (\text{Likning 10})$$

P' = Effektivspenning

P = totalspenning

u = poretrykk

Konsolidering er en prosess der porevannet forflyttes ut fra porene og belastningen blir overført til kornskjelettet (NGU, 2019a). Dette vil føre til en sammenpressing av kornskjelettet, som vil føre til setninger på terrengoverflaten. Denne typen setninger er typisk i leire og silt. Etersom både leire og silt har lav konduktivitet tar det lang tid å drenere vann fra slike avsetninger og konsolideringsprosessen vil skje over lang tid. Ved en litologi hvor det ligger leire over permeable masser vil drenasje av det permeable laget kunne føre til drenering av leiren, som vil lede til konsolidering (Jernbanekompetanse, 2016).

Typen avsetning og belastningshistorikk vil ha stor betydning for setningspotensialet i løsmassen. I leire er forkonsolideringstrykket i jorden et mål på hvor stor effektivspenning leiren tidligere har vært belastet av (vegvesen, 2014). Denne spenningen kan ha oppstått grunnet vekten av is eller av egenvekten til overliggende masser. Hvis en leire har betydelig forkonsolidering vil det potensielt kunne oppstå mindre setninger enn i en leire som ikke har det (vegvesen, 2014). Derfor er ikke poretrykksreduksjon alene nok til å beregne setningene

Teori

med mindre man ønsker å gjøre et konservativt anslag ved å anta ingen forkonsolidering (normalkonsolidert). Avsetningene i Norge er unge, noe som fører til at forkonsolideringen til massene er lave og vil føre til høyere setningspotensiale. Typiske verdier for OCR i leire som har ligget uberørt siden siste istid er mellom 1.2 til 1.4 (vegvesen, 2014). Hvis den vertikale effektivspenningen i leiren er tilnærmet lik forkonsolideringstrykket er den definert som en normalkonsolidert leire (NC-leire, $OCR=1,0-1,3$). Er vertikale effektivspenninger lavere en forkonsolideringstrykket er den betegnet som en overkonsolidert leire (OC-leire, $OCR>1.3$). Beregninger av primærtøyninger vil være forskjellige ettersom leiren er OC (Likning 11) eller NC (Likning 12) (vegvesen, 2014 Kapittel 7).

$$\varepsilon_{oc} = \frac{P'_c - P'_0}{M_c} \quad (n=1) \quad \text{(Likning 11)}$$

$$\varepsilon_{NC} = \frac{1}{m} \ln \left(\frac{P'_0 + \Delta P + P_r}{P'_c + P_r} \right) \quad (n=0) \quad \text{(Likning 12)}$$

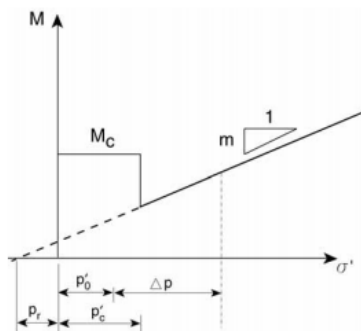
P'_0 = vertikal effektivspenning før forandring

P'_c = forbelastningstrykket

ΔP = tilleggsspenningene med dybden

P_r = referansetall (i denne oppgaven er 50 kPa brukt)

Dersom forkonsolideringstrykket er større enn effektivspenningen (dvs. at nåværende belastning er mindre enn tidligere belastning) vil det bli beregnet for ε_{oc} (vegvesen, 2014). Er forkonsolideringstrykket mindre enn effektivspenningen (dvs. at nåværende belastning er større enn tidligere belastning) må tøyningene bli beregnet opp til forkonsolideringstrykket med (Likning 11) og over forkonsolideringstrykket med (Likning 12) Det totale tøyningen vil da være summen av ε_{oc} og ε_{NC} . Dette illustreres i Figur 11.



Figur 11 Modulkurve for leire og leirig silt (vegvesen, 2014).

Beregning av primærsetningen gjøres ved å integrere tøyningene over den påvirkede dybden(Likning 13) (vegvesen, 2014):

$$\text{Setninger} \quad \delta = \int_0^H \varepsilon * dz \quad (\text{Likning 13})$$

Tidsforløpet til primærsetningene kan bestemmes ved likning 14, som ser på hvor lang tid det tar for et lag er fullstendig konsolidert ved ensidig drenasje. Dette er det noen usikkerheter rundt, slik at denne modellen er en grov beregning for tiden det vil ta før setningene er ferdig utviklet(vegvesen, 2014).

$$\text{Tidsforløp} \quad t_p = \frac{H^2}{C_v} \quad (\text{Likning 14})$$

H= Lagtykkelsen

C_v= Konsolideringskoeffisient

Den totale setningen er sammensatt av flere tidsperioder der setninger kan oppstå(Likning 15) (vegvesen, 2014). Initialsetninger er elastiske og/eller plastiske deformasjoner som oppstår umiddelbart etter påført belastning. Primærsetninger er de setningene som oppstår i perioden fra pålasting til poreovertrykket som har oppstått er utlignet gjennom konsolidering. Sekundærsetninger kommer av plastisk krypning av materialet og kan skje i lang tid etter konsolideringen (Jernbanekompetanse, 2016).

$$\text{Tot} = \text{Initialsetninger} + \text{primærsetninger} + \text{sekundærsetninger} \quad (\text{Likning 15})$$

2.3.1 Risikoanalyse for setningsskader

En metode som er brukt for å gjøre en skadevurdering er en tre-steps vurdering (Piciullo et al., 2020). Steg 1 handler om å identifisere bygninger som kan være sårbare i forhold til vertikal og horisontale forskyvninger i bakken. Under dette trinnet vil maksimum setning og vinkel bli beregnet for å klassifisere hvor stor påvirkning dette kan ha på bygningen (Figur 12).

Bygningen vurderes da som en stiv kloss. Steg 2 handler om å vurdere bygningens sårbarhet for den gitte forskyvningen. Her vil byggets byggemåte, utforming og alder påvirke vurderingen. Ved å sette vurderingene i et system kan den totale risikoen for skade på huset bli vurdert. Risikonivåene beskriver forskjellig nivå på skadene som kan oppstå (Figur 13) (Piciullo et al., 2020). Grunnvannsmodelleringen kan gi informasjon til å beregne maksimal setning som kan oppstå i de forskjellige områdene, som videre kan brukes i denne metoden.

Teori

Impact level	Maximum rotation (θ_{max})	Maximum settlement ($\delta_{v,max}$)
1. Negligible	< 1/500	< 10 mm
2. Slight	1/500-1/200	10-50 mm
3. Moderate	1/200-1/50	50-75 mm
4. High	> 1/500	> 75 mm

Figur 12 Inndelingen av påvirkningsnivå, basert på setninger og potensiell rotasjon til byggene (Piciullo et al., 2020)

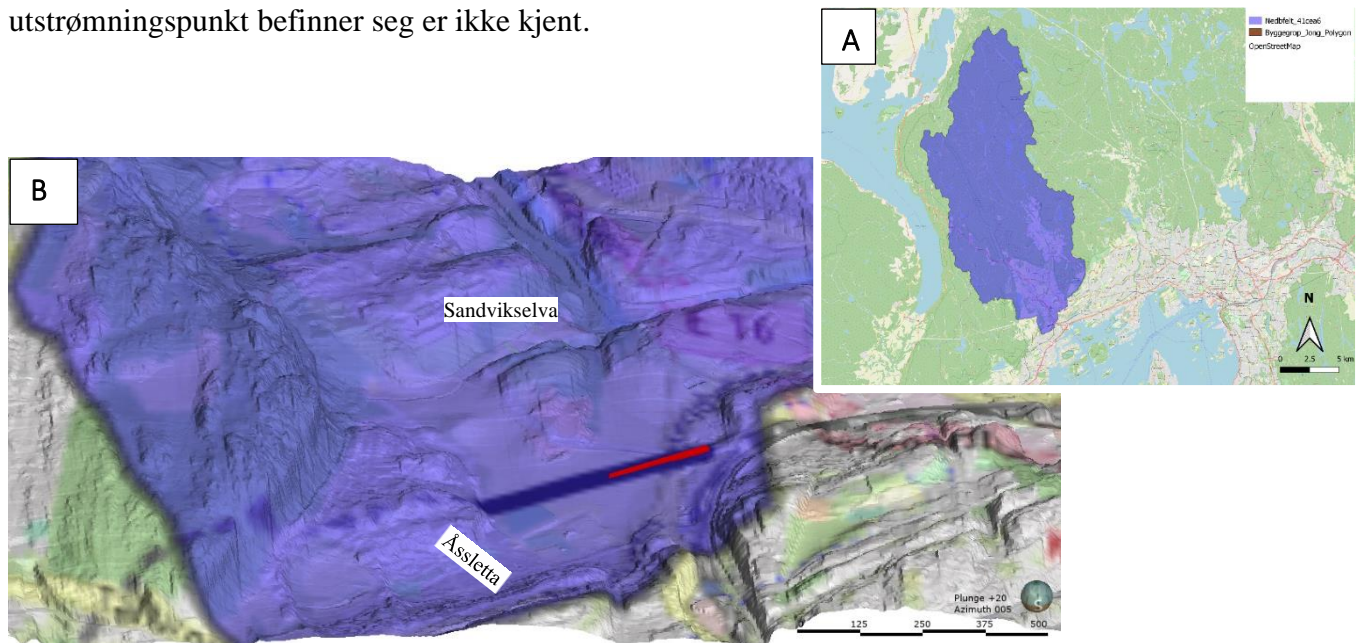
		Impact			
		I1	I2	I3	I4
Vulnerability	V1	D0	D0	D1	D2
	V2	D0	D1	D2	D3
	V3	D1	D2	D3	D4/D5
	V4	D2	D3	D4/D5	D4/D5

Figur 13 Matrise for risikoklassene (Piciullo et al., 2020)

3 OMRÅDEBESKRIVELSE

3.1 HYDROLOGI

Jongsjordet er en del av et stort nedbørsfelt på 191.15km² som ender ut i Sandvikselva. I Figur 14A er nedbørsfeltet markert med et blått felt der Jong er lokalisert lengst sør (NVE, 2019). Nedbørsfeltet ligger i klimaregion øst med årsnedbør på 937mm og har en avrenning på 601 mm/år (Avrenning 19.1 l/s*km²)(NVE, 2019). Figur 14B viser et nærbilde av nedbørsfeltet omfang på Jong. Dette viser at vann fra fjellpartiene rundt Jong dreneres ned til Jongsjordet før det videre strømmet ut i Sandvikselva. Direkte hvor vannets utstrømningspunkt befinner seg er ikke kjent.



Figur 14 A) Et oversiktskart over hele nedbørsfeltet som Jong er en del av. B) Illustrerer utstrekningen til nedbørsfeltet på Jong (NVE, 2019).

3.2 GEOLOGISKE FORHOLD

Fra tidligere undersøkelser ble det beskrevet at fjellnivået har store variasjoner, fra grunnfjell oppe i dagen til ca. 40 meter under terrengoverflaten (Braaten et al., 2004). Berggrunnen består av rombeporfyr, skifer med noe kalkinnhold og sandstein (NGU, 2020a). Disse bergartene har et sprekkesystem der strøkretningen på lagdelingen er NØ-SV, mens fallretningen varierer mye på grunn av at lagene er sterkt foldet (Jernbaneverket & Statenvegvesen, 1999).

Løsmassene består i hovedsak av leire, silt og sand, hvor topplaget består av en meter tørrskorpe med underliggende leire og morene (Braaten et al., 2004). NGU sine kvartærgeologiske karttjenester (2020b) viser at avsetningen på Jongsjordet er tykk havavsetning med tynn hav-/strandavsetning (Figur 5). Avsetningen ble avsatt da dette

området lå under havnivå (Nordhal-olsen, 1989). Strandforskyvningskurve fra Oslo området, laget av Hafsten (1956) viser at marin grense har vært opp til 200 moh for 10 000 år siden, Jong ligger på rundt 30 moh. Leiren i området er til dels bløt, sensitiv og blir beskrevet som normalkonsolidert (Braaten et al., 2004). Leirens tyngdetetthet er 18.5 kN/m^3 (Piciullo et al., 2020), og setningsparameterne i leiren er satt til: overkonsolideringsgrad $OCR=1.3$, modul $M_0= 5 \text{ MPa}$, modultallet $m= 15-22$, konsolideringskoeffisienten $2-10 \text{ m}^2/\text{år}$ (Braaten et al., 2004). Beskrivelsen av geologien i Asker viser til at det ligger morenematerialer med en økt akkumulasjon i lesideposisjoner med hensyn på en isbevegelse mot sørøst, og i forsenkninger og støtsider kan mektigheten være flere meter (Nordhal-olsen, 1989). Grunnundersøkelsen fra Skøyen – Asker prosjektet har observert tykkere morenelag på den østre delen av jordet enn i den vestre delen (Braaten et al., 2004). Kornfordelingsanalysen fra representative prøver på morenematerialet fra Asker viser til en d_{10} på ca. $4 \mu\text{m}$ (Nordhal-olsen, 1989). Under grunnundersøkelsen kom det frem at det var områder hvor det lå grovere masser med høyere dreneringsevne enn morenen (Aas-Jakobsen, 1999). Jordarten er beskrevet som sandig, siltig materiale og har en d_{10} på 0.01 til 0.02mm (Andersen, 1999).

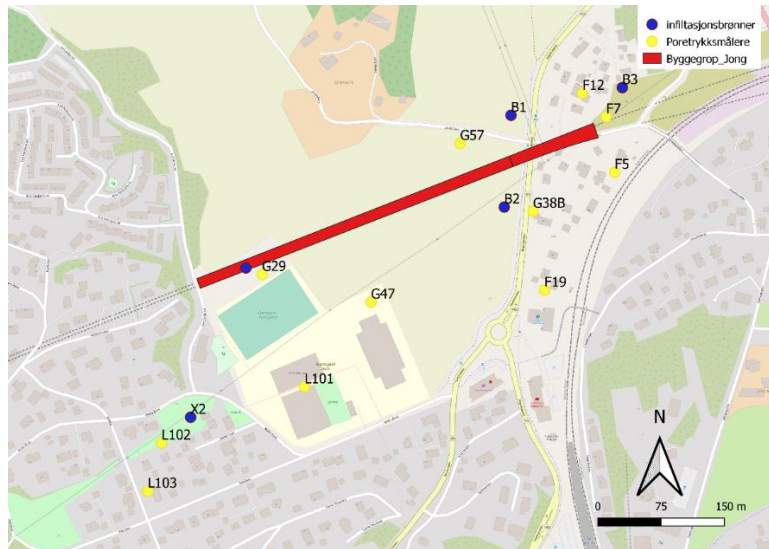
3.3 HYDROGEOLOGISKE FORHOLD

Generelle observasjoner fra poretrykksmålerne (Figur 15) før byggeprosjektet viste til et grunnvannspeil 1-2 m under terrengoverflaten i grunne målere (Braaten et al., 2004).

Poretrykksmålere installert i morenelaget rett over berggrunnen viste en trykkehøyde tilsvarende terrengnivå, eller høyere. I tekniske notater ble det registrert at akviferen responderer på nedbøren og vil dermed være regnvannsmatet (Kleven, 2007).

Poretrykksmålingene tyder på at akviferen i morenelaget er en lukket akvifer, der den overliggende leiren oppfører seg som en akvitard formasjon. Dette er på bakgrunn av at målinger i leiren viser til en vannstand lavere enn i morenelaget, og den hydrauliske trykkehøyden i morenen er høyere enn akviferens øvre grense, noe som er typisk for en lukket akvifer (Hendriks, 2010).

Områdebeskrivelse

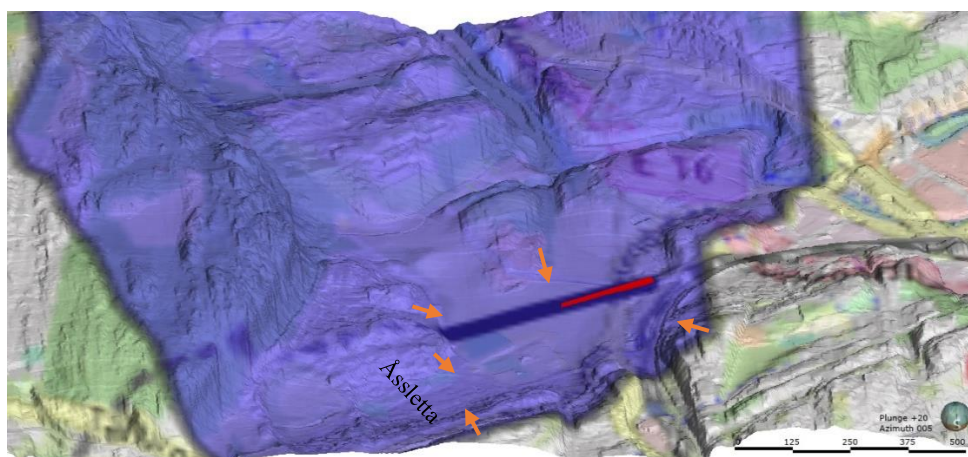


Figur 15 Oversiktskart over Jong med poretrykksmålere og infiltrasjonsbrønner (lokasjonene er tatt fra Braaten et al. (2004)).

4 VIDERE ANALYSE BASERT PÅ EKSISTERENDE DATA

4.1 VANNBALANSE

På Jong er det noe bebyggelse og asfalt, men mesteparten av arealet består av en terrengoverflate av leire, noe som fører til lav vertikal infiltrasjonsmengde lokalt (Kap. 2.1). Ved jordets ytterkant der berget kommer opp i dagen vil det være potensielle infiltrasjonsområder, hvor overflatevann kan drenerer ned i grunnen (morenematerialet) og danne nytt grunnvann (Figur 16). Gjennomsnittsnedbøren i klimaregionen øst er på ca. 900 mm/år og en morene/till kan ha en konduktivitet fra $2E-6$ til $1E-12$ m/s, noe som kan lede til at en lav prosentandel av nedbøren vil infiltrere akviferen. Erfaringstall fra tunnelprosjekter viser til store variasjoner i mengde lekkasje som kan oppstå, 5 til 20 L/min/100 meter (Karlsrud et al., 2003). Det er satt et krav på en lekkasje ikke kan bli høyere enn 3 til 7 L/min per 100 meter i byggegropen for at det ikke skal oppstå store påvirkninger på rundt liggende områder (Karlsrud et al., 2003). Byggegroppen på Jong er 700 meter lang og kan potensielt drenerer store mengder av det nydannede grunnvannet. Med hensyn til at det er relativt små områder hvor det naturlig infiltreres vann til morenelaget vil dette området være følsom for drenering av vann.



Figur 16 Kart over nedbørsfeltet på Jong (NVE, 2019) med antatte infiltrasjonsområder langs blottet berggrunn.

4.2 ETABLERING AV GEOLOGISK MODELL OG GEOLOGISK TOLKNING

Basert på informasjonene fra grunnundersøkelsene, tidligere undersøkelse og egne observasjoner ble det etablert en geologisk modell. Programmet som er brukt er et numerisk visualiserings program, Leapfrog Work. Denne programvaren er utarbeidet av Seequent (Seequent, 2017). Seequent har lagt opp til at studenter kan søke om en «research license». Dette ble søkt om og det ble innvilget et års lisens.

Videre analyse basert på eksisterende data

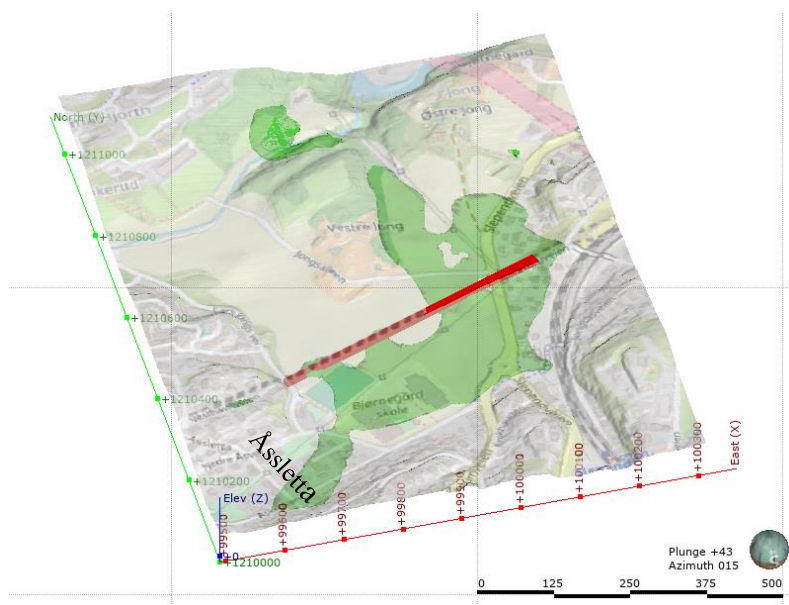
Den geologiske modellen er basert på tolkningen av 81 utførte totalsonderinger (Figur 5) (Orange prikker) som er boringer hvor dybden til berg kartlegges (Statens Kartverk, 2011). Totalsondering bygger på prinsippene for dreietrykksondering og bergkontrollboring. Dreietrykksondering går ut på å dreie og trykke stenger ned i bakken med konstant rotasjon og penetrasjonshastighet (NGF, 1994). Tolkningen er gjort med hensyn til NGF melding 9(NGF, 1994). Tolkningene er beskrevet i to tabeller som er lagret i CSV format (vedlegg B) og ble importert i Leaprog Work som borehull data.

Terrengoverflaten er definert med DTM fil fått fra NGI ved Mats Kahlström, med satellittbildet drapert på. Berggrunnsflaten er basert på observasjonspunkter av blottet berggrunn (observert i felt og kart) og berggrunns punkter fra tolkningene. Med disse to punktsettene er det dannet et rutenett som er berggrunnsflaten. Leapfrog programvaren bruker en interpoleringsmetode, FastRBF, for å estimere verdier mellom to kjente punkter (Seequent, 2013). Interpoleringsmetoden er basert på Kriging, men er utviklet slik at prosessen går fortere. I noen tilfeller ga den interpolerte grenseflaten fra Leapfrog berggrunn over den reelle terrengoverflaten. Justeringer for dette måtte gjøres manuelt.

På Jong er det i hovedsak to avsetninger, dette er leire (øverst) og morene (ned mot fjell). Ut ifra lagdelingene som er beregnet fra importerte tolkninger, ble det kalkulert volum av hvert lag. Interpoleringen av morenelaget viste at morenen ikke var sammenhengende, men at morenen lå som små lommer rundt de punktene der det var registrert grove masser i totalsonderingene, noe som virket veldig urealistisk. Ut ifra tidligere informasjon om geologien på Jong og personlig tolkning av geologien i området ble laggrensene manuelt justert. Dette ble gjort ved å legge til linjer mellom punkter slik at morenelaget ble sammenhengende. Geometrien til byggegropen ble laget av NGI ved Mats Kahlström.

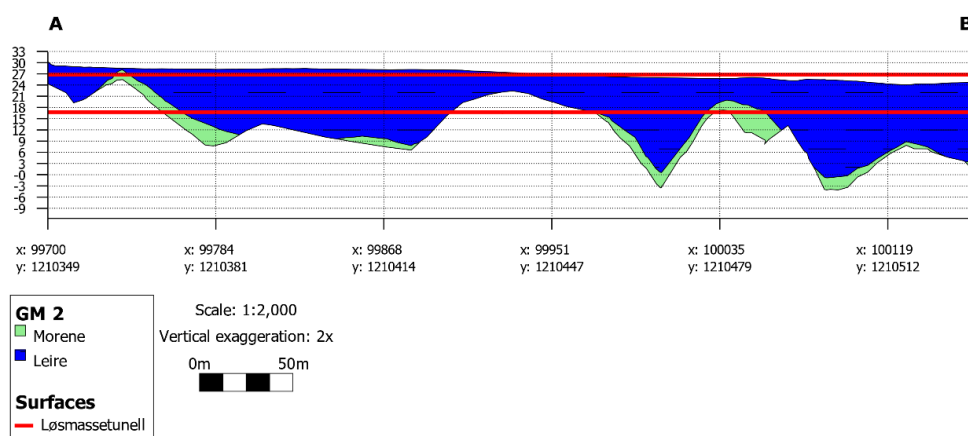
Tolkningen og sammenstillingen av de geologiske informasjonene i området viser at morenelaget ligger som et sammenhengende dekke over berggrunnen (grønt felt i Figur 17), hvor tykkelsen varierer mellom 0 til 10 meter. Morenedekke strekker seg ut til Åssletta som ligger 400 meter bort fra byggegropen, hvor tykkelsen på morenelaget variere mellom 1 til 4 meter morene. Byggegroppen strekker seg over jordet (rødt felt, Figur 17) og krysser morenelaget flere plasser.

Videre analyse basert på eksisterende data



Figur 17 Viser utbredelsen til morenelaget i forhold til terrengoverflaten og byggegrop (rødt felt). Illustrasjon generert i Leapfrog work.

Tverrsnittet langs byggegropen (Figur 18) viser byggegropens toppunkt og bunnpunkt (røde linjer). Dette viser hvor lavt grunnvannstanden potensielt kan synke. Byggegropens bunn ligger på kote 16, mens grunnvannstanden ligger mellom kote 29 og 24. Noe som fører til at grunnvannet kan senkes 13 meter ved byggegropens sør-vestlige del (A i profilet) og 8 m ved byggegropens nord-østlige del (B i profilet). Basert på informasjon angående lekkasjepunkter i forbindelse med byggegroper (kap 1.1) og observasjoner rundt lekkasjepunkt som oppsto på Jong (kap 1.4) vil det oppstå potensielle lekkasjepunkter i området hvor byggegropen ikke har direkte kontakt med grunnfjell. I disse områdene er det etablert stag og stålkjerner som er festet til grunnfjellet og vil punktere akviferen i morenen.



Figur 18 Et tverrsnitt av området som går langs med byggegropen. De røde linjene illustrerer byggegropens topp og bunn punkt. Dette illustrerer potensielle lekkasjeområder. I områder der byggegropen ikke har kontakt med grunnfjellet vil stag og peler blir brukt, og festet i grunnfjellet.

4.3 GRUNNVANNSSTRØMNING OG SENKNING

Under Skøyen-Asker prosjektet er hydraulisk trykkehøyde i morenelaget godt rapportert på Jong, noe som gir en mulighet til å kartlegge forandringene i strømningsmønsteret under hele prosjektet. Det er brukt hydrauliske og automatiske målere som fanger opp små forandringer i grunnvannsstanden (NGF, 1982). For å få en oversikt over grunnvannets strømningsmønster før, under og etter byggingen er målingene fra de 11 installerte poretrykksmålere samlet (Tabell 3) for å bearbeide målingene videre. De fleste poretrykksmålingene er installert nede ved berggrunnen, hvor et filter eller filterspiss ble plassert i løsmasser (Figur 20).

Tabell 3 Oversikt over 11 installerte målerne. Hydraulisk trykkehøyde verdier før igangsetting av byggeprosjektet og etter utgraving er oppgitt i kote, som er tilsvarende moh (Data hentet fra Kleven og Hagen (2002), Aas-Jakobsen (1999) og Braaten et al. (2004)).

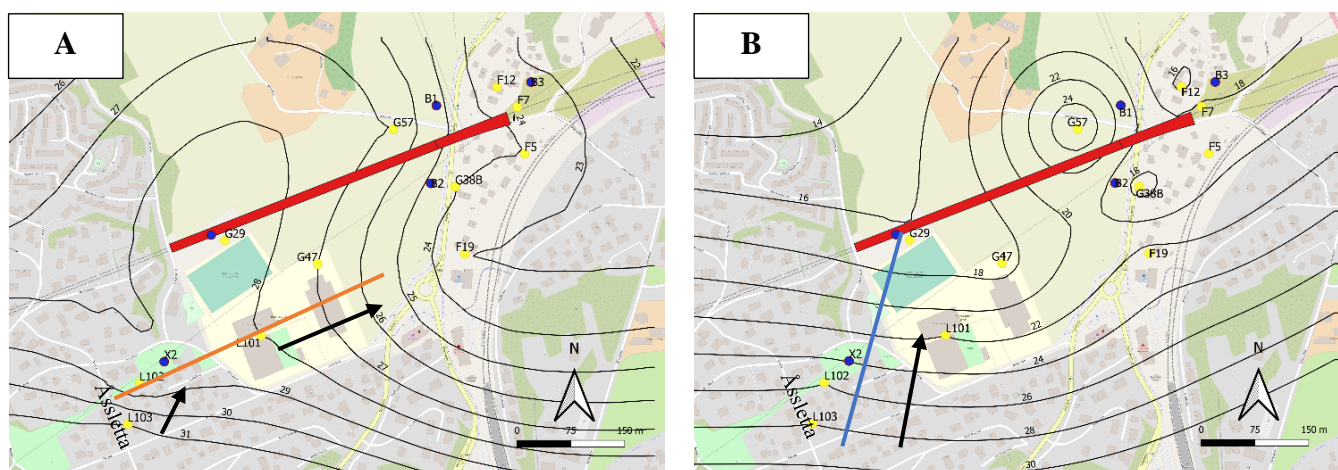
ID	Kote terreng	Kote fjell	Filterbelliggenhet/spiss (kote)	Sensor (kote)	Trykkehøyde før inngrep (kote)	Trykkehøyde etter inngrep (kote)	Notat	Type Brønn	Ca. Avstand til byggegrøp (m)
G47	27.01	-2	2	18.29	27	17		Hydraulisk	90
L101	27.66	1.66	5.66 - 0.66	2.08	28	22	Artesisk	Automatisk	154
L103	30.54	12.54	13.84 - 12.84	19.58	31	28	Artesisk	Automatisk	350
L102	29.51	24.51	25.81 - 24.81	26.11	28	26		Automatisk	250
F5	24.5		11.1	11.7	24	19.5			45
F19	23.6	-17	8.6	8.6	23	23	Plassert i leiren		150
F7	22.8	9.5	9.5		24	18.5	Artesisk		5-10
F12	22.4	11.9	11.9	11.9	23	15.5			40
G57	26	12.2	12.2		27		Artesisk		37
G38B	25.1	-13.9	-3.2	-3.2	24	17			60
G29	28	7	7.1		29	16	Artesisk		11

Målingene (Tabell 3) ble brukt i Leapfrog work for å definere den potensiometriske overflaten i morenen før og etter etableringen av byggegrøpen. Dette ble gjort ved å samle målingenes plasseringer og dybder til grunnvannets overflate ved tidsperiode 1 og 2, disse ble så importert som borreprøver i Leapfrog work (vedlegg C). I Leapfrog Work ble det interpolert mellom punktene som representerte den potensiometriske overflaten, slik at en grenseflate ble etablert. Disse to flatene ble senere importert i QGIS. Filene fra Leapfrog work kunne ikke brukes direkte, de måtte konverteres for å visualisere lagflaten i QGIS.

Resultatene fra denne visualiseringen av hydrauliske trykkehøyder er vist i Figur 19. Figur 19A viser hvordan strømningslinjene var før byggeprosjektet ble satt i gang, og viser en generell strømningsretning fra SørVest mot NordØst hvor gradienten følger terrengoverflaten. Det

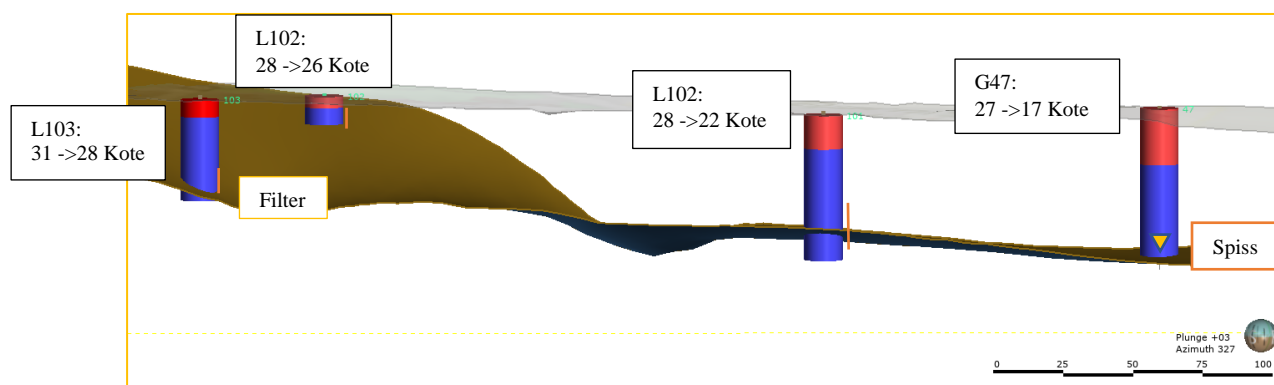
Videre analyse basert på eksisterende data

antas at det var stasjonær grunnvannstand før utbyggingen startet da poretrykkmålingene kun indikerer normale årstidsvariasjoner og det er ingen annen virksomhet som kan antas å ha påvirket vannstrømningen i området. I løpet av byggeprosjektet oppstod det lekkasje inn i byggegropen, som førte til en ny strømningsretning (Sør mot Nord), hvor den hydraulisk gradient har økt (Figur 19B). Det er også dokumentert at grunnvannstanden ble redusert og det oppsto transiente forhold.



Figur 19 A) Grunnvannskart for potensiometriske overflaten til akviferen i morenelaget før byggegropen ble etablert (Orange linje markerer hvor snittet i Figur 20 går), B) grunnvannskart for potensiometriske overflaten til akviferen i morenelaget etter at byggegropen var etablert (blå linje viser hvor snittet til grunnvannsimuleringen går).

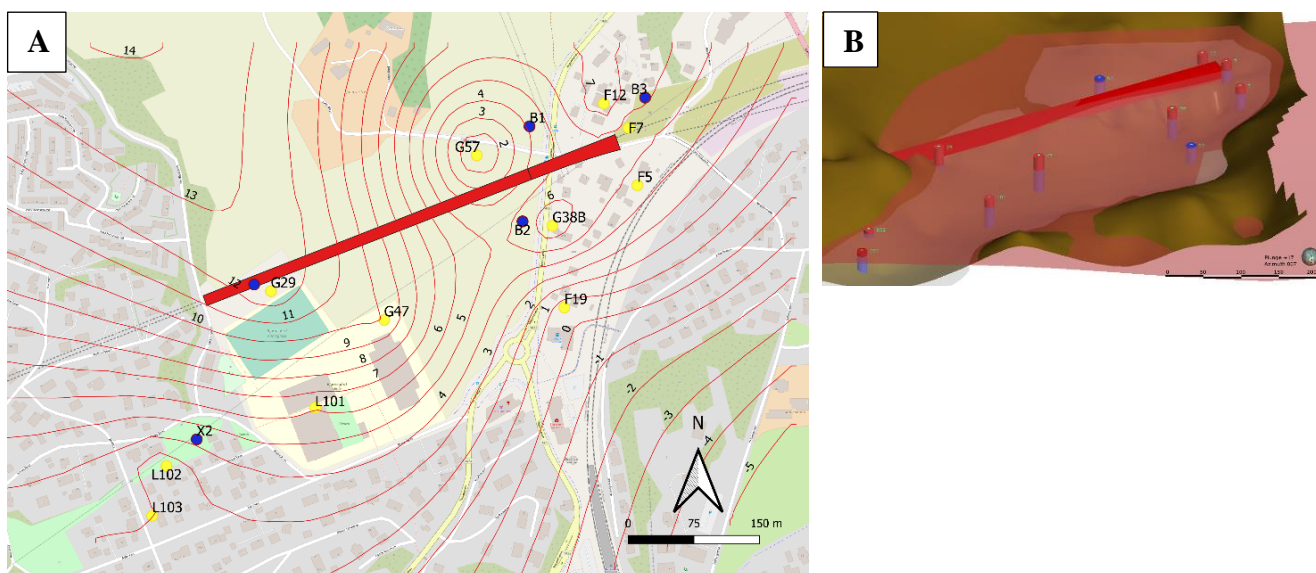
I området fra Åssletta er det en hydraulisk gradient som går fra 31 til 27 moh, over en 400 meter lang strekning (Figur 20). Dette snittet er illustrert i Figur 19A med orange linje, hvor måler L103, L102, L101 og G47 er lokalisert. Gradienten lengre ned i strømningsretningen er høyere og vil kunne føre til en større strømning, men i denne oppgaven blir verdiene i Figur 20 brukt. Under utgravningen forandret strømningsretningen seg som førte til en ny gradient og strømningsretning (Figur 19B). Den blå linjen blir brukt for videre transient simulering.



Figur 20 Et tverrsnitt fra Jong som går gjennom området der poretrykksbrønn L103, L102, L101 og G47 er satt (orienteringen er vist i Figur 19A). Rødt felt viser differansen mellom grunnvannsnivået før og etter byggeprosjektet, tatt fra tabell 3. Vertikal overdrivelse på x2.

Videre analyse basert på eksisterende data

Senkningen av hydraulisk trykkehøyde som er registrert i morenelaget på Jong varierer lokalt (Figur 21). De største reduksjonene ble observert i områder nærme byggegropen (6 til 12 meter) og minker med økt avstand fra byggegropen. Senkningen i Figur 21 er etablert basert på interpolering mellom målinger fra poretrykksbrønner (Markert med guler prikker), dette har ført til negative verdier enkelte steder. Disse verdiene er et stykke utenfor målepunktene, som ikke vil være pålitelig resultat. Ved Åssletta 400 meter bort fra byggegropen har det oppstått en senkning på 3 meter, noe som er veldig spesielt. Brønn F19 var plassert et stykke opp i leirelaget og viste ikke noe respons på dreneringen i morenelaget, som kan være på grunn av en fordrøyning i responsen på grunn av leirens lave konduktivitet.



Figur 21 Illustrasjoner for grunnvannssenkningen. A) viser beregnet størrelse på senkningen i området basert på interpolerte potensiometriske overflate fra Leapfrog. B) viser interpolerte potensiometriske overflaten til grunnvannet i morenelaget før (Rød flate) og etter (hvit flate) fra leapfrog work.

5 METODE

5.1 NUMERISK MODELLERING

Formålet med modelleringen er å øke forståelsen for hvordan det hydrogeologiske systemet ved Jong reagerer ved på en drenering. Samt kvantifisere betydningen av den antatte hydrauliske ledningsevnen, mektigheten av de grove sedimentene som ofte finnes under den marine leiren og grensebetingelser. Selv om det har blitt gjort omfattende grunnundersøkelser ved Jong, er det ikke nok til å lage en fullstendig tredimensjonal strømningsmodell. Det er for eksempel stor usikkerhet knyttet til grunnvannsmatingen fra/til den underliggende sprekkakviferen i berg, samt hydraulisk ledningsevne i morenelaget. Modellen som benyttes her er derfor forenklet til et todimensjonalt snitt der betydningen av geometri og hydrauliske parametere kan studeres nærmere.

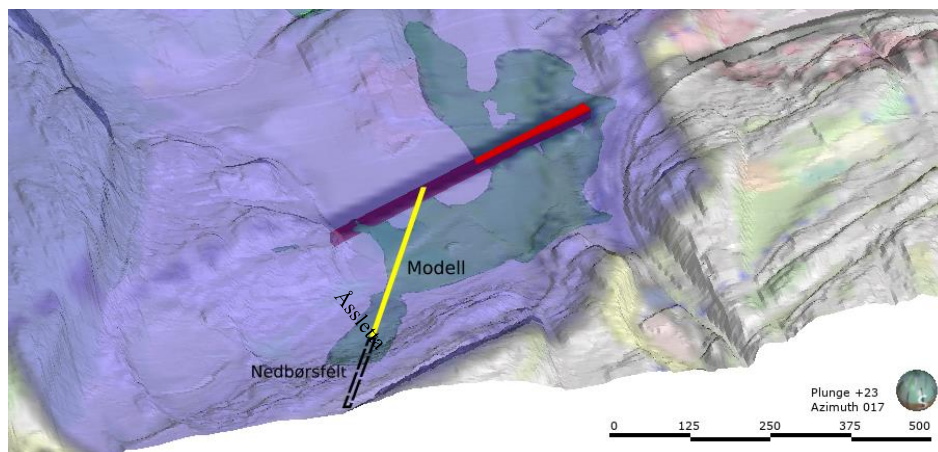
Modelleringen av grunnvannsstrømningen på Jong er gjort i programvaren Modflow-2005 (Harbaugh, 2005) og Modelmuse som grensesnitt (Winston, 2009). Modelmuse er et grafisk brukergrensesnitt som brukes for å danne strømnings- og transportinputfilene for Modflow-2005. Modflow-2005 er et numerisk modelleringsprogram som beregner 3D-strømning for grunnvannet ved å løse partielle differensial likninger (Harbaugh, 2005). Likningen som ligger til grunn for programmet er likning 16, som er basert på grunnvannslikningen presentert tidligere (Kap.2.2). Denne formelen har med W (volumetrisk vanntilstrømning per enhetsvolum som representerer en tilførsel eller reduksjon av lagret vannmengde) og S_s (spesifikk lagring til det porøse materialet) (Harbaugh, 2005).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Likning 16})$$

I Modelmuse kan lagene bli definert som confined eller convertible, der begge begrepene blir behandlet som confined hvis grunnvannet ligger over lagets topp. Dette fører til at magasinkoeffisienten vil bli beregnet ut fra S_s for begge lagene. Hvis det ene laget egentlig er en åpen akvifer må S_s bli definert med S_y delt på lagets tykkelse for å få rett magasinkoeffisient (Harbaugh, 2005).

5.1.1 Konseptualisering

Snittet denne modellen er basert på går fra boligfeltet ved Åssletta og inn til byggegropen (Figur 22). I dette snittet ligger det morene hele veien, hvor orienteringen til snittet går tilnærmet parallelt med grunnvannets strømningsretning som oppstår under selve byggeprosjektet (Figur 19B). Antatt infiltrasjonsområde til profilet baseres på tolkningen i kapittel 4.1. Det blir antatt at nedbøren infiltrerer ned i grunnen hvor berggrunnen er blottet og grunnvannet strømningsretning vil strømme ned langs med grunnfjellet.

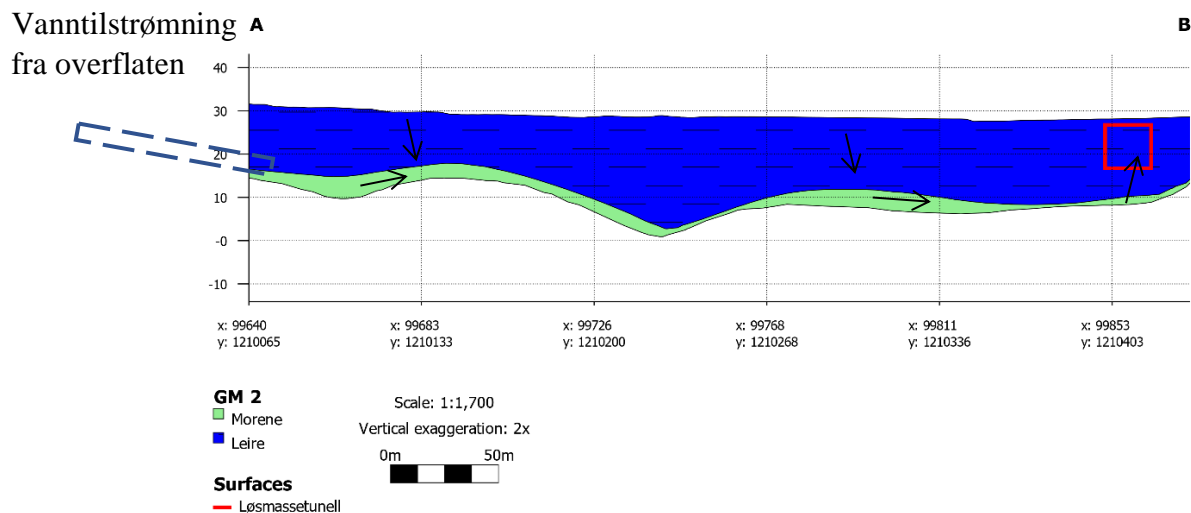


Figur 22 Oversiktskart over Jong hvor utsnittet som er utgangspunktet for modellen er illustrert med en gul linje. Tenkt nedbørsfeltet som er bidragsgivende til morenelaget er illustrert med stiplet linje. Det grønne feltet er utstrekningen av morenelaget og byggegropen er markert med rød og lilla(tunnel).

Det tenkte strømningsmønsteret som oppstår nede i grunnen er illustrert i Figur 23, hvor det er en direkte vanntilførsel til morenelaget fra overflaten ved nedbørsfeltets ytterpunkt. Videre strømmer vannet langs morenelaget før det strømmer inn i byggegropen. For at dette scenarioet skal være gjeldende må strømningsretningen være tolket rett.

Nedbøren ved modellens topp er ikke tatt med i simuleringen. Det er tenkt at nedbøren ved overflaten vil dreneres bort i det øvre siktet hvor det er tørrskorpe som kan oppføre seg som mer permeable løsmasser (vegvesen, 2014). På grunn av leirens lave permeabilitet vil det være lite vann som dreneres ned i tverrsnittet. Grunneier har også opplyst om at det er etablert kunstig drenering av området i forbindelse med jordbruket, noe som vil kunne påvirke dreneringen av overflatevannet. En testmodell der det ble definert nedbør skapte et veldig høyt trykk i leiren noe som ikke er reelt. Dette kan komme av at det ikke er definert en drenering i leiren hvor vannet vil dreneres bort.

Metode



Figur 23 Et tverrsnitt langs modellens orientering på Jong, hvor vannets strømningsmønster er illustrert med sorte piler. Vannet strømmer inn ved profilets venstre side, følger morenelaget som ligger ved berggrunnen og strømmer ut i byggegropen (rød firkant), lokalisert ved snittets høyre side

Grensebetingelser – Stasjonære forhold (før tilstanden)

Vannmengde inn i systemet er definert ved modellens venstre side, der det er tenkt at morenelaget har kontakt med et større system som mater grunnvannet til morenelaget. For å beregne hvor stor vanngjennomstrømningen er i det grove laget (gitt ulike scenarier av geologiske forhold), ble førsituasjonen modellert ved å definere en konstant hydraulisk trykkehøyde på begge sider av modellen (31m på venstre side og 27 m på høyre side, verdier fra Figur 20). Dette representerer reelle verdier målt før igangsetting av prosjektet. I dette området er det observert artesiske trykkehøyder i morenelaget (Tabell 3).

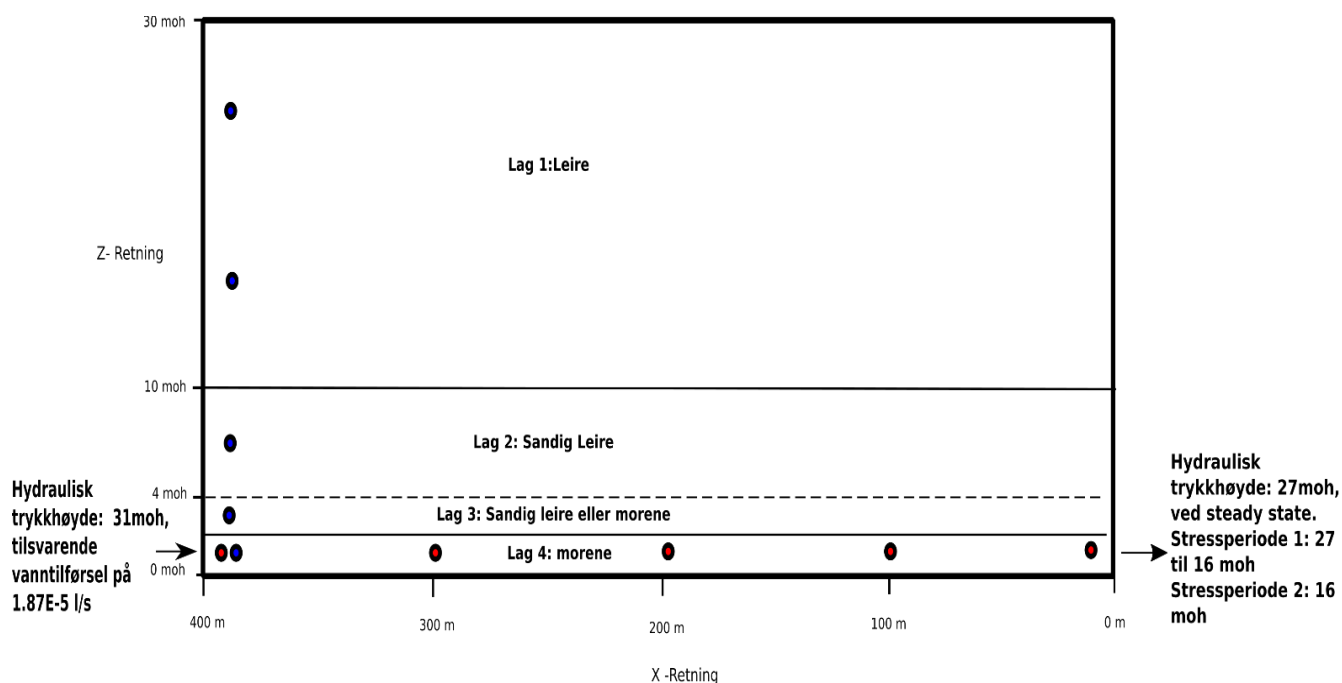
Grensebetingelser – transiente forhold (etter tilstand)

Etter at vanngjennomstrømning (fluks) er etablert for stasjonære forhold for ulike geologiske scenarier, blir den konstante hydrauliske trykkehøyden (grensebetingelse ved venstre side) erstattet med en vanntilførsel med en konstant fluks tilsvarende vanntilførsel ved stasjonære tilstander.

Ved modellens høyre side vil grunnvannssenkningen tilsvare nivåforandringen for utgravningen i byggegropen, som vil variere over tid. I den første tidsperioden, som går over 9 måneder, senkes den hydrauliske trykkehøyden fra 27 til 16 meter. Kote 16 er hvor bunn av byggegropen ligger (Figur 18). Etter dette blir det utført en transientanalyse i 2 år med en konstant hydraulisk trykkehøyde på 16 m.

5.1.2 Modelloppsett

Modelloppsettet er basert på geotekniske undersøkelser hvor det er registrert en dybde til grunnfjellet på 0 til 40 meter. I områdene hvor morenedekket var lokalisert varierte dybden til berg ofte mellom 20 og 40 meter. I modellen er berggrunnen satt til 30 meters dybde og er representert med en nullstrømnings grensebetingelse i bunn av modellen. Morenelaget (lag 4) varierte i hovedsak mellom 0 til 4 meter i området rundt Åssletta borettslag og inn til byggegropen, som ledet til en antatt tykkelse på 2 meter morene i modellen. Laget over morenen på 2 meters tykkelse (lag 3), er definert som et eget lag. I noen av simuleringene var dette laget definert som leire, mens i andre som morene. På denne måten kunne effekten av lagtykkelser vurderes med samme grunnmodell. Lag 1 (Leire, øverst) er et 20 meter tykk leire lag og lag 2 er et 6 meter tykt (sandig leire). Begge lagene ble definert med anisotropi ettersom det var noen observasjoner av tynne lag med grus i sonderingene (Aas-Jakobsen, 1999). Vanntilførselen er definert ved modellens venstre side og dreneringen skjer ved modellens høyre side (Figur 24). Blå og røde punkter i Figur 24 viser observasjonspunkter som er brukt for å visualisere det som skjer under simuleringen.

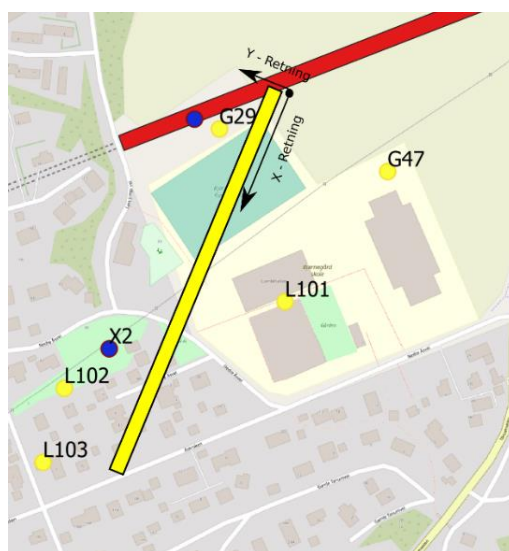


Figur 24 Illustrasjon av modelloppsettet, med lagdeling og definerte grensebetingelser. Observasjonspunkter som er brukt videre i oppgaven er illustrert med røde og blå sirkler.

Metode

5.1.3 Modelldesign (diskretisering)

Modellen er bygd opp av 4 lag (z retning, dybde), 80 kolonner (x retning) og 1 rad (y retning) med en cellestørrelse på 5x5 meter. Den vertikale inndelingen i de tre nederste lagene er på 5 celler, mens topplaget er delt i to. Modellens oppbygning gir en lengde på 400 meter (x retning), en bredde på 5 meter (y retning) og en total dybde på 30 meter (z retning). Definert X og Y retning i modellen er illustrert ovenfra i Figur 25.



Figur 25 er en illustrasjon på hvor Y retningen og X retningen er i det modellerte området i forhold til terrenget

5.1.4 Parametere

Basert på teori om grunnvannsstrømning er det noen hydrogeologiske parametere som påvirker strømmingen. Disse er hydraulisk konduktivitet, magasinkoeffisient og tykkelsen på morenelaget. I denne masteroppgaven er verdier hentet fra litteraturen.

Hydraulisk konduktivitet

Hydraulisk konduktivitet i morenemateriale kan variere mellom $1E-12$ - $2E-6$ m/s (kap 2.2). I NGU sin kvartærgeologiske beskrivelse fra Asker har det blitt utført noen kornfordelingsanalyser på morenemateriale i området (Nordhal-olsen, 1989). Denne analysen indikerer en d_{10} på ca. $4E-3$ mm. Ved å bruke Hazen's d_{10} metode vil dette gi en hydraulisk konduktivitet på $1.8E-7$ m/s. Dette er innenfor gitte intervaller til morene materialer. Analysen av den grovere avsetningen som ble lokalisert i området viste en d_{10} på ca. 0.01 til 0.02 mm. Med Hazen's formel gir dette en hydraulisk konduktivitet på $1E-6$ m/s til $4.6E-6$ m/s. Kornstørrelsen ved d_{10} til disse avsetningene er veldig små hvor d_{60}/d_{10} er mer enn 5, som fører til at Hazen's formel ikke er ideelt (Kap. 2.2). Denne metoden er brukt i denne

Metode

oppgaven for å ha en pekepinn på hvilke verdier som kan oppstå i disse sedimentene, ettersom intervallet for potensielle verdier for morene eller en silt kan være stor.

Hydraulisk konduktivitet i leiren kan variere mellom $1E-11$ til $4.2E-9$ ($8E-13$ til $2E-9$ marin leire) basert på verdier hentet fra Schwartz og Zhang (2003). I Vegvesenets rapport angående undersøkelser og krav til lekkasje i tunneler for å minske påvirkningen på ytre miljø (Karlsruud et al., 2003) er en typisk verdi for leire på $1E-9$ m/s. Denne verdien blir dermed brukt i denne modellen hvor det kan være rom for å definere en lavere konduktivitet.

Magasinkoeffisient

Magasinkoeffisienten er satt sammen av effektiv porøsitet og spesifikk lagring. Effektiv porøsitet er basert på verdier fra Tabell 2, hvor det er oppgitt en effektiv porøsitet i leire på 3%. I en lukket akvifer vil ikke effektiv porøsitet være relevant, og ble derfor oppgitt med verdi 0 (Kap 2.2).

I en lukket akvifer er spesifikk lagring vanligvis lavere enn $1E-5$ (Acworth et al., 2017), derfor ble denne verdien valgt. Magasinkoeffisientens størrelsesorden i en åpen akvifer er større enn i en lukket akvifer, men magasinkoeffisienten bruker i hovedsak å bli beregnet ut ifra effektiv porøsitet. I følge Batu (1998, S.61) vil spesifikk lagring i leire variere mellom $2.53E-3$ til $9.19E-4$. På bakgrunn av dette blir det valgt en verdi på $1E-3$.

Oppsummering av hydrogeologiske parametere i modellen

Parametere som definerer materialets egenskaper og tykkelse av de ulike lagene er listet opp i Tabell 4. Her er hydraulisk konduktivitet (K_s) oppgitt i x, y og z retning sammen med spesifikk lagring, effektiv porøsitet og de forskjellige lagtykkelsene.

*Tabell 4 Verdier og parametere til hvert definerte lag i prinsippmodellen er oppgitt i tabellen. *Ettersom morene laget er definert til å ligge i en lukket akvifer, vil det ikke være relevant med S_y her.*

LAGDELING	LEIRE	SANDIG LEIRE	SANDIG LEIRE	MORENE
TYKKELSE (M)	20	6	2	2
KS (K_x OG K_y) (M/S)	$1E-10$	$1E-9$	$1E-9$	$1.8E-7$
KS (K_z) (M/S)	$1E-10$	$1E-10$	$1E-10$	$1.8E-7$
SY	0.03	0.03	0.03	0*
SS	$1E-3$	$1E-3$	$1E-3$	$1E-5$

5.1.5 Senario simulering

Den transiente simuleringen har et tidsforløp som går over 2 år og 9 måneder. Den første stressperioden er på 9 måneder. Dette er tidsperioden der vannstanden i byggegropen reduseres lineært over hele tidsperioden. Neste stressperiode går over 2 år og er med en konstant hydraulisk trykkehøyde ved byggegropen.

5.1.6 Kalibrering og validering

Fordi den hydrogeologiske modellen er en forenkling av de faktiske forholdene på Jong er det ikke gjort en klassisk kalibrering og valideringsøvelse. De modellerte hydrauliske trykkehøydeverdiene er likevel sammenliknet med målte poretrykksendringer i felt, og gir en pekepinn i forhold til om resultatene er i riktig størrelsesorden. Resultatene fra stasjonær simulering er sammenlignet med poretrykksmålinger fra brønn L103, L102, L101, G47, G29 og G38B. Disse poretrykksmålerne er ikke lokalisert direkte på profilet, men er i samme området. Resultatene fra transientanalysen er sammenlignet med erfaringstabellen fra Baardvik et al. (2016) hvor målinger fra Jong er plottet.

Beregnet vannbudsjett er sammenlignet med avrenningen fra NVE (2019). For å beregne en tilnærming til størrelsen på nedbørsfeltet er infiltrasjonsmengden delt på avrenningen fra NVE (2019). For å kunne sammenligne lekkasjen i byggegropen med erfaringstall så er lekkasjen omregnet fra m^3/s til L/min per 100 meter.

5.2 SETNINGSBEREGNINGER

Setningsberegninger er utført med setningsparametere samlet i Tabell 5 (Fra kap 3.2) og resultatene fra grunnvannsmodelleringen. Verdier for hydraulisk trykkehøyde fra stasjonær tilstand og ved simuleringens slutt, ble hentet fra beregningene og omgjort til poretrykk (kPa). Totalspenningen er beregnet ved leirens tetthet og dybden til laget (Leirelaget ble oppdelt i meterlange sekvenser). Ved å ta bort poretrykket ble effektivspenningen funnet (Ligning 10, kap. 2.3). Ved å beregne dette før og etter grunnvannssenkningen kan delta P defineres og vurderes opp mot P^c ($p^0 \cdot \text{OCR}$). Dette vil vise om det er OC eller NC tilstand som viser om det må beregnes tøyning opp til P^c eller opp til P^c og over. Tøyningen ble så summert for hvert lag og hele sekvensen.

Metode

Tabell 5 Samlet parametere som er brukt i setningsberegningene.

Setningsparametere	
M (kPa)	5.00E+03
m (-)	17
Cv(m ² /år)	2-10
γ (kN/m ³)	18.5
OCR (-)	1.3
Pr	50

Basert på setningsberegningene blir det vurdert hvilken påvirkningsgrad simuleringen vil indikere. Dette blir vurdert ut ifra klassifiseringen som er definert i klassifiseringsklassene i risikoanalysen for setningsskader (Kap.2.3.1).

5.3 SENSITIVITETSANALYSE

Sensitivitetsanalysen er gjort på tre forskjellige faktorer. Disse tre faktorene er valgt på grunnlag av grunnvannslikningen. Morenelagets tykkelse blir testet med 1 og 4 meter. Tykkelsene er valgt med tanken på geologien på Jong hvor det er registrert tykkelser mellom 0 til 4 meter i morenelag rundt Åssletta. I noen områder er det tykkere morenelag, men det var sjeldent. Hydraulisk konduktivitet i morene har et stort intervall. Valg av intervallet ble begrenset til mellom 2E-6 og 1E-8 m/s, på bakgrunn av at det er en grusig morenen. Spesifikk lagring (Ss) i morenelaget og leirlaget ble testet. Verdier i morenelaget ble hovedsakelig testet for lavere verdier på grunn av at dette er en lukket akvifer hvor typiske verdier er mellom 1E-5 til 1E-7, men også noe med en høyere verdi. Verdier i leiren ble testet med en større og mindre verdi.

Tabell 6 oppgitte verdier som ble testet under sensitivitets analysen

Parameter	Testede verdier
Morenelagets tykkelse (m)	1 - 4
Ks verdier (m/s)	2E-6 - 6E-7 - 6E-8 - 1E-8
Ss verdier i morene	1E-7 - 1E-4
Ss verdier i leiren	2E-3 - 1.5E-3 - 5E-4 - 1E-4

Sensitivitetsstudiet ble gjort ved å forandre på en parameter om gangen, hvor hele prosessen fra stasjonære simulering og transient simulering ble gjennomført for hvert scenario. For hver kjøring ble resultatene for ønsket celler importert i GW_Chart(Winston, 2000) for så å få dataen fra de ønskede punktene. Dette er en primitiv testing hvor en forandring på tvers av parameterne ikke ble utført. Flopy(Bakker et al., 2016) er et Python bibliotek som kan

Metode

generere Modflow-2005 inputfiler, samt åpne Modflow-2005 resultatfiler. Dette åpner muligheten for å skripte parameterstudiet, men det er enkelte utfordringer. Det å definere en modell ved hjelp av Flopy er en tungvinn prosess, og gjøres uten et grafisk grensesnitt. Derfor ble det forsøkt å generere modellen ved hjelp av Modelmuse, for så å åpne modellen i Flopy og endre enkeltparametere. Selv om Modflow-2005 leser inputfiler generert i både Flopy og Modelmuse, så er det noen små forskjeller i formatet på inputfilene som generes. Dette gjør at inputfiler generert i Modelmuse ikke lar seg åpne av Flopy. På grunn av undertegnede begrensede erfaring med programmering ble det derfor ikke gjort videre forsøk på å gjennomføre parameterstudiet i Flopy.

Flopy ble derimot brukt til å hente ut data fra resultatfilene til Modflow-2005. Dermed var det mulig å visualisere og kombinere resultatene fra simuleringene på måter som ikke var tilgjengelig i Modelmuse.

6 RESULTATER

6.1 GRUNNVANNSMODELLERING

6.1.1 Stasjonær simulering

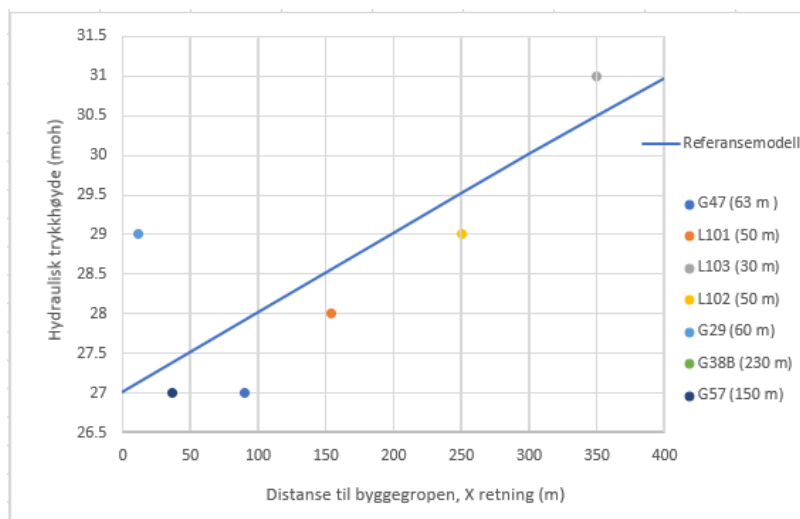
Simuleringen viser til en strømning fra venstre til høyre i morenelaget. Vanntilførselen fra modellen sammenlignet med avrenningen fra NVE (2019) er listet i Tabell 7. Modellen trengte en vanntilførsel på $1.87E-5$ L/s (0.02 L/min/100 m) for å oppnå en stasjonær tilstand med modelloppsettet beskrevet i Kap. 5.1. Dette tilsvarer 9.8% av den årlige avrenningen beregnet av NVE (2019) for nedbørsfeltet til Jong. Det vil si at vannmengden er tilgjengelig, men infiltrasjonsmengden er lav. Beregnet nedbørsfelt som bidrar til vanninfiltrasjon til morenelaget er veldig lite. Dersom avrenningstallene til NVE (2019) legges til grunn og det antas at morenelaget kun mates gjennom avrenning, vil modellen forsynes gjennom et område på 0.98 m² på terrengoverflaten (Dette gjelder for en modell med 5 meters bredde). Dette er verdier med lignende størrelse som tidligere beregnet strømning i fjell, hvor det er antatt at infiltrasjonen i fjell er mellom 1 – 20 % av nedbøren (Kap. 2.1).

Tabell 7 verdier for avrenning fra NVE (2019) og definert vanntilførsel ved modellens vestre grensebetingelse. Forholdet mellom disse i prosent av avrenning og hvor stort nedbørsfeltet som er bidragsgivende er beregnet.

Avrenning fra NVE (2019)		Vanntilførsel til morenelag		Andel av avrenning	Bidragsgivende nedbørsfelt
(L/s m ²)	(mm/år)	(L/s)	(mm/år)	(%)	(m ²)
1.91E-05	601.53	1.87E-5	58.98	9.8	0.98

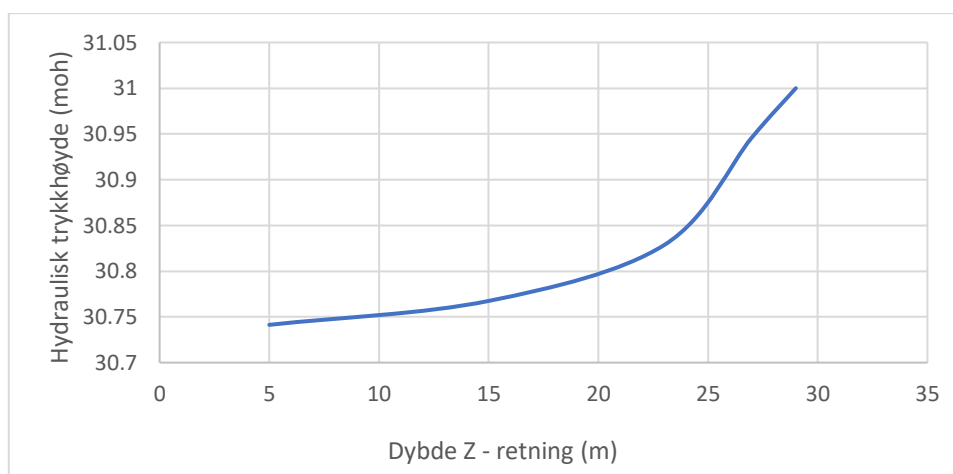
Hydraulisk trykkehøyde i morenelaget fra den stasjonære simuleringen viser en lineær økning fra byggegropen til en distanse på 400 meter (Figur 26). Verdiene fra simuleringen er plottet sammen med målte verdier fra Jong i Figur 26. Avstanden mellom poretrykksmålerne og modellert snitt varierer, og er oppgitt bak målernavnet. Verdiene fra den stasjonære simuleringen er vurdert til å ha en god nok korrelasjon til å bli brukt som startbetingelser for den transiente analysen.

Resultater



Figur 26 Grafen viser hydraulisk trykkhøyde i morenelaget i forhold til distanse fra byggegropen ved en stasjonær simulering. Verdier fra forskjellige poretryksmålere er plottet, i forhold til målerens distanse til byggegropen, verdier i parentes er ca. distanse til modellert snitt.

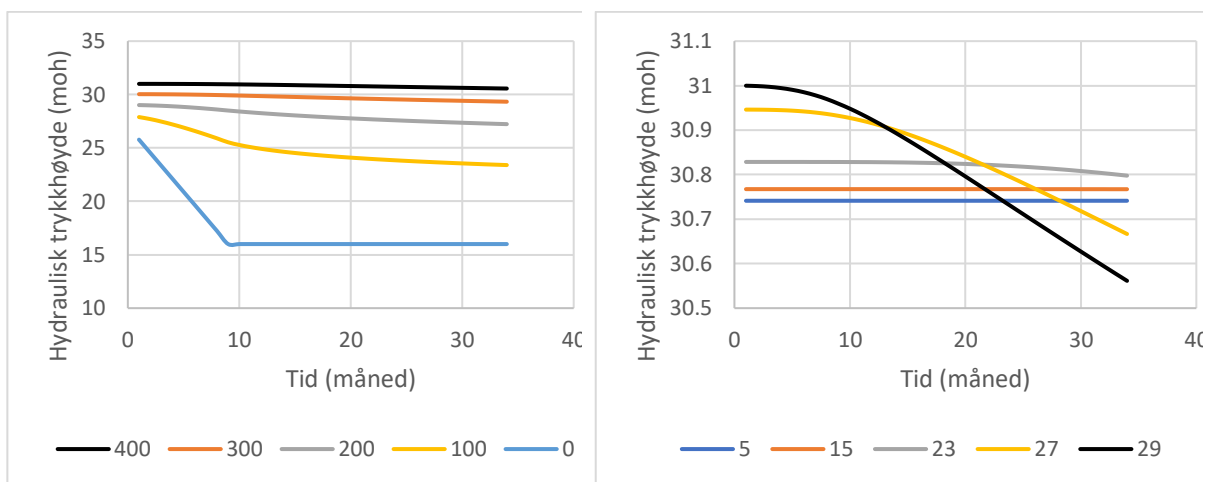
Hydrauliske trykkverdier fra observasjonspunktene plassert vertikalt (Z-retning) i profilet viser til en økende hydraulisk trykkhøydegradient med dybden (Figur 27). Leirelaget har lavere verdier enn de dypere lagene. Trykkhøyden i topplaget er noe høyere enn forventet, ettersom observasjoner tatt fra rapporten (Kap.3.3) viser til et grunnvannsspeil som er lokalisert rundt to meter under terrengoverflaten. Forholdene ved overflaten er forenklet ved at nedbøren ikke er definert og drenering i tørrskorpen og antropogene dreneringsruter ikke er definert. På bakgrunn av forenklingene og ettersom fokuset ligger på morenelaget er det vurdert til at dette er godt nok for videre modellering.



Figur 27 Grafen viser hydraulisk trykkverdier i forhold til dybden i profilet (Z retning) ved en distanse på 400 meter fra byggegropen.

6.1.2 Transient simulering

Resultatene fra simuleringen, hvor grunnvannsnivået i byggegropen (grensebetingelse høyre side) senkes til 16 moh., viser en reduksjon på 0.5 meter i området 400 meter unna byggegropen ved endt simulering (Figur 28A). Her blir det synlig at det er en rask senkning nære byggegropen i løpet av de første 9 månedene (hvor hydraulisk gradient øker lineært), og etter de ni månedene avtar senkningen. Figur 28B viser utviklingen i hydraulisk trykkehøyde i Z-retning ved en distanse på 400 meter. Denne viser at hydraulisk trykkehøyde ved dybde på 29 meter (morenelaget) får en respons noen måneder etter at senkningen har startet. Leiren som ligger over morenelaget, opp til 23 meter dybde, vil bli drenert og får en liten senkning. De øverste meterne viser ingen påvirkning, hvor dette er grunnet fordrøyningen i leiren.



Figur 28 A) Grafen viser utviklingen i hydraulisk trykkehøyde i morenelaget ved forskjellige distanser til byggegropen (X-retning). B) viser utviklingen i hydraulisk trykkehøyde ved forskjellige dybder (Z-retning) ved en distanse på 400 meter.

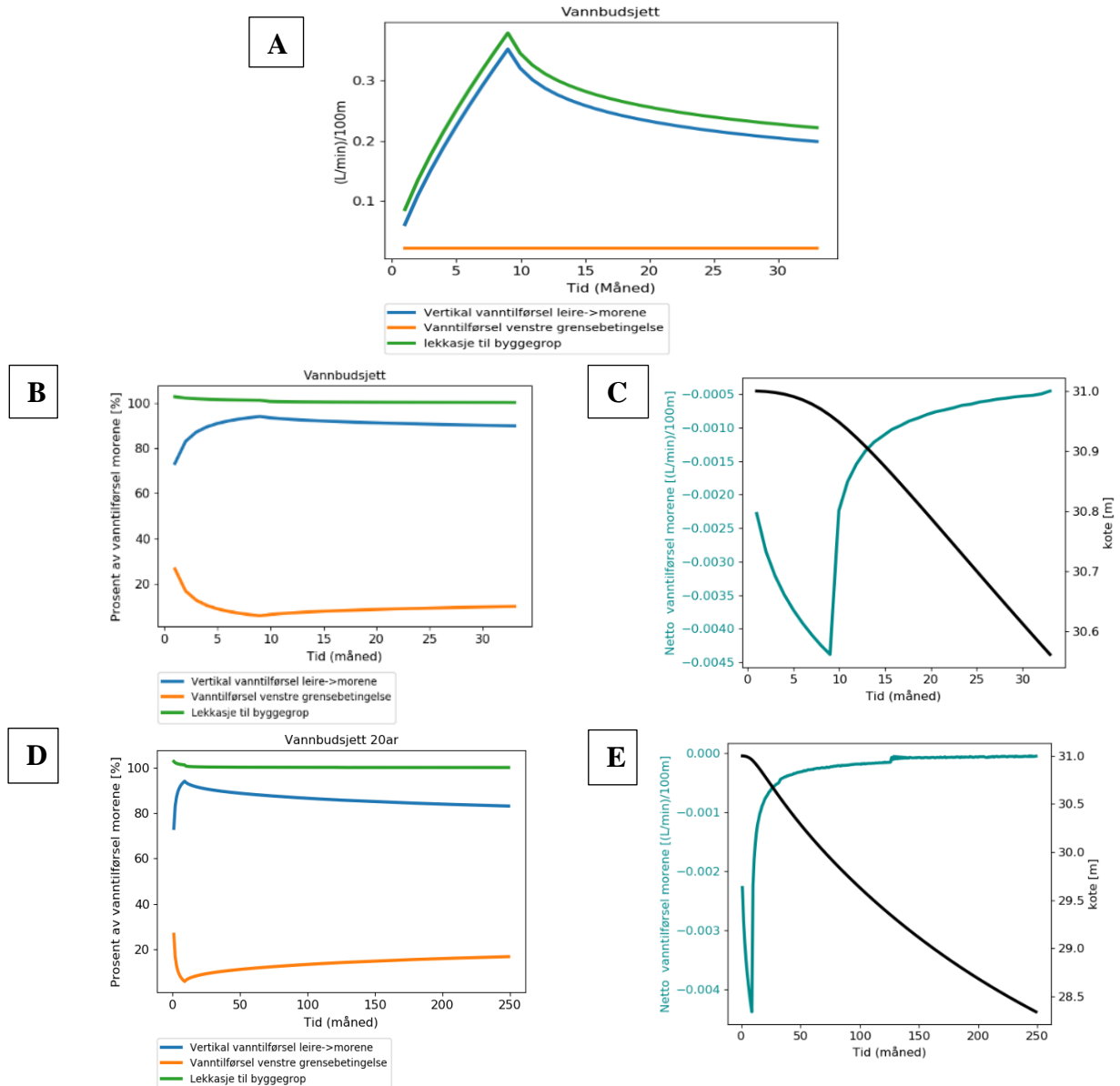
Vannbudsjettet under den transiente simuleringen viser en konstant vanntilførsel ved venstre grensebetingelse, noe som er forventet ettersom den er definert til å være konstant.

Vanntilførselen fra hele leirlaget som ligger rett over morenen øker samtidig med lekkasjen i byggegropen (Figur 29A). I Figur 29B blir prosentandelen av vanntilførselen fra hver grense presentert. Dette viser at vanntilførselen fra leirelaget utgjør en større andel enn vanntilførselen fra venstre grensebetingelse. Lekkasje til byggegropen er på 0.10 L/min/100 meter ved start og 0.35L/min/100 meter på det meste, hvor netto vanntilførsel ligger mellom 0.0025 til 0.0045 L/min/100 meter (Figur 29C). Netto vanntilførsel tilsvarer verdien (+/-) lagring i likning 5 (Kap. 2.2), som vil være faktoren som fører til transiente forhold sammen med skifte i strømningsretning. Dette vil si at selv om den beregnede drenasjen til byggegropen er liten, så vil den over tid ha en stor betydning for poretrykket. Vanninfiltrasjon som ble igangsatt ved Åssletta (infiltrasjonsbrønn X2) tilførte en vannmengde mellom 35 og

Resultater

10 L/min (0.35 til 0.10 L/min/100 meter) (Kap. 1.4). Dette er tilsvarende vannmengden som går ut i byggegropen fra modellen.

En simulering som går over 20 år og 9 måneder viser at modellen vil bruke lang tid på å stabilisere seg, ettersom det ikke oppsto en stasjonær tilstand i løpet av simuleringstid (Figur 29 D og E). En drenering av systemet vil dermed fortsette over lang tid hvis det ikke blir satt i gang noen tiltak. Vannbudsjettet viser at en drenering av leiren oppstår tidlig i dette scenarioet, og viser at systemet er relativt sensitivt på en drenering.



Figur 29 Graf A) viser vannbudsjettet for morenelaget. Hvor mye vanntilførsel det er fra leirelaget over, venstre grensebetingelse og lekkasje til byggegroppen. Graf B og D) viser hvor stor andel av vanntilførselen de forskjellige vannkildene utgjør over 34 måneder (B) og 250 måneder (D). Grafene C og E) viser netto vanntilførsel og forandringen i hydraulisk trykkehøyde i morenelaget 400 meter unna byggegroppen over to forskjellige tidsrom, C 34 måneder og E 250 måneder.

Resultater

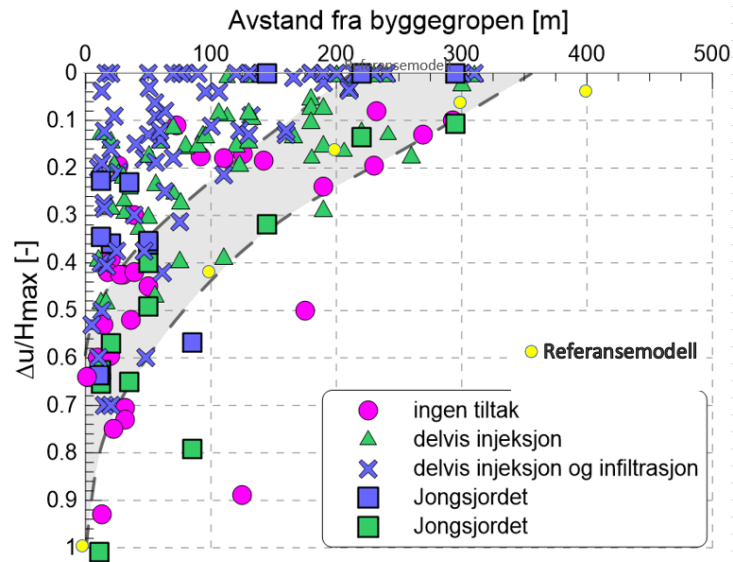
For å verifisere resultatene med måleresultatene fra Jong er beregnet reduksjon av hydraulisk trykkehøyde sammenstilt med noen målinger i Tabell 8 og i Figur 30. Beregningene er tatt ut fra siste tidsserie i transientanalysen og sammenlignet med målinger som er gjennomført før infiltrasjonen ble igangsatt.

Resultatet fra simuleringen viser at hele modellens lengde er påvirket av grunnvannssenkningen, men størrelsesorden på reduksjonen er lavere enn målinger fra Jong (Tabell 8). Slik som det er beskrevet i kapittel 1.4 ble det observert senkninger ved Åssletta etter ca. 12 måneder, og verdiene som er brukt i sammenligningen er målinger tatt ca. 18 måneder etter etablering av byggegropen. Dette viser til en raskere utvikling enn i beregningsmodellen. Sammenligningen med erfaringstabellen fra «Begrens skade» prosjektet viser at dette scenarioet ligger i det øvre siktet som er betegnet som et «Worst case scenario». De normaliserte verdiene fra modellen samsvarer veldig bra med erfaringene fra Jong hvor det var brukt delvis injeksjon (grønne firkanter, Figur 30). De rosa symbolene viser tilfeller ved ingen tiltak, og ligner mer på målt reduksjon fra Jong, listet i Tabell 8. Erfaringer på Jong (Figur 30) viser tilfeller hvor det har vært større og lavere senkninger enn den beregnede senkningen. Ettersom beregningene viser lavere senkninger enn observasjonene blir andre scenarioer testet i Kap. 6.3, for å se hvordan modellen vil reagere på andre grensebetingelser og parametere.

Tabell 8 Reduksjon i hydraulisk trykkehøyde som er målt og simulert er vist i tabellen ved en distanse på 400 meter fra byggegropen og 100 meter fra byggegropen.

Distanse fra byggegropen	Målte verdier, Jong	Verdier fra simuleringen
	Reduksjon	Reduksjon
(m)	(m)	(m)
400	3	0.5
100	10	4.6

Resultater

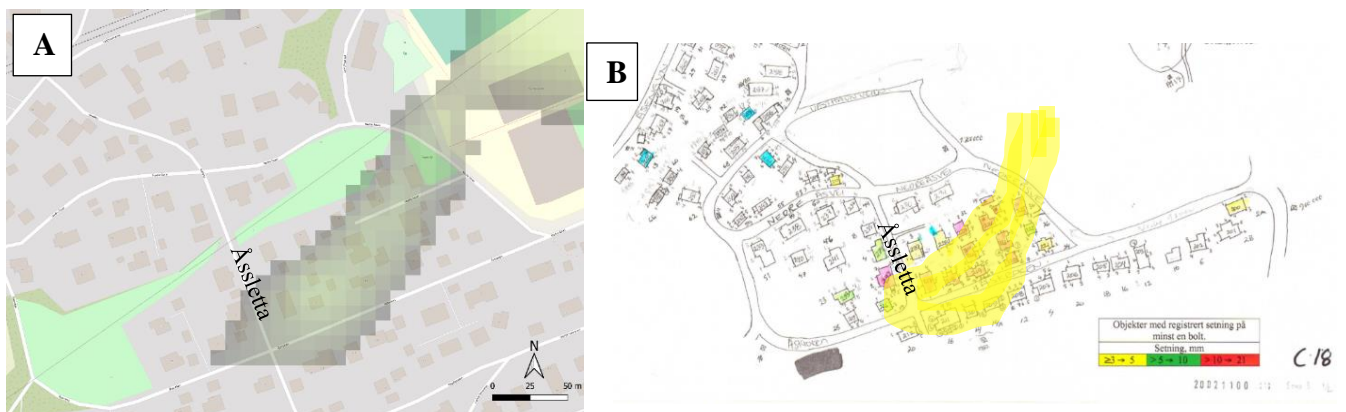


Figur 30 Resultatene fra simuleringen (gule sirkler) plassert i erfaringsgraf fra "Begrens skade" prosjektet, hvor reduksjonen (Δu er poretrykksreduksjon ved berg i meter stighøyde) er normalisert på maks dybde i byggegruppen.

(Modifisert etter Baardvik et al. (2016)).

6.2 SETNINGSBEREGNING

Kartleggingen av morenelaget viser til et definert område der en drenering vil opptre raskere enn i området rundt (Figur 31A). Kartleggingen av observerte setninger viser at det er husene lokalisert på samme området som har fått de største setningene (Figur 31B). Husene som er ved morenelagets ytterkant har enten lavere setningsutvikling eller ingen, hvor det også vil være tynnere avsetninger som vil forårsake mindre setningsutvikling.

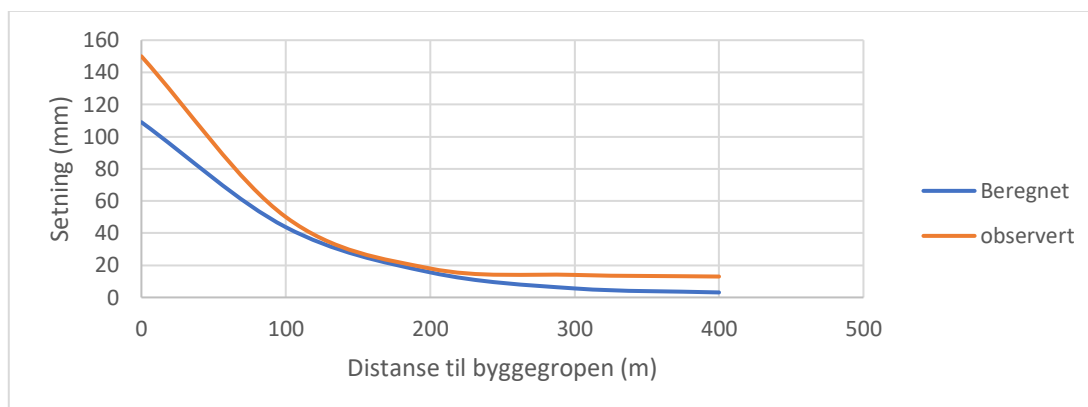


Figur 31 A) viser hvor morenelaget ligger ved Åssletta, B) viser hvilke bygg det er observert setninger i forskjellige størrelser (Modifisert etter Klevland (2005)).

En enkel beregning av setninger som kan oppstå på grunn av forandringen i hydraulisk trykkhøyde fra simuleringen er vist i Figur 32. Beregningen viser til en setning på 3 mm, 400 meter unna byggegruppen. Dette er samme distanse som Åssletta har til byggegruppen hvor det

Resultater

ble målt setninger opp til 14 mm setning. Nærmere byggegropen var det målt setninger opp til 150 mm mens beregningene viser til en setning på 109 mm. Denne beregningen er utført på et leirelag som er 28 meter tykt. De beregnede setningene er i dette tilfellet ikke konservative.



Figur 32 Beregnet setningsutviklingen basert på reduksjoner fra simulering i forhold til distanse til byggegropen (blå graf), og observerte setninger som er gjort på Jong er vist ved oransje graf (Modifisert etter Braaten et al. (2004)).

I en risikoanalyse basert på senkningen fra simuleringen vil område ved Åssletta havne mellom D0-negliskjerbar til D2-slightly. I denne vurderingen er ikke geometrien og sårbarheten til byggene tatt med, noe som kan føre til en annen klassifisering. Basert på målingene fra Jong (Kap.1.4) vil det kunne oppstå skader tilsvarende risikonivå D3. Ved en minkende distanse til byggegropen i modellen vil risikoen for skade på infrastruktur basert på modelleringen øke og kan komme opp i D4/D5. Denne risikogruppen ble også definert ved boligfeltet rett ved byggegropen i risikoanalysen fra Piciullo et al. (2020).

6.3 SENSITIVITETSSTUDIE

I dette kapittelet vil det bli sett på modellens sensitivitet på forandringer av definert hydraulisk konduktivitet, morenetykkelse og magasinkoeffisient. Resultatene vil bli vurdert i forhold til målte verdier fra Jong og resultatene fra referansemodellen (som er resultatene fra tidligere modell fra Kap. 6.1). Data som blir brukt for å sammenligne er hydraulisk trykkehøyde, og ikke setninger. Dette er et bevist valg ettersom beregnet setning er direkte linket med senkning i hydraulisk trykkehøyde, hvor hydraulisk trykkehøyde vil være beskrivende for situasjonsforløpet.

6.3.1 Hydraulisk konduktivitet

Hydraulisk konduktivitet er en parameter som kan variere lokalt, og på Jong ble det observert områder hvor det var et grusig lag som muligens brer seg ut mot måler G47(Kap. 3.2). En forandring av hydraulisk konduktivitet i modellen vil påvirke grensebetingelsen ved modellens venstre side. Denne grensebetingelsen definerer en vanntilførsel som går direkte inn til morenelaget. En høyere konduktivitet vil føre til at modellen trenger en større vanntilførsel for å oppnå stasjonær tilstand. Forholdet mellom disse er beskrevet i Tabell 9, hvor bidragsgivende nedbørsfelt og andel av avrenning er basert på avrenningen fra NVE (2019).

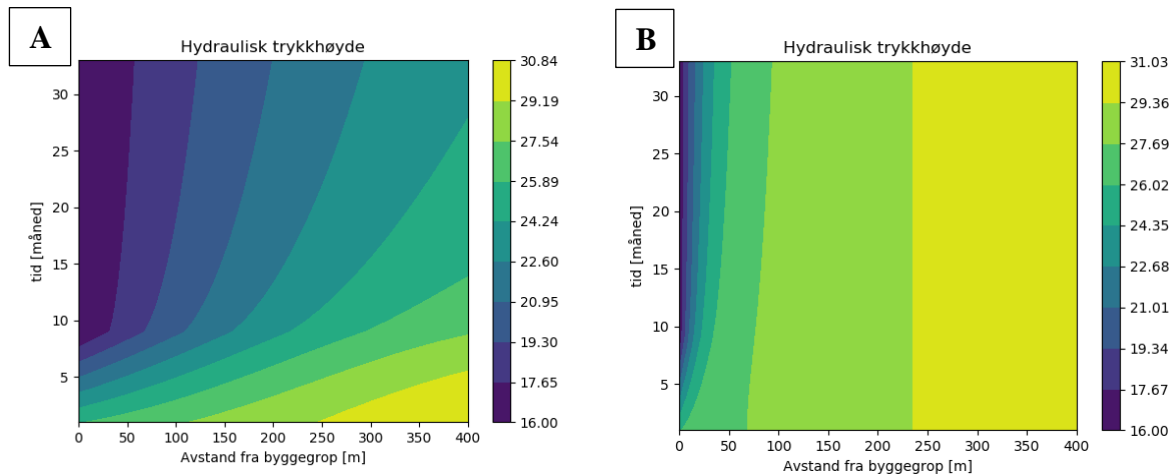
Tabell 9 Viser definert vanntilførsel ved modellens vestre grensebetingelse. Forholdet mellom vanntilførselen og avrenningen fra NVE (2019) er oppgitt som andel av avrenning og bidragsgivende nedbørsfeltet. Maks lekkasjen inn i byggegropen for hvert scenario under transient analysen er oppgitt i L/min/100 meter. Grå kolonne er verdi fra referansemodellen.

Konduktivitet	Vanntilførsel til morenelag	Andel av avrenning	Bidragsgivende nedbørsfelt	Maks lekkasje ut i byggegropen
(m/s)	(L/min per 100 meter)	(%)	(m ²)	(L/min per 100 meter)
2.00E-06	0.25	106.5	10.63	1.3
6.00E-07	0.07	32.12	3.21	0.7
1.80E-07	0.02	9.8	0.98	0.4
6.00E-08	0.01	3.43	0.34	0.2
1.00E-08	0.002	0.77	0.08	0.1

Utfallet fra simuleringene, hvor hydraulisk konduktivitet og vanntilførsel ved morenelagets venstre grensebetingelse er forandret, viser store variasjoner på senkningen av hydraulisk trykkehøyde. Resultatene fra to scenarioer er vist i Figur 33, og vil bli diskutert videre. Høy konduktivitet leder til en hurtig og stor senkning hvor hele profilet er påvirket etter ca. 5 måned (Figur 33A). En konduktivitet på 1E-8 viser at dreneringen av morenelaget vil påvirke

Resultater

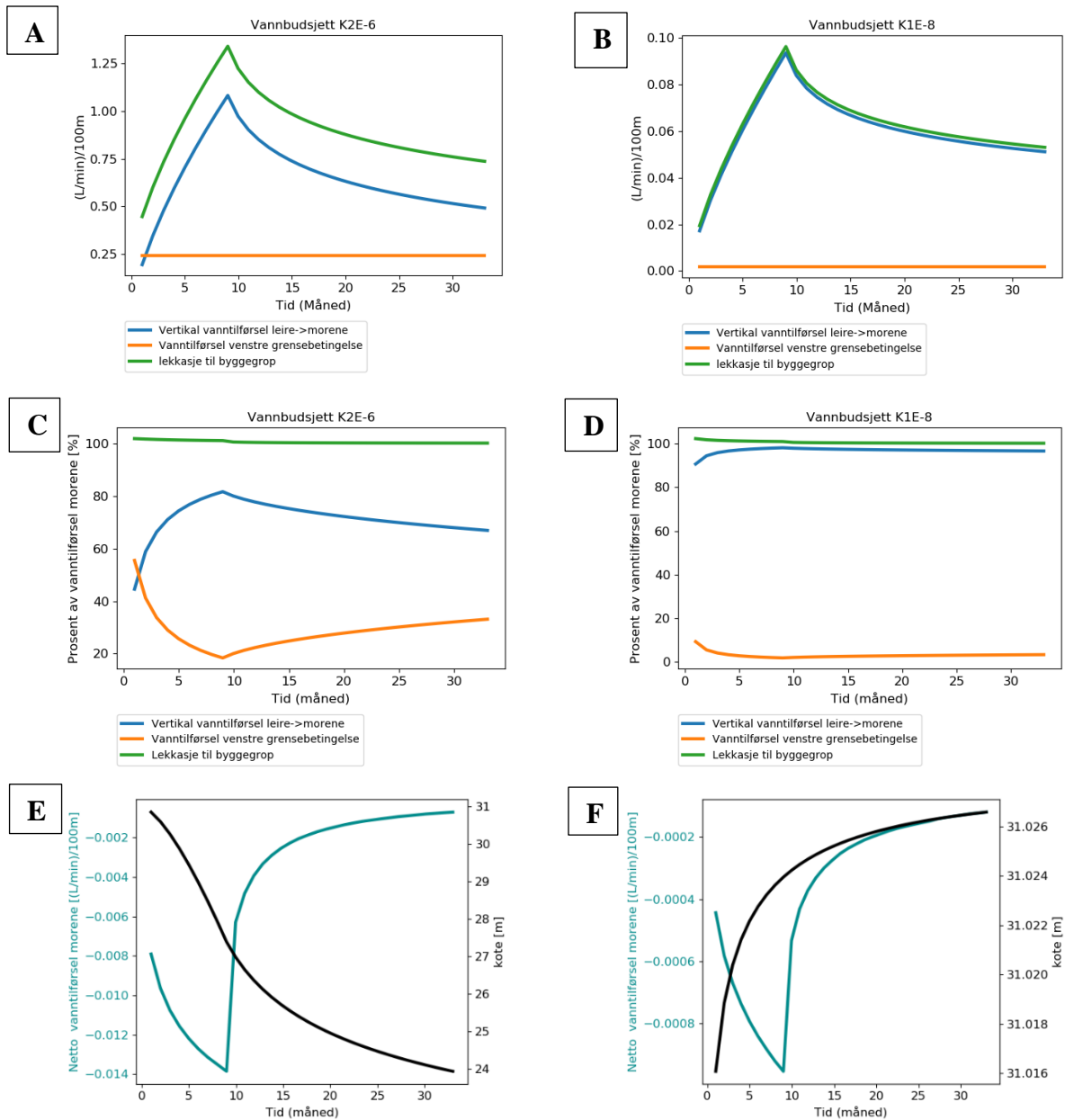
et område på ca. 100 til 150 meter unna byggegropen ved endt simulering (Figur 33B). En simulering med en konduktivitet tilnærmet en avsetning som sand ($1E-5$ m/s) førte til en veldig hurtig senkning i hele morenelaget. En senkning opp mot 11 meter oppsto rett etter at grunnvannssenkningen skjedde, noe som er maks senkning (vedlegg D).



Figur 33 Diagram som viser hydraulisk trykkehøyde i forhold til tid og avstand til byggegropen i morenelaget. Diagram A viser beregnet resultat fra scenarioet med hydraulisk konduktivitet definert som $2E-6$ m/s, og diagram B viser resultatene fra scenarioet med hydraulisk konduktivitet definert som $1E-8$ m/s. (laget i Flopy)

En analyse av vannbudsjettet i morenelaget fra simuleringen med hydraulisk konduktivitet satt til $2E-6$ m/s og $1E-8$ m/s viser store forskjeller i utviklingen under en drenering (Figur 34). En hydraulisk konduktivitet satt til $2E-6$ m/s fører til en lekkasje i byggegropen opp mot 1.4 L/min/100 meter (Figur 34A), noe som begynner å ligne på erfaringstall fra tidligere tunnelprosjekt (Kap. 4.1). Den definerte vanntilførsel ved venstre grensebetingelse er større, noe som leder til at vertikal vanntilførsel fra leiren utgjør en mindre andel av den totale vanntilførselen enn ved en lavere kondukt (Figur 34C). Den negative netto vanntilførsel øker med høyere konduktivitet og fører til at området 400 meter unna byggegropen viser en hurtig respons med en stor reduksjon (Figur 34E). Scenarioet med en hydraulisk konduktivitet på $1E-8$ m/s har en vanntilførsel fra leirelaget som utgjør en stor prosentandel av vanntilførselen (Figur 34D). Dette fører til en liten økning i hydraulisk trykkehøyde i løpet av simuleringstiden. Lekkasje ut i byggegropen er opp til 0.10 L/min/100 meter (Figur 34B). Netto vanntilførselen i begge scenarioene er negativ, men størrelsesorden er små (Figur 34E og F). Dette tyder på at akviferen i morenelaget er sensitivt og vil reagere på en liten drenering, noe som er forventet grunnet lav spesifikk lagring i morenen.

Resultater



Figur 34 Venstre kolonne viser vannbudsjettet fra scenarioet med hydraulisk konduktivitet i morenen 2E-6 m/s. Høyre kolonne viser tilfellet med en hydraulisk konduktivitet i morenelaget satt til 1E-8 m/s. Graf A og B) viser vanntilførsel fra venstre grensebetingelse, vertikal vanntilførsel fra leirelaget og lekkasje i byggegroppen, Graf C og D) viser prosentandelen disse vanntilførselene utgjør av total vanntilførsel, Graf E og F) viser netto vanntilførsel sammen med reduksjonen i hydraulisk trykkehøyde i området 400 meter unna byggegroppen.

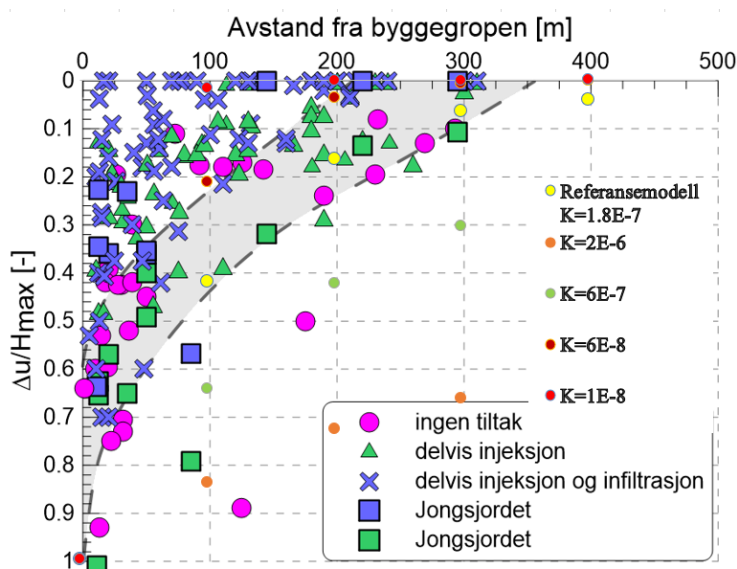
Sammenligningen med målte data fra Jong er gjort i Tabell 10 og Figur 35. Tabell 10 viser beregnet senkning ved en distanse på 400 og 100 meter bort fra byggegroppen ved forskjellig hydraulisk konduktivitet sammen med målt senkning fra Jong. Resultatene viser en stor spredning mellom de modellerte scenarioene, hvor differansen ved en distanse på 400 meter er på 7 meter og ved distansen på 100 meter er det 9 meter. Spredningen illustreres godt i sammenligningen med erfaringstabellen (Figur 35). Sammenligningen i erfaringstabellen

Resultater

viser at konduktivitet er en parameter som bidrar til en stor usikkerhet i modellen og kan føre til varierende forhold på Jong.

Tabell 10 Målte reduksjoner av hydraulisk trykkehøyde fra Jong og reduksjoner ved forskjellige scenarioer med variert hydraulisk konduktivitet. Konduktivitetsverdier er oppgitt i m/s.

Distanse fra byggegropen (m)	Målt reduksjon (m)	Beregnet reduksjon ved forskjellig K (m)			
		K=2E-6	K=6E-7	K= 6E-8	K= 1E-8
400	3	7	2.9	0.01	-0.02
100	10	9.2	7.1	2.3	0.2



Figur 35 Resultatene fra beregningene plottet sammen med erfaringsdata fra "Begrens skade prosjektet" (Modifisert etter Baardvik et al. (2016))

6.3.2 Tykkelsen på morenelaget

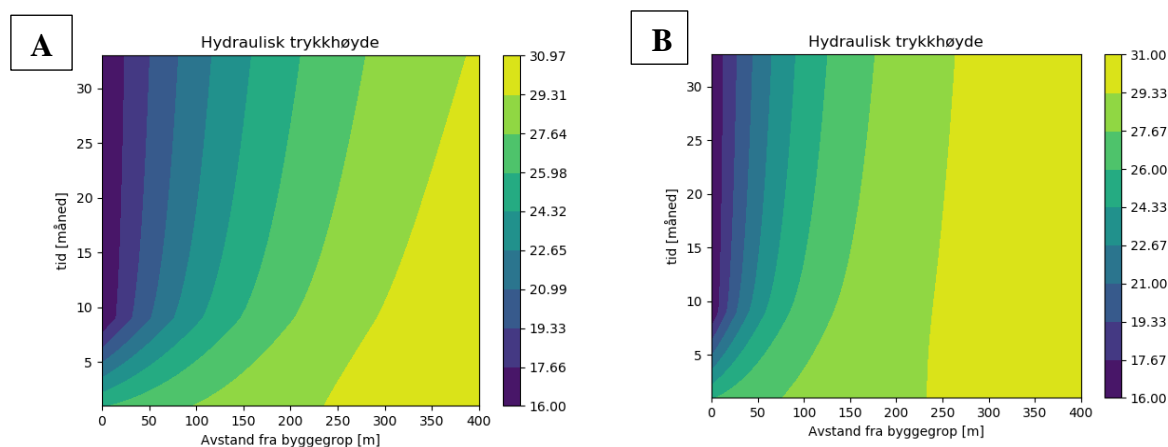
Geometrien til modelleringsområdet er blitt forenklet i modellen. Morenelaget er definert til 2 meter hele veien og er horisontalt. På Jong er det registrert variasjoner i lagtykkelsen, noe som fører til at dette er en modelleringsteknisk usikkerhet. Modellens sensitivitet på morenelagets tykkelse ble testet ved å variere med 1 og 4 meter. Strømningen som er nødvendig for å opprettholde hydraulisk trykkehøyde i systemet med de forskjellige tykkelsene er listet i Tabell 11. Vanntilførselen øker med økende tykkelse, hvor tilsvarende nedbørsfelt også øker. Vanntilførselen til morenelaget utgjør fremdeles en liten prosent av avrenningen, hvor bidragsgivende nedbørsfelt er små.

Resultater

Tabell 11 Nye verdier som er definert ved venstre grensebetingelse under de forskjellige scenarioene, hvor mange prosent dette utgjør av gjennomsnittlig avrenning fra NVE (2019) og beregnet bidragsgivende nedbørsfelt er oppgitt, sammen med maks lekkasjen som går ut i byggegropen under transient analysen. Verdiene fra referansemodellen er satt i grått felt.

Morenetykkelse	Vanntilførsel til morenelag	Andel av avrenning	Bidragsgivende nedbørsfelt	Maks lekkasje inn i byggegropen
(m)	(L/min per 100 meter)	(%)	(m ²)	(L/min per 100 meter)
1	0.01	5.1	0.51	0.26
2	0.02	9.8	0.98	0.4
4	0.05	19.32	1.93	0.53

Utviklingen i hydraulisk trykkehøyde i morenelaget viser en stor forskjell på påvirkningsradiusen etter endt simulering (Figur 36). Scenarioet med et morenelag på 4 meter viser en påvirkning på hele modellen (Figur 36A), mens modellen med et morenelag på 1 meter påvirker et område opp til 250 meter i løpet av simuleringen (Figur 36B).

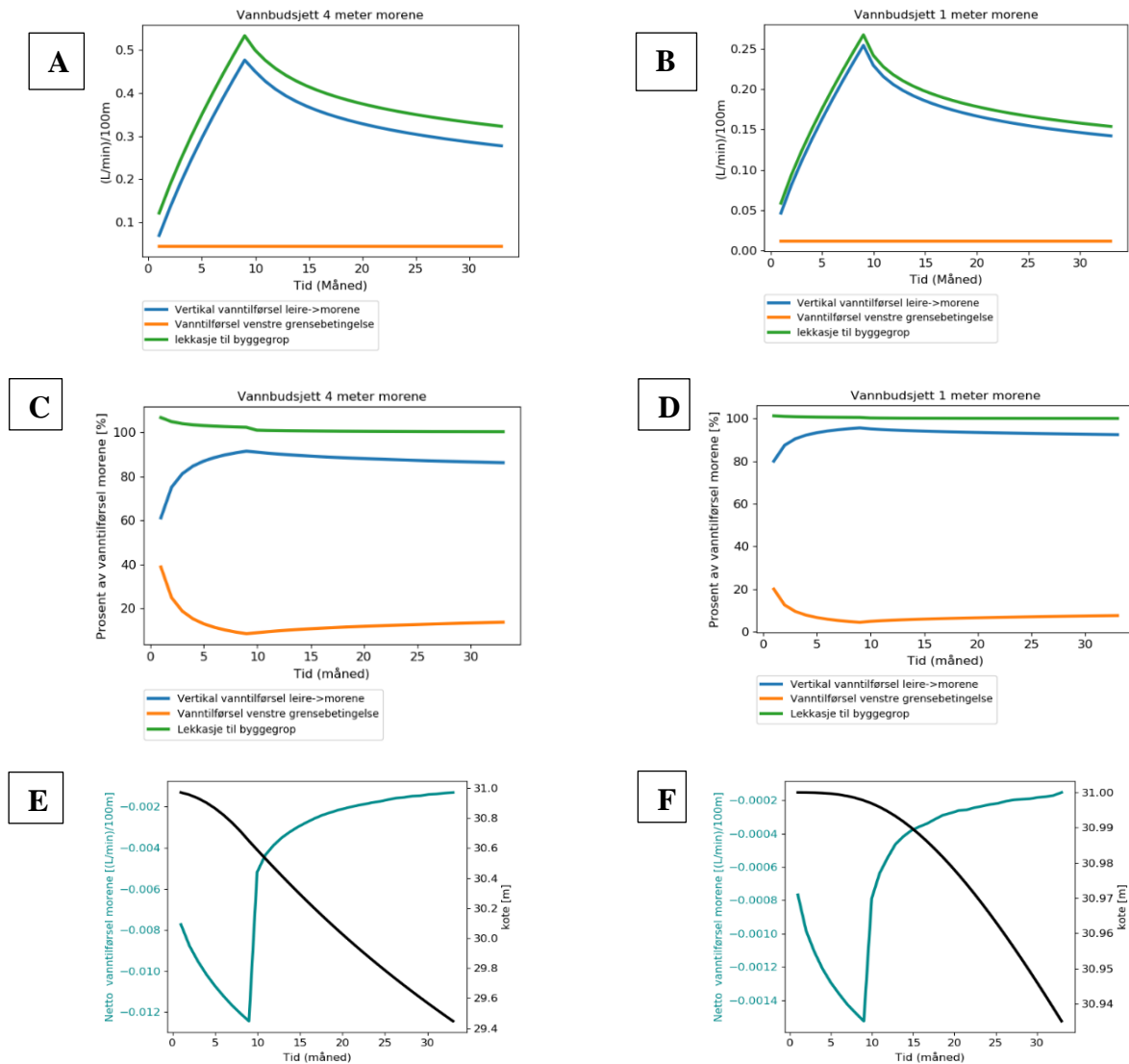


Figur 36 Utviklingen i hydraulisk trykkehøyde over tid og distanse til byggegropen. Diagram A viser resultatene fra scenarioet med 4 meter morenelag, og diagram B viser resultater fra scenarioet med 1 meter morene.

Vannbudsjetten til morenelaget ved de to scenarioene med 1 og 4 meter morene viser at et lag med 4 meter tykkelse vil ha høyere volumetrisk vanngjennomstrømning enn med 1 meter, noe som er forventet ettersom arealet av morenelagets tverrsnitt påvirker volumetrisk vannstrømning (Figur 37 A og B). I denne modellen hvor vannlekkasjen i byggegropen er styrt av en reduksjon av grunnvannsspeilet i byggegropen, definert i hele morenelagets bredde, fører til et dobbelt så stort volum vann som strømmer ut i byggegropen med 4 meter enn scenarioet med 1 meter morene. Forholdet mellom hvor stor prosentandel vanntilførselen fra leiren utgjør er litt forskjellig. Ved 1 meter morene vil vanntilførselen fra leiren utgjøre en større andel av vanntilførselen enn ved et 4 meter tykkelse (Figur 37C og D). Dette fører til at

Resultater

netto vanntilførsel er mindre ved 1 meter morenetykkelse og en saktere respons på dreneringen (Figur 37 E og F).



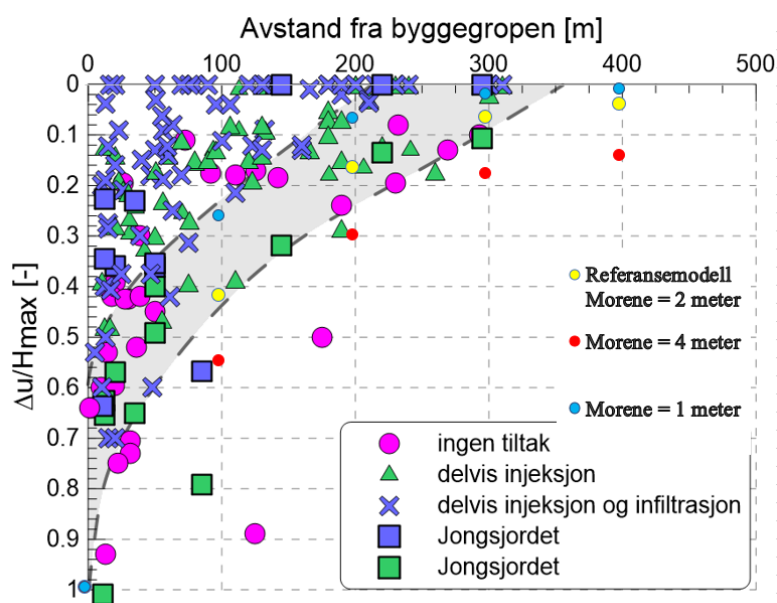
Figur 37 Grafene i venstre kolonne viser vannbudsjetten i morenelaget ved en morenetykkelse på 4 meter. Diagrammene til høyre viser vannbudsjetten i morenen ved en morenetykkelse på 1 meter. Graf A og B viser vannbudsjetten i morenelaget. Graf C og D viser hvor stor prosentandel av total vanntilførsel de forskjellige utgjør og grafen E og F viser netto vanntilførsel og senkningen av hydraulisk trykkehøyde i området 400 meter unna byggegroppen.

En sammenstilling av hydraulisk trykkehøyde verdier fra simuleringene og målte verdier fra Jong ved en distanse på 400 meter og 100 meter fra byggegroppen er vist i Tabell 12, hvor beregningene fra begge scenarioene viser en lavere reduksjon enn de målte verdiene. Denne modelltekniske usikkerheten vil skape en modellusikkerhet som kan føre til store modelleringsusikkerheter med kombinasjon med andre forenklinger og antagelser som er gjort i modellen. En sammenligning med erfaringstabellen fra «Begrens skade» prosjektet viser en liten spredning i resultatene, men ingen av resultatene innenfor utprøvd intervall har veldig store avvik fra verdiene fra Jong (Figur 38).

Resultater

Tabell 12 Målte reduksjon fra Jong oppført sammen med beregnet reduksjon fra simuleringen ved to forskjellige distanser til byggegroppen.

Distanse fra byggegropp (m)	Målt reduksjon (m)	Beregnet reduksjon (m) ved forskjellig morenetykkelse	
		1 m	4 m
400	3	0.0	1.5
100	10	3.1	6



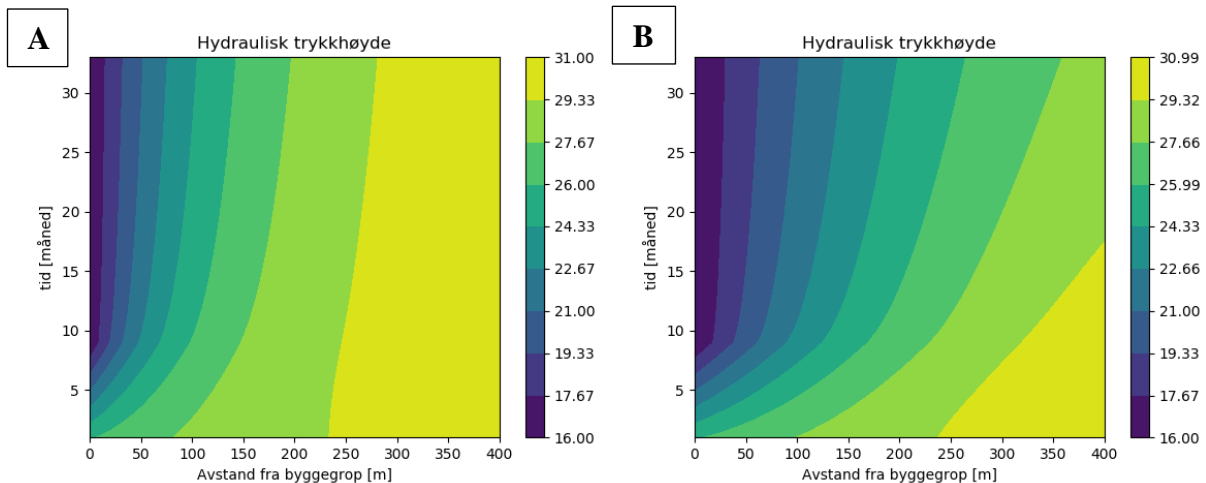
Figur 38 Resultater fra beregnet reduksjon i hydraulisk trykkehøyde ved forskjellige tykkelser på morenelaget sammen med erfaringsdata fra Baardvik et al. (2016).

6.3.3 Magasinkoeffisient (spesifikk lagring)

Magasinkoeffisienten er en parameter som ikke har noen påvirkning på simuleringen ved stasjonære forhold, men vil påvirke transiente scenarier. Dette fører til lik vanntilførsel ved venstre grensebetingelse. Modflow-2005 beregner magasinkoeffisienten basert på spesifikk lagring, som vil være den parameteren som blir testet videre her. Det ble simulert noen tilfeller hvor spesifikk lagring ble redusert i morenelaget og scenarier der den ble forandret i leiren. En senkning av spesifikk lagring i morenen gjorde ikke store utslag, men hvis dette laget ikke hadde blitt definert som en luket akvifer og spesifikk lagring hadde en høyere verdi ville påvirkningsradiusen blitt lavere. En lav magasinkoeffisient vil lede til en hurtigere drenering av morenen og den overliggende leiren (Vedlegg D - Simuleringsresultat).

Resultater

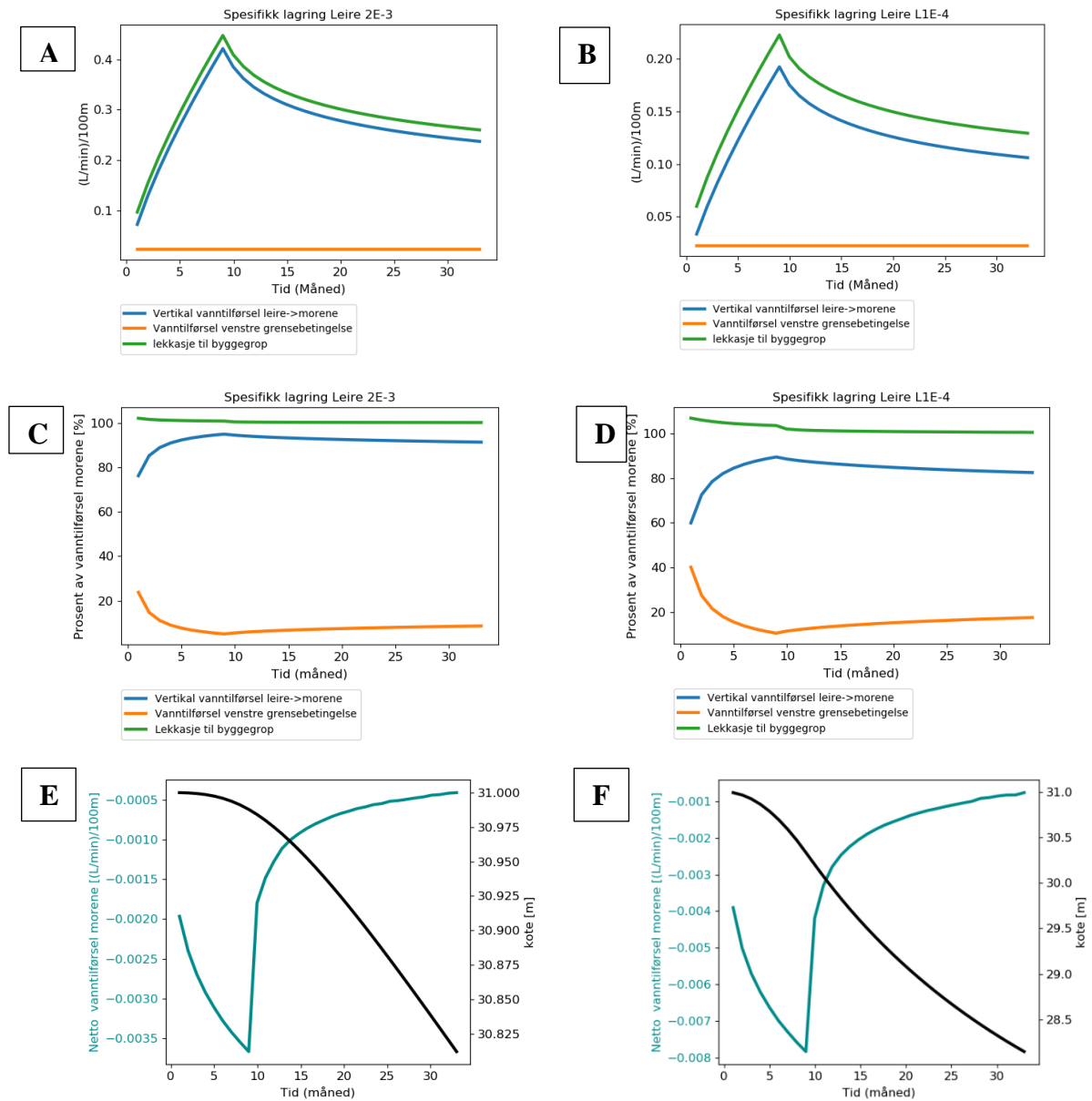
En forandring av spesifikk lagring i leiren førte til en større forskjell (Figur 39). En høyere spesifikk lagring vil kunne gi resultater hvor det ikke viser noe reduksjon ved en distanse på 300 til 400 meter ved endt simulering (Figur 39A). En lavere spesifikk lagring i leiren viser en påvirkning på hele modellen etter halve simulerings tiden, og i løpet av hele simuleringen har det oppstått en senkning i hydraulisk trykkehøyde på 2.8 meter ved en distanse på 400 meter fra byggegropen (Figur 39B).



Figur 39 A) viser utviklingen til hydraulisk trykkehøyde i morenelaget ved en spesifikk lagring i leiren på 2E-3. B) viser utviklingen i hydraulisk trykkehøyde i morenelaget ved en spesifikk lagring i leiren på 1E-4. Begge diagrammene viser utviklingen i hydraulisk trykkehøyde i forhold til tid og distanse til byggegropen.

En økning av denne parameteren vil føre til en større vanntilførsel fra leirelaget og utgjør en prosentandel opp mot 95% av vanntilførselen (Figur 40A og C). lekkasjen ut i byggegropen er opp mot 0.45 L/min/100 meter og netto vanntilførsel er rundt -0.003 L/min/100meter (Figur 30E). En lavere spesifikk lagring i leiren resulterer i at vannmengden fra leirelaget er mindre, opp mot 0.19 L/min/100 meter som utgjør ca. 90 % av vanntilførselen (Figur 40B). Noe som har vist seg å utgjøre en stor prosentandel av vanntilførselen til morenelaget. Netto vanntilførsel øker og fører til en raskere senkning i morenen enn ved en høyere spesifikk lagring. Dette viser at i en modell hvor det er en liten vanntilførsel i morenen vil akviferens respons bli noe påvirket av hvor mye vann det overliggende laget vil avgi ved en kompresjon.

Resultater



Figur 40 Grafene i venstre kolonne viser vannbudsjettet i morenelaget hvor spesifikk lagring i leiren er 2E-3, og grafene til høyre viser vannbudsjettet hvor spesifikk lagring i leiren er 1E-4. Graf A og B viser vannbudsjette i morenelaget. Graf B og C viser hvor stor prosentandel av total vanntilførsel de forskjellige utgjør og grafen E og F viser netto vanntilførsel og senkningen av hydraulisk trykkehøyde i området 400 meter unna byggegropen.

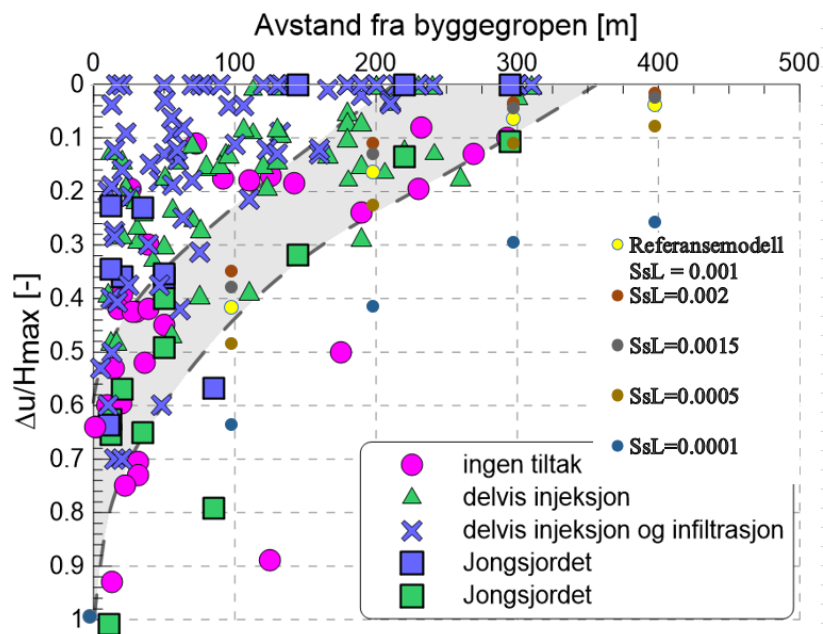
Reduksjonen i hydraulisk trykkehøyde ved en distanse på 400 meter til byggegropen viser ikke store variasjoner (Tabell 13). Nærmere byggegropen er det litt større spredning i resultatene. Sammenligning med erfaringstabellen fra «Begrens skade» viser noe spredning i resultatene fra scenarioene med valgte verdier. Scenarioet med lavest spesifikk lagring i leiren viser størst avvik ved en distanse på 400 meter. Denne verdien er litt utenfor antatte verdier for leiren, og illustrerer at det er et skille mellom S_{sL} 0.0005 og 0.0001 hvor dreneringen vil skje ganske mye raskere.

Resultater

Tabell 13 Viser beregnet reduksjon fra forskjellige senarioer der spesifikk lagring i leiren ble forandret. Resultater fra en distanse på 400 meter og 100 meter fra byggegropen er oppgitt. Reduksjonen som ble målt ved Jong er også plottet ved samme distanser.

Beregnet reduksjon (m) ved forskjellig spesifikk lagring i leiren (S_{sL})

Distanse fra byggegrop (m)	Målt reduksjon (m)	$S_{sL}=0.0001$	$S_{sL}=0.0005$	$S_{sL}=0.0015$	$S_{sL}=0.002$
400	3	2.8	0.9	0.3	0.2
100	10	7.0	5.3	4.2	3.9



Figur 41 Beregnet senkning ved forskjellige senarioer hvor spesifikk lagring i leiren er forandret. Senkningen er normalisert med maks dybden til byggegropen. Resultatene er plottet sammen med erfaringstabellen fra Begrenskade (Baardvik et al., 2016).

7 DISKUSJON

I dette kapittelet vil det bli diskutert hvor relevant det vil være å utføre en forenklet grunnvannmodell i planleggingsfasen til prosjekter hvor det skal utføres omfattende grunnarbeid. Det vil bli diskutert hvor kompleks modellen bør være for å få en prediksjon som er presis nok, og hvilke parametere som vil føre til store usikkerheter i modellen. Det vil bli sett på hvilke data en slik enkel modellering vil gi og om en slik modellering vil lønne seg i forhold til tidsbruk og ressurser. I denne oppgaven er det brukt flere programmer, og nytteverdien av disse programmene vil bli vurdert.

7.1 BEREGNINGSMODELLENS KOMPLEKSITET

Teknologi og numerisk regnekapasitet har hatt en stor utvikling i løpet av de siste årene. Dette har åpnet opp for å etablere komplekse regionale grunnvannsmodeller. Komplekse modeller kan by på mange muligheter, men nytteverdien av en kompleks modell vil i stor grad avhenge av tilgjengelig informasjon om modelleringsområdet. Ved å definere et minimumskrav og en øvre grense for kompleksiteten som har noen betydning vil denne prosessen bli lettere og mer presis. Tidligere erfaringer fra feltet viser til at en for kompleks modell kan gi en høy grad av upresise prediksjoner, noe også en for enkel modell kan gi (Zhou & Li, 2010).

Under modelleringsprosessen av Jongsjordet ble det vurdert hvor kompleks modellen skulle være. I starten ble det vurdert om det skulle etableres en 3D-modell for et større område. Det ble satt opp forskjellige modeller for å teste systemet, med forskjellige dreneringspunkter, helningsgrader, 2D snitt og 3D snitt. Underveis ble det synlig at det var mange potensielle feilkilder. En fullskala 3D-modell ble vurdert som uegnet som startpunkt ettersom den ville føre til store usikker rundt det modelleringstekniske.

En modelleringsprosess kan utvikle seg forskjellig for hver person og tilfelle (Danielsson, 2019). De forenklingene som blir gjort og hva som er sett på som viktige parametere og grensebetingelser er avgjørelser som vil bli tatt av hver enkelt person basert på egne erfaringer, oppfatning og formål. For denne modelleringen ble det valgt å gjøre store forenklinger for å kunne studere utvalgte parametere og grensebetingelser nærmere, og for å se hvor enkel modellen kan være før resultatene ikke samsvare med virkeligheten lengre.

I en modell med mange usikkerheter rundt antagelser og grensebetingelser vil det være mange scenarioer som kan lede til relativt like resultater (Anderson et al., 2015), men vil også føre til en stor spredning i resultatene. I grunnvannsmodellen kan de ukjente faktorene forandres hver

for seg frem til det ønskede resultatet oppstår. For eksempel hadde senarioet med en konduktivitet på $6E-7$ m/s en reduksjon 400 meter unna byggegroppen som samsvarte med poretrykksreduksjonen fra Jong (Tabell 10). Den samme reduksjonen kan også oppnås ved å forandre på kombinasjonen av andre parametere og antagelser. I virkeligheten kan det være at kombinasjonen med de antatte grensebetingelsene og parameterne er feil, selv om resultatet blir riktig. Derfor ble ikke kalibrering av modellen opp imot målt poretrykksreduksjon prioritert. Det ble i stedet lagt vekt på en sensitivtetsstudie. Feilkildene i referansemodellen vil bli diskutert videre i 7.2 og usikkerhetenes betydning på analysen vil bli vurdert.

7.2 MODELLUSIKKERHETER OG KVANTIFISERING AV USIKKERHETENS BETYDNING

Modellen er basert på grunnundersøkelser som har kartlagt lagtykkelser, grunnvannsstrømninger og type løsmasser. Disse grunnundersøkelsene har gitt et godt bilde på det som skulle kartlegges, men for å etablere en grunnvannsmodell er det noen mangler. Observerte mangler i grunnundersøkelsen gjelder primært morenelagets egenskaper. Modelleringsusikkerheter rundt forenklinger i grensebetingelser og lagdelingen ble også synlig under modelleringen. Spredningen i resultatene fra senarioer med forskjellige parametere innenfor realistiske verdier var stor.

7.2.1 Modelldesign

I denne modellen har variasjoner i litologien blitt forenklet. Berggrunnen og lagdelingen har blitt definert til å være horisontale, og tykkelsen på morenelaget er 2 meter over hele området i referansemodellen. Dette fører til en feilkilde i det modelltekniske. Resultatene fra simuleringene med varierende morenetykkelse viser som forventet at morenetykkelsen påvirker senkningen (Figur 36). Ved å sammenstille denne senkningen ved ulike morenetykkelser med erfaringstabellen fra Jong (Figur 38) ser man at senkningen havner innenfor forventningsområdet. Dette kan tyde på at en enkel 2D modell med horisontal lagdeling klarer å predikere utfallsrommet for senkningen.

Innhentet data fra grunnundersøkelsen gir et godt bilde på litologien som er på Jong. Ved aktivt bruk av Leapfrog Work under grunnundersøkelsen og modelleringsprosessen, kan feilkilden rundt lagdelingen og variasjoner i grunnfjellet reduseres. Det vil være vanskelig å fjerne feilkilden helt ettersom det vil være nødvendig med personlig tolkninger og korrigeringer for å etablere den geologiske modellen, men lokale variasjoner kan lettere bli tatt hensyn til (Seequent).

7.2.2 Hydraulisk gradient

Hydraulisk trykkverdier er basert på tidsbestemte verdier. I referansemodellen er det antatt at disse verdiene er stabile, men de vil i virkeligheten variere med årstider hvor nedbørsmengden varierer. I beskrivelsen av hydrogeologiske forhold (Kap.3.3) beskrives det at akviferen på Jong er regnvannsmatet. Dette vil påvirke målingene av hydraulisk trykkehøyde, etter hvilket tidspunkt målingene er gjort (gjelder manuelt avleste målepunkter).

Den initiale hydrauliske gradienten i denne oppgaven er basert på målinger tatt før byggeprosjektet ble satt i gang. Hydrauliske trykkverdier i morenelaget fulgte terrenget (+/- 1 meter). Terrenget fra Åssletta er nesten flatt, noe som førte til en veldig lav hydraulisk gradient. Gradienten lengre ned i strømningsretningen er noe høyere, og kan være styrende for hvor mye vann som drenerer ned i området lengre oppstrøms. En faktor som ikke er tatt med i vurderingen i denne oppgaven er påvirkningen fra grunnfjellet. Grunnfjellet har et sprekkesystem som kan mate morenelaget og kan føre til en høyere hydraulisk gradient fra området oppstrøms hvis vanntilførselen til sprekkeene skjer ved en høyere kote. Dette kan føre til en feilkilde i initiale startbetingelser rundt hydraulisk gradienten. Den gradienten som er valgt for referansemodellen er antatt til å være representerende for området på grunn av sammenligningen med verdier fra målingene (Figur 26). Dette vil være en generalisert verdi som kan variere lokalt og føre til andre strømningsmønstre i andre snitt fra områder på Jong.

Data fra poretrykksmålere gir et bra overblikk på vannstrømningen i morenelaget, hvor det er plassert målere spredt på Jong. Hvis det skal etableres en modell med høyere detaljnivå hvor det er ønskelig å få ut mer presise resultater rund lekkasjen ut i byggegropen kan det tenkes at flere målere må bli etablert for å få med lokale variasjoner i strømningsmønsteret. Eventuell vanntilførsel fra berggrunnen bør også vurderes.

7.2.3 Venstre grensebetingelse

I grunnvannsmodellen er vanntilførselen ved venstre grensebetingelse konstant. Dette er en grensebetingelse som tilsvarer prosentandelen av nedbøren som infiltrerer ned i morenen. Nedbør er en variabel som vil variere gjennom årstider, noe som ikke vil være kjent ved en fremtidsrettet modellering. Undersøkelsen av morenelagets vannbudsjett viste at vanntilførselen fra venstre grensebetingelse utgjorde en liten andel av total vanntilførsel til morenelaget (Figur 27), noe som fører til et sensitivt system med tanken på en drenering. Det var synlig at akviferen på Jong var regnvannsmatet og responderte på variasjoner i nedbøren. I rapporten fra Kleven og Hagen (2002) beskrives en lav nedbørsmengde den sommeren det var observert stor reduksjon. Dette underbygger antagelsen om at systemet på Jong er sensitivt for

små endringer i vanntilførsel. Dette kan ha forsterket størrelsesordenen på senkningen. Beregningsmodellen er også følsom for små endringer i netto vanntilførsel. Rojas et al. (2010) har brukt en multimodel tilnærming for å se hvordan forskjellige variasjoner i nedbøren og klimavariasjoner vil påvirke, og fant ut at resultatene ble mer realistisk hvor usikkerheten ble sett på i forhold til flere scenarier. En konstant vanntilførsel ved venstre grensebetingelse kan føre til en feilkilde hvor resultatet kan føre til en prediksjon som ikke vil være tidsbestemt til det året utbygningen skal skje. Med denne måten å definere vanntilførselen til morenelaget vil modellen fremdeles kunne gi et innblikk i hvordan et tilsvarende system vil kunne reagere i forhold til hvor stort område som potensielt kan påvirkes.

Nedbørsmengden i de ulike tilfellene som utgjør erfaringstabellen for poretrykksreduksjon i prosjekt «Begrens skade» er ukjent. Ved å redusere vanntilførselen ved venstre grensebetingelse kan effekten av en nedbørsfattig periode predikeres.

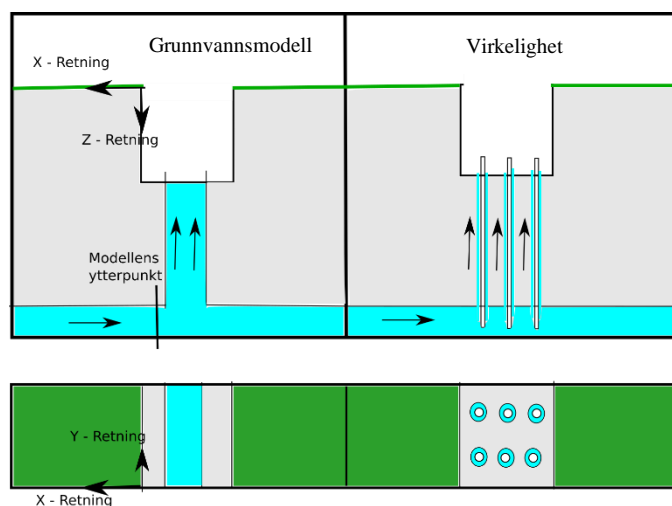
7.2.4 Høyre grensebetingelse

Dreneringen ut i byggegropen er definert med en bestemt trykkehøyde i hele morenelaget på høyre side av modellen som senkes lineært over ni måneder. Dette gir et varierende uttak som øker i løpet av denne perioden. Etter ønsket reduksjon minker uttaket av vann, for så å stabilisere seg. Lekkasjen vil i virkeligheten være bestemt av antall lekkasjepunkter, og hvor mye vann som har mulighet til å drenere gjennom disse punktene. Tidsrommet for grunnvannssenkningen og hvor lenge disse lekkasjepunktene er åpne vil også påvirke størrelsen på senkningen ved endt simulering. I Figur 31 er prinsippene for hvordan lekkasjen er definert i modellen og i virkeligheten. Defineringsmetoden i denne oppgaven kan føre til en overpredikering av lekkasjen ettersom det antas at hele arealet av morenelaget er en potensiell dreneringsvei. Ved å bruke denne måten å definere byggegropen vil morenetykkelsen påvirke dreneringen til en viss grad, noe som ikke trenger å ha samme påvirkning hvis dreneringsmengden er begrenset av lekkasjepunktene. Resultatene fra modellen viser til en lavere lekkasje enn erfaringstall, noe som er litt rart med tanken på hvordan denne grensebetingelsen er definert. Referansemodellen har en lekkasje på opp til 0.70 L/min/100meter (lekkasje ganget med 2 for å inkludere begge sidene av gropen). Erfaringstall viser til at lekkasje hvor det har oppstått store reduksjoner er på mellom 3 til 20 L/min/100 meter.

I artikkelen «The modelling of settlements caused by groundwater drawdown in soft soil areas» (Alanen & Korkiala-Tanttu, 2015) ble det testet med en kompleks grense ved byggegropen. Dette førte til numeriske vanskeligheter angående kalkulering av

Diskusjon

grunnvannsnivået. Det ble dermed modellert med brønner eller kjente grunnvannsnivåer i morenelaget, noe som er tilnærmet lik definering som i denne masteren. Ved bruk av en brønntilnærming må det bli gjort noen beregninger på hvor mye som går ut til enhver tid. Hvis det blir pumpet ut mer vann enn modellen klarer å tilføre vil cellene tørke ut. Dette vil føre til numeriske problemer i Modflow-2005 ettersom beregningene er basert på metta celler. Den forenklingen av grensebetingelsen ved byggegroppen hvor grunnvannstanden senkes vil være en feilkilde, men som ser ut til å være en tilstrekkelig forenkling for å få et estimat på modellens respons.



Figur 42 En illustrasjon av grunnvannmodellens prinsipp rundt høyre grensebetingelse og hvordan situasjonen kan være i virkeligheten. Øvre bildet illustrerer et tverrsnitt av scenarioet, og det nedre bildet er en illustrasjon ovenfra.

7.2.5 Parametere

Hydraulisk konduktivitet i morene kan variere innenfor $1E-12$ - $2E-6$ m/s, hvor en grusig morenen vil ha en hydraulisk konduktivitet som tilhører det øvre siktet, mens en moreneleire vil være i det nedre sjiktet (Kap.2.2). I dette scenarioet blir det vurdert til å være en grusig morene grunnet kornfordelingsanalysen fra geologisk beskrivelse fra Asker. - Sammensetningen av morenen er preget av grunnfjellet som breen beveget seg over (vegvesen, 2014) (Side 3-9), slik at morenens sammensetning i området kan være noe likt. Derfor ble det tenkt at egenskapene var like i hele morenelaget. Denne parameteren vil påvirke lagenes dreneringsevne, hastigheten på dreneringen og påvirkningsradiusen. Størrelsen på hydraulisk konduktivitet vil også påvirke hvor mye vanntilførsel som er nødvendig for å opprettholde hydraulisk trykhøyde i morenelaget som vil være en initial grensebetingelse. Ved å variere hydraulisk konduktivitet innenfor de verdiene som kan oppstå for en grusig morene vil det være en stor variasjon av resultatene (Figur 35). Ved en distanse på 400 meter bort fra byggegroppen varierte reduksjonen mellom 0 til 7 meter. Dette viser hvor

Diskusjon

viktig det er å utføre prøver hvor konduktiviteten undersøkes, der alle variasjonene av drenerbare avsetningene blir undersøkt. Dette vil føre til at individuelle forandringer i modellen kan bli tatt med. Hydraulisk konduktivitet kan forandre seg underveis i byggeprosjektet, hvor en utvasking av fine partikler i morenelaget vil føre til en høyere konduktivitet (Persson, 2007). Dette kan oppstå under boringer og setning av stag og peler (vegvesen, 2014). Dette er noe som bør bli tatt med i en vurdering av tiltak, ettersom hydraulisk konduktivitet er en faktor som vil skape stor usikkerhet i modellen.

I forhold til å definere magasinkoeffisienten er det viktig å kartlegge hvilke lagdeling som finnes i området og hvilke typer akvifer det er i grunnen. Dette vil påvirke størrelsesorden på magasinkoeffisienten som har stor påvirkning på dreneringsmønsteret. En lukket akvifer vil indikere en magasinkoeffisient beregnet ut ifra spesifikk lagring, noe som vil bety en lav verdi (Kap.2.2). Ved en grunnvannsmodellering hvor magasinkoeffisienten i morenelaget var lavere enn $1E-5$ ga tilnærmet like resultater, men en høyere verdi ga nesten ingen endring av hydraulisk trykkhøyde ved 400 meter etter endt transient periode. Dette viser at en generell verdi for en lukket akvifer vil kunne bli brukt i tilsvarende modell uten å skape store usikkerheter. Magasinkoeffisienten i lagdelingen over morenelaget vil ha en betydning for hvor mye vann som dreneres ned til morenelaget og kan føre til en senere senkning. Sensitivitetsanalysen på denne faktoren (Figur 41) viser at senkningen i hydraulisk trykkhøyde vil ha en liten spredning med forskjellig spesifikk lagring innenfor leirens verdier fra litteratur. Senarioer med en verdi utenfor leirens antatte verdier viser til et høyere avvik fra resten av senarioene. Dette tyder på at verdier innenfor intervallet for spesifikk lagring til leire ikke vil føre til en stor feilkilde, men det er viktig å definere en verdi i riktig størrelsesorden.

Ved valg av modelleringskode vil det være viktig å se hvordan magasinkoeffisienten blir beregnet og hvordan magasinkoeffisienten bør bli beregnet til de forskjellige lagene. Modflow-2005 beregner magasinkoeffisienten ut ifra spesifikk lagring ganget med lagets bredde hvis vannstanden er definert høyere enn toppen av cellen. Hvis dette laget egentlig er en åpen akvifer må det bli korrigert for. Magasinkoeffisienten i en åpen akvifer er basert på effektiv porøsitet som er som regel høyere enn spesifikk lagring. I denne oppgaven er spesifikk lagring basert på verdier fra litteraturen og ikke ut ifra effektiv porøsitet.

7.3 SETNINGSBEREGNING OG RISIKOANALYSE

I denne oppgaven er sammenligningen av modellen og Jong primært gjort ved hjelp av endring av hydraulisk trykkehøyde, og ikke setninger. Dette er et bevist valg som er gjort ettersom setninger er en funksjon av endring av hydraulisk trykkehøyde.

Setningsberegningene utført på hydraulisk trykkehøyde fra modellen før og etter grunnvannssenkningen i byggegropen ser ut til å gi et godt estimat på hvor store setninger som kan oppstå. Resultatene viser til lavere setninger enn det som er målt på Jong, men senkningen av hydraulisk trykkehøyde er også lavere. Beregningene er gjort for hele dybden av tverrsnittet som er satt opp i modellen, dette er en leiretykkelse på 28 meter. I virkeligheten vil denne tykkelsen variere noe som kan lede til en lavere størrelsesorden på setningene.

Ved en risikoanalyse basert på metoden utviklet av Piciullo et al. (2020) vil det være viktig å ha riktig størrelsesorden på setningen, noe som samsvarer i denne modellen. Ved en videre analyse kan det være nyttig å kjøre flere modeller slik at et utfallsrom blir definert. Resultatene ser ut til å kunne brukes videre i en grov vurdering av risikoklassen.

7.4 MODELLERINGENS NYTTEVERDI

Den forenklede modell som er valgt i denne oppgaven vil være raskt å sette opp, relativt enkel å vurdere og identifisere feilkilder som kan oppstå i modellen. Resultatene viser at modelleringsområdet kan potensielt få en stor respons på en drenering, hvor variasjonene innenfor hastigheten til dreneringen vil bli mest påvirket av hvilke verdier som er definert for hydraulisk konduktivitet. Påvirkningsradiusen ved forskjellige scenarioer er varierende, men sensitivitetsanalysen viser at en drenering kan påvirke et område opp til 400 meter unna byggegropen. Ettersom morenelaget ble drenert sank hydraulisk trykkehøyde i leiren rett over morenelaget (Figur 28). Simuleringen viser at vanntilførselen fra leiren øker ganske raskt etter at dreneringen har startet, noe som fører til en reduksjon av hydraulisk trykkehøyde i leiren (Figur 29). Sammenligningen med erfaringstabellen fra Jong viser at modellen samsvarer godt med tilfeller hvor det hadde blitt brukt delvis injeksjon, men hvor tilfeller uten tiltak havnet utenfor disse resultatene. En beregning av sekundærsetninger viser at tøyningene øker i dybden noe som illustrerer at leiren dreneres fra undersiden. Dette illustrerer godt hva som skjedde på Jong, men hvor størrelsesorden på senkningen i hydraulisk trykkehøyde ikke samsvarer helt mellom målinger og beregninger. Dette viser at en slik modellering kan gi en god vurdering på hvordan systemet vil reagere og kan brukes videre for en grov risikovurdering. Noen vurderinger kan gjøres for hånd ved enkle beregninger eller ved å

Diskusjon

anvende erfaringsverdier, men hvor en slik enkel modell kan bidra med en mer detaljert forståelse for hele systemet og en rask beregning for flere scenarioer.

Etablering av en modell med høyere kompleksitet vil kreve flere ressurser rundt grunnundersøkelser og timer for å sette opp modellen. Ved lite tilgjengelige ressurser vil en slik modell kunne føre til feilkilder som ikke blir identifisert og feil input som kan føre til upresise prediksjoner. Før det blir lagt mer ressurser i et stort modelleringsprosjekt kan det være relevant å utføre en forenklet modell hvor en grunnleggende forståelse av systemet blir etablert og en grov analyse av tilfellet kan etableres. Hvis det ser ut til at systemet er sensitivt så bør det bli vurdert om det skal bli lagt flere ressurser i modelleringen og om det er mulig å hente nok informasjon om de viktigste parameterne slik at modellen vil kunne føre til en mer presis prediksjon. Dette kan videre gi informasjon om hvor mye vann som må infiltreres for å opprettholde trykket.

Selv om det blir gjort omfattende grunnundersøkelser, og det etableres en kompleks modell, vil det alltid være en usikkerhet rundt nedbør. Nedbør kan føre til så store endringer av resultatet at det kan stilles spørsmål ved nytteverdien av en «nøyaktig» kompleks modell. Basert på resultatene fra modelleringen, som viser at systemet er veldig sensitivt for små endringer i netto tilførsel, tyder på at nedbørsvariasjoner kan utgjøre en stor andel av modellusikkerheten. Denne usikkerheten vil i prinsippet være like stor for en enkel og komplisert modell.

7.5 PROGRAMVARE

I denne oppgaven er det valgt å bruke flere programmer som verktøy for å visualisere forholdene på jord og modellere grunnvannets dreneringsmønster. Disse verktøyene kan være tidkrevende, men kan også skape en raskere prosess for å etablere en modell med høyere kompleksitet og skape en høyere forståelse for systemet. Valg av framgangsmåte må vurderes ut ifra hvor mye informasjon som er tilgjengelig og hvor mange timer som skal brukes på å utføre modelleringen.

Det er mange alternativ når det gjelder programvarer som modellerer grunnvannsstrømning. I starten av masteren ble det vurdert flere programvarer som FEFLOW (MIKE Powered by DHI, 2020) og SEEP/W (Sequent, 2020). Disse er gode programvarer, men som koster en god del. Disse programmene kan også kombineres med Leapfrog Work. SEEP/W er kjøpt opp av Sequent noe som kan føre til en bedre måte å jobbe med Leapfrog Work og SEEP/W i fremtiden. Modflow-2005 ble brukt mest på grunn av at det er gratis. Modflow-2005 har noen

Diskusjon

begrensinger, for eksempel så behandler Modflow-2005 bare mettet grunn og kan ha vanskeligheter med å modellere store helningsgrader og store forskjeller i jordens egenskaper. Dette har ikke vært et problem når det gjelder denne modelleringen.

Hvis Leapfrog Work blir brukt aktivt i planleggingsfasen vil dette kunne føre til en raskere etablering av grunnvannsmodellens rammer. Dette vil omfatte geologisk lagdeling, terrengoverflaten og andre konstruksjoner som skal etableres. Det vil kunne føre til noen feilkilder rundt hvordan den geologiske modellen blir etablert, som egne korrigeringer og tolkninger på hvordan lagdelingen er, men det vil i alt føre til en mer realistisk lagdeling. Hydrogeologiske grensebetingelser og noen parametere må defineres senere i et annet program (slik som Modelmuse). Kombinasjonen med Leapfrog Work kan føre til en raskere prosess for å etablere enkelte tverrsnitt eller større områder. Ettersom en modellering av enkelte tverrsnitt kan gi en god forståelse av et system kan det være at dette er nok å gjennomføre i starten av en undersøkelse.

Ved en større undersøkelse eller en akademisk kartlegging vil det være viktig med en sensitivitetsanalyse, dette er mulig å automatisere i Modflow-2005. Flopy (Bakker et al., 2016) er et Python bibliotek hvor det vil være lettere å utføre en omfattende sensitivitetsanalyse. Inputfilene generert i Modelmuse har et litt annet format enn de som genereres av Flopy. Det var derfor ikke mulig å modifisere inputfiler generert i Modelmuse i Flopy. Modellen kan skrives direkte i Flopy, men dette ble for omfattende. Det kan være filene fra SEEP/W eller direkte filer fra Leapfrog Work kan brukes direkte, men dette må undersøkes mer. FEFLOW har også utviklet en måte å bruke Python programmering i grunnvannsmodelleringen. I denne oppgaven ble Flopy brukt for å lese ut celleverdier, og for å visualisere resultater på måter som ikke var mulig i Modelmuse. Dette er et godt verktøy da resultatfilene fra Modflow-2005 oppgir vannmengder ved definerte grensebetingelser. Dette gjør en analyse på det som er ønskelig raskt og enkelt etter at koden først er skrevet.

8 KONKLUSJON

En enkel 2D grunnvannsmodellering vil være et godt verktøy for å skape en generell forståelse av systemets respons, tidsforløp og potensielt påvirkningsområde ved en drenering. Modellen vil ikke gi presise prediksjoner, noe som vil kreve mer informasjon om enkelte parametere og grensebetingelser. Fordeler med å bruke en slik forenklet modell vil være at det krever mindre ressurser og i scenarioer hvor det er store usikkerheter rundt grensebetingelser kan det tenkes at en enkel modellering kan gi en like god forståelse som en omfattende grunnvannsmodell.

En parameter som gir høy usikkerhet i modellen er hydraulisk konduktivitet. Denne parameteren førte til at senkningen ved Åsletta varierte mellom 0 til 7 meter i samme punkt for ulike mulige konduktivitetsverdier. Dette vil være en parameter som vil være nødvendig å ha informasjon om for å få en senkning i riktig størrelsesorden. Hvis denne parameteren er ukjent vil en sensitivitetsstudie være viktig for å identifisere et «worst case scenario».

Modellen er mindre sensitiv for endringer i spesifikk lagring og det er trolig tilstrekkelig å bruke en erfaringsverdi. Dette vil si at det er viktig å definere hvilken type akvifer det er i området og hvilket materiale som ligger over. En verdi innenfor materialets/akviferens antatte verdier vil ikke gi store feilkilder.

Morenetykkelsens vil ha en påvirkning på hvor fort morenelaget dreneres ettersom lekkasjen ut i byggegropen blir definert i hele tverrsnittet av morenelaget. Grensebetingelsene som definerer forholdene ved byggegropen med en tvungen hydraulisk trykkehøyde i hele morenelaget vil kunne overpredikere morenelagets respons. Sammen med en usikkerhet i lagtykkelsen kan det gi en større feilkilde.

FORSLAG TIL VIDERE ARBEID

- For å eliminere flere usikkerheter rundt en grunnvannsmodellering av tilsvarende tilfeller ville det vært interessant å samle inn erfaringer rundt hvor store mengder som kan dreneres gjennom de forskjellige lekkasjepunktene.
- Det kunne vært interessant å etablere en mer presis måte å definere grensebetingelsen i byggegroppen, i forhold til tidsforløp og dreneringsmengde.
- En etablering av en kompleks modell av samme tilfellet vil være nyttig for å identifisere flere faktorer som vil ha stor betydning for modelleringen, og om det vil gi prediksjoner med høyere nøyaktighet.
- En undersøkelse på hvordan en lignende modell med et aktivt sprekkesystem som mater morenelaget vil respondere ville vært interessant.
- I forhold til at en sensitivitetsstudie vil vært relevant for tilfeller med manglende informasjon, hadde det vært interessant å undersøke mulighetene i Flopy nærmere. En videre utprøving av dette programmet kan øke forståelsen av et system slik at flere scenarioer kan raskt testes, og en høyere forståelse kan etableres for hvert modellert tilfelle.

REFERANSER

- Aas-Jakobsen. (1999). *Vurdering av poretrykks-, drenasje- og setningsforhold i forbindelse med byggegrøper*. Sandvika: Jernbaneverket utbygging,.
- Acworth, R. I., Rau, G. C., Halloran, L. J. S. & Timms, W. A. (2017). Vertical groundwater storage properties and changes in confinement determined using hydraulic head responses to atmospheric tides. *water resour. res.*, doi: 10.1002/2016WR020311.
- Alanen, J. M. K. & Korkiala-Tanttu, L. K. (2015). *The modelling of settlements caused by groundwater drawdown in soft soil areas*. Geotechnical engineering for Infrastructure and development: ICE Publishing.
- Andersen, L. (1999). *Dobbeltspor Skøyen-Asker Parsell Sandvika, Grunnundersøkelser fase 2. Datarapport*. Oslo: NGI.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W. & Hunt, R. J. (2015). *Applied Groundwater Modeling, Simulation of flow and advection transport*: Elsevier Inc.
- Baardvik, G., Engen, A., Kalsnes, B., Karlsrud, K., Lande, E. J., Langford, J., Simonsen, A., Tvedt, G. & Veslegard, G. (2016). *Begrensning av skader som følge av grunnarbeider - Sluttrapport*. Oslo: Begrens Skade,.
- Baardvik G & Braaten A. (2002, 22.11.02). *Boring av stag og stålkjernepeler i tettbygde strøk. Erfaringer fra nytt dobbeltspor Sandvika-Asker*. Geoteknikkdagen, Oslo.
- Bakker, M., Post, V., Langevin, C. D., Hughes, J. D., White, J. T., Starn, J. J. & Fienen, M. N. (2016). Scripting MODFLOW Model Development Using Python and FloPy. *Groundwater*, 54 (5): 733-739. doi: 10.1111/gwat.12413.
- Batu, V. (1998). *Aquifer hydraulics: a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis*: John Wiley & Sons.
- Bøyum, Å. (1992). *VA-teknikk*. [Trondheim]: Institutt for vassbygging, NTH.
- Braaten, A., Baardvik, G., Vik, A. & Brendbekken, G. (2004). Observerte effekter på poretrykk på grunn av omfattende fundamenterings-arbeider i dyp utgraving i leire.
- Dagestad, A., Hansen, L. & Braathen, A. (2003). *Hydrauliske egenskaper i løsmasser og fjell sett i sammenheng med EU-direktoratet for deponering av avfall*. Trondheim: Norges geologiske universitet, .
- Danielsson, A. (2019). *Uncertainties in groundwater modelling*. Gothenburg: Chalmers University og technology.
- Harbaugh, A. W. (2005). *Modflow-2005, The U. S. Geological survey modular ground-water model - the ground-water flow process*. Virginia: U. S. Geological Survey
- Hendriks, M. R. (2010). *introduction to Physical Hydrology*. United state: Oxford university press.
- Henriksen, H. & Dale, T. (2018). Groundwater discharge from a rock-slope failure system in phyllitic rocks influencing fjord basin hydrodynamics, stamp in Aurland, west Norway. *Norwegian Journal of Geology* 98.
- Jernbanekompetanse. (2016). *Underbygning/Setninger*. Tilgjengelig fra: [https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Underbygning/Setninger#Setninger_som_proble m_for_jernbaneanlegg](https://www.jernbanekompetanse.no/wiki/Underbygning/Setninger#Setninger_som_proble_m_for_jernbaneanlegg) (lest 01.02.2020).
- Jernbaneverket & Statenvegvesen. (1999). Stillingsrapport - konsekvensutredning og foreløpig teknisk/økonomisk plan.
- Karlsrud, K., Erikstad, L. & Snilsberg, P. (2003). Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø.
- Karlsrud, K., Langford, J., Lande, E. J. & Baardvik, G. (2015). Vurdering av skader og deformasjoner knyttet til utførelse av stagforankring og borede peler i byggegrøper
- Kleven, A. & Hagen, A. W. (2002). *Jong - Asker. Varslingsgrenser for poretrykksmålere. -Teknisk notat*: NGI. Upublisert manuskript.
- Kleven, A. (2007). *Åssletta, Jong - prøveavstegning av infiltrasjonsbrønn x2 og vurdering av behov for vanninfiltrasjon*. Oslo NGI. Upublisert manuskript.

Referanser

- Klevland, A. (2005). *Jong-Asker. Fremtidig overvåkningsprogram. - Teknisk notat*: NGI. Upublisert manuskript.
- Klevland, A. (2008). *Åssletta, Jong-Permanent vanninfiltrasjon*: NGI. Upublisert manuskript.
- Langford, J., Baardvik, G. & Karlsrud, K. (2016). *Pore pressure reduction and settlements induced by deep supported excavations in soft clay*. Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting.
- Manoliu, I. & Radulescu, N. (2008). *Education and Training in Geo-Engineering Sciences: Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Engineering Geology, Rock Mechanics*: CRC Press.
- MIKE Powered by DHI. (2020). *FEFLOW*. Tilgjengelig fra: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow>.
- Morris, D. A. & Johnson, A. I. (1967). *Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948-60*. Water Supply Paper, 1839D.
- NGF. (1982). *Veiledning for måling av grunnvannstand og poretrykk*: Norges geotekniske forening.
- NGF. (1994). *Veiledning for utførelse av totalsondering*.
- NGI. (2012-2015). *FoU program, Begrens Skade*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngi.no/Prosjekter/BegrensSkade/#Delprosjekter> (lest 01.02.2020).
- NGI. (2017a). *BegrensSkade II/Remesy-risk reduction of groundwork damage*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngi.no/Prosjekter/BegrensSkade-II-REMEDY-Risk-Reduction-of-Groundwork-Damage> (lest 01.09.2019).
- NGI. (2017b). *WP 3: Hydrogeological modelling, drainage and grouting*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngi.no/Prosjekter/BegrensSkade-II-REMEDY-Risk-Reduction-of-Groundwork-Damage/WP-3-Hydrogeological-modelling-drainage-and-grouting> (lest 01.09.2019).
- NGU. (2019a). *Ordbok: Norges geologiske undersøkelse*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/ordbok#h>.
- NGU. (2019b). *Setningsskader*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/setningsskader>.
- NGU. (2020a). *Berggrunn*. Tilgjengelig fra: http://geo.ngu.no/kart/berggrunn_mobil/ (lest 20.12.2019).
- NGU. (2020b). *Løsmasser*. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/> (lest 20.12.2019).
- Nordhal-olsen, T. (1989). *Asker: Kvartærgeologisk kart 1814 I - M 1:50 000, med beskrivelse*: NGU.
- NVE. (2019). *NEVINA*. Tilgjengelig fra: <http://nevina.nve.no/> (lest 04.01.2020).
- Optimal Geoteknikk. (2009). *Jernbaneverket utbygging, Vurdering av setninger og årsak Jong - notat 1*.
- Persson, J. (2007). *Hydrogeological Methods in Geotechnical Engineering: Applied to settlements caused by underground construction*. Göteborg, Sweden: Chalmers university of technology.
- Piciullo, L., Ritter, S., Lysdahl, A. O. K., Langford, J. & Nadim, F. (2020). Risk assessment of buildings damage due to excavation-induced displacements. *NGI*.
- QGIS Development Team. *QGIS (Versjon 3.4.11-Madeira)*. Tilgjengelig fra: <https://qgis.org/en/site/>.
- Rojas, R., Kahunde, S., Peeters, L., Batelaan, O., Feyen, L. & Dassargues, A. (2010). Application of a multimodel approach to account for conceptual model and scenario uncertainties in groundwater modelling. *Journal of Hydrology*, Volume 394 (Issues 3–4): Pages 416-435.
- Schwartz, F. W. & Zhang, H. (2003). *Fundamentals of ground water*: John Wiley & Sons.
- Seequent. (2020). *GEOSLOPE, SEEP/W*. Tilgjengelig fra: <https://www.geoslope.com/products/seep-w>.
- Seequent. *Hydrogeology module*. Tilgjengelig fra: <https://www.leapfrog3d.com/products/leapfrog-geo/hydrogeology-module> (lest 01.11.2019).
- Seequent. (2013). *Leapfrog interpolation basics*. Tilgjengelig fra: <https://www.seequent.com/leapfrog-interpolation-basics/>.
- Seequent. (2017). *User manual for Leapfrog works version 2.0*. New Zealand: ARANZ Geo Limited t/a Seequent.
- Seequent. (2019). *Leapfrog Work (Versjon 3.0.3)*. Tilgjengelig fra: https://www.leapfrog3d.com/products/leapfrog-works?gclid=EAlaIqobChMIguTpw6Sr6QIVBMqyCh3b8gl-EAAYASAAEgLSJvD_BwE.

Referanser

- Singhal, B. B. S. & Gupta, R. P. (2010). *Applied hydrogeology of fractured rocks*: Springer Science & Business Media.
- Statens Kartverk. (2011). *Geoteknisk undersøkelse*. SOSI standard - generell objektkatalog versjon 4.0
- Tømmerdal, H. M. (2017). *En evaluering av empiriske formler som relaterer kornfordeling til hydraulisk konduktivitet og deres egnethet til bruk i fluviale og glisiale sedimenter*: Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet.
- vegvesen, S. (2014). *Geoteknikk vegbygging, håndbok v220*. Tilgjengelig fra:
[https://www.vegvesen.no/_attachment/70057/binary/1305835?fast_title=Håndbok+V220+Geoteknikk+i+vegbygging+\(18+MB\).pdf](https://www.vegvesen.no/_attachment/70057/binary/1305835?fast_title=Håndbok+V220+Geoteknikk+i+vegbygging+(18+MB).pdf)
- vegvesen, S. (2018). *Vegbygging, N200*. Tilgjengelig fra:
[https://www.vegvesen.no/_attachment/2364236/binary/1269980?fast_title=Håndbok+N200+Vegbygging+\(10+MB\).pdf](https://www.vegvesen.no/_attachment/2364236/binary/1269980?fast_title=Håndbok+N200+Vegbygging+(10+MB).pdf)
- Winston, R. B. (2000). *Graphical User Interface for MODFLOW*: U.S. Geological Survey Open-file report 00-315. Tilgjengelig fra: <https://www.usgs.gov/software/gwchart-a-program-creating-specialized-graphs-used-groundwater-studies>.
- Winston, R. B. (2009). ModelMuse-A graphical user interface for modflow-2005 and PHAST. I: U.S. Geological survey (red.) *Modeling techniques*. Virginia: U.S. Geological survey.
- Zhou, Y. & Li, W. (2010). A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience frontiers*.

VEDLEGG A - FELTDATA FRA NEVINA



Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Kartbakgrunn: Statens Kartverk
Kartdatum: EUREF89 WGS84
Projeksjon: UTM 33N
Beregn.punkt: 248836 E
6648052 N

Nedbørfeltgrenser og feltparametere er automatisk generert og kan inneholde feil.
Resultatene må kvalitetssikres.

Nedbørfeltparametere

Vassdragsnr.: 008.A12
Kommune.: Bærum
Fylke.: Viken
Vassdrag.: Sandvikselva

Feltparametere

Areal (A)	191 km ²
Effektiv sjø (A _{SE})	0.07 %
Elvleengde (E _L)	24.9 km
Elvegradient (E _G)	19.0 m/km
Elvegradient ₁₀₈₅ (E _{G,1085})	19.4 m/km
Helning	9.3 °
Dreneringstetthet (D _T)	2 km ⁻¹
Feltlengde (F _L)	25.5 km

Arealklasse

Bre (A _{BRE})	0 %
Dyrket mark (A _{JORD})	5.9 %
Myr (A _{MVR})	1.7 %
Leire (A _{LEIRE})	9.8 %
Skog (A _{SKOG})	83.7 %
Sjø (A _{SJO})	1.8 %
Snau fjell (A _{SF})	0 %
Urban (A _U)	4.2 %
Uklassifisert areal (A _{REST})	2.4 %

Hypsografisk kurve

Høyde _{MIN}	5 m
Høyde ₁₀	121 m
Høyde ₂₀	197 m
Høyde ₃₀	263 m
Høyde ₄₀	308 m
Høyde ₅₀	341 m
Høyde ₆₀	372 m
Høyde ₇₀	399 m
Høyde ₈₀	437 m
Høyde ₉₀	494 m
Høyde _{MAX}	680 m

Klima- /hydrologiske parametere

Avrenning 1961-90 (Q _N)	19.1 l/s*km ²
Sommernedbør	447 mm
Vinternedbør	490 mm
Årstemperatur	3.8 °C
Sommertemperatur	11.8 °C
Vintertemperatur	-1.9 °C

Figur A 1 Nedbørsparametere fra (NVE, 2019)

VEDLEGG B - TOLKNINGER AV TOTALSONDERINGER

I vedlegg B er det informasjon fra innhentet data fra totalsonderingene med stoppkode 94 (stopp grunnet oppnådd dybde til fjell) som er utført av NGI, og mine tolkninger.

Tabell B Info om totalsonderingene som er tolket og brukt i Leapfrog

Hole-ID	X	Y	Z	Metode	Stopp	Løsm	Fjell	KoteBerg	maxDepth	Prosjekt
3	1210632	100087.4	23.9	Total	94	14.4	2.9	9.5	16.4	E16 Kjørbo-Økri
4	1210640	100073.6	24.4	Total	94	13	2.9	11.4	15	E16 Kjørbo-Økri
5	1210653	100046.3	25.4	Total	94	3	2.97	22.4	5	E16 Kjørbo-Økri
6	1210668	100020.5	26.2	Total	94	6.3	3	19.9	8.3	E16 Kjørbo-Økri
12	1210613	100059.9	24.2	Total	94	9.3	3.1	14.9	11.3	E16 Kjørbo-Økri
13	1210627	100033.4	25.2	Total	94	9.7	3.1	15.5	11.7	E16 Kjørbo-Økri
14	1210641	100007.2	26	Total	94	8.7	2.9	17.3	10.7	E16 Kjørbo-Økri
15	1210634	99980.18	26.6	Total	94	15	1.9	11.6	17	E16 Kjørbo-Økri
16	1210669	99959.36	28.1	Total	94	10.7	2.9	17.4	12.7	E16 Kjørbo-Økri
17	1210575	100101.1	23.9	Total	94	21	3	2.9	23	E16 Kjørbo-Økri
19	1210577	100058.2	24.7	Total	94	15.3	2.87	9.4	17.3	E16 Kjørbo-Økri
20	1210586	100045.9	24.8	Total	94	15.1	2.92	9.7	17.1	E16 Kjørbo-Økri
21	1210602	100020.4	25.4	Total	94	9.6	3	15.8	11.6	E16 Kjørbo-Økri
22	1210615	99994.64	26.1	Total	94	9.9	2.9	16.2	11.9	E16 Kjørbo-Økri
23	1210619	99960.03	28.1	Total	94	10.8	2.9	17.3	12.8	E16 Kjørbo-Økri
27	1210866	99804.28	31.7	Total	94	5.8	3.2	25.9	7.8	E16 Kjørbo-Økri
28	1210889	99789.8	34.7	Total	94	4.6	3	30.1	6.6	E16 Kjørbo-Økri
33	1210555	100037.4	25.1	Total	94	19.9	3.1	5.2	21.9	E16 Kjørbo-Økri
34	1210560	100032.2	25.2	Total	94	15.77	3.23	9.43	17.77	E16 Kjørbo-Økri
35	1210608	100069.3	23.8	Total	94	11.3	3.8	12.5	13.3	E16 Kjørbo-Økri
42	1210751	99991.88	28.7	Total	94	8.1	2.38	20.6	10.1	E16 Kjørbo-Økri
43	1210760	99975.15	27.8	Total	94	7.9	3	19.9	9.9	E16 Kjørbo-Økri
44	1210768	99959.22	28.8	Total	94	8.7	2.9	20.1	10.7	E16 Kjørbo-Økri
54	1210925	99838.78	33.7	Total	94	2.5	3.3	31.2	4.5	E16 Kjørbo-Økri
61	1210599	100136.7	23	Total	94	18.5	2.9	4.5	20.5	E16 Kjørbo-Økri
62	1210623	100170.2	20.5	Total	94	9.9	3	10.6	11.9	E16 Kjørbo-Økri
63	1210633	100157	21.4	Total	94	14.9	2.9	6.5	16.9	E16 Kjørbo-Økri
64	1210645	100141.5	21.5	Total	94	12.6	2.9	8.9	14.6	E16 Kjørbo-Økri
65	1210711	99968.41	27.8	Total	94	13	3	14.8	15	E16 Kjørbo-Økri
66	1210680	99967.92	27.5	Total	94	10.8	3	16.7	12.8	E16 Kjørbo-Økri
G12	1210490	100091.8	24.687	Total	94	38.8	1.4	-14.113	40.8	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G13	1210515	100165.4	22.82	Total	94	33.9	1.3	-11.08	35.9	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G14	1210475	100074.1	25.07	Total	94	18	1.4	7.07	20	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G16	1210498	100069.9	24.89	Total	94	8.8	1.2	16.09	10.8	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G17	1210478	100034.6	25.25	Total	94	7.9	1.4	17.35	9.9	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G19	1210443	99990.06	26.11	Total	94	5.9	1.4	20.21	7.9	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G20	1210474	99981.29	26.35	Total	94	10.2	1.4	16.15	12.2	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G21	1210439	99931.83	27.53	Total	94	5.1	1.4	22.43	7.1	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G25	1210434	99875.15	28.57	Total	94	14.8	0.87	13.77	16.8	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker

Vedlegg B - Tolkninger av totalsonderinger

G27	1210366	99788.47	27.61	Total	94	18.8	1.5	8.81	20.8	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G34	1210361	99736.9	28.48	Total	94	2.48	1.01	26	4.48	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G41	1210459	99985.18	26.25	Total	94	16.2	0.4	10.05	18.2	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G42	1210419	99881.41	28.27	Total	94	21.7	1.27	6.57	23.7	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G43	1210381	99782.65	27.88	Total	94	20.2	1.4	7.68	22.2	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G44	1210348	99743.05	28.43	Total	94	5.24	1.16	23.19	7.24	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G46	1210467	100006	25.72	Total	94	29.65	2.95	-3.93	31.65	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G48	1210362	99694.15	31	Total	94	30.4	1.4	0.6	32.4	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G50	1210487	100057.6	25.02	Total	94	17.1	1.3	7.92	19.1	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G52	1210449	99958.26	26.86	Total	94	8.5	1.18	18.36	10.5	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G53	1210429	99907.04	28.02	Total	94	8.8	1.4	19.22	10.8	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G54	1210410	99856.87	28.31	Total	94	19.9	1.4	8.41	21.9	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
G55	1210390	99807.02	28.34	Total	94	14.8	1.4	13.54	16.8	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
X1-1	1210433	100137	24.614	Total	94	26.8	1.9	-2.186	28.8	SVV / JBV
X2-1	1210207	99686.61	29.757	Total	94	7.1	1.92	22.657	9.1	SVV / JBV
X2-2	1210188	99678.32	29.734	Total	94	6.8	1.9	22.934	8.8	SVV / JBV
X2-3	1210144	99676.15	29.286	Total	94	12.4	0.9	16.886	14.4	SVV / JBV
X2-4	1210107	99659.53	30.509	Total	94	20.8	0.9	9.709	22.8	SVV / JBV
X3-1	1210231	99711.55	29.466	Total	94	17.7	1.3	11.766	19.7	SVV / JBV
X3-2	1210231	99732.45	28.777	Total	94	25.9	1	2.877	27.9	SVV / JBV
X3-3	1210225	99750.76	28.015	Total	94	27.4	0.9	0.615	29.4	SVV / JBV
X3-4	1210223	99771.34	27.241	Total	94	22.9	0.75	4.341	24.9	SVV / JBV
X4-1	1210245	99975.02	26.398	Total	94	23.4	0.9	2.998	25.4	SVV / JBV
X4-2	1210242	99948.27	27.152	Total	94	15.1	0.77	12.052	17.1	SVV / JBV
X4-3	1210245	99933.93	27.343	Total	94	21.1	0.88	6.243	23.1	SVV / JBV
1C02015	1210303	99622.85	45.516	Total	94	6.5	3.02	39.016	8.5	FRE16-Avrop 04-S1
1C02014	1210292	99585.23	47.744	Total	94	5	3.02	42.744	7	FRE16-Avrop 04-S1
F3	1210281	100123.5	27.743	Total	94	12.5	3	15.243	14.5	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
F2	1210550	100122.9	22.36	Total	94	14.7	0.4	7.66	16.7	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
F62	1210558	100212	24.179	Total	94	14.6	1.5	9.579	16.6	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
F64	1210524	100208	26.174	Total	94	11.4	1.9	14.774	13.4	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
F65	1210532	100182.2	23.139	Total	94	11.4	1.62	11.739	13.4	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
F66	1210519	100178	23.641	Total	94	11.8	1.82	11.841	13.8	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
F67	1210542	100164.3	21.244	Total	94	13.8	1.9	7.444	15.8	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
F68	1210532	100145.8	22.789	Total	94	13.6	1.8	9.189	15.6	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
F70	1210520	100127.1	23.063	Total	94	14.6	1.9	8.463	16.6	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker

Vedlegg B - Tolkninger av totalsonderinger

F71	1210504	100129.2	23.03	Total	94	17.5	1.9	5.53	19.5	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker
F72	1210517	100114.3	23.676	Total	94	18.8	2.2	4.876	20.8	NGI_Dobbelspor_Skøyen-Asker

Tabellen under viser mine tolkninger av totalsonderingene som er plukket ut for å få et representativt bilde av geologien på Jong.

Tabell B 2 Tolkningen av lagdelingen fra 12 totalsonderingene er vist i tabellen, dette er dokumentet som er referert til som litologien.

Hole-ID	from	To	Unit	Tolket av	Dato
3	0	5.5	Leire	HS	10.10.2019
3	5.5	14.4	Grovere	HS	10.10.2020
3	14.4	16.4	Grunnfjell	HS	10.10.2021
4	0	3.5	Leire	HS	10.10.2022
4	3.5	13	Grovere	HS	10.10.2023
4	13	15	Grunnfjell	HS	10.10.2024
5	0	3	Leire	HS	10.10.2025
5	3	5	Grunnfjell	HS	10.10.2026
6	0	6.3	Leire	HS	10.10.2027
6	6.3	8.3	Grunnfjell	HS	10.10.2028
12	0	8	Leire	HS	10.10.2029
12	8	9.3	Grovere	HS	10.10.2030
12	9.3	11.3	Grunnfjell	HS	10.10.2031
13	0	9.7	Leire	HS	10.10.2032
13	9.7	11.7	Grunnfjell	HS	10.10.2033
14	0	8.7	Leire	HS	10.10.2034
14	8.7	10.7	Grunnfjell	HS	10.10.2035
15	0	8	Leire	HS	10.10.2036
15	8	15	Grovere	HS	10.10.2037
15	15	17	Grunnfjell	HS	10.10.2038
16	0	3.5	Leire	HS	10.10.2039
16	3.5	10.7	Grovere	HS	10.10.2040
16	10.7	12.7	Grunnfjell	HS	10.10.2041
17	0	15	Leire	HS	10.10.2042
17	15	21	Grovere	HS	10.10.2043
17	21	23	Grunnfjell	HS	10.10.2044
19	0	15.3	Leire	HS	10.10.2045
19	15.3	17.3	Grunnfjell	HS	10.10.2046
20	0	15.1	Leire	HS	10.10.2047
20	15.1	17.1	Grunnfjell	HS	10.10.2048
21	0	9.6	Leire	HS	10.10.2049
21	9.6	11.6	Grunnfjell	HS	10.10.2050
22	0	5	Leire	HS	10.10.2051
22	5	9.9	Grovere	HS	10.10.2052

Vedlegg B - Tolkninger av totalsonderinger

22	9.9	11.9	Grunnfjell	HS	10.10.2053
23	0	2	Leire	HS	10.10.2054
23	2	10.8	Grovere	HS	10.10.2055
23	10.8	12.8	Grunnfjell	HS	10.10.2056
27	0	5.8	Grovere	HS	10.10.2057
27	5.8	7.8	Grunnfjell	HS	10.10.2058
28	0	4.6	Grovere	HS	10.10.2059
28	4.6	6.6	Grunnfjell	HS	10.10.2060
33	0	18	Leire	HS	10.10.2061
33	18	19.9	Grovere	HS	10.10.2062
33	19.9	21.9	Grunnfjell	HS	10.10.2063
34	0	15.7	Leire	HS	10.10.2064
34	15.7	17.7	Grunnfjell	HS	10.10.2065
35	0	9	Leire	HS	10.10.2066
35	9	11.3	Grovere	HS	10.10.2067
35	11.3	13.3	Grunnfjell	HS	10.10.2068
42	0	7.5	Leire	HS	10.10.2069
42	7.5	8.1	Grovere	HS	10.10.2070
42	8.1	10.1	Grunnfjell	HS	10.10.2071
43	0	6.5	Leire	HS	10.10.2072
43	6.5	7.9	Grovere	HS	10.10.2073
43	7.9	9.9	Grunnfjell	HS	10.10.2074
44	0	4.5	Leire	HS	10.10.2075
44	4.5	8.7	Grovere	HS	10.10.2076
44	8.7	10.7	Grunnfjell	HS	10.10.2077
54	0	2.5	Grovere	HS	10.10.2078
54	2.5	4.5	Grunnfjell	HS	10.10.2079
61	0	14.5	Leire	HS	10.10.2080
61	14.5	18.5	Grovere	HS	10.10.2081
61	18.5	20.5	Grunnfjell	HS	10.10.2082
62	0	9.9	Leire	HS	10.10.2083
62	9.9	11.9	Grunnfjell	HS	10.10.2084
63	0	11	Leire	HS	10.10.2085
63	11	14.9	Grovere	HS	10.10.2086
63	14.9	16.9	Grunnfjell	HS	10.10.2087
64	0	8.5	Leire	HS	10.10.2088
64	8.5	15.6	Grovere	HS	10.10.2089
64	15.6	17.6	Grunnfjell	HS	10.10.2090
65	0	7	Leire	HS	10.10.2091
65	7	13	Grovere	HS	10.10.2092
65	13	15	Grunnfjell	HS	10.10.2093
66	0	7	Leire	HS	10.10.2094
66	7	10.8	Grovere	HS	10.10.2095
66	10.8	12.8	Grunnfjell	HS	10.10.2096
G12	0	30	Leire	HS	10.10.2097

Vedlegg B - Tolkninger av totalsonderinger

G12	30	38.8	Grovere	HS	10.10.2098
G12	38.8	40.8	Grunnfjell	HS	10.10.2099
G13	0	27	Leire	HS	10.10.2100
G13	27	33.9	Grovere	HS	10.10.2101
G13	33.9	35.9	Grunnfjell	HS	10.10.2102
G14	0	16	Leire	HS	10.10.2103
G14	16	18	Grovere	HS	10.10.2104
G14	18	20	Grunnfjell	HS	10.10.2105
G16	0	8.8	Leire	HS	10.10.2106
G16	8.8	10.8	Grunnfjell	HS	10.10.2107
G17	0	6	Leire	HS	10.10.2108
G17	6	7.9	Grovere	HS	10.10.2109
G17	7.9	9.9	Grunnfjell	HS	10.10.2110
G19	0	5	Leire	HS	10.10.2111
G19	5	5.9	Grovere	HS	10.10.2112
G19	5.9	7.9	Grunnfjell	HS	10.10.2113
G20	0	7	Leire	HS	10.10.2114
G20	7	10.2	Grovere	HS	10.10.2115
G20	10.2	12.2	Grunnfjell	HS	10.10.2116
G21	0	5.1	Leire	HS	10.10.2117
G21	5.1	7.1	Grunnfjell	HS	10.10.2118
G25	0	14	Leire	HS	10.10.2119
G25	14	14.8	Grovere	HS	10.10.2120
G25	14.8	16.8	Grunnfjell	HS	10.10.2121
G27	0	17	Leire	HS	10.10.2122
G27	17	18.8	Grovere	HS	10.10.2123
G27	18.8	20.8	Grunnfjell	HS	10.10.2124
G34	0	2.48	Grovere	HS	10.10.2125
G34	2.48	4.48	Grunnfjell	HS	10.10.2126
G41	0	16.2	Leire	HS	10.10.2127
G41	16.2	18.2	Grunnfjell	HS	10.10.2128
G42	0	20.5	Leire	HS	10.10.2129
G42	20.5	21.7	Grovere	HS	10.10.2130
G42	21.7	23.7	Grunnfjell	HS	10.10.2131
G43	0	15	Leire	HS	10.10.2132
G43	15	20.2	Grovere	HS	10.10.2133
G43	20.2	22,2	Grunnfjell	HS	10.10.2134
G44	0	5.2	Leire	HS	10.10.2135
G44	5.2	7.2	Grunnfjell	HS	10.10.2136
G46	0	25.5	Leire	HS	10.10.2137
G46	25.5	29.6	Grovere	HS	10.10.2138
G46	29.6	31.6	Grunnfjell	HS	10.10.2139
G48	0	27	Leire	HS	10.10.2140
G48	27	30.4	Grovere	HS	10.10.2141
G48	30.4	32.4	Grunnfjell	HS	10.10.2142

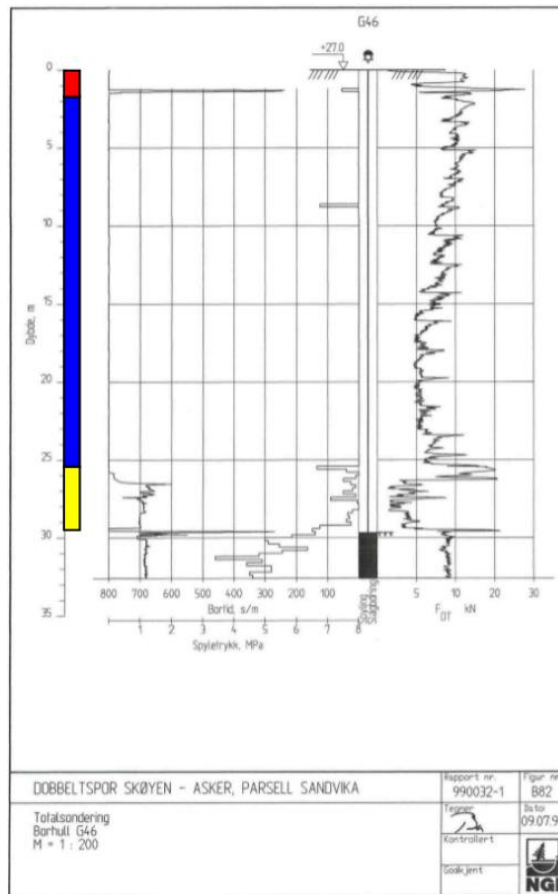
Vedlegg B - Tolkninger av totalsonderinger

G50	0	11	Leire	HS	10.10.2143
G50	11	17.1	Grovere	HS	10.10.2144
G50	17.1	19.1	Grunnfjell	HS	10.10.2145
G52	0	8.5	Leire	HS	10.10.2146
G52	8.5	10.5	Grunnfjell	HS	10.10.2147
G53	0	8.8	Leire	HS	10.10.2148
G53	8.8	10.8	Grunnfjell	HS	10.10.2149
G54	0	18	Leire	HS	10.10.2150
G54	18	19.9	Grovere	HS	10.10.2151
G54	19.9	21.9	Grunnfjell	HS	10.10.2152
G55	0	14.8	Leire	HS	10.10.2153
G55	14.8	16.8	Grunnfjell	HS	10.10.2154
F2	0	6.5	Leire	HS	10.10.2155
F2	6.5	14.7	Grovere	HS	10.10.2156
F2	14.7	16.7	Grunnfjell	HS	10.10.2157
F3	0	11	Leire	HS	10.10.2158
F3	11	12.5	Grovere	HS	10.10.2159
F3	12.5	14.5	Grunnfjell	HS	10.10.2160
F62	0	12	Leire	HS	10.10.2161
F62	12	14.6	Grovere	HS	10.10.2162
F62	14.6	16.6	Grunnfjell	HS	10.10.2163
F64	0	11.4	Leire	HS	10.10.2164
F64	11.4	13.4	Grunnfjell	HS	10.10.2165
F65	0	9.5	Leire	HS	10.10.2166
F65	9.5	11.4	Grovere	HS	10.10.2167
F65	11.4	13.4	Grunnfjell	HS	10.10.2168
F66	0	10.5	Leire	HS	10.10.2169
F66	10.5	11.8	Grovere	HS	10.10.2170
F66	11.8	13.8	Grunnfjell	HS	10.10.2171
F67	0	13.8	Leire	HS	10.10.2172
F67	13.8	15.8	Grunnfjell	HS	10.10.2173
F68	0	13.6	Leire	HS	10.10.2174
F68	13.6	15.6	Grunnfjell	HS	10.10.2175
F70	0	13.5	Leire	HS	10.10.2176
F70	13.5	14.6	Grovere	HS	10.10.2177
F70	14.6	16.6	Grunnfjell	HS	10.10.2178
F71	0	16	Leire	HS	10.10.2179
F71	16	17.5	Grovere	HS	10.10.2180
F71	17.5	19.5	Grunnfjell	HS	10.10.2181
F72	0	18	Leire	HS	10.10.2182
F72	18	18.8	Grovere	HS	10.10.2183
F72	18.8	20.8	Grunnfjell	HS	10.10.2184
X1-1	0	23.5	Leire	HS	10.10.2185
X1-1	23.5	26.8	Grovere	HS	10.10.2186
X1-1	26.8	28.8	Grunnfjell	HS	10.10.2187

Vedlegg B - Tolkninger av totalsonderinger

X2-1	0	7.1	Leire	HS	10.10.2188
X2-1	7.1	9.1	Grunnfjell	HS	10.10.2189
X2-2	0	6.8	Leire	HS	10.10.2190
X2-2	6.8	8.8	Grunnfjell	HS	10.10.2191
X2-3	0	11	Leire	HS	10.10.2192
X2-3	11	12.4	Grovere	HS	10.10.2193
X2-3	12.4	14.4	Grunnfjell	HS	10.10.2194
X2-4	0	15.5	Leire	HS	10.10.2195
X2-4	15.5	20.8	Grovere	HS	10.10.2196
X2-4	20.8	22.8	Grunnfjell	HS	10.10.2197
X3-1	0	17.7	Leire	HS	10.10.2198
X3-1	17.7	19.7	Grunnfjell	HS	10.10.2199
X3-2	0	24	Leire	HS	10.10.2200
X3-2	24	25.9	Grovere	HS	10.10.2201
X3-2	25.9	27.9	Grunnfjell	HS	10.10.2202
X3-3	0	26	Leire	HS	10.10.2203
X3-3	26	27.4	Grovere	HS	10.10.2204
X3-3	27.4	29.4	Grunnfjell	HS	10.10.2205
X3-4	0	22.9	Leire	HS	10.10.2206
X3-4	22.9	24.9	Grunnfjell	HS	10.10.2207
X4-1	0	20.5	Leire	HS	10.10.2208
X4-1	20.5	23.4	Grovere	HS	10.10.2209
X4-1	23.4	25.4	Grunnfjell	HS	10.10.2210
X4-2	0	14	Leire	HS	10.10.2211
X4-2	14	15.1	Grovere	HS	10.10.2212
X4-2	15.1	17.1	Grunnfjell	HS	10.10.2213
X4-3	0	18.5	Leire	HS	10.10.2214
X4-3	18.5	21.1	Grovere	HS	10.10.2215
X4-3	21.1	23.1	Grunnfjell	HS	10.10.2216
1C02015	0	6.5	Grovere	HS	10.10.2217
1C02015	6.5	8.5	Grunnfjell	HS	10.10.2218
1C02014	0	5	Grovere	HS	10.10.2219
1C02014	5	7	Grunnfjell	HS	10.10.2220

Eksempel tolkning



Figur B 1 Et eksempel på tolkning som ble gjennomført på et diagram fra en totalsondering gjennomført av NGI. Rød er tørrskorpe, blå er leire og gul er morene.

VEDLEGG C - DATA FRA PORETRYKKSÅLINGER

Vedlegg C består av en tabell med hentet informasjon fra poretrykksmålere på Jong og oppsettet som er gjort for å importere de til Leapfrog Work.

Tabell C 1 Informasjon om lokasjonen til poretrykksmålere, og registrerte verdier for hydraulisk trykshøyde i forhold til havnivå.

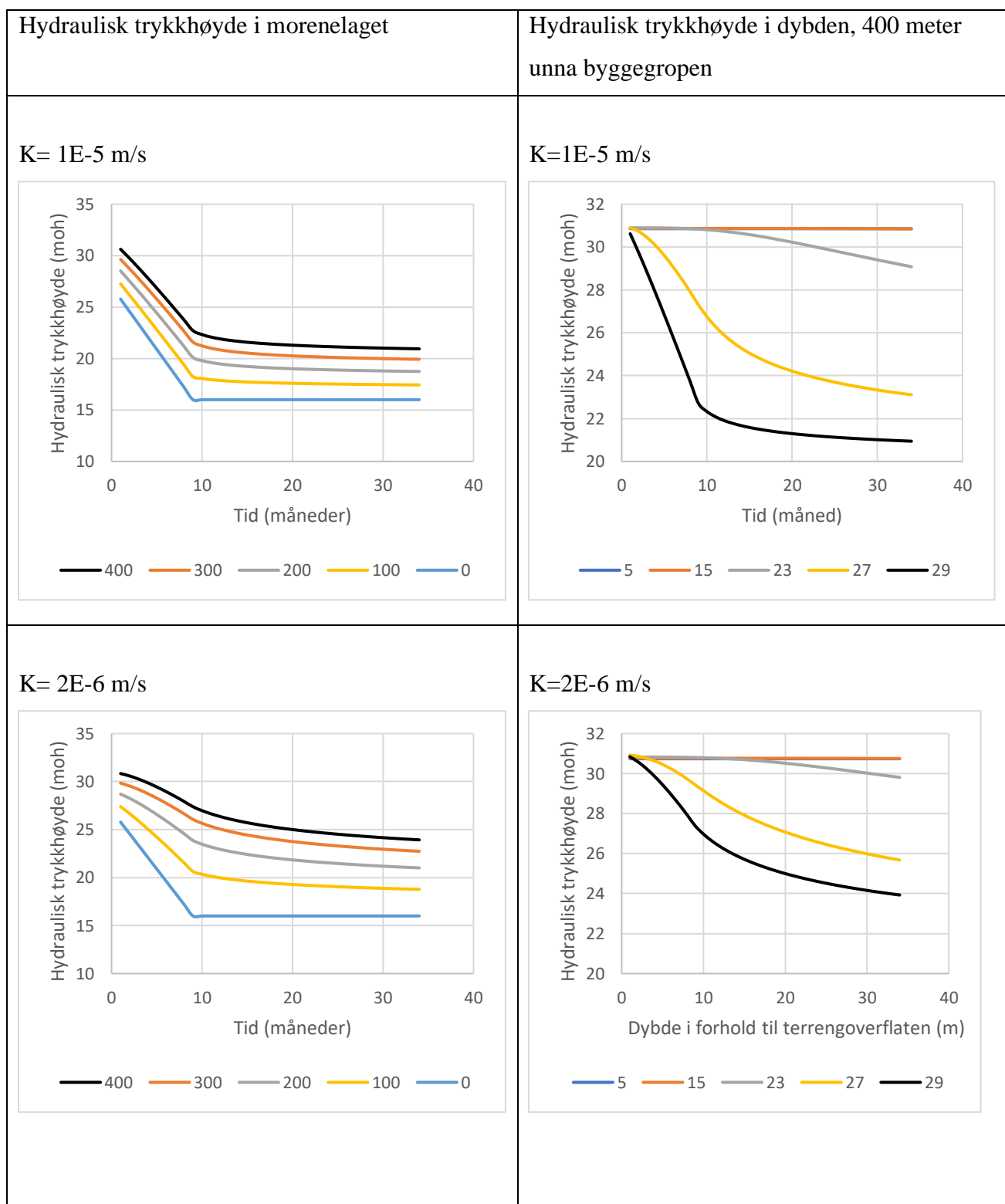
Hole ID	x	y	z	Max depth	Poretrykk 2
G47	99896.6	1210323	27	27	17
L101	99817.9	1210223	28	28	22
L103	99632	1210100	31	31	28
L102	99648.4	1210157	28	28	26
5	100185.3	1210477	24	24	19.5
19	100102	1210337	23	23	23
7	100175.2	1210542	24	24	18.5
12	100146.9	1210570	23	23	15.5
57	100002.2	1210511	27	27	
38	100088.5	1210431	24	24	17
29	99767.5	1210356	29	29	

Tabell C 2 oppstillingen og tolkningen som er importert til Leapfrog

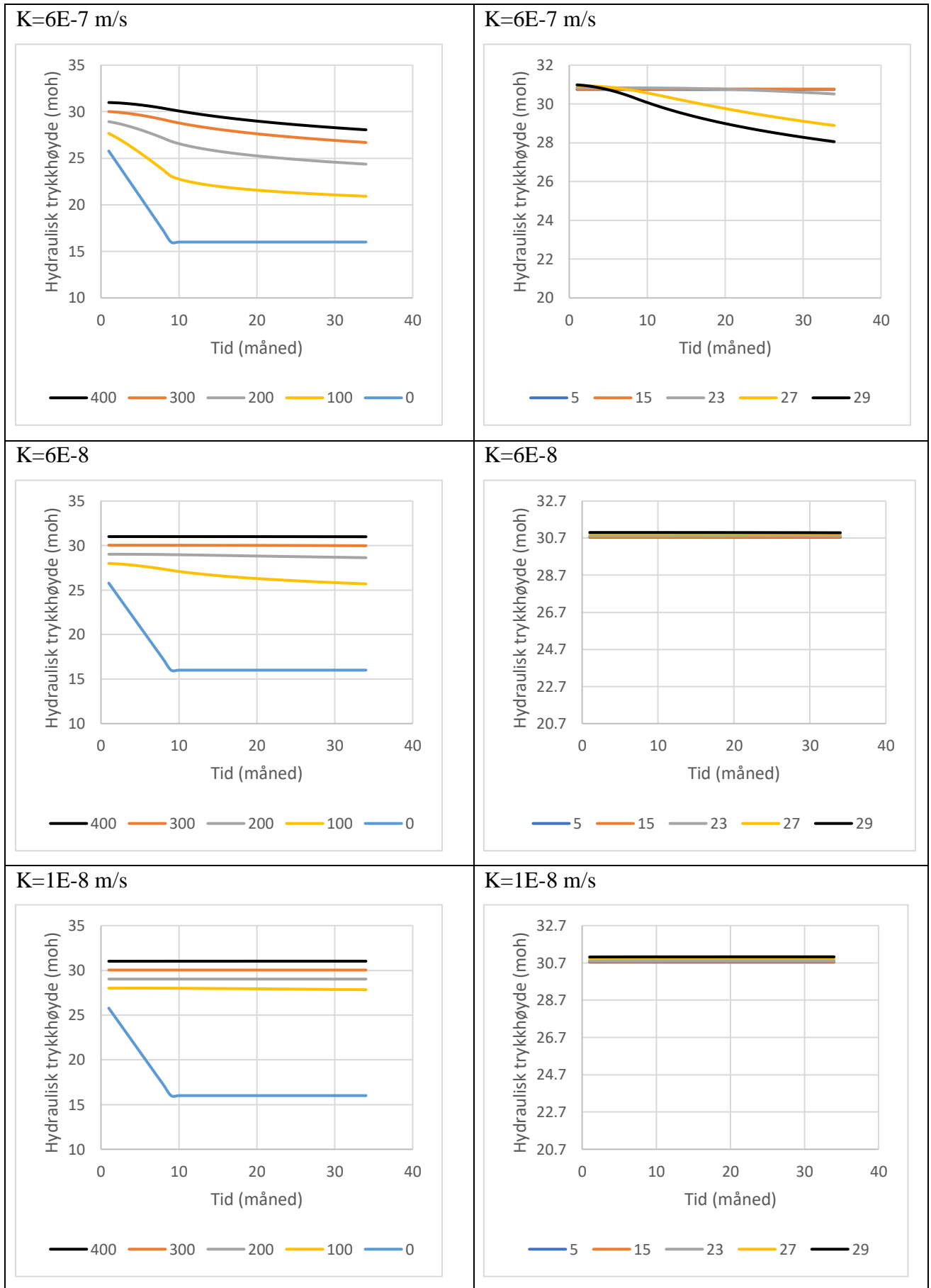
Hole-ID	from	To	Lithology
G47	0	10	Vannstand1
G47	10	27	Vannstand2
L101	0	6	Vannstand1
L101	6	28	Vannstand2
L103	0	2	Vannstad 1
L103	2	31	Vannstand2
L102	0	2	Vannstand1
L102	2	28	Vannstand2
5	0	4.5	Vannstand1
5	4.5	24	Vannstand2
19	0	23	Vannstand2
7	0	5.5	Vannstand1
7	5.5	24	Vannstand2
12	0	7.5	Vannstand1
12	7.5	23	Vannstand2
57	0	27	Vannstand2
38	0	7	Vannstand1
38	7	24	Vannstand2
29	0	13	Vannstand1
29	13	29	Vannstand2

VEDLEGG D - SIMULERINGSRESULTAT

I dette vedlegget er resultatene fra de forskjellige senarioene. Det er grafer fra hvert senario fra observasjonspunkter langs morenelaget og observasjonspunktene som er plassert nedover i tverrsnittet lokalisert 400 meter unna byggegropen.

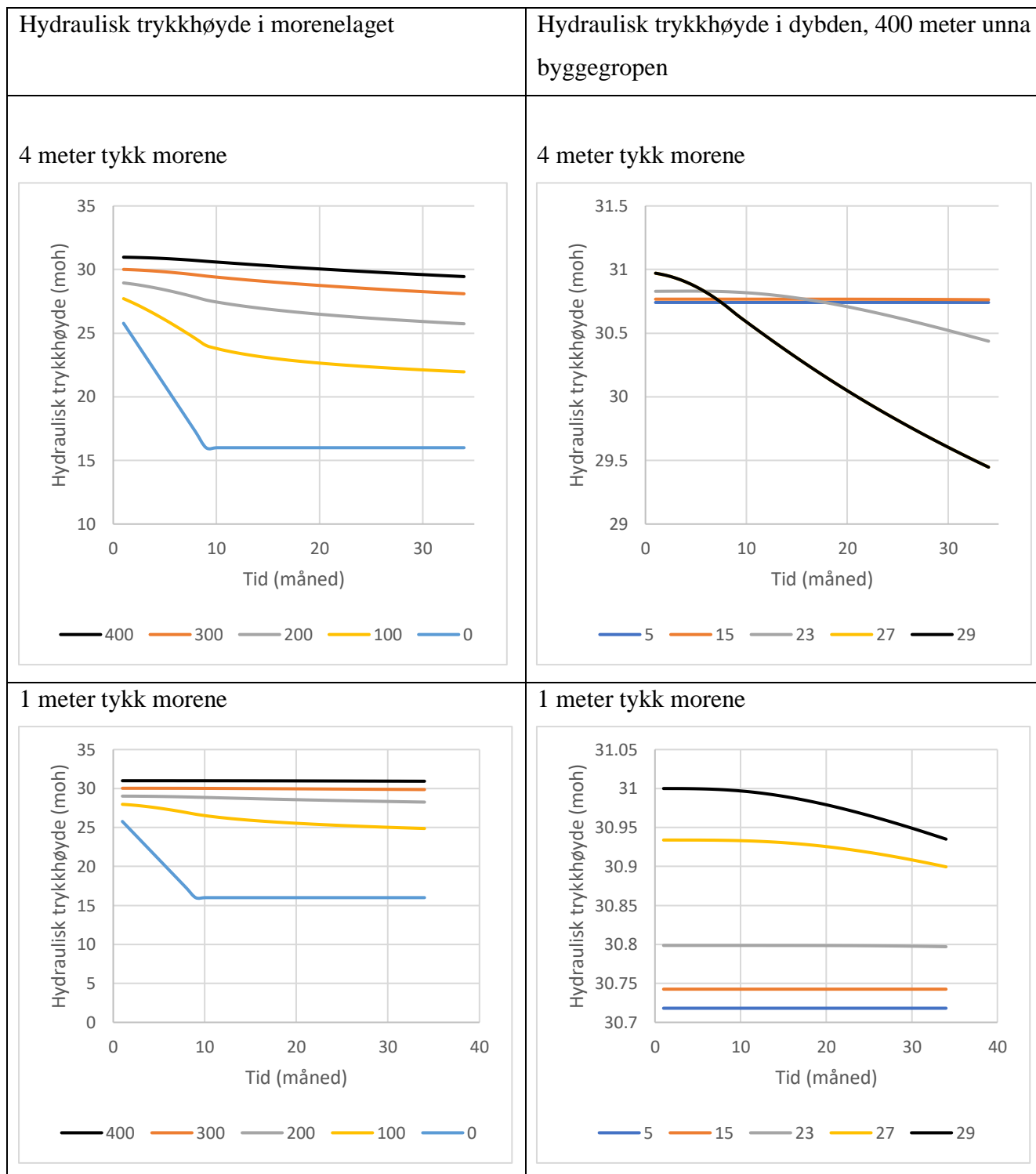


Vedlegg D - Simuleringsresultat



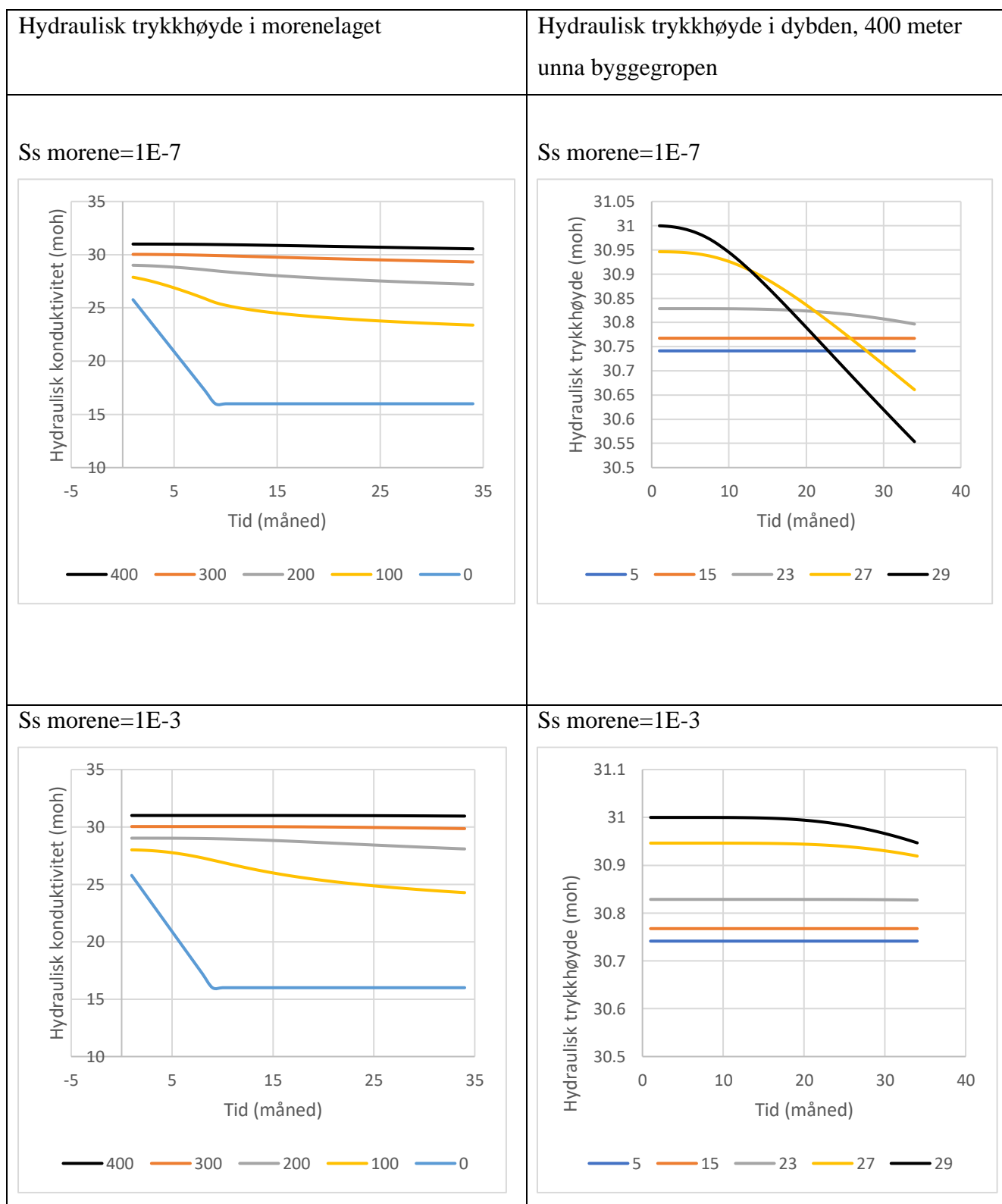
Figur D 1 Grafer fra scenarier hvor det er variert med hydraulisk konduktivitet

Vedlegg D - Simuleringsresultat



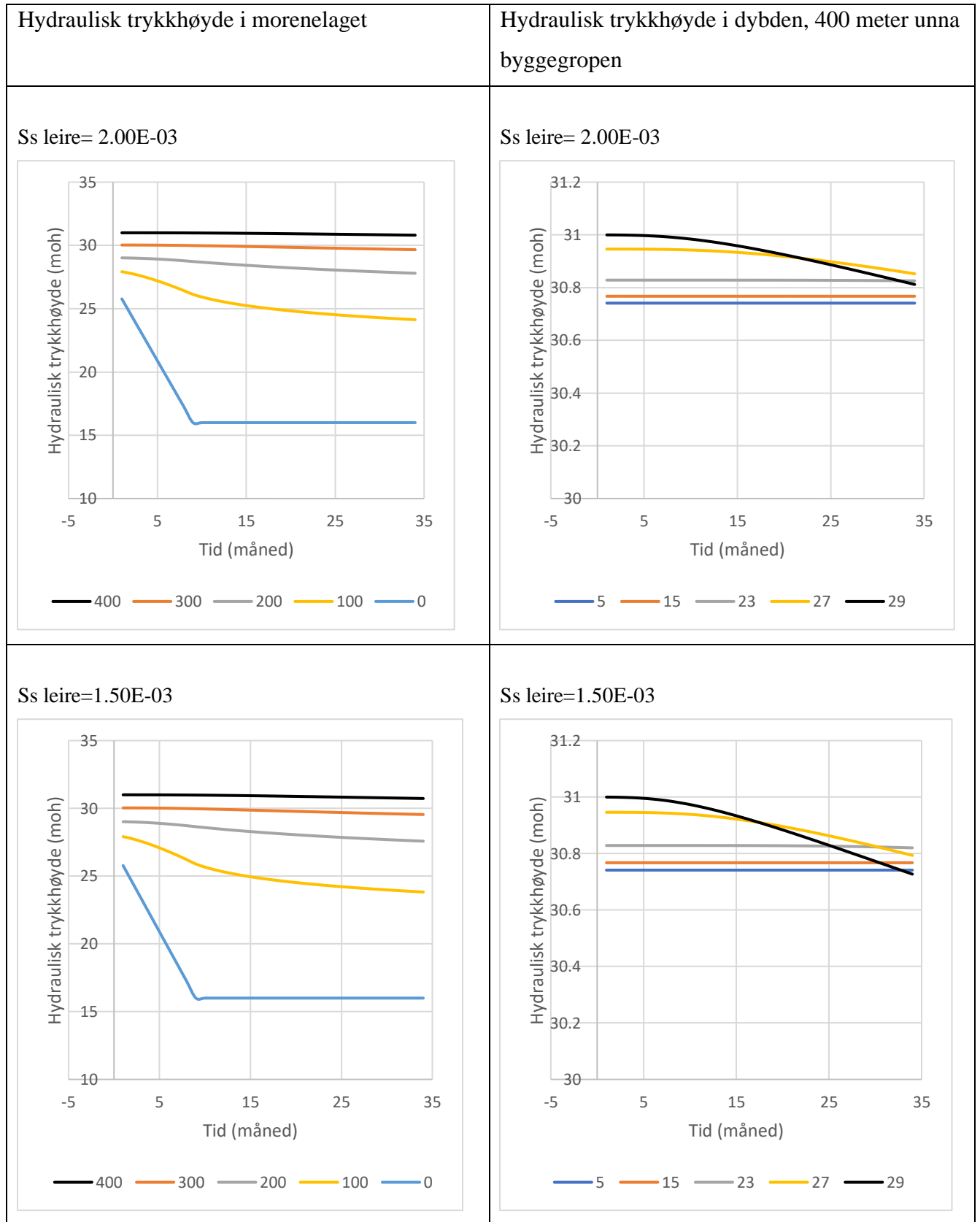
Figur D 2 Utvikling i hydraulisk trykkhøyde med forskjellig tykkelse på morenen.

Vedlegg D - Simuleringsresultat

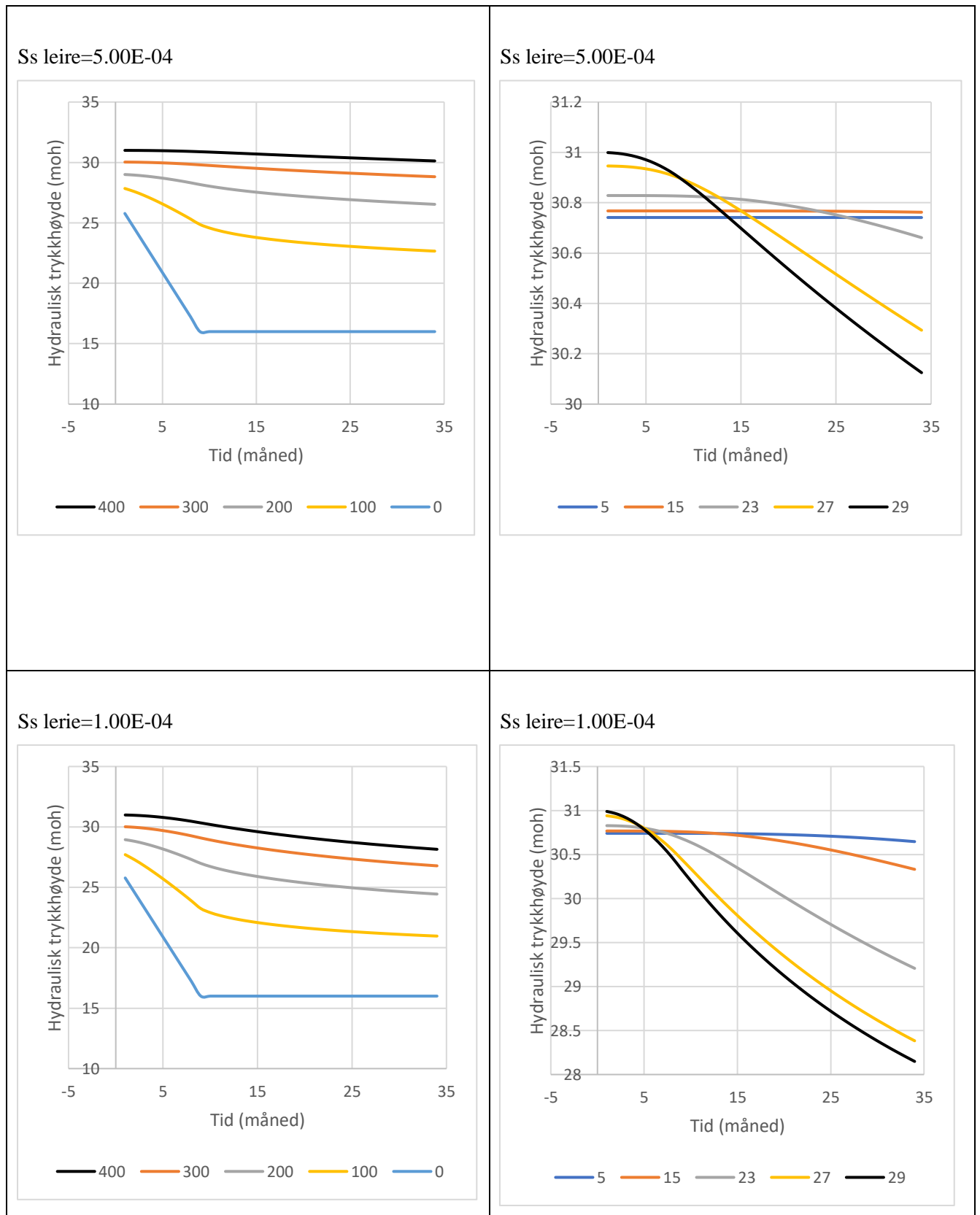


Figur D 3 Resultater fra simuleringer hvor det er variert med spesifikk lagring (Ss) i morenelaget

Vedlegg D - Simuleringsresultat



Vedlegg D - Simuleringsresultat



Figur D 4 Utvikling i hydraulisk trykkehøyde Med forskjellig spesifikk lagring (S_s) verdier i leiren.

Vedlegg E - Setningsberegninger

Tabell E 5 Setningsberegninger rett ved byggegropen

0 meter unna		Før					Etter									
O	Kote	Kote grunnvannstand	Vannspøyte (m)	Poretrykk u0 (kPa)	p0	p'0	Kote grunnvannstand	Vannspøyte (m)	Poretrykk k (kPa)	p'	Delta p	p'c	Tøyning under p'c	Tøyning over p'c	Setning	
0	31												0	0	0	
2	29												0	0	0	
3	28	27.24369	-0.75631	-7.5631	55.5	63.0631	27.24347	-0.75653	-7.56533	63.06533	0.00222053	81.98204	4.44106E-07	0	4.44106E-07	
4	27	27.24369	0.24369	2.436895	74	71.5631	27.24347	0.243467	2.434675	71.56533	0.00222053	93.03204	4.44106E-07	0	4.44106E-07	
5	26	27.24369	1.24369	12.4369	92.5	80.0631	27.24347	1.243467	12.43467	80.06533	0.00222053	104.082	4.44106E-07	0	4.44106E-07	
6	25	27.24369	2.24369	22.4369	111	88.5631	27.24347	2.243467	22.43467	88.56533	0.00222053	115.132	4.44106E-07	0	4.44106E-07	
7	24	27.24369	3.24369	32.4369	129.5	97.0631	27.24347	3.243467	32.43467	97.06533	0.00222053	126.182	4.44106E-07	0	4.44106E-07	
8	23	27.24369	4.24369	42.4369	148	105.5631	27.24347	4.243467	42.43467	105.56533	0.00222053	137.232	4.44106E-07	0	4.44106E-07	
9	22	27.24369	5.24369	52.4369	166.5	114.0631	27.24347	5.243467	52.43467	114.06533	0.00222053	148.282	4.44106E-07	0	4.44106E-07	
10	21	27.22624	6.226239	62.26239	185	122.7376	27.19535	6.195355	61.95355	123.0465	0.30884209	159.5589	6.17684E-05	0	6.17684E-05	
11	20	27.22624	7.226239	72.26239	203.5	131.2376	27.19535	7.195355	71.95355	131.5465	0.30884209	170.6089	6.17684E-05	0	6.17684E-05	
12	19	27.22624	8.226239	82.26239	222	139.7376	27.19535	8.195355	81.95355	140.0465	0.30884209	181.6589	6.17684E-05	0	6.17684E-05	
13	18	27.22624	9.226239	92.26239	240.5	148.2376	27.19535	9.195355	91.95355	148.5465	0.30884209	192.7089	6.17684E-05	0	6.17684E-05	
14	17	27.22624	10.22624	102.2624	259	156.7376	27.19535	10.19535	101.9535	157.0465	0.30884209	203.7589	6.17684E-05	0	6.17684E-05	
15	16	27.22624	11.22624	112.2624	277.5	165.2376	27.19535	11.19535	111.9535	165.5465	0.30884209	214.8089	6.17684E-05	0	6.17684E-05	
16	15	27.22624	12.22624	122.2624	296	173.7376	27.19535	12.19535	121.9535	174.0465	0.30884209	225.8589	6.17684E-05	0	6.17684E-05	
17	14	27.22624	13.22624	132.2624	314.5	182.2376	27.19535	13.19535	131.9535	182.5465	0.30884209	236.9089	6.17684E-05	0	6.17684E-05	
18	13	27.22624	14.22624	142.2624	333	190.7376	27.19535	14.19535	141.9535	191.0465	0.30884209	247.9589	6.17684E-05	0	6.17684E-05	
19	12	27.19771	15.19771	151.9771	351.5	199.5229	26.439	14.439	144.39	207.11	7.587085081	259.3798	0.001517417	0	0.001517417	
20	11	27.18635	16.18635	161.8635	370	208.1365	25.97472	14.97472	149.7472	220.2528	12.11628989	270.5775	0.002423258	0	0.002423258	
21	10	27.16928	17.16928	171.6928	388.5	216.8072	25.11966	15.11966	151.1966	237.3034	20.4962145	281.8493	0.004099243	0	0.004099243	
22	9	27.1457	18.1457	181.457	407	225.543	23.77604	14.77604	147.7604	259.2396	33.69658391	293.2059	0.006739317	0	0.006739317	
23	8	27.11417	19.11417	191.1417	425.5	234.3583	21.87774	13.87774	138.7774	286.7226	52.36428625	304.6658	0.010472857	0	0.010472857	
24	7	27.08617	20.08617	200.8617	444	243.1383	20.24965	13.24965	132.4965	311.5035	68.36519231	316.0797	0.013673038	0	0.013673038	
25	6	27.07066	21.07066	210.7066	462.5	251.7934	19.38293	13.38293	133.8293	328.6707	76.87729807	327.3315	0.015107606	0.000208414	0.015316019	
26	5	27.05339	22.05339	220.5339	481	260.4661	18.46815	13.46815	134.6815	346.3185	85.85245843	338.6059	0.015627963	0.001156034	0.016783997	
27	4	27.03409	23.03409	230.3409	499.5	269.1591	17.5104	13.5104	135.104	364.396	95.23689562	349.9068	0.016149546	0.002093554	0.018243101	
28	3	27.01235	24.01235	240.1235	518	277.8765	16.51477	13.51477	135.1477	382.8523	104.9757574	361.2394	0.01667259	0.003012989	0.019685579	
														Total	0.109512851	
														Total i mm	109	

VEDLEGG F – FLOPY

I dette vedlegget er den ene koden fra Flopy lagt inn. Dette er koden for diagrammet hvor hydraulisk trykkhøyde i morenelaget blir vist i forhold til tid og distanse til byggegroppen. Diagrammet fra referansemodellen er lagt ved.

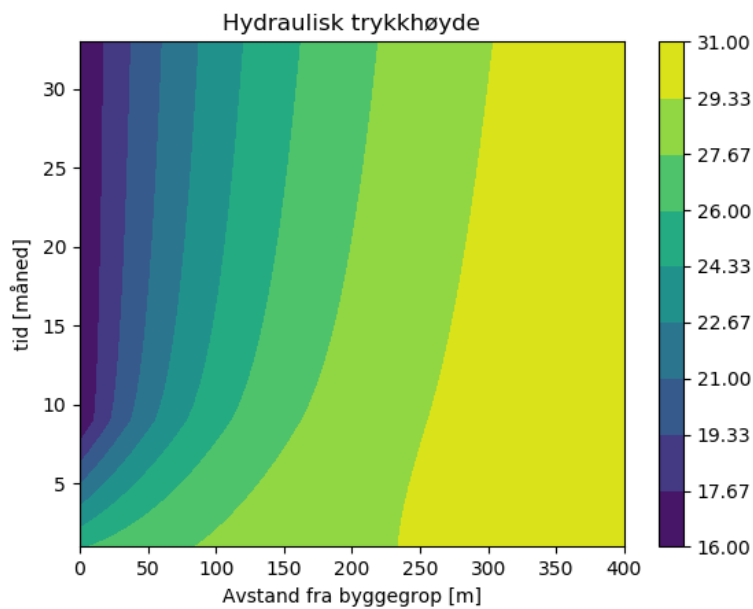
```

1. import flopy.utils.binaryfile as bf
2. import numpy as np
3. import matplotlib.pyplot as plt
4. import pint
5. unit=pint.UnitRegistry()
6.
7.
8. #User input
9. modelnames=['Transient31-27','K2E-6Transient','K1E-8Transient','4mTransient','1mTransient']
10. n_layer_modelmuse=15
11.
12. n_ticks=10
13.
14. x=5*unit.m
15. y=400*unit.m
16. area_layer=x*y
17.
18.
19.
20. # Start of script
21. n_layer=n_layer_modelmuse-1 #Zero indexing conversion
22.
23.
24.
25.
26. for n,modelname in enumerate(modelnames):
27.     #Import data
28.
29.
30.     hdoobj = bf.HeadFile(modelname+'.bhd') #Read Modelmuse result file to object
31.     times=hdoobj.get_times()*unit.s
32.     head_values=hdoobj.get_alldata()
33.     head_values_layer=head_values[:,n_layer,0,:]
34.     n_cells=np.shape(head_values_layer)[1]
35.
36.
37.     x_data =np.linspace(0,y.magnitude,num=n_cells)*unit.m
38.     y_data = times.to('month')

```

Vedlegg F – Flopy

```
39. X, Y = np.meshgrid(x_data.magnitude, y_data.magnitude)
40. Z=np.flip(head_values_layer,1)
41.
42. min_head=np.min(head_values_layer)
43. max_head=np.max(head_values_layer)
44. ticks=np.linspace(min_head,max_head,num=n_ticks)
45.
46. fig,ax=plt.subplots(1,1)
47. cp = ax.contourf(X, Y, Z,levels=ticks)
48. cbar=fig.colorbar(cp) # Add a colorbar to a plot
49. cbar.set_ticks(ticks)
50. ax.set_title('Hydraulisk trykkehøyde')
51. ax.set_xlabel('Avstand fra byggegrøp [m]')
52. ax.set_ylabel('tid [måned]')
53. plt.show()
```



Figur F 1 Diagram fra Flopy, hvor hydraulisk trykkehøyde fra referansemodellen er plottet i forhold til tid og avstand til byggegrøpen



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway