

Hilde Vestre Sem

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

Hilde Vestre Sem

Modellering av endring i ankerkrefter som følge av temperaturendring

Juni 2020



Kunnskap for en bedre verden

Modellering av endring i ankerkrefter som følge av temperaturendring

Hilde Vestre Sem

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2020

Hovedveileder: Steinar Nordal

Medveileder: Bernhard Naglestad og Corneliu Athanasiu

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Institutt for bygg - og miljøteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Norges Teknisk- Naturvitenskapelige Universitet ved Institutt for Bygg- og Miljøteknikk, vårsemesteret 2020. Oppgaven utgjør emnet TBA 4900 Geoteknikk-masteroppgave, og markerer avslutningen på min mastergrad innen Bygg- og miljøteknikk med hovedprofil innen geoteknikk. Den teller 100% av karakteren og dekker dermed hele fagets størrelse på 30 studiepoeng.

Problemformuleringen er utarbeidet i samarbeid med Bernhard Naglestad og Corneliu Athanasiu fra Multiconsult. Avhandlingen baserer seg på målinger gjort i forbindelse med prosjektet Kværnerdammen, der Multiconsult var engasjert som geoteknisk rådgiver ved etableringen av en permanent spuntkonstruksjon. Det er utført målinger for spuntveggen fra utbygging i 2018 til dags dato, som viser en sammenheng mellom temperaturendringer og endringer i ankerkrefter. Det er derfor ønsket å undersøke metoder for å evaluere disse effektene ved dimensjonering.

Jeg ønsker å takke Multiconsult som har vært villige til å distribuere informasjon, rapporter, modeller og beregningsnotater fra prosjektet. Jeg vil også rette en takk til Cautus Geo AS som har gitt tilgang til all måledata fra prosjektet, og til Sigmund Brekke Langelid som ga opplæring i bruk av databasen Cautus Web og ellers har bistått med forklaringer og veiledning for tolkning av målinger. Det rettes en takk til veileder ved NTNU Steinar Nordal for gode innspill og veiledning underveis i prosessen. Til slutt vil jeg rette en spesiell takk til Bernhard Naglestad og Corneliu Athanasiu i Multiconsult, som med stor iver både har bistått med forklaringer og forslag til utvikling og revisjon av beregningsmodellene undersøkt, underveis i prosessen. De har også stilt opp som gode diskusjonspartnere og vist stor interesse og engasjement.

Trondheim, 2020-06-10



Hilde Vestre Sem

Sammendrag

Multiconsult har hatt oppdrag som geoteknisk rådgiver på prosjektet Kværnerdammen. Et av tiltakene som ble utført i forbindelse med prosjektet, var etableringen av en permanent sikringskonstruksjon for å ivareta krav til skråningsstabilitet. I samarbeid med Cautus Geo AS ble det utført en monitorering og overvåkning gjennom byggefase, som utviklet seg til kontinuerlig overvåkning i mer enn et år etter ferdigstillelse. Målingene gjort i permanent fase av prosjektet viser at variasjoner i temperatur ble fulgt av endringer i ankerkrefter. Det var derfor ønskelig å studere målingene av temperatur og ankerkraftvariasjoner videre og finne mulige årsaker til denne sammenhengen.

Målingene fra både lastceller og inklinometre er presentert og sammenlignet. Målingene i lastcellene indikerer en tydelig sammenheng mellom temperaturvariasjoner og variasjoner i ankerkrefter, både i øvre og nedre stegrad. Inklinometermålingene viser mindre systematiske variasjoner, og det er vanskelig å finne en sammenheng mellom temperaturendringer og deformasjon av spuntveggen.

Det er utviklet og sammenlignet to modeller for å evaluere og kvantifisere effektene av temperaturendring. Modell A beregner endring i ankerkraft som følge av termisk lengdetøyning av spuntveggen. Modell B beregner endring i ankerkraft som følge av termisk tøyning i jord. Ved sammenligning med målte resultater gir ingen av de to modellene tilfredsstillende resultat alene. En kombinasjon av de to modellene viser seg imidlertid å gi variasjoner i ankerkrefter som stemmer svært godt med de variasjonene som er målt i ankerstagene. Denne beregningen viser også at den forventede årstidsvariasjonen i deformasjon av spuntveggen er svært liten. Variasjoner av denne størrelsen er vanskelig å måle med et inklinometer. Følgelig viser det seg at beregningsmodellen som tar hensyn til både effekten termisk tøyning i jord og termisk tøyning i spuntveggen, gir resultater som stemmer godt med det som er målt i virkeligheten. Det skal imidlertid påpekes at flere av parametrene i denne modellen er svært usikre. Analyser utført i denne avhandlingen viser også at endring av disse parametrene kan gi stort utslag i beregningene. Det er derfor usikkerheter ved modellen som bør utbedres før man kan vurdere å benytte den i ingeniørpraksis.

Abstract

Multiconsult was assigned as a geotechnical advisor at one of the Kværnerdammen project. One measure that was done was the establishment of a permanent sheet pile wall (SPW). In collaboration with Cautus Geo AS, the SPW was monitored through the construction phase. This evolved into continuous monitoring for more than a year after completion. The measurements from the permanent phase of project indicates that variations in temperature are followed by changes in anchor forces. It was therefore chosen to study the measurements of temperature and anchor force variations further and find possible causes for this connection.

The measurements from both load cells and inclinometers are presented and compared. The measurements in the load cells indicate a clear correlation between temperature variations and variations in anchor forces, both in the upper and lower row of anchors. The inclinometer measurements show less systematic variations, and a correlation between temperature changes and the measured deformation of the SPW was not found.

Two calculation models for evaluation and quantification of the effect of temperature changes, have been developed and compared. Model A calculates the change in anchor force resulting from thermal strains in the SPW. Model B calculates change in anchor force resulting from thermal strains in soil. When compared to measured results, none of the models gave acceptable results alone. However, a combination of the two calculation models turns out to give variations in the anchor force that match very well with the variation that are measured in the anchors. This calculation also shows that the expected seasonal variation in the deformation of the SPW small. Variations of this size are difficult to measure with an inclinometer. Hence, the the combination of the two models, that takes into account both effective thermal strain in soil and thermal strain in the SPW, shows results that corresponds well with the measurements. However, several parameters in these models are uncertain. The analyzes made in this thesis, also show that changing these parameters, has significant effect on the results of the calculations. Therefore, there is uncertainty associated with these models, that needs to be rectified before considering using it in engineering practice.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemformulering og avgrensning av oppgaven	1
1.3 Oppgavens oppbygning	3
2 Metode	4
2.1 Litteraturstudium	4
2.2 Analyse av beregningsmodeller	5
3 Teori	6
3.1 Temperaturendringer i leire	6
3.1.1 Laboratorieundersøkelser på termisk tøying i leire	6
3.1.2 Drenert og udrenert tilstand	10
3.2 Grunnleggende mekaniske sammenhenger	12
3.2.1 Elastisitet	12
3.2.2 Temperaturutvidelse i metaller	13
3.3 Beregningsmodeller	14
3.3.1 Modell A - termisk tøying i spuntvegg	14
3.3.2 Håndberegninger	19
3.3.3 Modell B - termisk tøying i jorda	23
3.3.4 Beregning av opptredende ankerkraft	26
4 Prosjektet	28
4.1 Informasjon om tiltaksområdet	28
4.1.1 Kort omtale av prosjektet	28
4.1.2 Grunnforhold	29

4.2	Eablering av sikringskonstruksjonen	31
4.3	Overvåkning og monitorering	35
5	Inputparametre	38
5.1	Modell A - termisk tøyning kun av spuntvegg	38
5.1.1	Geomteridata	38
5.1.2	Parametre for strukturelle komponenter	39
5.1.3	Lagdelling	40
5.1.4	Temperaturrendring	46
5.1.5	Referanseverdi	48
5.1.6	Analyser	48
5.2	Håndberegning	49
5.2.1	Parametre for strukturelle komponenter	49
5.2.2	Temperaturrendring	50
5.3	Modell B - termisk tøyning i jord	52
5.3.1	Parametere for jordlagene	52
5.3.2	Temperaturrendring	55
5.3.3	Analyser for Modell B	56
5.4	Kombinasjon av de to modellene	56
6	Resultater	58
6.1	Målinger fra lastceller	58
6.2	Målinger i inklinometre	61
6.2.1	X-deformasjon	62
6.2.2	Y-deformasjon	66
6.3	Modell A - termisk tøyning kun i spunt	68
6.3.1	Analyse A1	68
6.3.2	Analyse A2	70
6.3.3	Analyse A3	71
6.4	Håndberegninger	73
6.5	Modell B - termisk tøyning i leire	74
6.5.1	Analyse B1	74
6.5.2	Analyse B2	75
6.5.3	Analyse B3	76
6.6	Kombinasjon av Modell A og Modell B	77
7	Diskusjon av resultater	81
7.1	Målinger	81

INNHold

7.2	Beregninger	83
7.2.1	Modell A - termisk tøying kun i spuntvegg	83
7.2.2	Håndberegning	83
7.2.3	Modell B - termisk tøying i leire	84
7.2.4	Kombinasjon av de to modellene	85
7.3	Parameterbestemmelse	86
7.4	Årstidsvariasjoner i dimensjoneringssammenheng	86
8	Konklusjon og videre arbeid	89
8.1	Konklusjon	89
8.2	Forslag til videre arbeid	91
	Referanser	93
A	Symboler	95
A.1	Norsk	95
A.2	Gresk	96
A.3	Forkortelser	96
A.4	SI-enheter	96
B	Justering av referanseverdi	98
C	Vedlegg til Kapittel 4	102
C.1	Utgravingsprosessen	103
C.2	KS-stabilisering	108
C.3	Etablering av permanente stag	109
D	Vedlegg til Kapittel 5	110
D.1	Tilpasning i PLAXIS Soil test	110
D.2	Temperaturmålinger	115
D.3	Lagdelling	117
E	Vedlegg til Kapittel 6	120
E.1	Deformasjon beregnet med Modell B	120
E.1.1	Analyse B1	120
E.1.2	Analyse B2	122
E.1.3	Analyse B3	123

Tabeller

4.1	Inklinometrene som ble benyttet i prosjektet	36
5.1	Inputparametre for spuntvegg delt inn i elementer og noder	39
5.2	Materialparametre	40
5.3	Lagdeling ved spunt	45
5.4	Inputparametre i Modell A for de 4 lagene ved spunt	45
5.5	Verdier av ΔT relativt til juni 18, ved ulike koter, redusert til én desimal. Ved spuntfoten er $dZ=0$	46
5.6	Verdier av ΔT relativt til juni 18, ved ulike koter, redusert til én desimal. Ved spuntfoten er $dZ=0$	47
5.7	Opprinnelig og justert referanseverdi for ankerkraft N_{ref}	48
5.8	Analysert	49
5.9	Inputverdier for strukturelle komponenter	50
5.10	Gjennomsnittlig temperaturendring (relativt til juni 18) i del A og del B av spuntveggen	51
5.11	Verdier for termisk volumutvidelse i OC-leire (tolket fra Figur 3.1 i Kapittel 3	54
5.12	Målt temperaturendring (relativt til juni 18) ved ankerhodet for stagrad 1 og 2	55
5.13	Analysert utført for Modell B	56
7.1	Sammenligning av parametrene som er analysert	86
B.1	Opprinnelig og justert referanseverdi for ankerkraft	98
D.1	Temperatur målt i inklinometer 1 kl. 00:00:0 første dag gitt måned	116

Figurer

3.1 Volumetrisk tøyning vs. temperatur beregnet etter interpolasjon ved termoelastisk modell og fra eksperiment for (a) Pontida siltig leire og (b) Boom leire (Baldi, Hueckel & Pellegrini, 1988). Negativ tøyning er definert som volumutvidelse.	8
3.2 Volumetrisk termisk tøyning vs. temperatur for (a) Pontida siltig leire ved 0,5 MPa og OCR2 og (b) normalkonsolidert prøve av Boom leire (Baldi et al., 1988)	9
3.3 Overgangen fra udrenert til drenert tilstand (Nordal, 2019)	11
3.4 Et legeme i strekk som utvider seg med en lengde ΔL	12
3.5 Spunt som utvider seg en lengde ΔL_{spunt} og dytter staghodet oppover slik at ankerstaget utvider seg en lengde δ_{stag}	14
3.6 Komponentene av aksialkraften i ankerstaget per lineære meter av spuntveggen	15
3.7 Utsnitt av spuntvegg delt inn i diskrete elementer koblet med nodepunkter mellom hvert element	16
3.8 Illustrasjon av hvordan friksjon fra jorda motvirker termisk lengdeutvidelse i veggen	17
3.9 Sikringskonstruksjonen med dimensjoner	19
3.10 Spuntkonstruksjonen delt inn i to beregningssystemer	20
3.11 System 1 med lokasjon og retning for ytre krefter	20
3.12 System 2 med ytre krefter	22
3.13 Spuntvegg med jordlag som utvider seg ved temperaturøkning	24
3.14 Jordlaget som utvider seg	24
3.15 Geometri og krefter for staget ved temperaturutvidelse av bakenforliggende jordlag	25
4.1 Oversiktskart med plassering av Kværnerdammen (Nielsen, 2016)	29
4.2 Utsnitt av bergkotekart basert på tilgjengelige grunnundersøkelser (Nielsen & Frossard, 2017)	30
4.3 Plantegning som viser spunt og koter for utgravingsnivåer (Knutsen, 2017d)	31
4.4 Skråningen før utgraving	32
4.5 Skråningen etter utgraving til endelig utgravingsnivå	33
4.6 Arbeidstegning av spuntkonstruksjonen og kjeller (Sandbakk, 2017)	33
4.7 Detaljtegning av spuntkonstruksjonen og kjeller (EDS, 2017)	34

4.8	Plassering av inklinometer 1, 2 og 3 (oransje nummererte stjerner), lastceller (grønne trekkanter), poretrykksmålere (blå ring) og vibrasjonsmålere (brune prikker) (Langelid & Naglestad, 2019).	35
4.9	Utsnitt fra spuntoppriss som viser plassering av inklinometere og lastceller på spunt ihht. Ulvestad (2017)	37
5.1	Dimensjoner for stag og spuntvegg. Ved beregning med modell B er spuntveggen er delt inn i elementer (blå rektangler) med noder (røde prikker) mellom hvert element.	39
5.2	Oversiktskart med beregningssnitt benyttet i dimensjonering	41
5.3	Sonderinger og tolket lagdeling for Profil B (Nielsen & Frossard, 2017)	42
5.4	Antatt lagdeling for Modell A. Nodenummer er angitt i noder som skiller to lag og i noder der stagene er festet	43
5.5	Triaxprøver for kompresjon plottet mot resultater i PLAXIS Soil test (Nielsen & Frossard, 2017)	44
5.6	Triaxprøver for kompresjon plottet mot resultater tilpasset i PLAXIS Soil test (Nielsen & Frossard, 2017)	44
5.7	Triaxprøver for forlengelse plottet mot resultater i PLAXIS Soil test (Nielsen & Frossard, 2017)	45
5.8	Sikringskonstruksjonen med dimensjoner	50
5.9	Dimensjoner av jordlaget som utvider seg ved oppvarming av leira	52
6.1	Grafen viser last målt i øvre og nedre lastcelle fra juni 2018. Startpunkt permanent fase (juni 2018) vises her som 0 kN. Temperatur internt i lastcellen er plottet for samme periode og angitt på y-aksen til venstre	59
6.2	Ankerkraft og temperatur målt i øvre lastcelle	60
6.3	Ankerkraft og temperatur målt i nedre lastcelle	60
6.4	Samlet plott av lastendring målt i øvre og nedre lastcelle samt nedbør målt ved Blindern målestasjon	61
6.5	Samlet plott av endring i ankerkrefter og nedbør målt i slutten av august 2019	61
6.6	Retning for X- og Y- deformasjoner av spuntveggen. Nordsør-pila viser orientering i luftretning	62
6.7	Målinger av dX fra inklinometer 1 (relativt til juli 18) plottet for 6 ulike måneder	63
6.8	Målinger av dX fra inklinometer 2 (relativt til juli 18) plottet for 6 ulike måneder	63
6.9	Målinger av dX fra inklinometer 3 (relativt til juli 18) plottet for 6 ulike måneder	64
6.10	Deformasjon i x-retning målt i høyde 6m og 8,5 m. Målingene er hentet fra inklinometer 2.	65
6.11	Ankerkraft beregnet ved Hookes lov ut ifra dX målt i inklinometer 2	65
6.12	Målinger fra inklinometer 1 (relativt til juli 18) plottet for 6 ulike måneder	66
6.13	Målinger fra inklinometer 2 (relativt til juli 18) plottet for 6 ulike måneder	67
6.14	Målinger fra inklinometer 3 (relativt til juli 18) plottet for 6 ulike måneder	67
6.15	Deformasjon i y-retning målt i høyde 6m og 8,5 m. Målingene er hentet fra inklinometer 2.	68
6.16	Kraft i øvre stegrad (N1) beregnet for ulike verdier av t, plottet sammen med målinger i øvre lastcelle	69
6.17	Kraft i nedre stegrad (N2) beregnet for ulike verdier av t, plottet sammen med målinger i nedre lastcelle	69
6.18	Kraft i øvre stegrad (N1) beregnet for antatt verdi av G ($G = G_0$) og $G=0,1$ kPa, plottet sammen med målinger i øvre lastcelle	70

6.19 Kraft i nedre stagrad (N2) beregnet for antatt verdi av G ($G = G_0$) og $G=0,1$ kPa, plottet sammen med målinger i nedre lastcelle	71
6.20 Kraft i øvre stagrad (N1) beregnet for ulike verdier av f_{temp} , plottet sammen med målinger i øvre lastcelle	72
6.21 Kraft i nedre stagrad (N2) beregnet for ulike verdier av f_{temp} , plottet sammen med målinger i nedre lastcelle	72
6.22 Håndberegninger for N1 plottet med beregninger med Modell A med $G=0,1$ kPa	73
6.23 Håndberegninger for N2 plottet med beregninger med Modell A med $G=0,1$ kPa	73
6.24 Kraft i øvre stagrad (N1) beregnet for ulike verdier av α_{jord} , plottet sammen med målinger i øvre lastcelle	74
6.25 Kraft i nedre stagrad (N2) beregnet for ulike verdier av α_{jord} , plottet sammen med målinger i nedre lastcelle	74
6.26 Kraft i øvre stagrad (N1) beregnet for ulike verdier av h , plottet sammen med målinger i øvre lastcelle	75
6.27 Kraft i nedre stagrad (N2) beregnet for ulike verdier av h , plottet sammen med målinger i nedre lastcelle	76
6.28 Kraft i øvre stagrad (N1) beregnet for ulike verdier av L , plottet sammen med målinger i øvre lastcelle	77
6.29 Kraft i nedre stagrad (N2) beregnet for ulike verdier av L , plottet sammen med målinger i nedre lastcelle	77
6.30 Kraft i øvre stagrad (N1) beregnet ved en kombinasjon av Modell A og Modell, plottet sammen med målinger i øvre lastcelle	78
6.31 Kraft i nedre stagrad (N2) beregnet ved en kombinasjon av Modell A og Modell, plottet sammen med målinger i nedre lastcelle	78
6.32 Deformasjon dX beregnet for to punkter på spuntveggen - ved øvre og nedre stagrad	79
7.1 Ankerkraft målt i øvre lastcelle plottet sammen med ankerkraft beregnet ut ifra deformasjonen dX av spuntveggen	82
7.2 Ankerkraft målt i nedre lastcelle plottet sammen med ankerkraft beregnet ut ifra deformasjonen dX av spuntveggen	82
7.3 Plott av differansen mellom målt og beregnet ankerkraft for kombinert modell	85
B.1 Plott av Beregning A1.2 for målt og justert referanseverdi	99
B.2 Plott av Beregning A1.2 for målt og justert referanseverdi	99
B.3 Plott av Beregning A1.2 for målt og justert referanseverdi	100
B.4 Plott av Beregning A1.2 for målt og justert referanseverdi	100
C.1 Snitt av den ferdigstilte spuntkonstruksjonen før siste utgravingsfase (Knutsen, 2017d)	103
C.2 Fase 1 av utgravingsprosessen (Knutsen, 2017d)	104
C.3 Fase 2 av utgravingsprosessen (Knutsen, 2017d)	105
C.4 Fase 3 av utgravingsprosessen (Knutsen, 2017d)	105
C.5 Fase 4 av utgravingsprosessen (Knutsen, 2017d)	106
C.6 Fase 5 av utgravingsprosessen (Knutsen, 2017d)	107
C.7 Skisse av mønster for installasjon av kalksementpæler (Knutsen, 2017b)	108

D.1 Triaxprøver for kompresjon plottet mot resultater i PLAXIS Soil test (Nielsen & Frossard, 2017)	111
D.2 Triaxprøver for kompresjon plottet mot resultater i PLAXIS Soil test (Nielsen & Frossard, 2017)	112
D.3 Triaxprøver for forlengelse plottet mot resultater i PLAXIS Soil test (Nielsen & Frossard, 2017)	113
D.4 Kart med plassering av borhull MC1 (høyre) og MC4 (venstre)markert i gult (Nielsen & Frossard, 2017)	114
D.5 Sonderinger og tolket lagdeling (Nielsen & Frossard, 2017)	118
E.1 Beregnet deformasjon ved øvre stagfeste for Analyse B1	120
E.2 Beregnet deformasjon ved nedre stagfeste for Analyse B1	121
E.3 Beregnet deformasjon ved øvre stagfeste for Analyse B2	122
E.4 Beregnet deformasjon ved nedre stagfeste for Analyse B2	122
E.5 Beregnet deformasjon ved øvre stagfeste for Analyse B3	123
E.6 Beregnet deformasjon ved nedre stagfeste for Analyse B3	123

Kapittel 1

Innledning

1.1 Bakgrunn

Multiconsult hadde oppdrag som geoteknisk rådgiver på prosjektet Kværnerbyen felt F1, også kalt Kværnerdammen. Et av tiltakene som ble utført i forbindelse med prosjektet var etableringen av en permanent sikringskonstruksjon for å ivareta krav til skråningsstabilitet. Multiconsult og Cautus Geo AS har siden sommeren 2017 jobbet med et samarbeid kalt «FoU - forskning og utvikling». Dette samarbeidet fokuserer på sikringskonstruksjoner i kompliserte grunnforhold, og aspektene knyttet til samhandling mellom prosjektering, sikkerhet, overvåkning og varsling (Langelid & Naglestad, 2019). Cautus Geo AS er en bedrift som jobber med utvikling, etablering og drift av forskjellige automatiske målesystemer og overvåkningsløsninger, og ble engasjert av Multiconsult for å bidra på prosjekt Kværnerdammen. Det ble utført overvåkning og monitorering av sikringskonstruksjonen under etablering. Som en del av FoU-samarbeidet er denne overvåkningen blitt videreført i nesten 2 år etter ferdigstilling.

Langelid og Naglestad (2019) har i forbindelse med Geodagen 2019 utarbeidet en rapport der målinger for nevnte spuntkonstruksjon er analysert. Målingene for permanent fase viste at variasjoner i temperatur ble fulgt av endringer i ankerkrefter. Det var derfor ønskelig å undersøke effekten av klimavariasjoner på ankerkreftene, og finne metoder for å evaluere slike effekter.

1.2 Problemformulering og avgrensning av oppgaven

Hvilke effekter kan være årsak til den observerte sammenhengen mellom temperaturendringer og endring i ankerkraft for en permanent spuntkonstruksjon? Hvordan kan temperatureffekten på ankerkreftene i en spuntkonstruksjon modelleres?

Mål og tilnærming

For å komme frem til et svar på problemstillingen er det satt opp følgende delmål:

1. Gjennomføre et litteraturstudie for å kartlegge tidligere arbeid med tilknytning til temaet
2. Studere målinger av temperatur, ankerlaster og deformasjoner i spuntkonstruksjonen ved Kværnerdammen, utført over en lengre periode
3. Utvikle og tilpasse beregningsmodeller basert på de analyserte målingene samt kunnskap opparbeidet i litteraturstudiet
4. Finne representative parametre for spuntkonstruksjonen og jorda i området
5. Teste beregningsmodellene og sammenligne resultatene opp mot feltmålinger

Det første delmålet skal besvares ved et litteraturstudie som består av to deler. Første del innebærer et studie av relevante informasjon om hvordan jord og spuntkonstruksjoner kan påvirkes av temperaturendring. Hovedvekten av litteraturstudiet ligger på publiserte laboratoriestudier av temperaturendring i jord og spesielt leire. Dette er et tema der det er utført flere studier, men disse har tidvis gitt svært ulike resultater. Det vil derfor bli presentert resultater fra flere studier og en vurdering av hva kan være årsaken splid i resultatene.

For delmål to skal det utføres en analyse av måledataene for å identifisere og presentere effekten temperaturendringer har på spuntkonstruksjonen. Kvantitative verdier for svingningene i ankerkrefter skal identifiseres og brukes til sammenligning når beregningsmodellene testes.

Delmål tre - basert på litteraturstudiet og analyse av måledata blir det utviklet beregningsmodeller for å beregne endringen i ankerkrefter som et resultat av sesongavhengige temperaturvariasjoner.

Fjerde delmål skal besvares ved å se på grunnundersøkelsene gjort i det aktuelle området, og vurderingene gjort ved dimensjonering av spuntveggen. Ved mangel på felt- og labundersøkelser i parameterbestemmelse vil det bli gjort antagelser.

For siste delmål skal det utføres testing av beregningsmodellene og eventuelle tilpassede modeller, for så å sammenligne resultatene med verdier hentet ut fra feltmålingene. Det vil også bli utført analyser der de mest usikre inputparametrene varieres. Med disse analysene er det ønsket å avdekke hvor stort utslag eventuelle feilantagelser for disse parametrene vil gi, og dermed også hvor presis parameterbestemmelsen må være for å gi en sikker beregning.

Avgrensning av oppgaven

Målingene som er observert viser større ankerkrefter i sommermånedene, og mindre ankerkrefter i vintermånedene. Det antas derfor at variasjonene i ankerkrefter kan ha sammenheng med klimavariasjoner som temperatur og nedbør. Denne avhandlingen legger hovedvekt på temperatur som mulig årsak. Modellene som er utviklet og undersøkt baserer seg derfor bare på fenomener som forekommer ved temperaturendring. Det vil bli utført en kort analyse av

nedbørsmålinger for å avklare hvordan disse kan påvirke ankerkreftene, men hovedfokus for denne oppgaven er effekten av temperaturendringer.

Beregningene utført for beregningsmodellene er avgrenset til å gi resultater for perioden mellom 1.juni 2018, som ansees som starten av permanent fase (Langelid & Naglestad, 2019), og 1.september 2019. Dette tidsrommet på litt over et år er ansett som tilstrekkelig da det gir oversikt over en hel klimasyklus. Samtidig vil måledata analyseres for hele perioden, mellom 1.juni 2018 og 1.mars 2020. Dette har gjort det mulig å utelukke store abnormaliteter i målingene i tidsrommet beregningene er utført for.

Denne oppgaven er avgrenset til å kun undersøke termisk tøyning i spuntvegg og termisk tøyning i jord, som mulig årsak til variasjonene observert i ankerstagene. Disse to fenomenene er valgt da introduksjonsberegninger indikerte at de kunne gi endringer lignende de som er observert. Det er allikevel ikke utelukket at andre fenomener kan være viktige bidrag til variasjonene som forekommer.

Opgaven er begrenset til å kun fokusere på ett prosjekt. Dette valget er tatt fordi det må utføres målinger i lang tid etter at permanent fase er nådd for å kunne undersøke årstidsvariasjonene som er tema i denne avhandlingen. Dette prosjektet synes å være unikt i denne sammenhengen, da litteraturstudiet ikke har kunnet avdekke andre prosjekter der det er utført like grundige målinger over tilsvarende tidsrom.

Det er utført en analyse av to beregningsmodeller. Det vil fremkomme av oppgaven at flere av inputparametrene er svært usikre. Studiet som er utført er avgrenset til å teste modellene, og hvorvidt disse kan manipuleres til å gi resultater som ligner på de som er målt. Et mer omfattende parameterstudie supplementert av målrettede laboratorieundersøkelser vil kunne relevant som fremtidig arbeid.

1.3 Oppgavens oppbygning

I det følgende vil det i Kapittel 2 bli gjort en vurdering av studiets metode, der styrker og svaheter blir kommentert. I Kapittel 3 vil det teoretiske grunnlaget for oppgaven bli presentert. Det vil bli gjengitt faglitteratur, samt gitt en gjennomgang av ulike studier på termisk tøyning i leire. Deretter vil modellene som skal testes i denne avhandlingen bli beskrevet. Kapittel 4 gis en gjennomgang av oppgavens referanseprosjekt Kværnerdammen. Deretter blir valg av inputparametre i modellene gjort rede for i Kapittel 5. Her blir ulike beregningsanalyser presentert. Resultatene av både målinger og beregninger blir presentert i Kapittel 6 og videre diskutert i Kapittel 7. Avslutningsvis vil det i Kapittel 8 bli gitt en oppsummering av oppgaven etterfulgt av en konklusjon og forslag til videre arbeid.

Etter innholdsfortegnelsen er det gitt en liste over tabeller og figurer. Vedlegg er gitt som supplement i slutten av oppgaven.

Kapittel 2

Metode

2.1 Litteraturstudium

Det er som nevnt i Kapittel 1 utført er litteraturstudie i prosessen med å besvare problemstillingen for denne avhandlingen. Universitetsbibliotekets søkeverktøy, med tilgang til ulike databaser, ble brukt som en del av dette studiet. De mest brukte databasene har vært American Society of Civil Engineers (ASCE) og Canadian Geotechnical Journal. Søkemotorene Google og Google Scholar ble også brukt for å finne relevant litteratur. Litteraturen som ble funnet gjennom de nevnte søkene har blitt vurdert med fokus på objektivitet, troverdighet og egnethet. Basert på disse vurderingene er det avgjort hvilke kilder som tilbyr pålitelig informasjon, og kan brukes for å besvare problemstillingen.

Som en del av litteraturstudiet ble enkeltpersoner i firmaene Multiconsult og Cautus Geo AS kontaktet for å få tilgang til litteratur som ikke var tilgjengelig gjennom de nevnte kildene. Her trekkes Sigmund Brekke i Cautus Geo AS spesielt frem, ettersom han bistod med viktige artikler og produktblader om målingene gjort i forbindelse med Kværnerdammenprosjektet. Disse kildene ble også vurdert på samme måte som de ovennevnte.

Styrker og svakheter ved litteraturstudiet

Det ble lagt fokus på forfatterens faglige bakgrunn og kompetanse innenfor det aktuelle temaet, samt antall ganger kilden er blitt referert til i senere tid, for å bedømme kildens troverdighet og objektivitet.

Trykte bøker og kompendier som eksplisitt omtaler hvordan temperaturendringer påvirker jord ved plussgrader lot seg ikke oppdrive. Dette anses ikke som en vesentlig begrensning, da det var god tilgang på publikasjoner digitalt. Det medførte imidlertid at litteratursøket ikke ga et klart entydig bilde av temperatureffektene på jord, ettersom enkelte av publikasjonene motsier hverandre. Dette er også presisert når resultatet av litteraturstudiet presenteres i Kapittel 3.

2.2 Analyse av beregningsmodeller

Det vil bli presentert to mulige årsaker til årstidsvariasjon i ankerkrefter - termisk lengdeutvidelse i spuntveggen i vertikal retning og termisk jordutvidelse bak veggen i horisontalretning. Førstnevnte beregnes med Modell A, som er utviklet av Multiconsult i forbindelse med denne oppgaven. Denne modellen etterprøves ved håndberegninger. For jordutvidelse er det utviklet en modell basert på litteraturstudiet som er utført, kalt Modell B. For begge modellene utføres et parameterstudie i form av flere analyser for å avgjøre hvordan enkelte parametre påvirker beregningene. Basert på disse analysene blir det utført en siste beregning med parametrene som gir det resultatet som stemmer best med de målte verdiene.

Styrker og svakheter

Modell A er ikke testet av andre enn utviklerne i Multiconsult og undertegnende. Dette gir rom for feil i modellen, og håndberegningene ble derfor utført som en kontroll. Modellen for termisk jordutvidelse er kun testet av undertegnende. Kontroll i form av håndberegninger er ikke utført for denne modellen. Det er imidlertid utført flere analyser med variasjoner i inputparametrene, for begge modeller. I disse analysene ble det etterprøvd om modellene ga resultater som forventet. Dette ga mulighet til å kontrollere for systematiske feil ved å sammenligne resultatene med det som var forventet, samt luke ut uteliggere.

Det kan argumenteres for at metoden med å utføre analyser av hvordan parametrene påvirker resultatet for så å manipulere beregningene til å gi resultater som ligner målingene, kan gi en falsk tillit til modellen. Det er derfor viktig å påpeke at dette studiet alene ikke kan vise at modellen stemmer. Dette studiet kan imidlertid teste om modellen ikke stemmer, samt gi et grunnlag for å tro at den stemmer dersom valg av inputparametre underbygges av et utvidet studie.

Kapittel 3

Teori

Når en sikringskonstruksjon dimensjoneres er det flere ting som må tas hensyn til. Ytre laster som for eksempel en gang og sykkelvei, jordforholdene der den står og materialene konstruksjonen skal utføres i er kritisk informasjon for å utvikle en sikker konstruksjon. I denne seksjonen presenteres teori hentet fra litteraturen, rundt hvordan disse forholdene kan påvirkes av temperaturendringer

3.1 Temperaturendringer i leire

Termisk tøying er tøying induisert av temperaturendringer. Flere publikasjoner har uttalt seg om hvordan termisk tøying utarter seg i leire.

3.1.1 Laboratorieundersøkelser på termisk tøying i leire

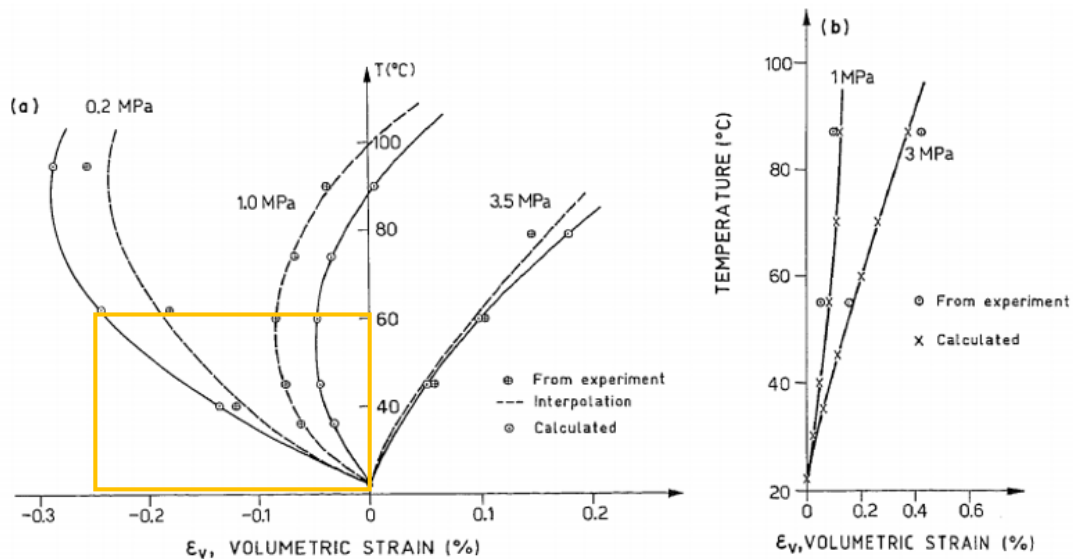
Termisk tøying i mettede leirer er et resultat av: (i)utvidelse av leirmineralene (ii)omorganisering av kornstrukturen (iii)vannforhold og (iv)dreneringsforhold. Generelt er omorganiseringen som oppstår under oppvarming og ved høye temperaturer, ansvarlig for mesteparten av volumdeformasjonene, siden virkningen av termisk ekspansjon av de faste kornene er liten (Burghignoli, Desideri & Miliziano, 2000). Campanella og Mitchell (1968) utviklet en modell for mettede leirer basert på disse konseptene. De etablerte da en tolkningen av termiske tøyninger i leirer basert på to essensielle hypoteser:

1. Den termiske ekspansjonskoeffisienten av jordskjelettet er konstant og negativ pga. fysiokjemiske effekter av volumendring.
2. Leirvann ekspanderer som rent vann gjør ved atmosfærisk trykk.

Begge disse påstandene ble bekreftet eksperimentelt for leirprøver med relativt høyt vanninnhold og lave effektivspenninger(Campanella & Mitchell, 1968). Resultatene i studien indikerte at en økning i temperatur under drenerte

forhold ga en volumreduksjon i jorda. Dette fenomenet har blitt bekreftet i flere senere studier, deriblant av [Demars og Charles \(1982\)](#) og [Desideri \(1988\)](#). Demars og Charles fant imidlertid ut at den termiske oppførselen for en marin omrørt leire under isotropiske forhold, var uavhengig av den gjennomsnittlige effektivspenningen, men sterkt knyttet til overkonsolideringsraten (OCR). Overkonsolideringsraten er forholdet mellom effektivspenningen jorda påføres nå ($\sigma'_{v,0}$) og den høyeste spenningen jorda har blitt utsatt og konsolidert for tidligere (σ'_c). Årsaker til overkonsolidering kan være trykk fra isbre som har smeltet bort, tidligere ovenforliggende jordlag som er erodert bort, endringer i vannnivå osv. I overkonsolidert jord har de svakeste leddene i jordstrukturen allerede blitt brutt ned og motstanden mot deformasjoner opp til prekonsolideringsnivået ($\sigma'_{v,0} < \sigma'_c$) kan derfor være betydelige ([Amundsen et al., 1970](#)). I tillegg til den termiske oppførselens tilknytning til overkonsolideringsraten fant Demars og Charles også ut at endringen i porevolum Δe (som gir volumreduksjon) er omvendt proporsjonal med plastisiteten i jorda. Forholdet mellom plastisitetsindeksen og Δe_{st} er tilnærmet lineær. Derfor er jordarter med høy plastisitet mer utsatt for volumendringer enn jordarter med lav plastisitet.

[Habibagahi \(1977\)](#) observerte volumreduksjon ved oppvarming av en omrørt siltig leire i ødometer tester. For overkonsoliderte prøver ble det imidlertid observert volumøkning induisert av en økning i temperatur. Dette ble av Habibagahi tolket som underekperimentelle feil. Noen år senere viste [Miliziano \(1992\)](#) og [Towhata, Kuntiwattanaku, Seko og Ohishi \(1993\)](#) at oppvarming av en omrørt leire produserte *økning* i volum for noen av prøvene. Normal-konsoliderte leirer viste volumreduksjon imens overkonsoliderte leirer kunne vise volumøkning ved oppvarming. [Baldi et al. \(1988\)](#) fikk lignende resultater i et studie av lite porøse leirer. I deres studie ble termale tøyninger studert under drenerte forhold, ved ulike konstante isotropiske effektivspenninger. Resultatene indikerte en sammenheng mellom termisk tøyning og temperatur og effektivspenningstilstanden. Den målte termiske volumetriske tøyningen viste volumøkning ved lave verdier av isotropisk spenning og volumreduksjon ved høye verdier. Ved mellomstore effektivspenninger (0,5-1,0 MPa) kunne volumøkning observeres ved lave temperaturer og volumreduksjon ved høye temperaturer, som vist i Figur 3.1. I området markert med en gul firkant i figuren ble det observert volumutvidelse.



Figur 3.1: Volumetrisk tøyning vs. temperatur beregnet etter interpolasjon ved termoelastisk modell og fra eksperiment for (a) Pontida siltig leire og (b) Boom leire (Baldi et al., 1988). Negativ tøyning er definert som volumutvidelse.

For de ulike forsøkene på Pontida leire varierte OCR som følger:

- OCR=12,5 ved 0,2 MPa
- OCR=2,5 ved 1,0 MPa
- OCR=1,42 ved 3,5 MPa

(Baldi et al., 1988)

I udrenerte tester på forstyrret og uforstyrrede leirer viste Campanella og Mitchell (1968) at oppvarming gir økt poretrykk, og at syklisk/gjentagende udrenert termisk belastning resulterer i akkumulering av poreovertrykk. Lignende funn er også gjort av Houston, Houston og Williams (1985) og Hueckel og Pellegrini (1989)). Burghignoli et al. (2000) utførte forsøk både under drenerte og udrenerte forhold. De ønsket å undersøke hvorvidt termisk oppførsel avhenger av spenningstilstand og -historie. For å teste dette ble ulike verdier for gjennomsnittlig effektivspenning, overkonsolideringsrate og ulike spenningshistorie vurdert. Testene ble utført på rekonstituert og naturlige leirjord ved bruk av triaksiale celler som ble modifisert for å kontrollere temperaturen. Det undersøkte temperaturområdet var mellom 20 og 60 ° C.

Resultatene av Burghignoli et al. (2000) sitt studie viste at poretallet endres på grunn av omorganisering av partiklene, som bortsett fra verdien av temperaturendringen avhenger av mange andre faktorer som (i) spenningshistorie, (ii) termisk historie, (iii) nylig spenningshistorie, (iv) tiden som gikk mellom slutten av den primære konsolidering av den siste mekaniske belastningen som ble påført og starten av den termiske belastningen, og (v) varigheten

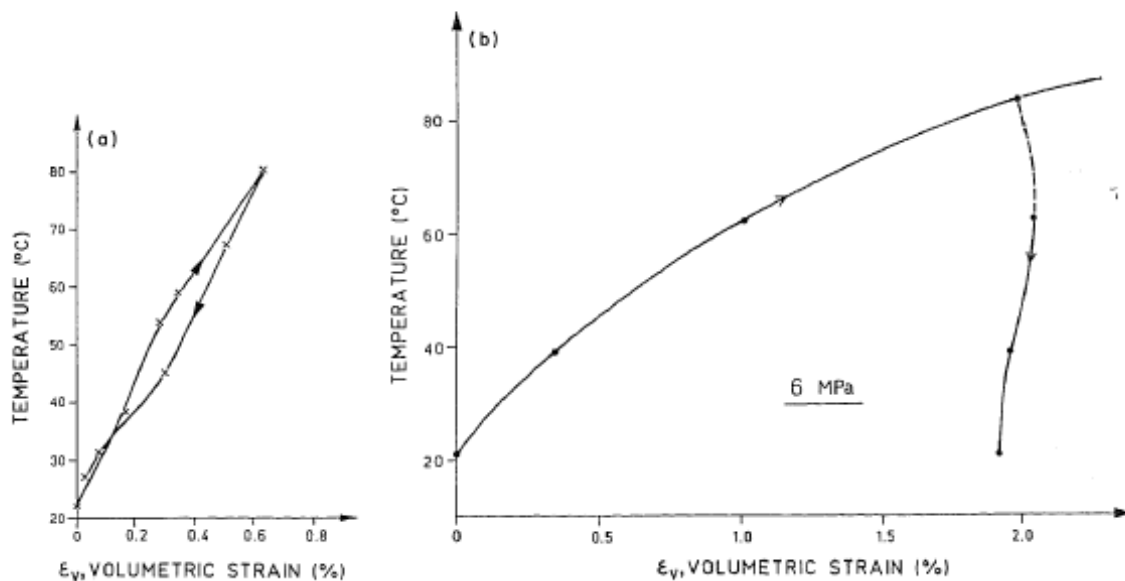
av oppvarmingen og konstante høye temperaturfaser. Avhengigheten av forandringene i porettall for de tre siste faktorene (iii, iv og v) ble først observert i [Burghignoli et al. \(2000\)](#) sitt arbeid. De fant ut at den nylige og overordnede spenningshistorien har en direkte påvirkning på endringen i porettall for drenerte tester: normalkonsoliderte og overkonsoliderte leirprøver som nylig er blitt belastet viser volumreduksjon ved oppvarming. Overkonsoliderte prøver som nylig er avlastet utvider seg.

Reversible/irreversible tøyninger

Studiet til [Baldi et al. \(1988\)](#) ble utført på leirer med lavt vanninnhold og ved høyere effektivspenninger. For disse forsøkene ga de to hypotesene [Campanella og Mitchell \(1968\)](#) etablerte, inkonsekvente resultater og indikerte behov for revisjon. [Baldi et al. \(1988\)](#) utførte derfor et videre studie av resultatene med mål om å tilpasse Campanella og Mitchells modell til mindre porøse leirer. Som et produkt av dette studiet kom de med to nye hypoteser:

1. Termomekanisk oppførsel for overkonsolidert leire er termoelastisk. Tøyningen er reversibel.
2. I normalkonsolidert tilstand er tøyningene uelastiske. En viss del av tøyningen er ikke reversibel.

Testene denne formuleringen baserte seg på innebar isoterm belastning, etterfulgt av isobarisk oppvarming, isoterm avlastning og isobarisk nedkjøling, slik at endelig trykk og temperatur var identisk med initialverdiene (se [Figur 3.2](#)).



Figur 3.2: Volumetrisk termisk tøyning vs. temperatur for (a) Pontida siltig leire ved 0,5 MPa og OCR2 og (b) normal-konsolidert prøve av Boom leire ([Baldi et al., 1988](#))

Stivhet og skjærstyrke ved oppvarming

Over et bredt temperaturspekter (0 ° -180 ° C) viste [Houston et al. \(1985\)](#) at oppvarming ved høy temperatur kan indusere avstivning av jorden, og kan øke skjærstyrken. I et mindre temperaturområde (<60 ° C) fant [Hueckel og](#)

Pellegrini (1989), Miliziano (1992) og Lingnau, Graham og Tanaka (1995) ingen nevneverdig påvirkning av temperaturen på deformerbarhet og skjærstyrke. Resultatene av Burghignoli et al. (2000) sitt studie viste at deformasjonsevnen og skjærstyrken av jordskjelettet ikke ble nevneverdig påvirket av temperaturen. Den forventede avstivningen av materialet på grunn av reduksjon av spesifikt volum produsert ved oppvarming balanseres med en motsatt effekt indusert av økningen i temperaturen. På den annen side, påvirkes jordens deformerbarhet av termisk historie. En termisk syklus med oppvarming og avkjøling gir effekter av overkonsolidering tilsvarende de forårsaket av kryp alene. Avstivningen av jordskjelettet som en effektene av isotermisk kryp, er bare betydelig innenfor et begrenset spennings- og deformasjonsområde. Når verdiene overskrider dette området vil ikke oppførselen lenger være påvirket av temperaturen historie. Basert på dette konstaterte de at skjærstyrken i jord ikke blir nevneverdig påvirket av termiske sykluser.

3.1.2 Drenert og udrenert tilstand

For laboratorietestene omtalt i forrige avsnitt (avsnitt 3.1.1) skiller det mellom drenerte og udrenerte tester. I et triaksapparat kan det utføres drenerte og udrenerte tester ved å henholdsvis åpne og lukke buretten der utpresset porevann slippes ut av triakscellen.

Dersom den ytre spenningsforholdene rundt et jordelement endres, vil også de indre spenningene i jorda endre seg for å opprettholde likevekt i den nye spenningstilstanden. Reaksjonen til spenningsendringene i jorda vises delvis ved økt effektivspenning, og delvis ved generering av poreovertrykk. Begrepene drenert og udrenert brukes for å definere hvorvidt dissipasjon av poretrykksendringen tillates å skje eller ikke. Drenering refererer til graden av dissipasjon av poreovertrykket. Det kan deles inn i tre tilstander (Amundsen et al., 1970):

- **Udrenert tilstand:** Poreovertrykket får ikke lov til å dissipere. Denne tilstanden forekommer typisk ved rask belastning av en jordart med lav permeabilitet, som leire.
- **Fullstendig drenert tilstand:** Dissipasjon av poreovertrykk er fullstendig tillatt ved alle stadier av stressendringen, og tillater ikke oppbygning av poreovertrykk. Denne tilstanden forekommer ved sakte belastning av svært permeable jordarter, som sand eller grus.
- **Delvis drenert tilstand:** Poreovertrykk utvikler seg til en viss grad i løpet av belastning eller avlastning av jorda, siden dissipasjonen foregår parallelt med poretrykksøkningen. Dette er ofte situasjonen for mange byggeprosjekter/geotekniske prosjekter. Som en foreklaring av problemet gjøres det imidlertid ofte en antagelse om at man har fullstendig drenert eller fullstendig udrenert tilstand.

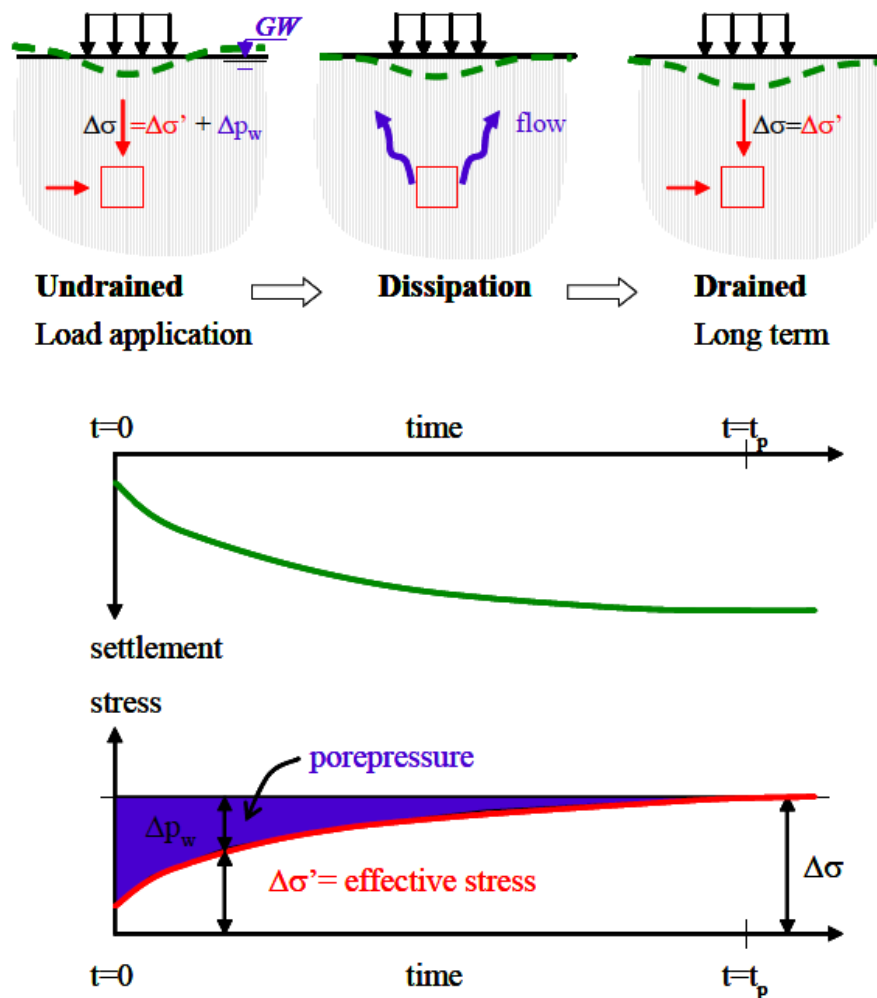
Nordal (2019) beskriver at varigheten av den udrenerte tilstanden for en jordart er: permeabiliteten(k), stivheten i jordskjelettet(feks. E_{oed} eller M) og dreneringsveien(H). Som et grovt estimat kan varigheten av den udrenerte tilstanden bestemmes ut ifra konsolideringstiden:

$$t_p = \frac{H^2}{c_v} \quad (3.1)$$

der

$$c_v = \frac{M \times k}{\gamma_w} \tag{3.2}$$

der γ_w er vannets densitet. Ved belastning over kort tid gir udrenert tilstand poreovertrykk. Dette poreovertrykket dissiperer mot en fullstendig drenert tilstand, i løpet av konsolideringsprosessen (se Figur 3.3). Udrenert tilstand kan forventes å dominere i tiden frem til $0,1 t_p$, ofte også lengre. Drenerende lag av silt eller sand reduserer H og dermed også t_p betydelig.



Figur 3.3: Overgangen fra udrenert til drenert tilstand (Nordal, 2019)

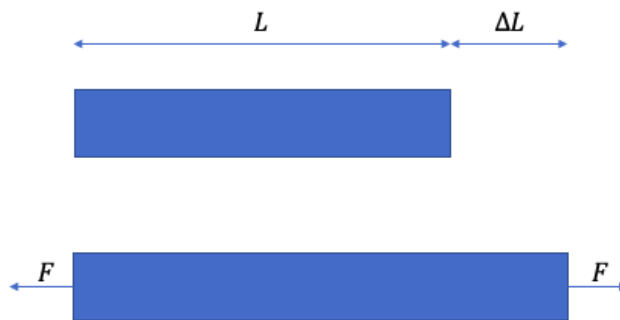
3.2 Grunnleggende mekaniske sammenhenger

Modellene som skal testes i denne avhandlingen bygger på grunnleggende mekaniske sammenhenger for elastisitet og termisk utvidelse i faste stoffer. I denne seksjonen vil det bli gitt en kort gjennomgang av disse.

3.2.1 Elastisitet

Faste stoffer består av atomer i en struktur hold sammen av molekylkrefter. De intermolekulære kreftene i tillater atomer og molekyler å både trekkes fra hverandre og trykkes sammen når stoffet utsettes for ytre krefter. Figur 3.4 skal illustrere en stav med en opprinnelig lengde L og tverrsnitt A i strekk der kraften F virker i begge ender. Legemet utsettes da for en spenning σ_n rettet normalt på tverrsnittet A , definert som (Lien, 2000):

$$\sigma_n = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$



Figur 3.4: Et legeme i strekk som utvider seg med en lengde ΔL

Enheden for spenning er N/m^2 og har fått betegnelsen pascal (Pa). For en ideell stav (uten diskontinuiteter og skjevheter) er spenningen den samme i ethvert tverrsnitt av staven. Spenningen staven utsettes for vil føre til en forlenging ΔL av legemet. Den relative forlengelsen av legemets opprinnelige form, kalles lengdetøyningen (Lien, 2000):

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.4)$$

E-modulen E er en størrelse som gir den kvantitative sammenhengen mellom normalspenning og tøyning for et gitt materiale. Denne sammenhengen er også kjent som Hookes lov. Innenfor det elastiske området, området der det bare skjer reversible tøyninger, gjelder følgende sammenheng (Lien, 2000):

$$\sigma = \epsilon \times E \quad (3.5)$$

Kombinert med Ligning (3.3) gjelder dermed også følgende sammenheng

$$\epsilon \times E = \frac{F}{A} \quad (3.6)$$

3.2.2 Temperaturutvidelse i metaller

Konstruksjonsdelene i spuntkonstruksjoner består gjerne av metall. Metaller utvider seg ved oppvarming. Sammenhengen mellom temperaturvariasjon, ΔT , og lengdeutvidelse, ΔL kan beskrives ved følgende formel

$$\Delta L = \alpha \times L_0 \times \Delta T \quad (3.7)$$

Der L_0 er opprinnelig lengde og α er proporsjonalitetsfaktoren, også kalt lengdeutvidelseskoeffisienten (Hallseth, Haugan, Hjelman & Isnes, 1990). SI-enheten er $1 K^{-1}$, men det er også vanlig å benytte $mm/m/^\circ C$. $1mm/m/^\circ C = 10^{-3}K^{-1}$ (Hofstad, 2018). Lengdeutvidelseskoeffisienten har ulike verdier for ulike materialer (Hallseth et al., 1990). Samtidig er den temperaturavhengig, og oppgis derfor enten for en bestemt temperatur eller som gjennomsnittsverdi for et angitt temperaturområde. For stål er lengdeutvidelseskoeffisienten oppgitt å være om lag $10^{-5}K^{-1}$ (Hofstad, 2018). Variasjonene er imidlertid vanligvis små. For tekniske formål betraktes α derfor å være uavhengig av temperaturen. Ved å skrive om Ligning (3.7) får vi

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (3.8)$$

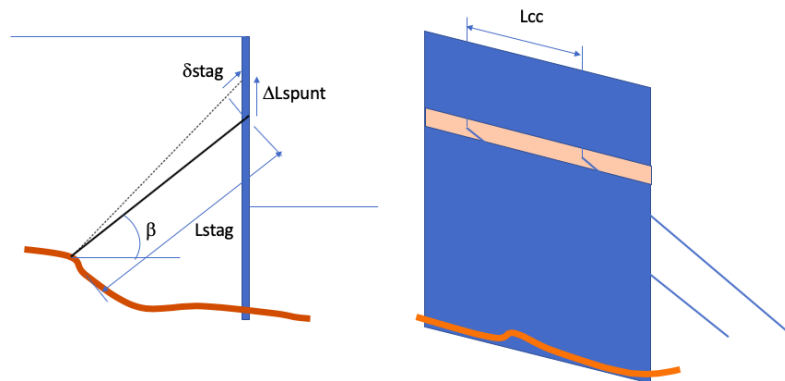
Lengdeutvidelseskoeffisienten er dermed den relative lengdeendringen per grad. Proporsjonaliteten i Ligning 3.8 gjelder ikke eksakt, men gir god tilnærming over små temperaturområder (Hallseth et al., 1990).

3.3 Beregningsmodeller

I denne avhandlingen er det ønsket å finne årsaken til en årstidsvariasjon observert for ankerkreftene på spuntkonstruksjonen ved Kværnerdammen. Ankerkreftene som er målt viser høyere verdier i de varmere sommermånedene og lavere verdier i de kalde vintermånedene. I det foregående er det beskrevet to fenomener som skal undersøkes videre: termisk tøyning i leire og termisk tøyning i metall - nærmere bestemt i spuntveggen. Det er utviklet to modeller i forbindelse med denne oppgaven, som skal undersøkes. Modell A modellerer utvidelsen av stålet spuntveggen består av. Denne vil kontrolleres med en håndberegning. Modell B betrakter utvidelse i jorda bak spuntveggen.

3.3.1 Modell A - termisk tøyning i spuntvegg

Modell A er et FORTRAN-dataprogram utviklet av Multiconsult i forbindelse med denne masteroppgaven, kalt TIAFA (Temperature Induced Anchor Forces). Videre i oppgaven vil programmet refereres til som Modell A. Den baserer seg på at temperaturøkning i en spuntvegg medfører utvidelse i stålet. Spuntveggen vil få utvidelse både horisontalt og vertikalt. Modell A bygger på tanken om at den vertikale lendeutvidelsen av spuntveggen vil medføre at spuntten drar med seg staghodet og øker strekkraften i ankerstaget. Ankerkraften og friksjonen mellom jord og spuntvegg vil samtidig øke trykk-aksialkraft i spuntten i dybder under stag. Modellen anvender en diskretelement-metode for å modellere samspillet mellom spunt, stag og jord når en spunt utsettes for temperaturendringer. I det følgende vil beregningsmodellen beskrives i henhold til Athanasiu (2020).



Figur 3.5: Spunt som utvider seg en lengde ΔL_{spunt} og dytter staghodet oppover slik at ankerstaget uvider seg en lengde δ_{stag}

Temperaturøkning fører til en lengdeutvidelse av spuntveggen i vertikal retning slik at staghodet forskyves en lengde ΔL_{spunt} (se Figur 3.5). Dersom veggen stod fri kunne en slik utvidelse i spuntveggen ført til en avbøyning av spuntveggen, der ankerhoder trekkes bakover i horisontal retning, pga. ankerstagets motstand mot tøyning. Denne modellen er imidlertid utformet for en spuntvegg som stabiliserer jordmasser. På baksiden av spuntkonstruksjonen er det jord som trykker mot veggen, og trykket fra disse massene antas å motvirke denne avbøyningen. Beregningsmodellen

antar derfor ingen forflytning langs veggen i horisontal retning. Med denne antagelsen kan systemets reaksjon på temperaturøkning forventes å foregå som illustrert i Figur 3.5. Relasjonen mellom forlengelsen av ankerstaget (δ_{stag}) og forflytning av staghodet (ΔL_{spunt}) følger følgende trigonometriske sammenheng

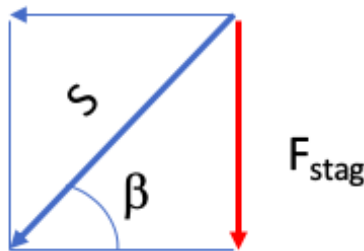
$$\delta_{stag} = \Delta L_{spunt} \times \sin \beta \quad (3.9)$$

Aksialkraften i ankerstaget, S , per lineærmeter av spuntveggen beregnes ut ifra aksial stagstivhet

$$S = \delta_{stag} \times \frac{(EA)_{stag}}{L_{stag} \times L_{CC}} \quad (3.10)$$

Der $(EA)_{stag}$ er produktet av stagets elastisitetsmodul og tverrsnittsareal og L_{CC} er seteravstanden mellom stagene. Aksialkraft i spuntvegg per lineære meter er lik vertikalkomponenten av ankerkraft (se Figur 3.11)

$$F_{stag} = S \times \sin \beta \quad (3.11)$$



Figur 3.6: Komponentene av aksialkraften i ankerstaget per lineære meter av spuntveggen

Kombinasjonen av ligning (3.9), (3.10) og (3.11) gir

$$F_{stag} = \Delta L_{spunt} \times k_{stag} \quad (3.12)$$

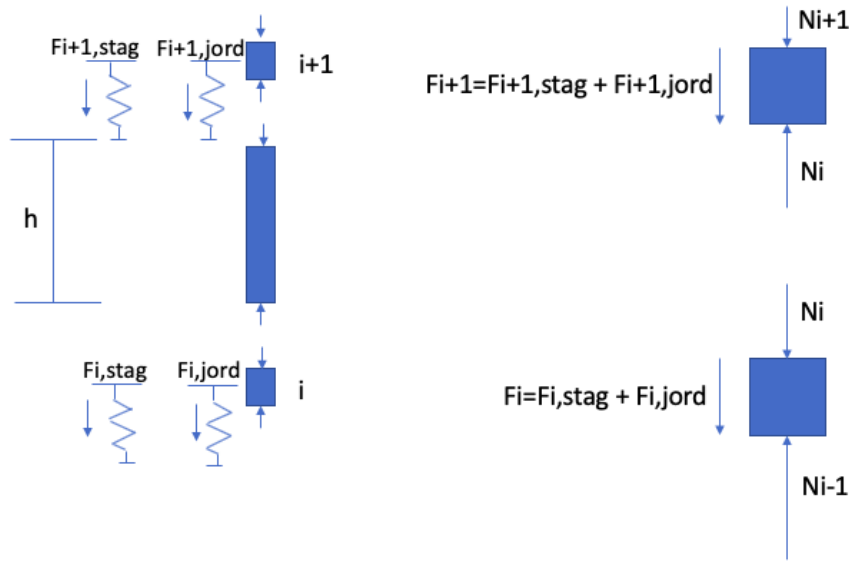
der

$$k_{stag} = \frac{(EA)_{stag}}{L_{stag} \times L_{CC} \times \sin^2 \beta} \quad (3.13)$$

Dermed kan ankerets reaksjon til en vertikal utvidelse av spuntveggen modelleres som en fjær med fjærstivhet k_{stag} .

Diskret-element-metode

I denne modellen benyttes en diskret-element-metode. Spuntveggen deles opp i en rekke diskrete elementer med en høyde h . Disse er koblet med nodepunkter mellom hvert element. I nodepunktene er reaksjonen fra stag og jord modellert ved hjelp av to fjær (se Figur 3.7).



Figur 3.7: Utsnitt av spuntvegg delt inn i diskrete elementer koblet med nodepunkter mellom hvert elemet

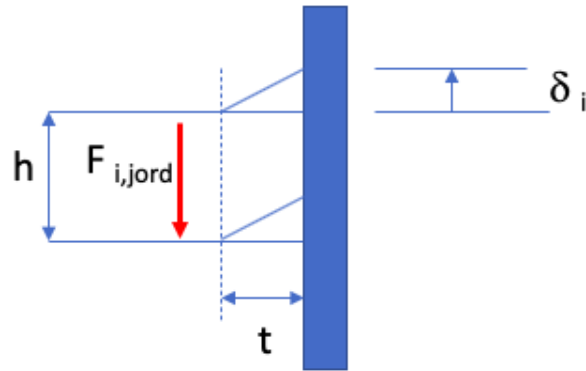
Kraftlikevekt av punkt i gir at

$$N_i = N_{i-1} - (k_{i,stag} + k_{i,jord})\delta_i \quad (3.14)$$

Fjærstivhet fra jord

Jordens reaksjon mot den termisk tøyningen av spunten er modellert som en fjær med fjærstivhet $k_{i,jord}$ slik

$$k_{i,jord} = \frac{F_{i,jord}}{\delta_i} \quad (3.15)$$



Figur 3.8: Illustrasjon av hvordan friksjon fra jorda motvirker termisk lengdeutvidelse i vegg

I henhold til Emdal, Grande, Nordal, Eiksund og Grimstad (2006) kan skjærtøyningen γ beregnes slik

$$\gamma = \frac{\delta_i}{t} \quad (3.16)$$

og skjærspenningen τ beregnes slik

$$\tau = G_i \times \gamma \quad (3.17)$$

der G_i er jordens skjærmodul i punkt i .

Som tidligere oppgitt i Ligning (3.3) er kraft lik produktet av spenning og areal. Friksjonskraften per meter spuntvegg er dermed:

$$F_{i,jord} = \tau \times h \quad (3.18)$$

Ved å kombinere Ligning (3.16), (3.17) og (3.18) kan denne fjærstivheten $k_{i,jord}$ uttrykkes som

$$k_{i,jord} = \frac{G_i \times h}{t} \quad (3.19)$$

Tøyningskompatibilitet i spuntveggen

Tøyningen i et element av spuntveggen mellom node i og $i + 1$ beregnes som en funksjon av gjennomsnittlig temperaturendring i elementet og trykkraft N_i fra ovenliggende node:

$$\epsilon_{i,i+1} = \alpha \times \frac{\Delta T_i + \Delta T_{i+1}}{2} - \frac{N_i}{(EA)_{spunt}} = \frac{\delta_{i+1} - \delta_i}{h} \quad (3.20)$$

N_i som funksjon av N_{i-1} gir rekurrenssystemet

$$\delta_{i+1} = \frac{1}{a_i} \times (C_i - b_i \times \delta_i) \quad (3.21)$$

der

$$a_i = \frac{1}{h} \quad (3.22)$$

$$b_i = -\left(\frac{k_{i,stag} + k_{i,jord}}{(EA)_{spunt}} + \frac{1}{h}\right) \quad (3.23)$$

$$c_i = \alpha \times \frac{\Delta T_i + \Delta T_{i+1}}{2} - \frac{N_{i-1}}{(EA)_{spunt}} \quad (3.24)$$

Randbetingelser og løsning av systemet

Beregningsmodellen antar at temperaturvariasjonen langs spuntveggen er kjent. Løsningen av system (3.21) gir vertikal forflytning av alle noder og dermed også endring i ankerkrefter og jordkrefter.

Det antas at spunten er fundamentert i fjell. Knutepunktene/nodene er nummerert fra foten av spunten og oppover. Første punkt, punktet ved fjell, er har nummer 1. I Node 1 er også vertikal forskyvning lik 1 ettersom spunten er forspent i berg i dette punktet. Gitt aksial likevekt av spunten må aksialkraften i Node 1 være lik summen av vertikalkomponenten til stag- og jordreaksjoner langs spunten.

$$N_1 = \Sigma(F_{i,jord} + F_{i,spunt}) \quad (3.25)$$

Beregningsmodellen bruker en iterativ prosedyre der man begynner med en antatt N_1 . Rekurrensligningen (3.21) brukes til å finne vertikal forflytning i alle noder. Når forflytningen er beregnet, beregnes kraft per meter som fjærstivhet ganget med vertikal forskyvning av spunt, ved hjelp av ligning (3.26) og (3.27)

$$F_{i,stag} = k_{i,stag} \times \delta_i \quad (3.26)$$

$$F_{i,jord} = k_{i,jord} \times \delta_i \quad (3.27)$$

der δ_i er vertikal forskyvning av knutepunkt i og stivhet av jord beregnes $k_{i,jord}$ etter ligning (3.19).

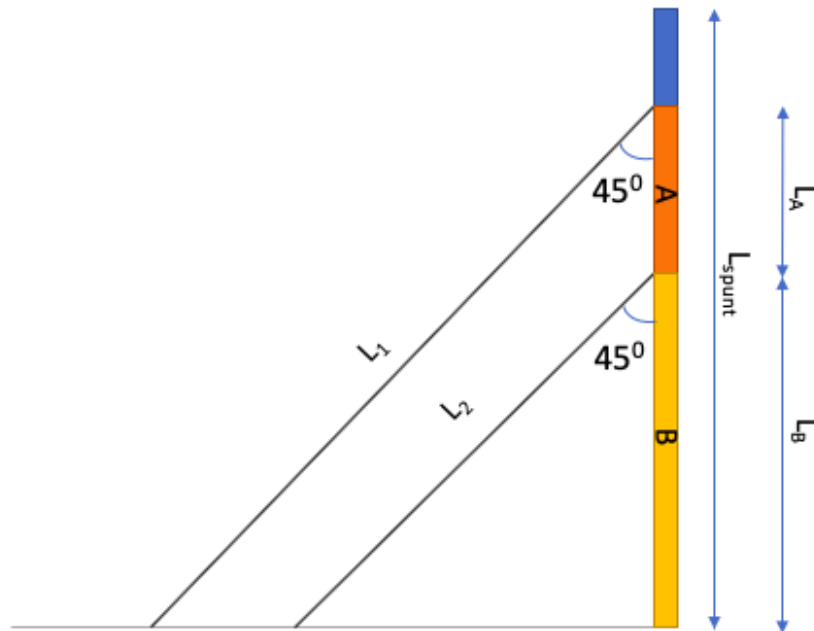
Aksialkraften i spuntveggen ved første node, N_1 , oppdateres etter Ligning (3.25). Denne prosedyren gjentas inntil

akseptabel konvergens er oppnådd.

3.3.2 Håndberegninger

Ved håndberegninger er det kommet frem til en modell som ligner Modell A, men ikke benytter seg av diskret element metode og ikke tar hensyn til jordens friksjon mot veggen. I det følgende vil likningene som benyttes i håndberegningen bli utledet.

Spuntveggen deles inn Del A og Del B, som vist i Figur 3.9. Del A er området mellom øvre og nedre stagfeste og del B er mellom nedre stagfeste og foten av spunt.



Figur 3.9: Sikringskonstruksjonen med dimensjoner

Som vist i Figur 3.9

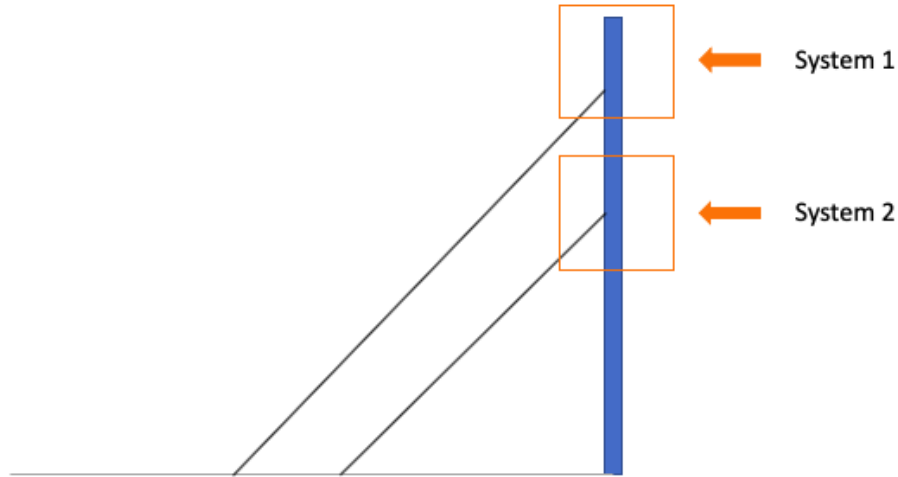
L_1 - lengden av øvre stagrad (stag 2)

L_2 - lengden av nedre stagrad (stag 1)

L_A - lengden av del A

L_B - lengden av del B

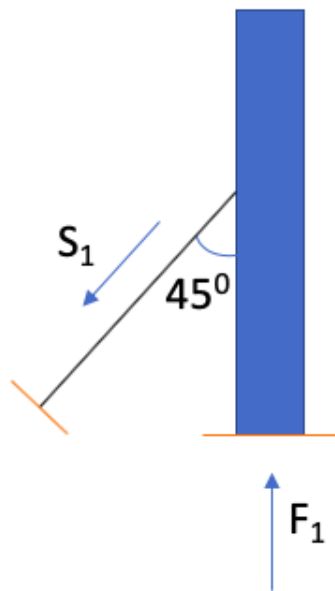
For å utføre håndberegningene ble spuntkonstruksjonen delt inn i to systemer som vist i Figur 3.10.



Figur 3.10: Spuntkonstruksjonen delt inn i to beregningssystemer

I system 1 (se Figur 3.11) betraktes den øverste delen av spunt. Her er det to ytre krefter som virker:

- S_1 - strekkraften i øvre stag
- F_1 - trykkraften mellom øvre og nedre stagfeste i spuntveggen



Figur 3.11: System 1 med lokasjon og retning for ytre krefter

Følgende sammenhenger gjelder for system 1:

$$S_1 = \sqrt{2} \times F_1 \quad (3.28)$$

$$\Delta L_1 = \frac{\Delta L_B + \Delta L_A}{\sqrt{2}} \quad (3.29)$$

$$\Delta L_1 = \frac{S_1}{\frac{(EA)_{stag1}}{L_1}} \quad (3.30)$$

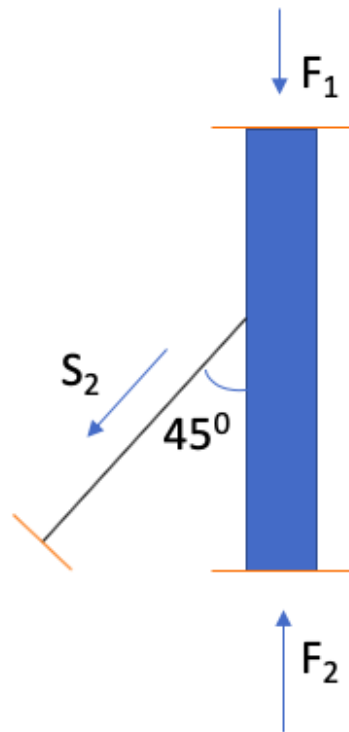
$$\Delta L_A = \alpha \times \Delta T_A \times L_A - \frac{F_1}{\frac{(EA)_{spuntA}}{L_A}} \quad (3.31)$$

Ligning 3.30 og Ligning 3.31 satt inn i Ligning 3.29 og gir

$$\frac{S_1}{\frac{(EA)_{stag1}}{L_1}} \times \sqrt{2} = \Delta L_B + \Delta L_A \quad (3.32)$$

I system 2 (figur 3.12) betraktes kontaktpunktet mellom spuntvegg og nedre ankerstag. Her er det tre ytre krefter som virker:

- S_2 - strekkraften i nedre stag
- F_1 - trykkraften mellom øvre og nedre stagfeste i spuntveggen
- F_2 - trykkraften mellom nedre stagfeste og foten av spuntveggen



Figur 3.12: System 2 med ytre krefter

Følgende sammenhenger gjelder for system 2:

$$F_2 = F_1 + \frac{S_2}{\sqrt{2}} \quad (3.33)$$

$$\Delta L_1 = \frac{\Delta L_B}{\sqrt{2}} \quad (3.34)$$

$$\Delta L_2 = \frac{S_2}{\frac{(EA)_{stag2}}{L_2}} \quad (3.35)$$

$$\Delta L_B = \alpha \times \Delta T_B \times L_B - \frac{F_2}{\frac{(EA)_{spuntB}}{L_B}} \quad (3.36)$$

Ligning 3.35 og Ligning 3.36 satt inn i Ligning 3.34 og gir:

$$\sqrt{2} \frac{S_2}{\frac{(EA)_{stag2}}{L_2}} = \alpha \times \Delta T_B \times L_B - \frac{F_2}{\frac{(EA)_{spuntB}}{L_B}} \quad (3.37)$$

Uttrykket for S_2 fra Ligning 3.33 gir videre:

$$2 \frac{F_2 - F_1}{\frac{(EA)_{stag2}}{L_2}} = \alpha \times \Delta T_B \times L_B - \frac{F_2}{\frac{(EA)_{spuntB}}{L_B}} \quad (3.38)$$

Dermed er

$$F_2 = \frac{1}{k} (\alpha \times \Delta T_B \times L_B + \frac{2 \times L_2 \times F_1}{(EA)_{stag2}}) \quad (3.39)$$

Der konstanten k er

$$k = \frac{2 \times L_2}{(EA)_{stag2}} + \frac{L_B}{(EA)_{spuntB}}$$

Kombinasjonen av Ligning 3.36 og Ligning 3.31 gir:

$$\Delta L_B + \Delta L_A = \alpha \times \Delta T_B \times L_B - \frac{F_1}{\frac{(EA)_{spuntB}}{L_B}} + \alpha \times \Delta T_A \times L_A - \frac{F_1}{\frac{(EA)_{spuntA}}{L_A}} \quad (3.40)$$

Ligning 3.39 settes inn i Ligning 3.40 og gir

$$F_1 = \frac{\alpha}{c} \times (\Delta T_A \times L_A + \Delta T_B \times L_B - \frac{\Delta T_B \times L_B^2}{k \times (EA)_{spuntB}}) \quad (3.41)$$

der

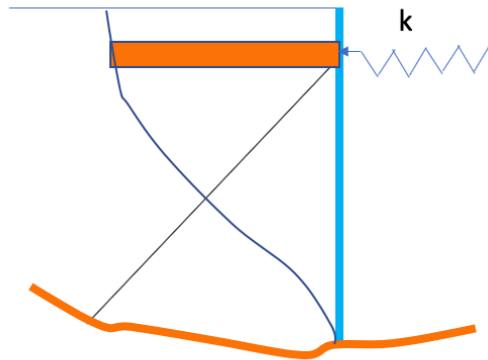
$$c = \frac{2 \times L_1}{(EA)_{stag1}} + \frac{L_A}{(EA)_{spuntA}} + \frac{2 \times L_2 \times L_B}{k \times (EA)_{spuntB} \times (EA)_{stag2}}$$

Da F_1 er gitt ved Ligning 3.41 kan F_2 beregnes ved Ligning 3.39. S_1 kan da beregnes ved Ligning 3.28 og S_2 ved ligning 3.33 og systemet er løst.

3.3.3 Modell B - termisk tøyning i jorda

Modell B er utviklet i form av et regneark, og baserer seg på ligningene beskrevet i det følgende. Modellen bygger på laboratoriestudiene beskrevet i Avsnitt 3.1, der det ble observert en volumøkning ved temperaturøkning i enkelte leirer.

Figur 3.13 er viser et jordlag med tykkelse h og horisontal lengde L fra spuntvegg og bakover. Anta at dette laget blir utsatt for en temperaturøkning ΔT .



Figur 3.13: Spuntvegg med jordlag som utvider seg ved temperaturøkning

Med den antagelse at jorden utvider seg ved oppvarming, vil ekspansjonen gi en forflytning δ_{se} for spuntveggen, dersom det ikke er noen motstand. En forankret spuntvegg vil imidlertid yte en motstand med en kraft F_h , som gir en negativ forskyvning δ_{ar} (se Figur 3.14).



Figur 3.14: Jordlaget som utvider seg

Den totale horisontale forskyvningen av staghodet kan dermed beregnes som:

$$\delta_a = \delta_{je} - \delta_{ar} = \alpha \times \Delta T \times L - \frac{F_h}{EA_{jord}} \times L \quad (3.42)$$

På samme måte gir påkjenningen på staget, som holder tilbake veggen med en motstandskraft F_h , en horisontal forskyvning δ_a :

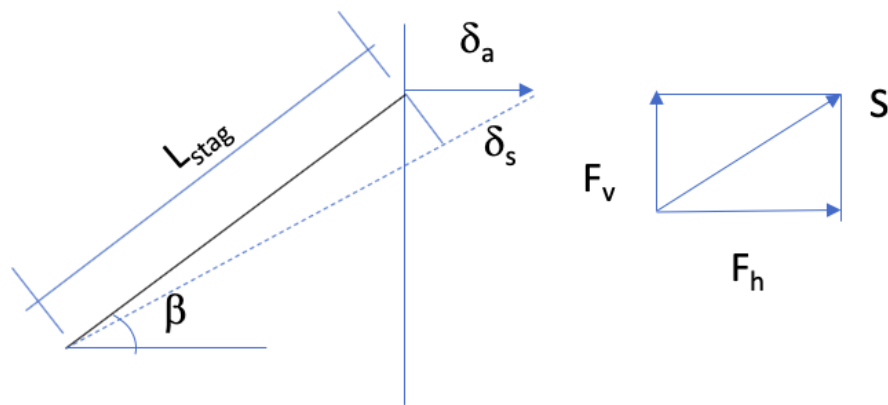
$$\delta_a = \frac{F_h}{k} \quad (3.43)$$

Der k er stivheten for ankerhodets forflytning i horisontal retning. Kombinasjonen av (3.42) og (3.43) gir:

$$F_h = \frac{\alpha \times \Delta T \times L}{\left(\frac{1}{k} + \frac{L}{EA_{jord}}\right)} \quad (3.44)$$

Når F_h er kjent er også den induserte stagkraften S gitt ved geometrien i Figur 3.15:

$$S = \frac{F_h}{\cos \beta} = \frac{\alpha \times \Delta T \times L}{\left(\frac{1}{k} + \frac{L}{EA_{jord}}\right) \times \cos \beta} \quad (3.45)$$



Figur 3.15: Geometri og krefter for staget ved temperaturutvidelse av bakenforliggende jordlag

Ankerhodets stivhet

Siste ukjente er da ankerhodets stivhet mot horisontal forflytning. Figuren 3.15 gir at:

$$\delta_s = \delta_a \times \cos \beta \quad (3.46)$$

Staget strekkes en lengde δ_s som gir:

$$S = \frac{(EA)_{stag}}{L_{stag}} \times \delta_s \quad (3.47)$$

Ligning (3.46) satt inn i Ligning (3.47) gir:

$$S = \frac{(EA)_{stag}}{L_{stag}} \times \delta_a \times \cos \beta \quad (3.48)$$

$$F_h = S \times \cos \beta = \frac{(EA)_{stag}}{L_{stag}} \times \cos^2 \beta \times \delta_a \quad (3.49)$$

Ligning(3.43) kombinert med Ligning (3.49) gir ankerhodets stivhet:

$$k = \frac{(EA)_{stag}}{L_{stag}} \times \cos^2 \beta \quad (3.50)$$

3.3.4 Beregning av opptredende ankerkraft

Både Modell A, håndberegningene og Modell B beregner kun ankerkraften induisert av en temperaturendring, kalt ankerkraft S . Ettersom ankerstagene i en spuntkonstruksjon allerede er utsatt for en belastning når temperaturendringen skjer, presenterer S kun en *endring* i ankerkraft. Denne ankerkraftsendringen S , vil derfor videre i avhandlingen benevnes som ΔN .

For å finne opptredende ankerkraft etter temperaturendringen (N_{etter}) må opptredende ankerkraft før temperaturendringen kalt N_{ref} summeres opp med den induerte ankerkraften ΔN . Opptredende ankerkraft i øvre stegrad (N_1) og nedre stegrad (N_2) er dermed beregnet slik:

$$N_1 = N_{1,ref} + \Delta N_1 \quad (3.51)$$

$$N_2 = N_{2,ref} + \Delta N_2 \quad (3.52)$$

Kapittel 4

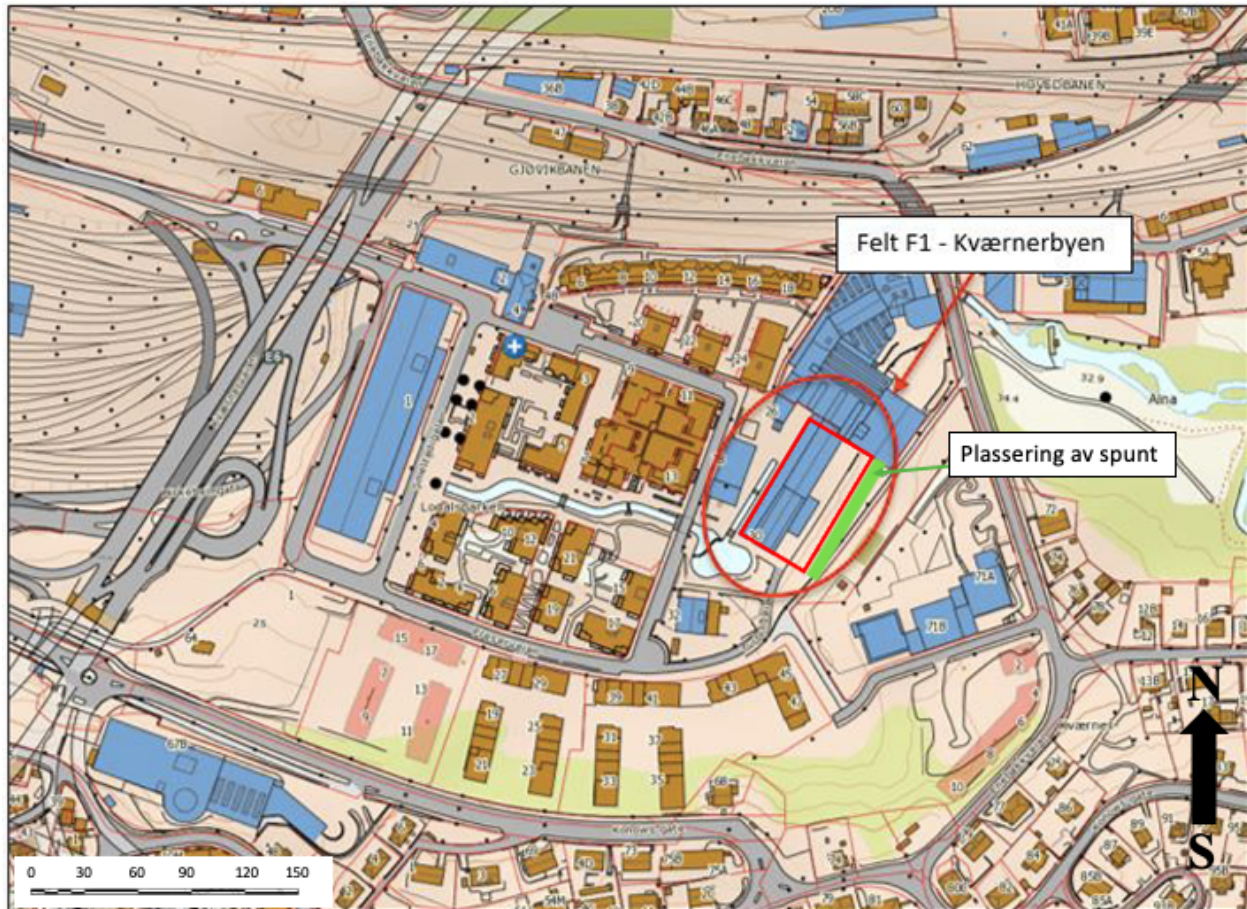
Kværnerbyen felt F1 - Kværnerdammen

Kværnerdammenprosjektet fant sted i Lodalen i Oslo som en del av et større byggeprosjekt. I dette kapittelet vil en kort gjennomgang av betingelsene for prosjektet og etablering av den permanente spuntkonstruksjonen presenteres. Noe av det følgende er hentet fra min prosjektoppgave der dette prosjektet også var referanseprosjekt (se [Sem \(2020\)](#)).

4.1 Informasjon om tiltaksområdet

4.1.1 Kort omtale av prosjektet

OBOS har siden 2006 jobbet med et prosjektet i Lodalen kalt Kværnerbyen (se Figur 4.1). Prosjektet går ut på å transformere en 150 år gammel industritomt til et boligområde med ca.1800 boliger og 55 0000 kvadratmeter næringslokaler ([OBOS, 2019](#)). Multiconsult Norge AS har hatt oppdraget som geoteknisk rådgiver på Felt F1. Felt F1 i Kværnerbyen, også kjent som Kværnerdammen, består av et 7 etasjes boligkompleks med underliggende parkeringsetasje. OBOS var byggherre for prosjektet og utbyggingen er utført av AF Gruppen([Shorokhova, Egel, Sanda, Ulvestad & Thorn, 2018](#)). Et av tiltakene som ble utført var etableringen av en permanent sikringskonstruksjon for å ivareta krav til skråningsstabilitet. I samarbeid med Cautus Geo AS ble det utført monitorering og overvåkning av nevnte spuntkonstruksjon gjennom byggefase. Dette utviklet seg til kontinuerlig overvåkning i mer enn et år etter ferdigstillelse ([Langelid & Naglestad, 2019](#)).



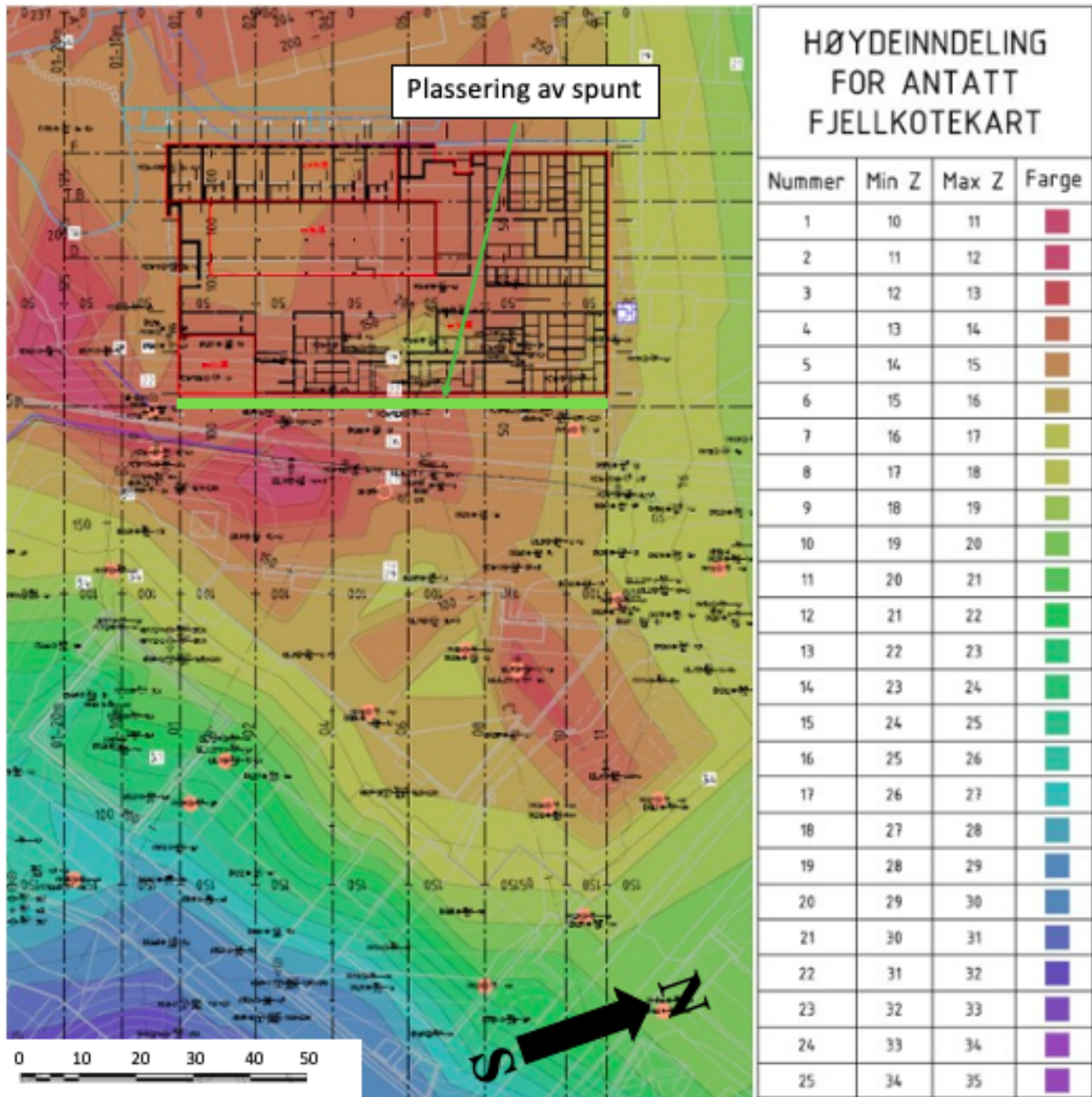
Figur 4.1: Oversiktskart med plassering av Kværnerdammen (Nielsen, 2016)

4.1.2 Grunnforhold

Løsmassene på tomten består av et topplag med primært tørrskorpeleire, men også stedvis fyllmasser. Topplagets mektighet er 2-4 m langs aktuelle spuntlinje. I underkant er det truffet lag av siltig leir med varierende mektighet, men primært 2-6 m. I deler av skråningen er det registrert bløt kvikkleire med lagtykkelse opptil 9 m. Ved kote +13 er det registrert et fast morenelag ned til antatt berg. Sonderingsforløpene indikerer relativt faste fyllmasser i topp, og antydning til overkonsolidert oppførsel i øvre siltig leire og nedre kvikkleire. Sonderingsforløpene antyder relativt faste fyllmasser. Den nedre kvikkleire og øvre siltige leire antyder overkonsolidert oppførsel (Nielsen & Frossard, 2017).

Hydrostatisk poretrykksmålere installert langs gang- og sykkelveg øst for tiltaksområdet, indikerte at grunnvannsstanden lå 3-4m under terreng. Samtidig viste målingene en del variasjon med dybden, og noe poreundertrykk i enkelte målepunkter (Knutzen, 2017d). Målinger i området rundt tomte tyder på at lag med silt og/eller finsand kan medføre porevannsovertrykk ved skråningsfoten, eller andre forhold som avviker fra hydrostatisk fordeling (Shorokhova, 2016).

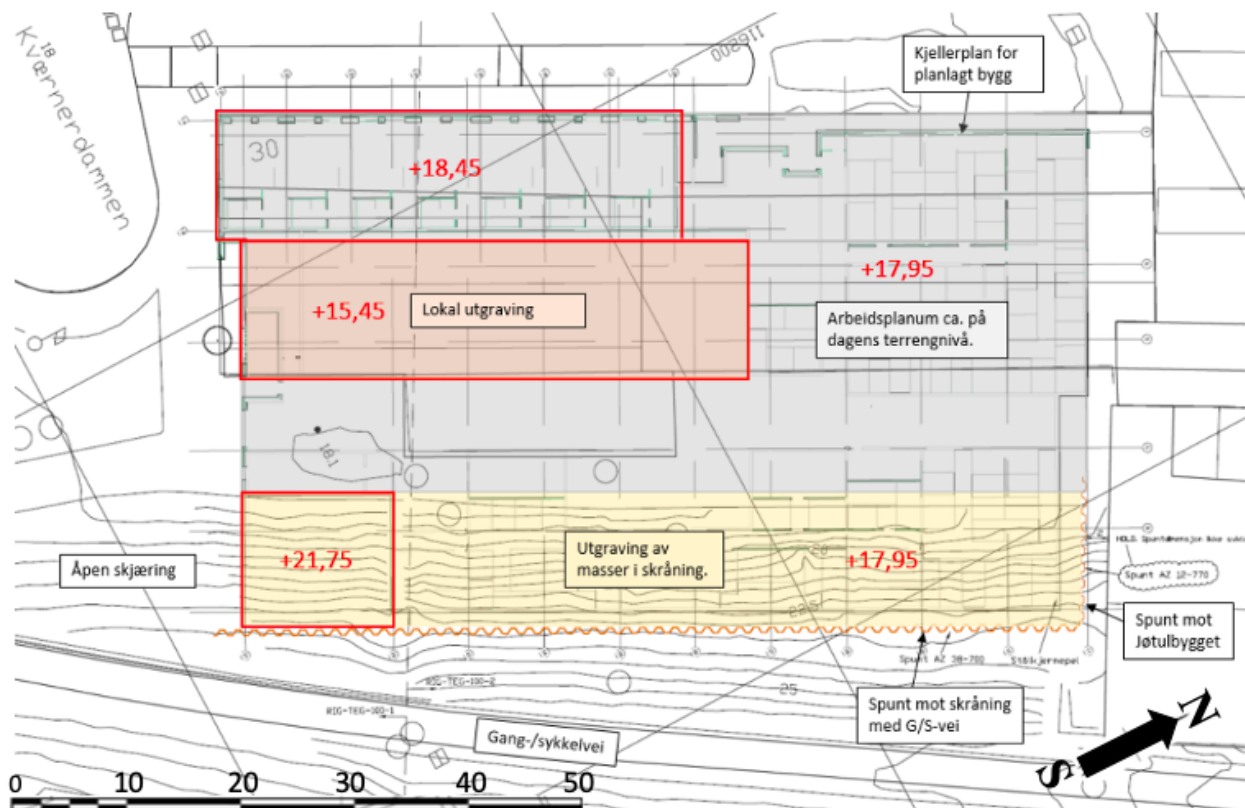
Basert på totalsonderingene er det antatt at dybder til berg faller fra topp av skråning ned mot sikringskonstruksjonen, med variasjon i fjelloverflate rett foran sikringskonstruksjonen. Basert på tilgjengelige grunnundersøkelser, totalsonderinger og fjellboringer er det tegnet et bergkotekart presentert i Figur 4.2



Figur 4.2: Utsnitt av bergkotekart basert på tilgjengelige grunnundersøkelser (Nielsen & Frossard, 2017)

4.2 Etablering av sikringskonstruksjonen

Kjelleren i bygget varierer i nivå. Generelt er kjelleren på terrengnivå, men i øst skjærer kjelleren inn i eksisterende skråning (se Figur 4.3). Det skulle derfor etableres en sikringskonstruksjon i form av en permanent spunt i skråningen, med levetid på 100 år. Den prosjekterte løsningen innebærer en stagforankret spunt av typen AZ 38-700, med to avstivingsnivåer. Spunten er innspenst med fotbolter i berg. Det er totalt 19 0,6" lissestag som bakforankrer spunten i berg. Alt er utført i stål kvalitet S355 (Knutsen, 2017d).



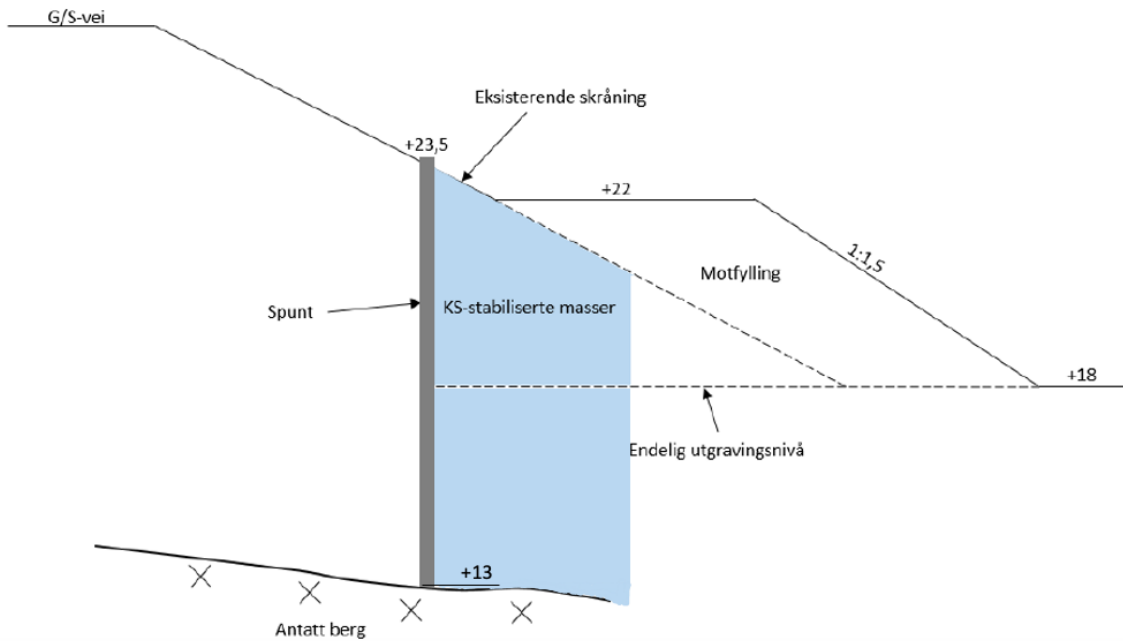
Figur 4.3: Plantegning som viser spunt og koter for utgravingsnivåer (Knutsen, 2017d)

I det følgende vil det bli gitt en beskrivelse av utførelsen av spuntkonstruksjonen, i henhold til Multiconsults notat skrevet av Knutsen (2017d) i planleggingsprosessen. Prosessen med å få etablert sikringskonstruksjonene var planlagt i fire deler:

1. Etablering av motfylling
2. Etablering av spunt langs GS-vei og inn mot deler av Jøtulbygget (Se Figur 4.3)
3. Kalksementstabilisering
4. Seksjonsvis utgraving

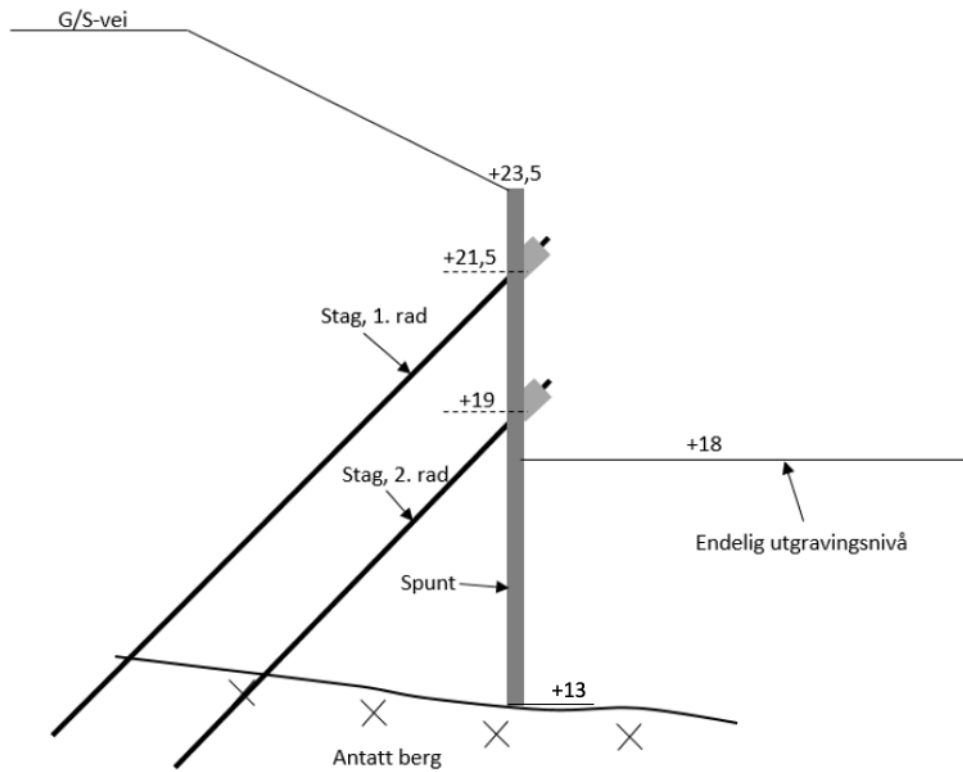
Det er etablert en motfylling inn mot eksisterende skråning. Denne etableres som arbeidsplattform for etablering av

spunt og kalksementpæler. Skråningen etter at motfylling er lagt, massene er kalksementstabilisert og spunten er satt ned er illustrert i Figur 4.4.



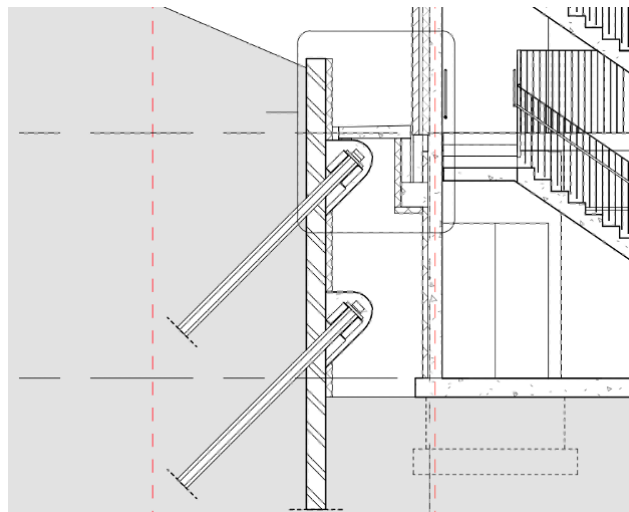
Figur 4.4: Skråningen før utgraving

Det etableres også en midlertidig spunt mot Jøtulbygget i nord. Ettersom bygget skjærer inn i en skråning der det er registrert kvikkleire, er grunnen på innsiden av byggegropen (vest for spunten) forsterket med kalksementstabilisering. Dette er gjort for å kunne gjennomføre utgraving, samt sikre stabiliteten av spunten (Knutsen, 2017d). Byggegroppa etter utgraving til siste utgravingsnivå er illustrert i Figur 4.5.



Figur 4.5: Skråningen etter utgraving til endelig utgravingsnivå

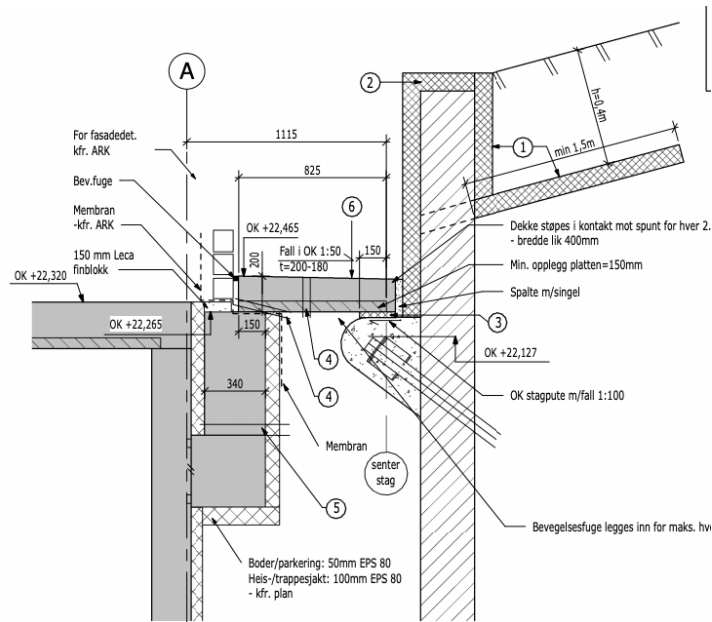
Figur 4.6 viser arbeidstegning av ferdigstilt spunt og kjeller. Det ble ikke tilbakefylt mellom spunt og bygg. Det ble etablert et lokk mellom spunt og bygg i terrengnivå. Lokket er konstruert slik at det ikke overfører last fra spunt til bygg under jordskjelv.



Figur 4.6: Arbeidstegning av spuntkonstruksjonen og kjeller (Sandbakk, 2017)

I henhold til arbeidstegningen på Figur 4.7 skal hulrommet mellom spunt og bygg være ca. 1,1 m. Merk at denne

tegningen viser spuntet sett fra sørsiden, og blir derfor speilvendt sammenlignet med de tidligere viste tegningene av spuntkonstruksjonen. Vi ser kjelleren på venstre side og spuntet på høyre side.



Snitt BK: Betonglokk mot spunt - kfr. snitt 50/120-121
1:20

Figur 4.7: Detaljtegning av spuntkonstruksjonen og kjeller (EDS, 2017)

4.3 Overvåking og monitorering

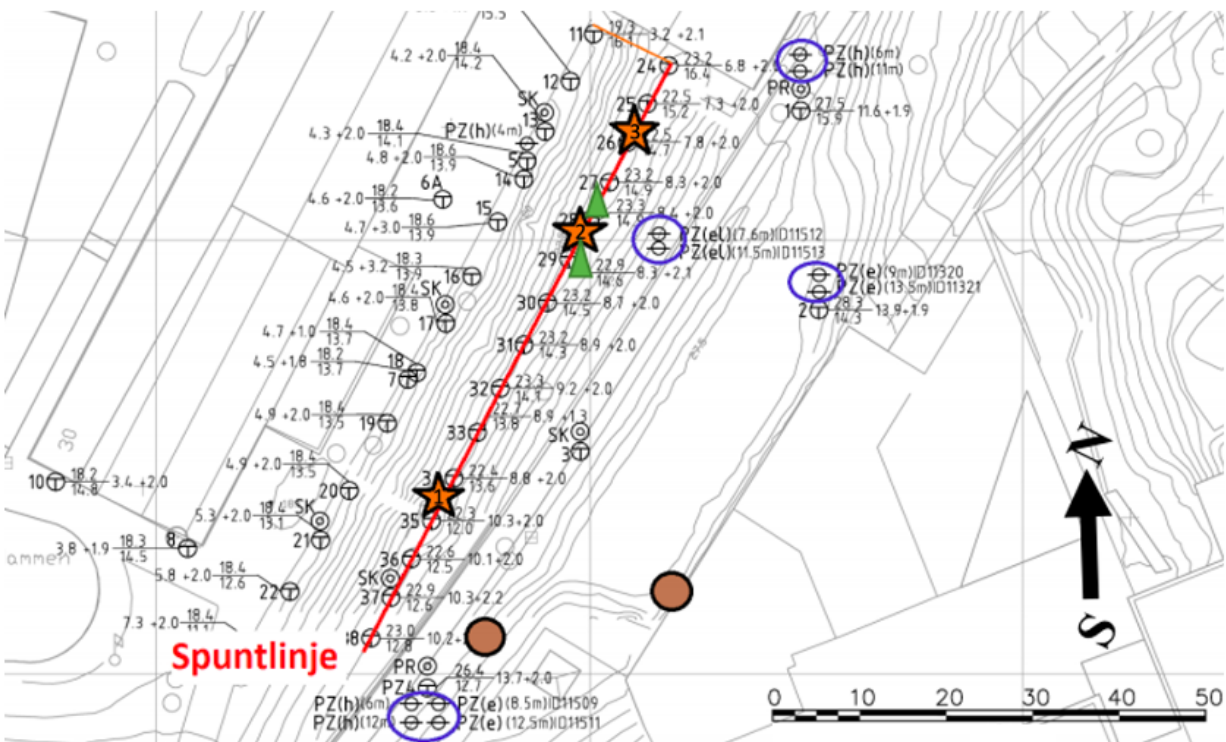
Måledataene som beregningene er sammenlignet med, er hentet inn av Cautus AS. Cautus AS begynte kontinuerlig monitorering og overvåking av spuntveggen ved byggestart, og utfører fortsatt målinger ved dags dato. I følgende delkapittel presenteres utvalgt teori om måleutstyret som brukes i forbindelse med overvåkingen av spuntveggen.

Måleutstyret brukt i overvåkingen er som følger

- 3 inklinometermålere langs spunten
- 2 lastceller
- 4 hydrauliske og 6 elektriske poretrykksmålere
- 2 vibrasjonsmålere i løsmasser
- Setningsnivellement på nabobygg

Inklinometerene måler deformasjoner av spuntveggen og lastcellene måler lasten i ankrene.

Plasseringen av disse er markert i Figur 4.8.



Figur 4.8: Plassering av inklinometer 1, 2 og 3 (oransje nummererte stjerner), lastceller (grønne trekkanter), poretrykksmålere (blå ring) og vibrasjonsmålere (brune prikker) (Langelid & Naglestad, 2019).

Inklinometre

For måling av deformasjoner i spuntveggen ble det benyttet borhullsinstrumenter av typen Measurand SAAF500 Model 3. Dette er en sammenhengende kabel bestående av 500 mm lange målesegmenter. MEMS-sensorer i målesegmentene måler vinkelendringer mellom segmentene med svært høy nøyaktighet (Walberg, 2017). Instrumentet overvåker også temperaturen langs målekabelen, for å kunne ta høyde for temperaturendringer i deformasjonsberegningen. SAAF systemet ansees å være et robust system, med oppgitt nøyaktighet på 1,5 mm for en instrumentlengde på 32 m (Measureand, 2019).

Det ble benyttet 3 instrumenter av denne typen i dette prosjektet:

Tabell 4.1: Inklinometrene som ble benyttet i prosjektet

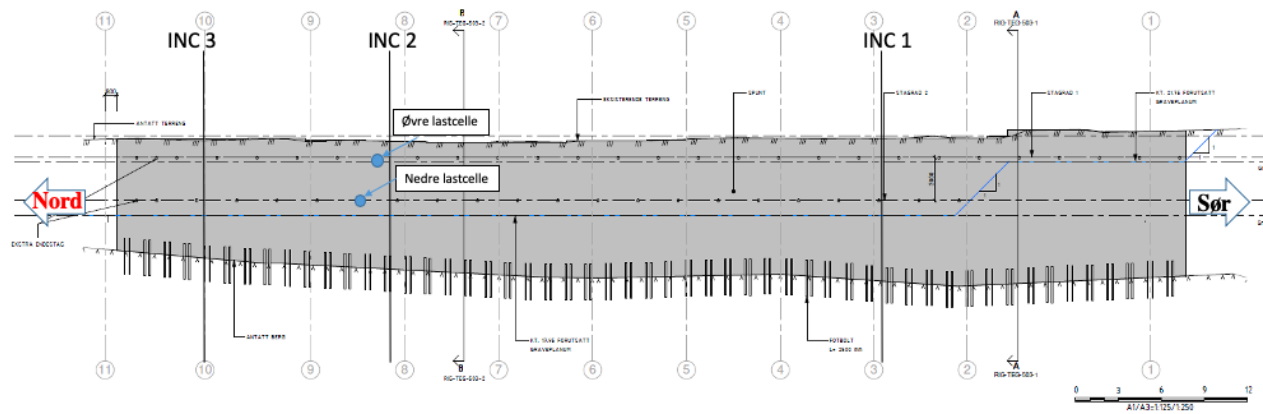
Navn	Intrumentlengde	Lengden av målesegmenter
INC1	10m	0,5m
INC2	9,5	0,5 m
INC3	8,5	0,5 m

Installasjonen av de tre inklinometerene ble utført 3.juli 2017. Instrumentene ble installert i en plast-casing og plassert i et firkantrør som var sveiset til spuntnålene på jordsiden av veggen. Inklinometerkanalene var forhåndsmontert langs hele spuntlengde, fra toppen og ned til fast fjell der spunten var forankret med bergbolter. Bunnen av instrumentet antas å være det mest stabile punktet på instrumentet. Bunnen av instrumentet ble derfor satt til nullpunktsreferansen for målingene. Segmentene er nummerert med segment nr.1 første målepunkt i bunn av kanalen og økende nummerering mot spunttopp (Langelid & Naglestad, 2019).

Lastceller på ankerstag

For måling av last i ankerstag ble lasteceller av typen Geonese VWLC 5000 benyttet. Disse hadde en øvre kalibrert kapasitet på 2500kN, men var designet for å håndtere laster opp til 3000kN. Lastcellene installeres med kraftfordelingsplater og har fem interne sensorer for hver celle. Det er for å utligne for skjevbelastninger mellom lissestag og pute. Nøyaktigheten av lastcellene som ble brukt er oppgitt å være 0,5% av full skala (Geosense, 2019).

Lastcellene ble installert 6.september og 23.oktober 2017 i henholdsvis øvre og nedre stagrad. De ble montert med en avstand på ca. 1 m horisontalt og 2,5 m vertikalt (Langelid & Naglestad, 2019) Figur 4.9 viser planlagt plassering av stagene. Inklinometer 2 er plassert mellom punktene der stagene er festet og er ca. 1-2 m unna lastcellene (se Figur 4.9). Lastcellene ble forhåndskalibrert i lab og kontrollert før installasjon i felt. En siste kontroll ble utført under oppspenning og belastningstest. Da ble belastningen på den hydrauliske oppspenningsjekken registrert og sammenlignet med lastcellens målte verdier (Langelid & Naglestad, 2019).



Figur 4.9: Utsnitt fra spuntoppriss som viser plassering av inklinometere og lastceller på spunt ihht. [Ulvestad \(2017\)](#)

Loggeintervall

Under etableringsfasen var loggeintervallet for inklinometere og lastceller satt til hvert 15. minutt. Ved overgangen til permanent fase ble det samme loggeintervallet opprettholdt, men under enkelte kritiske deler av etableringsfasen ble det brukt hyppigere måleintervall. Dette kunne justeres for ved fjernstyring ([Langelid & Naglestad, 2019](#)).

Kapittel 5

Inputparametre

5.1 Modell A - termisk tøyning kun av spuntvegg

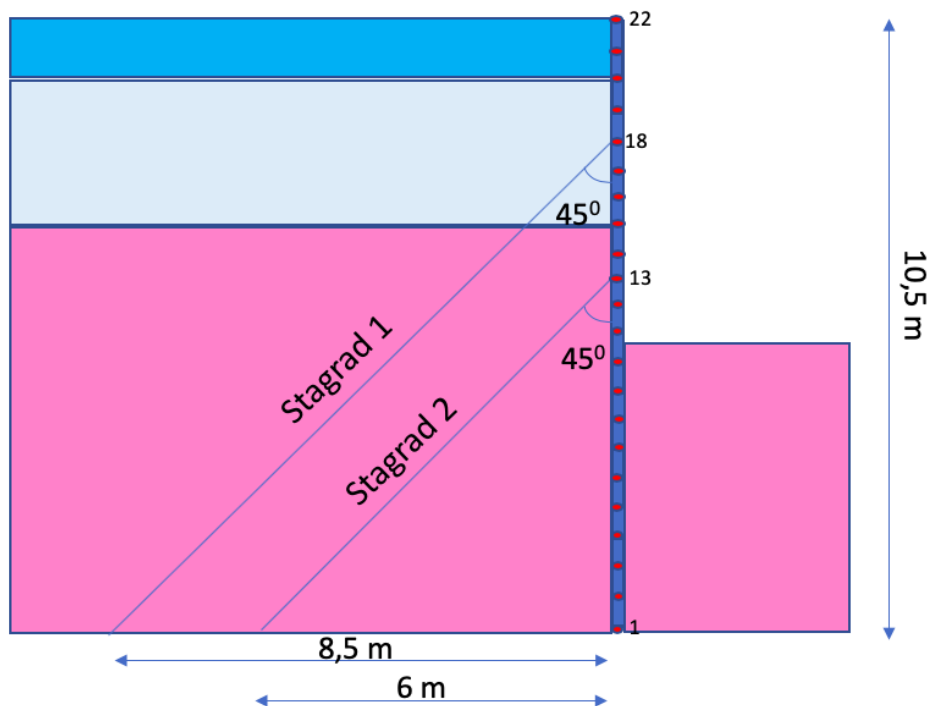
Som beskrevet i Kapittel 3 er Modell A en beregningsmodell for termisk tøyning i spuntveggen på en sikringskonstruksjon. Modellen bruker en diskretelement-metode for å modellere interaksjonen mellom spuntvegg, jord og ankerstag ved termisk tøyninger i spuntvegg. Modellen deler veggen inn i elementer og noder nummerert nedenfra og opp. For å oppsummere gjentas Ligning (3.20), der tøyningen i et element av spuntveggen mellom node i og $i + 1$ beregnes som en funksjon av gjennomsnittlig temperaturendring i elementet og trykkraft N_i fra ovenliggende node:

$$\epsilon_{i,i+1} = \alpha \times \frac{\Delta T_i + \Delta T_{i+1}}{2} - \frac{N_i}{(EA)_{spunt}} = \frac{\delta_{i+1} - \delta_i}{h}$$

Trykkraften N_i er et resultat av både kreftene i ankrene og friksjonskreftene fra jorda inntil veggen. I denne seksjonen vil det bli gitt en gjennomgang av valg av inputparametre for beregningene utført med denne modellen.

5.1.1 Geomteridata

Spuntveggen er delt inn i elementer som vist i Figur 5.1.



Figur 5.1: Dimensjoner for stag og spuntvegg. Ved beregning med modell B er spuntveggen delt inn i elementer (blå rektangler) med noder (røde prikker) mellom hvert element.

Temperaturen er målt for hver halvmeter og elementhøyden (h) ble derfor satt lik 0,5 m. Ettersom spuntens høyde er 10,5 m, bestod spuntveggen dermed av 21 elementer (n_{el}) og 22 nodepunkter (n_p). Nullpunktet for z settes ved spuntfoten med positiv retning oppover slik at z_{max} blir 10,5 m, som er spuntens høyde. Antall lag (n_{lay}) er satt lik fire. Se Avsnitt 5.1.3 for begrunnelse. Nevnte inputparametre er oppsummert i Tabell 5.1.

Tabell 5.1: Inputparametre for spuntvegg delt inn i elementer og noder

Geometridata		
	Data	Enhet
zmin	0	[m]
zmax	10,5	[m]
h	0,5	[m]
n_{el}	21	[-]
n_p	22	[-]
n_{lay}	4	[-]

5.1.2 Parametre for strukturelle komponenter

Inputparametrene for de strukturelle komponentene av sikringskonstruksjoenen er presentert i Tabell 5.2. Verdiene for elastisitetsmodulen E , senteravstanden mellom stagene L_{CC} , vinkelen mellom stag og spuntvegg β er hentet fra Nielsen og Frossard (2017). j_a er nummeret på noden der ankerstaget er festet (nummerert i Figur 5.1). Ankrene har

innfesting ved høyde 6 og 8,5, hvilket tilsvarer node 13 og 18. L_{stag} er beregnet som fri ankerlengde, gitt av Figur 5.1:

$$L_1 = \sqrt{8,5^2 + 8,5^2} = 12 \quad (5.1)$$

$$L_2 = \sqrt{6^2 + 6^2} = 8,5 \quad (5.2)$$

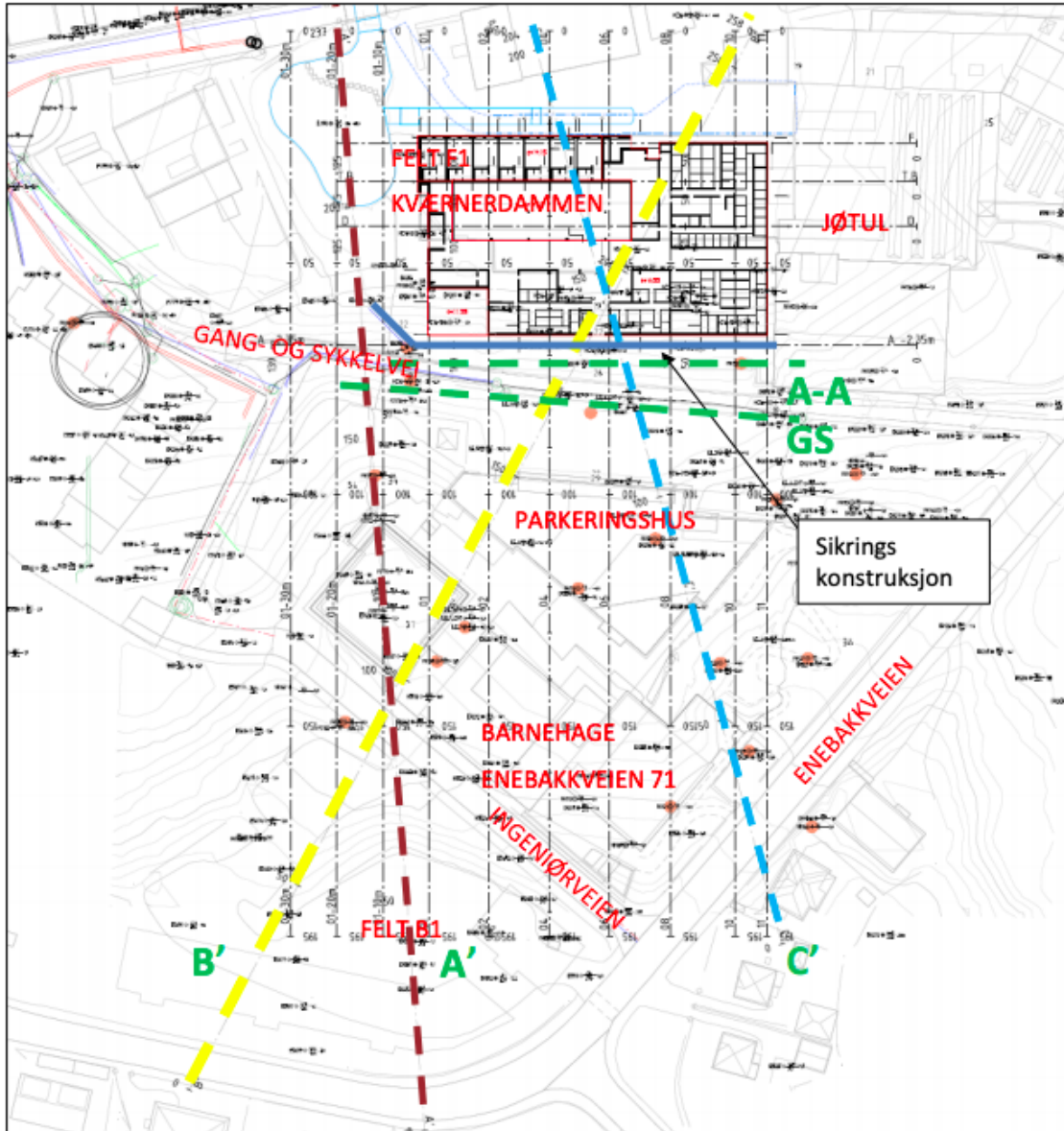
Tabell 5.2: Materialparametre

	Spunt	Anker 1	Anker 2	Enhet
E	$2,1 * 10^8$	$2,1 * 10^8$	$2,1 * 10^8$	[kPa]
L_{stag}	-	12	8,5	[m]
L_{CC}	-	2,8	2,8	[m]
β	-	45	45	[°]
EA	$4,8 * 10^6$	$5,9 * 10^5$	$5,9 * 10^5$	[kN/m]
ja	-	18	13	[-]

5.1.3 Lagdeling

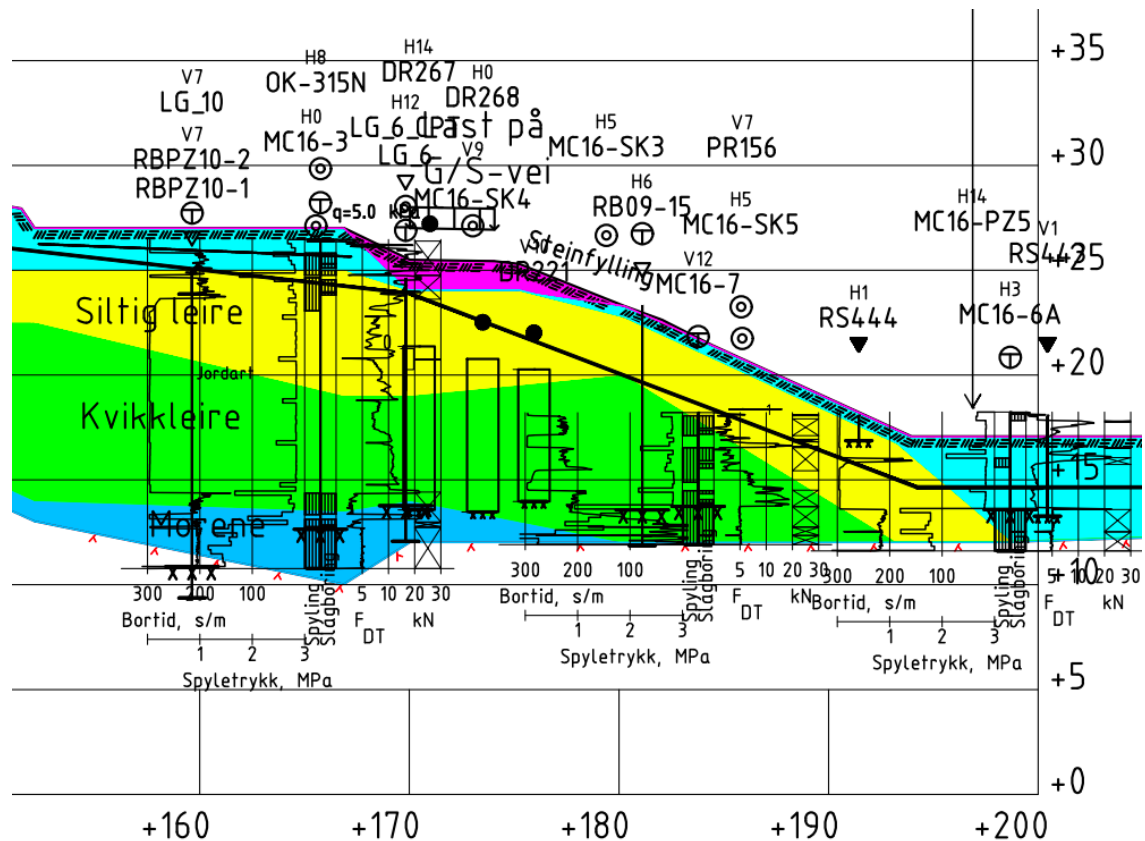
Bestemmelse av lagdelingen og skjærmodulen G er basert på Multiconsults vurderinger og antagelser gjort ved dimensjonering av spuntkonstruksjonen. Disse vurderingene står beskrevet i Beregningsnotat 006A utarbeidet av [Nielsen og Frossard \(2017\)](#). For å gjenskape en jordstrukturmodell er det tatt utgangspunkt i tidligere grunnundersøkelser og vurderinger av et prosjekt ved Felt B1 utført av Multiconsult i 2014, og ved Enebakkveien 71 utført av NGI i 2009. Forholdene er blitt justert og tilpasset dagens situasjon mht. terreng, topografiforhold og lagdeling. Multiconsult utførte også noen supplerende undersøkelser i bunn av skråningen, for bedre grunnlag for tolkning i bunn av skråningen. Basert på dette er gjort en vurdering av en generalisert og antatt konservativ lagdeling for skråningen bak spunten.

Lagdelingen valgt etterstreber antatt verst mulig lagdeling langs et vurdert mest kritisk tverrsnitt. Det er sett på flere langs og tverrgående snitt, se Figur 5.2, der Profil B' ble vurdert som mest representativt for dagens mest kritiske situasjon i det aktuelle området.



Figur 5.2: Oversiktskart med beregningsnett benyttet i dimensjonering

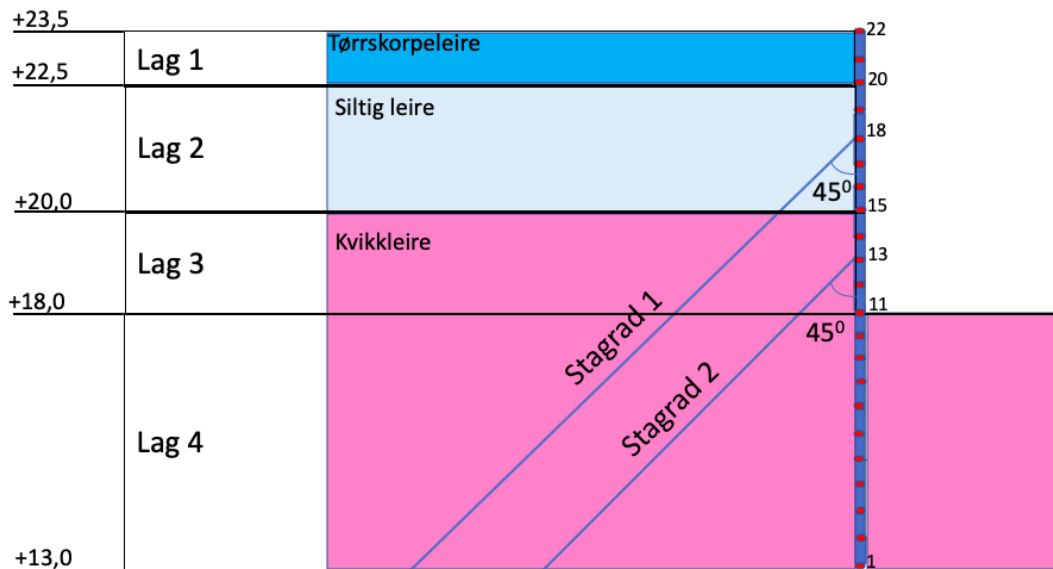
Figur 5.3 viser et utklipp av en presentasjon av sonderinger og tolket lagdeling for Profil B.



Figur 5.3: Sonderinger og tolket lagdeling for Profil B (Nielsen & Frossard, 2017)
Hele Profilnet er vist i Vedlegg D.3

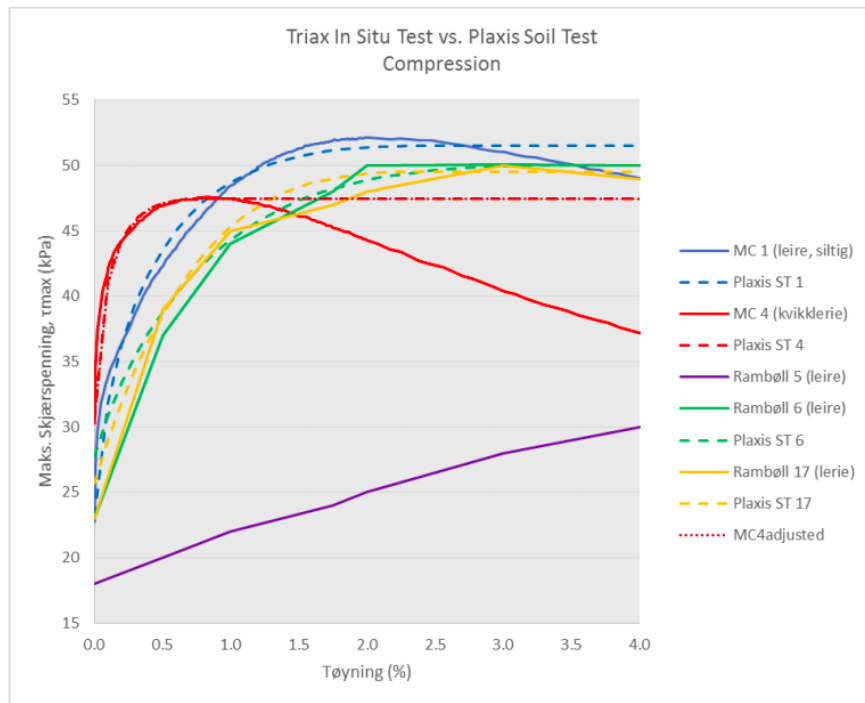
For denne beregningsmodellen er det kun lagdelingen ved spuntlinjen som er relevant. Der er det som Figur 5.3 viser 1 m med tørrskorpeleire i toppen, etterfulgt av siltig leire ned til kote +20 og deretter et tykt lag med kvikkleire ned til +13 der det er fast fjell.

Det er gravd ned til kote +18 på en side av spuntet. Inputparameteren n_{sides} angir antall sider av spuntet som er nede i jorda. Kvikkleirelaget må derfor deles inn i to lag der øverste har $n_{sides} = 1$ og laget nedenfor utgravningsnivået har $n_{sides} = 2$. I jordmodellen til Model A er det derfor delt inn i fire lag ($n_{lay} = 4$), selv om antatt lagdeling bare består av tre lag, vist i Figur 5.4.

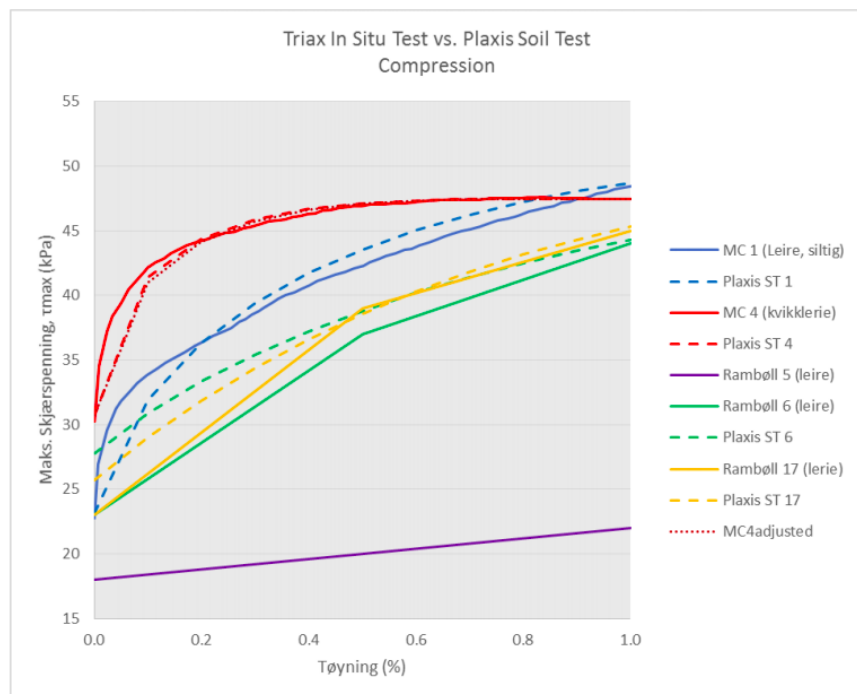


Figur 5.4: Antatt lagdeling for Modell A. Nodenummer er angitt i noder som skiller to lag og i noder der stagen er festet

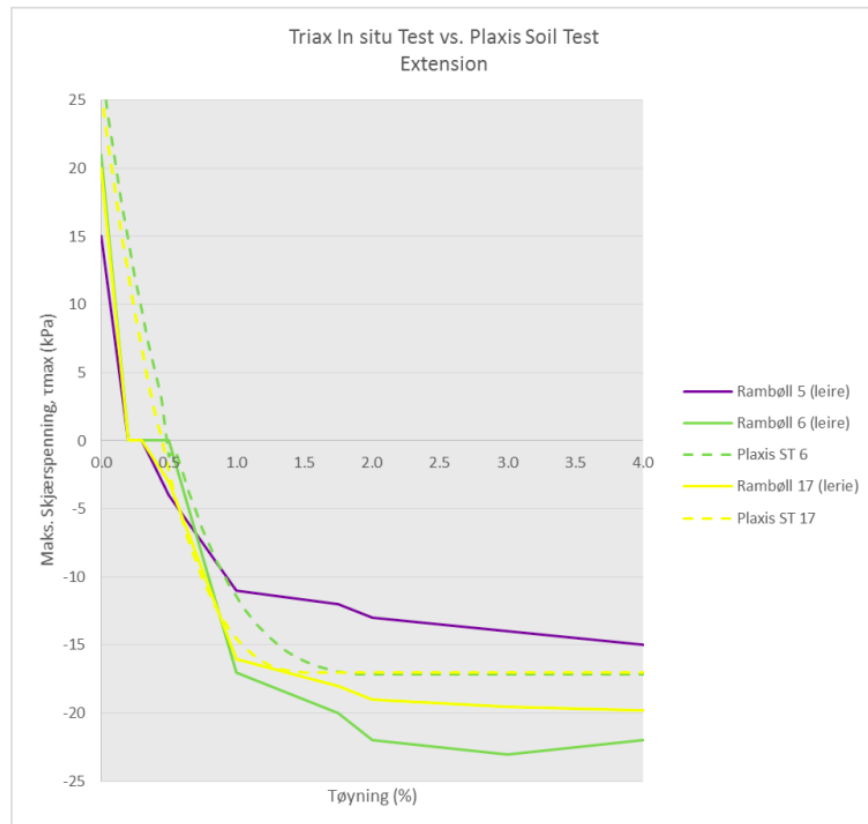
For skjærmodul(G) er det brukt de samme verdiene som Multiconsult brukte ved dimensjonering, hentet fra [Nielsen og Frossard \(2017\)](#). Det foreligger resultater fra 5 treaksialforsøk. To CAUa utført av Multiconsult(MC1 og MC4) og tre CAUa/CAUp utført av Rambøll(5, 6 og 17). Soil Test ble kjørt i Plaxis for sammenligning og bestemmelse av stivhetsparametre. Rambøll 5, 6 og 7 ble vurdert som dårlig kvalitet basert på vannutpressing under konsolidering. MC 1(siltig leire) ble vurdert som godt forsøk basert på det samme, samt vurderinger av prøvens respons i skjærfasen. Responsen prøven viste anses som brukbar, og er benyttet i tolkning av parametrene for siltig leire. MC4 (kvikkleire) er definert som «dårlig kvalitet» basert på vannutpressing under konsolidering. Det er derfor valgt en konservativ tolkning for parametrene i kvikkleire basert på en tilnærmelse mellom forsøk på kvikkleire (MC4) og siltig leire (MC1). Sammenligningene for parameterbestemmelse, gjort i soil test, er vist i [Figur 5.5](#), [5.6](#) og [5.7](#).



Figur 5.5: Triaxprøver for kompresjon plottet mot resultater i PLAXIS Soil test (Nielsen & Frossard, 2017)



Figur 5.6: Triaxprøver for kompresjon plottet mot resultater tilpasset i PLAXIS Soil test (Nielsen & Frossard, 2017)



Figur 5.7: Triaxprøver for forlengelse plottet mot resultater i PLAXIS Soil test (Nielsen & Frossard, 2017)

Den antatte lagdelingen ved spunt og skjærmodul tolket ut ifra Soil Test i PLAXIS for hvert lag er oppgitt i Tabell 5.3.

Tabell 5.3: Lagdeling ved spunt

Kote	Jordart	$G[kPa]$
+22,5-23,5	Tørreskorpeleire	3846
+20-22,5	Siltig leire	2400
+13-20	Kvikkleire	1333

Inputverdiene for hvert lag er presentert i Tabell 5.4.

Tabell 5.4: Inputparametre i Modell A for de 4 lagene ved spunt

	Lag 1	Lag 2	Lag 3	Lag 4	Enhet
nup	22	20	15	11	[-]
nb	20	15	11	1	[-]
G	3846	2400	1333	1333	[kPa]
t	0,2	0,2	0,2	0,2	[m]
nsides	1	1	1	2	[-]

5.1.4 Temperaturendring

Modell A beregner endring i ankerkrefter ut ifra temperaturendringen (ΔT) for hvert element i spuntveggen. Temperaturendringen ΔT for en måned er beregnet som differansen mellom temperatur for den aktuelle måneden og temperaturen for juni 18. Inklinometerene installert langs spuntkonstruksjonen ved Kværnerdammen måler temperaturen nedover i profilet. I Tabell 5.5 er inputdata for hver måned presentert. Inklinometer 1 er lengst og strekker seg fra spuntfoten til 9,5 m høyde på spunten. Det er derfor benyttet data fra dette inklinometeret. Det finnes ikke data for temperaturen i den øverste meteren av den 10,5m høye spunten. Det ble derfor gjort en forenkling der spunten antas å ha samme temperatur mellom 9,5 og 10,5m høyde. Temperaturen målt ved 9,5 m høyde bli dermed input for hele den øverste meteren av spunten. Ettersom det er utvidelsen nedenfor stagfestene som medfører økning i ankerkrefter vil denne forenklingen ikke påvirke resultatene. Temperaturmålingene fra inklinometer 1 er gitt i Vedlegg D.2.

Tabell 5.5: Verdier av ΔT relativt til juni 18, ved ulike koter, redusert til én desimal. Ved spuntfoten er $dZ=0$

dZ	jun. 18	jul. 18	aug. 18	sep. 18	okt. 18	nov. 18	des. 18
0,0	0,0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,6	0,5
0,5	0,0	0,3	0,6	0,9	1,0	1,0	0,9
1,0	0,0	0,6	1,1	1,5	1,7	1,6	1,5
1,5	0,0	0,9	1,6	2,3	2,4	2,3	2,1
2,0	0,0	1,3	2,2	2,9	3,0	2,8	2,4
2,5	0,0	1,5	2,7	3,3	3,3	2,9	2,4
3,0	0,0	1,6	3,1	3,5	3,3	2,5	1,8
3,5	0,0	1,4	3,5	3,2	2,7	1,3	0,6
4,0	0,0	0,9	3,5	2,3	1,3	-0,2	-1,3
4,5	0,0	0,4	3,3	1,3	-0,1	-1,6	-2,9
5,0	0,0	0,2	3,4	0,7	-1,0	-2,4	-4,1
5,5	0,0	-0,2	3,2	-0,1	-2,1	-3,4	-5,3
6,0	0,0	-0,6	2,7	-1,1	-3,2	-4,6	-6,5
6,5	0,0	-0,8	2,4	-1,8	-4,1	-5,7	-7,7
7,0	0,0	-1,1	2,1	-2,5	-5,1	-7,1	-9,3
7,5	0,0	-1,8	1,8	-3,5	-6,6	-9,5	-11,6
8,0	0,0	-1,8	1,4	-4,9	-8,9	-12,8	-14,2
8,5	0,0	0,3	1,3	-5,5	-10,3	-14,5	-14,5
9,0	0,0	2,6	1,5	-5,9	-10,9	-15,1	-14,2
9,5	0,0	8,2	2,3	-5,6	-10,3	-13,1	-10,5
10,0	-	-	-	-	-	-	-
10,5	-	-	-	-	-	-	-

Tabell 5.6: Verdier av ΔT relativt til juni 18, ved ulike koter, redusert til én desimal. Ved spuntfoten er $dZ=0$

dZ	jan. 19	feb. 19	mar. 19	apr. 19	mai. 19	jun. 19	jul. 19	aug. 19	sep. 19
0,0	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6
0,5	0,8	0,7	0,6	0,4	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0
1,0	1,3	1,1	0,8	0,7	0,7	0,9	1,2	1,5	1,8
1,5	1,7	1,5	1,1	0,8	0,9	1,3	1,7	2,2	2,6
2,0	1,8	1,5	1,0	0,7	1,0	1,6	2,0	2,8	3,3
2,5	1,7	1,2	0,6	0,3	0,9	1,7	2,3	3,4	3,8
3,0	1,1	0,2	-0,3	-0,6	0,6	1,5	2,3	3,8	4,0
3,5	0,0	-1,7	-1,8	-1,9	-0,1	1,0	1,9	4,0	3,7
4,0	-1,7	-4,6	-3,3	-3,3	-0,9	0,3	1,4	3,5	3,0
4,5	-3,4	-6,8	-4,8	-4,6	-1,8	-0,5	0,8	3,0	2,4
5,0	-4,5	-7,8	-5,7	-5,2	-2,2	-0,8	0,5	2,8	2,2
5,5	-5,6	-8,9	-6,7	-5,9	-2,7	-1,2	0,2	2,4	1,7
6,0	-6,8	-10,2	-7,8	-6,8	-3,4	-1,9	-0,4	1,8	1,0
6,5	-8,1	-11,5	-9,0	-7,7	-4,1	-2,6	-0,9	1,3	0,3
7,0	-9,9	-13,2	-10,5	-8,9	-4,8	-3,5	-1,5	0,8	-0,5
7,5	-12,7	-16,1	-12,9	-10,7	-5,6	-4,8	-2,0	-0,1	-1,5
8,0	-16,5	-20,2	-16,7	-13,6	-6,0	-6,0	-2,3	-2,1	-2,8
8,5	-18,8	-22,8	-18,6	-15,8	-5,3	-6,1	-1,2	-3,2	-3,7
9,0	-18,0	-23,3	-19,3	-17,3	-5,1	-6,3	-0,6	-4,0	-4,0
9,5	-13,3	-19,4	-16,0	-16,9	-4,7	-5,2	1,3	-1,2	-2,5
10,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Inklinometeret måler temperaturen på jordsiden av veggen. Det er imidlertid mulig at opptredende temperatur i spuntveggen viker fra målt temperatur på jordsiden av spuntveggen. Avstanden mellom bygget og senter spunt er 1,5 m (Knutsen, 2017c). Mellomrommet mellom spuntveggen og bygningen er ikke fylt igjen og består av luft. Her kan varme og luft sirkulere fritt. I løpet av året målingene er hentet fra er temperaturen på jordsiden av veggen tilnærmet konstant ved bunnen av spuntveggen imens den har en variasjon på ca. 20°C i toppen.

I luftrommet på andre siden av spuntveggen vil luften kunne sirkulere. Varmefordelingen på denne siden antas å styres av konveksjon i luft. Konveksjon er et annet ord for varmestrømning, og beskrives av Institutt for biovitenskap (2011) som overføring av varme som skyldes turbulente bevegelser i en luft eller væskestrøm. Varm luft har høyere tetthet enn kald luft, hvilket gjør at varm luft stiger og kald luft synker. Luften i rommet mellom spunt og bygg vil derfor hele tiden sirkulere for å opprettholde denne fordelingen. Samtidig skjer en kontinuerlig varmeoverføring mellom luftpartiklene, hvilket begrenser hvor stor differansen mellom topp og bunn kan bli. Det kan dermed argumenteres for at temperaturendringene er større på luftsidene av spuntveggen enn på jordsiden, der varmeoverføringen bremses opp av flere meter med jord. Det vil derfor utføres en separat analyse der temperaturendringen ΔT_i beregnet i Tabell 5.5 og 5.6, ganges opp med en faktor f_{temp} . Den justerte verdien for et gitt punkt i langs spuntene er dermed:

$$\Delta T_{i,justert} = \Delta T_i \times f_{temp} \quad (5.3)$$

5.1.5 Referanseverdi

Som beskrevet i Kapittel 3 beregner Modell A endringen i ankerkraft, ΔN , induisert av en gitt temperaturendring. For å finne opptredende ankerkraft etter temperaturendringen (N_{etter}) må opptredende ankerkraft før temperaturendringen (N_{ref}) legges til. Som oppgitt er temperaturendringen beregnet med 01.06.18 kl. 00:00:00 som startpunkt. Referanseverdien N_{ref} skulle dermed vært målt ankerkraft på det tidspunktet. En testberegning viste imidlertid at dette ga resultater som virket å være forskjøvet sammenlignet med målingene, spesielt for øvre lastcelle. En sammenligning for dette er vist i Vedlegg B. I dette prosjektet ble lastceller av typen Geonese VWLC 5000 benyttet for måling av last i ankerstag. Nøyaktigheten for disse lastcellene er oppgitt å være 0,5% av full skala (Geosense, 2019). Med bakgrunn i dette ble referanseverdien justert slik at beregnede verdier sammenfalt bedre med de målte. Opprinnelig og justert verdi er oppgitt i Tabell 5.7.

Tabell 5.7: Opprinnelig og justert referanseverdi for ankerkraft N_{ref}

	Referanseverdi, ankerkraft i øvre stegrad [kN]	Referanseverdi, ankerkraft i nedre stegrad [kN]
Verdi målt 01.06.18 kl. 00:00	1619,21	1368,996
Justert verdi	1614	1374

Den justerte verdien er referanseverdi(N_{ref}) for alle beregningene utført på sikringskonstruksjonens ankerkrefter i denne avhandlingen, både beregninger med Modell A, håndberegninger og beregninger med Modell B.

5.1.6 Analyser

Inputverdiene for temperaturendring, geometridata, materialparametre og lagdeling som er antatt i det foregående, beskriver Beregning A0. Det er imidlertid utført 4 analyser der enkelte verdier varieres. I Analyse A1 blir beregninger for 4 ulike verdier av t sammenlignet. I Analyse A2 blir beregning med $G = G_0$ sammenlignet med en beregning med $G=0,1$ kPa. I Analyse A3 blir temperaturendringen ΔT_i beregnet i foregående avsnitt, ganget opp med en faktor f_{temp} . Analysen sammenligner beregninger for 5 ulike verdier av f_{temp} . I A1 og A2 er ΔT_i i Tabell 5.5 brukt. Dette er markert i Tabell 5.8 ved å sette $f_{temp} = 1,0$ for disse beregningene.

Tabell 5.8: Analyser

	Beregning	t [m]	G [kPa]	f_{temp}
Analyse A1	A1.1	0,1	G_0	1,0
	A0	0,2	G_0	1,0
	A1.2	0,5	G_0	1,0
	A1.3	1	G_0	1,0
Analyse A2	A0	0,2	G_0	1,0
	A2.1	0,2	0,1	1,0
Analyse A3	A0	0,2	G_0	1,0
	A3.1	0,2	G_0	1,1
	A3.2	0,2	G_0	1,2
	A3.3	0,2	G_0	1,4
	A3.4	0,2	G_0	1,6

5.2 Håndberegning

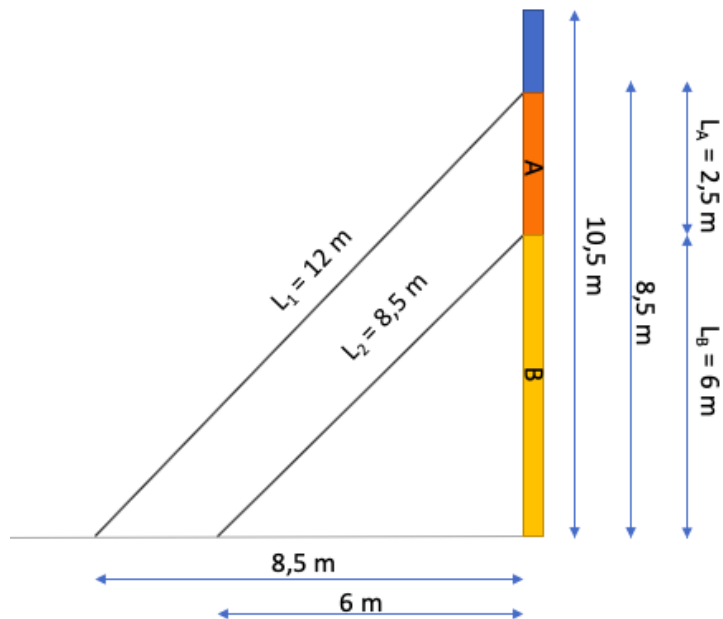
Håndberegningen tar utgangspunkt i noen av de samme effektene som Modell A. De betrakter begge effekten av termisk tøynings av spuntvegg, men håndberegningene bruker ikke diskret elementmetode, og inkluderer ikke effekten av friksjon fra jorden inntil spuntveggen. I denne seksjonen vil valg av inputparametre for håndberegningen begrunnes. Flere av inputparametrene er de samme som for Modell A, og bygger dermed på de samme antagelsene som parameterbestemmelsen i foregående seksjon.

5.2.1 Parametre for strukturelle komponenter

Materialparametrene for de strukturelle komponentene er oppgitt i Tabell 5.9, og er de samme som i Modell A (beregningsmodell for termisk utvidelse av spuntvegg). I håndberegningen ble det imidlertid beregnet pr. 2,8 m spuntvegg, og input EA for spunten er justert deretter:

$$EA_{pr.2,8m} = EA_{pr.m.spunt} * L_{cc} = 4,8 * 10^6 * 2,8 = 1,34 * 10^7 \text{ kN/m} \quad (5.4)$$

Sikringskonstruksjonens dimensjoner er illustrert i Figur 5.8.



Figur 5.8: Sikringskonstruksjonen med dimensjoner

Inputverdier for strukturelle parametre i håndberegningen er oppgitt i Tabell 5.9.

Tabell 5.9: Inputverdier for strukturelle komponenter

	Spunt	Anker 1	Anker 2	Enhet
L_{stag}	-	12	8,5	[m]
L_{CC}	-	2,8	2,8	[m]
L_A	2,5	-	-	[m]
L_B	6,0	-	-	[m]
β	-	45	45	[°]
$EApr.2,8m$	$1,34 * 10^7$	$5,9 * 10^5$	$5,9 * 10^5$	[kN/m]

5.2.2 Temperaturendring

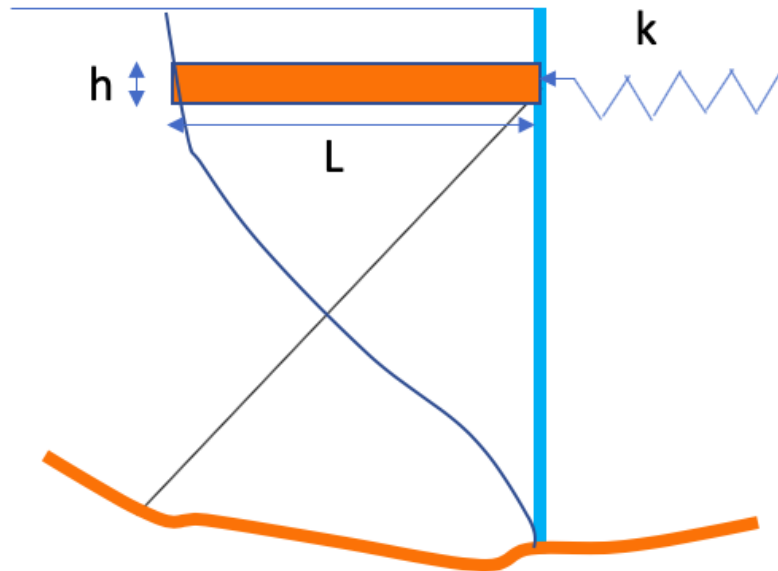
Inputparametrene for temperatur i del A og B av spunten (se Figur 5.8), er beregnet ut ifra ΔT -verdiene i Tabell 5.5. ΔT_A er gjennomsnittet av verdiene i intervallet $dZ = [0, 0, 6, 0]$ og ΔT_B er gjennomsnittet av verdiene i intervallet $dZ = [6, 0, 8, 5]$. ΔT_A og ΔT_B er presentert i Tabell 5.10.

Tabell 5.10: Gjennomsnittlig temperaturendring (relativt til juni 18) i del A og del B av spuntveggen

Måned	ΔT_A	ΔT_B
jun. 18	0,0	0,0
jul. 18	-0,5	0,7
aug. 18	1,9	2,4
sep. 18	-3,6	1,6
okt. 18	-7,0	1,0
nov. 18	-9,9	0,2
des. 18	-11,1	-0,6
jan. 19	-13,0	-1,0
feb. 19	-16,8	-2,6
mar. 19	-13,6	-2,0
apr. 19	-11,5	-1,9
mai. 19	-4,9	-0,5
jun. 19	-4,5	0,4
jul. 19	-1,3	1,1
aug. 19	-0,8	2,5
sep. 19	-1,6	2,4

5.3 Modell B - termisk tøyning i jord

Modell B betrakter en induksjon av krefter i ankerene som et resultat av termisk utvidelse i jorda bak spuntveggen. Modellen beregner utvidelsen i et jordlag i høyde samme høyde som ankerfestet for et stag, som vist på Figur 5.9.



Figur 5.9: Dimensjoner av jordlaget som utvider seg ved oppvarming av leira

Det er utført to separate beregninger med Modell B, en for øvre stegrad og en for nedre stegrad. Det antas dermed at det termisk induserte jordtrykket ved øvre stegrad ikke påvirker nedre stegrad og motsatt. I virkeligheten kan man se for seg at det i større grad vil være et samspill der kreftene fordeles mellom de ulike delene av sikringskonstruksjonen. Det understrekes derfor at Modell B er en forenkling av det som forventes å skje i virkeligheten. I det følgende beskrives vurderingene som ligger bak valg av inputparametre for beregningene med Modell B.

5.3.1 Parametere for jordlagene

Modell B betrakter utvidelsen av et jordlag som ligger i samme høyde som innfestingen av ankerstaget for en spuntvegg. Dette jordlaget er markert i Figur 5.9 som et oransje rektangel.

Parameteren h

h er høyden av jordlaget som utvider seg ved oppvarming og medfører en økning i ankerkraft for stagen som holder vegg tilbake. Modellen betrakter en idealisert situasjon der et jordlag med en gitt høyde h vil utvide seg og gi økt trykk i form av en horisontalrettet kraft F_h mot det punktet der ankerstaget er festet i spuntveggen. Resten av

spuntveggen tillater fri jordutvidelse uten å påvirke belastningen på ankerstagene. I virkeligheten vil man observere en mellomting. Spuntveggen vil tillate noe utvidelse, men vil også til en viss grad overføre krefter til ankerstagene. h må derfor velges som en antatt representativ verdi. Det vil bli utført en analyse, kalt Analyse B1, der beregninger for flere ulike verdier av parameteren sammenlignes. I øvrige analyser er det antatt $h = 0,5m$, både i beregninger for øvre og nedre stagrad.

Parameteren L

L er lengden av jordlaget som utvider seg ved oppvarming seg og medfører økt ankerkraft. Ideelt sett er dette et homogent lag uten diskontinuiteter med samme utvidelseskoeffisient og temperaturøkning langs sin fulle lengde. I virkeligheten vil et leirlag ofte inneholde diskontinuiteter i form av små sprekker, lommer av annet jordmateriale eller organsik materiale osv. L vil derfor, på samme måte som h , kun være en representativ verdi. Den kan være vanskelig å plassere, og det er derfor utført en analyse, kalt Analyse B2, der beregninger for et vidt spenn av verdier av parameteren sammenlignes. I øvrige analyser er det antatt $L = 2m$, både i beregninger for øvre og nedre stagrad.

Senteravstand

Senteravstanden horisontalt mellom stagene er $L_{CC} = 2,81m$ (Nielsen & Frossard, 2017) i både øvre og nedre stagrad.

Elastisitetsmodul E

I kote +21,5 der øvre stagrad er festet består jorda av siltig leire. I kote +18 der nedre stagrad er festet består jorda av kvikkleire. I Avsnitt 5.1.3 er det beskrevet en analyse utført av Nielsen og Frossard (2017) der Soil Test i PLAXIS benyttes i parameterbestemmelsen. Analysen ga som nevnt at $G = 2400kPa$ for den siltige leiren og $G = 1300kPa$ for kvikkleiren. Denne analysen ga også at Poissons tall $\nu = 0,495$ både for den siltige leiren og for kvikkleiren. E-modulen i Tabell 5.3.1 kan beregnes etter denne formelen (Nordal, 2019)

$$G = 2 \times E \times (1 + \nu) \quad (5.5)$$

Parameter	Øvre stagrad	Nedre stagrad	Enhet
G	2400	1300	[kPa]
ν	0,495	0,495	[-]
E	7176	3985,67	[kPa]

Temperaturutvidelseskoeffisienten i jorda

For å beregne den termiske tøyningen må verdien for den volumetriske tøyningen i det aktuelle temperaturintervallet bestemmes. Selv om det finnes mange publikasjoner som omtaler fenomenet volumetrisk tøyning i leire ved oppvarming, var det lite data tilgjengelig for verdien av den volumetriske tøyningen, utover Baldi et al. (1988) sitt plott fra Kapittel 3 (se Figur 5.11). Det var dermed vanskelig å bygge et solid grunnlag med erfaringsdata for

bestemmelse av denne verdien. Tabell 5.11 viser verdier for OC-leire, tolket fra Figur 5.11. Merk at i denne tabellen og i beregningene som er utført i forbindelse med denne avhandlingen, er volumutvidelse definert som positiv tøyning, i motsetning til slik de ble definerte i nevnte studie. Verdiene kommer fra drenerte triaksialtester. Jorda inntil spuntveggen ved Kværnerdammen består i hovedsak av siltig leire og kvikkleire. Det kan argumenteres for at situasjonen bør betraktes som udrenert, ettersom lagene består av leire. På den annen side er øvre leirlag siltig, og har dermed bedre dreneringsegenskaper enn ren leire. I tillegg er temperaturendringene ved Kværnerdammen en endring som skjer sakte over lengre perioder. Lagene det regnes på ligger også bare 2 m og 4,5 m under overflaten. Med langtidsperspektiv og kort dreneringsveg antas situasjonen derfor å være sammenlignbar med de drenerte laboratorietestene. Verdiene i Tabell 5.11 er dermed brukt som utgangspunkt i parametertolkningen.

Tabell 5.11: Verdier for termisk volumutvidelse i OC-leire (tolket fra Figur 3.1 i Kapittel 3)

Test	OCR	σ'	Måleintervall	ΔT	ϵ_V
1	12,5	0,2	22-40	18	0,12
2	2,5	1,0	22-40	18	0,68
3	1,42	3,5	22-40	18	-0,36

Som beskrevet i Avsnitt 4.1.2 antydte sonderingsforløpene overkonsolidert oppførsel både for øvre siltig leire og nedre kvikkleire. Videre ble både den siltige leiren og kvikkleiren gitt en OCR 1,2 i Multiconsults parametertolkning (Nielsen & Frossard, 2017). Kun basert på OCR ligner de mest på leiren i test nr. 3 med OCR 1,42, som viser volumkontraksjon. Men dette er bare resultatet for én leire i ett laboratoriestudie, og som det fremkommer av de ulike studiene omtalt i Kapittel 3 er det mange faktorer som påvirker resultatene. For å gjenta Burghignoli et al. (2000) avhenger omorganiseringen av partikler (og dermed også volumtøyningen) ved oppvarming, av både (i) spenningshistorie, (ii) termisk historie, (iii) nylig spenningshistorie, (iv) tiden som gikk mellom slutten av den primære konsolidering av den siste mekaniske belastningen som ble påført og starten av den termiske belastningen, og (v) varigheten av oppvarmingen og konstante høye temperaturfaser. Det er derfor valgt å gjøre en analyse, kalt Analyse B3, av beregninger med ulike verdier for volumtøyningen ϵ_V . Verdiene er valgt med Tabell 5.11 som utgangspunkt for størrelsesorden. I Modell B er det imidlertid utvidelseskoeffisienten i horisontalretning, her benevnt som α_{jord} , som er inputparameteren. Med antagelsen om at termisk tøyning i jorda er isotropisk, er horisontal tøyning

$$\epsilon_h = \frac{1}{3} * \epsilon_V \quad (5.6)$$

Utvidelseskoeffisienten i horisontalretning, α_{jord} , kan dermed beregnes slik

$$\alpha_{jord} = \frac{1}{3} * \frac{\epsilon_V}{\Delta T} \quad (5.7)$$

Tabell 5.3.1 oppsummerer de beregnede verdiene for Analyse B3. ϵ_V verdiene er valgt basert på verdiene i Tabell 5.11. I øvrige analyser er det antatt $\alpha_{jord} = 3,7 * 10^{-5}$, , både i beregninger for øvre og nedre stegrad.

Beregning	ΔT	ϵ_V [-]	α_{jord} [1/°C]
B3.1	18	0,05	$9,3 * 10^{-6}$
B3.2	18	0,10	$1,9 * 10^{-5}$
B3.3	18	0,2	$3,7 * 10^{-5}$
B3.4	18	0,3	$5,6 * 10^{-5}$
B3.5	18	0,5	$9,3 * 10^{-5}$
B3.6	18	0,7	0,0001296

Oppsummering av parametere for jordlagene

Utgangsverdiene for h , L , L_{cc} , E og α_{jord} er oppsummert i Tabell 5.3.1. h , L og α_{jord} er svært usikre parametere og vil derfor bli undersøkt ytterligere i egne analyser.

Parameter	Øvre stagrad	Nedre stagrad	Enhet
h	0,5	0,5	[m]
L	2	2	[m]
L_{cc}	2,81	2,81	[m]
E	7176	3985,67	[kPa]
α_{jord}	$3,7 * 10^{-5}$	$3,7 * 10^{-5}$	[1/°C]

5.3.2 Temperaturendring

Inputparametrene for temperatur i laget ved stag 1 og stag 2, ΔT_{stag1} og ΔT_{stag2} , er beregnet ut ifra ΔT -verdiene i Tabell 5.5. Høyden av jordlagene som utvider seg er antatt å være $h = 0,5$. Temperaturen i inklinometerene er målt for hver halve meter. Stagradene er festet ved høyde 8,5 m og 6,0 m. For å gjøre betydningen av lokale variasjoner som kan forkomme mindre, ble det ansett som hensiktsmessig å se på et gjennomsnitt av temperaturen for tre målepunkter. Inputverdien ΔT_{stag1} er dermed beregnet som gjennomsnittet av verdiene i intervallet $dZ = [5,5,6,5]$ og ΔT_{stag2} er gjennomsnittet av verdiene i intervallet $dZ = [8,0,9,0]$. ΔT_{stag1} og ΔT_{stag2} er presentert i Tabell 5.12.

Tabell 5.12: Målt temperaturendring (relativt til juni 18) ved ankerhodet for stagrad 1 og 2

Måned	ΔT_{stag1}	ΔT_{stag2}
jun. 18	0,0	0,0
jul. 18	0,3	-0,5
aug. 18	1,4	2,7
sep. 18	-5,4	-1,0
okt. 18	-10,0	-3,1
nov. 18	-14,1	-4,6
des. 18	-14,3	-6,5
jan. 19	-17,8	-6,8
feb. 19	-22,1	-10,2
mar. 19	-18,2	-7,9
apr. 19	-15,6	-6,8
mai. 19	-5,5	-3,4
jun. 19	-6,1	-1,9
jul. 19	-1,4	-0,4
aug. 19	-3,1	1,9
sep. 19	-3,5	1,0

5.3.3 Analyser for Modell B

Som nevnt er h , L og α_{jord} er de mest usikre parametrene. Det vil derfor bli utført tre analyser for å undersøke hvordan variasjoner av disse parametrene påvirker beregningsresultatene. For Analyse B1 varierer α_{jord} , Analyse B2 varierer h og Analyse B3 varierer L . Verdiene for de tre parametrene er oppgitt i Tabell 5.13. Verdien som varierer markert med uthevet skrift, for hver av analysene. Inputparametrene som ikke er oppgitt i tabellen har verdi som antatt i det foregående. For disse parametrene holdes verdien følgelig konstant for alle beregningene.

Tabell 5.13: Analyser utført for Modell B

	Beregning	α_{jord} [1/°C]	h [m]	L [m]
Analyse B1	B1.1	$9,3 * 10^{-6}$	0,5	2
	B1.2	$1,9 * 10^{-5}$	0,5	2
	B0	$3,7 * 10^{-5}$	0,5	2
	B1.6	$1,3 * 10^{-4}$	0,5	2
	B1.4	$5,6 * 10^{-5}$	0,5	2
	B1.5	$9,3 * 10^{-5}$	0,5	2
Analyse B2	B2.1	$3,7 * 10^{-5}$	0,1	2
	B2.2	$3,7 * 10^{-5}$	0,3	2
	B0	$3,7 * 10^{-5}$	0,5	2
	B2.4	$3,7 * 10^{-5}$	1	2
	B2.5	$3,7 * 10^{-5}$	1,3	2
	B2.6	$3,7 * 10^{-5}$	1,6	2
	B2.7	$3,7 * 10^{-5}$	2	2
Analyse B3	B3.1	$3,7 * 10^{-5}$	0,5	0,5
	B3.2	$3,7 * 10^{-5}$	0,5	1
	B0	$3,7 * 10^{-5}$	0,5	2
	B3.4	$3,7 * 10^{-5}$	0,5	3
	B3.5	$3,7 * 10^{-5}$	0,5	5
	B3.6	$3,7 * 10^{-5}$	0,5	10

5.4 Kombinasjon av de to modellene

Det er utført en beregning som kombinerer effekten av termisk tøyning og spunt beregnet ved Modell A, og termisk tøyning i jorda beregnet ved Modell B. Inputparametrene for denne kombinerte beregningen er valgt ved å sette sammen ulike A- og B-beregninger og og forsøke å finne en kombinasjon som ligner på de målte verdiene.

Beregningene som er kombinert her er A3.3 der $f_{temp} = 1,4$ og Beregning B0. Opptredende ankerkraft for en måned i er dermed beregnet slik:

$$N_{i,kombinert} = N_{ref} + \Delta N_{BeregningA3.3} + \Delta N_{BeregningB10} \quad (5.8)$$

Kapittel 6

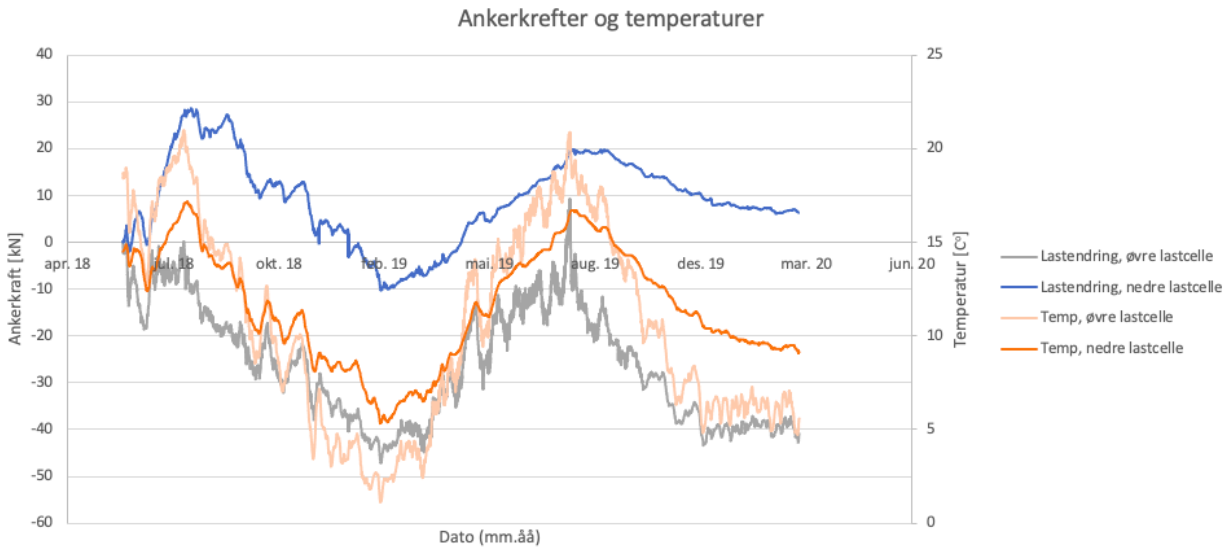
Resultater

I dette kapitlet er resultatene av både målinger og beregninger presenter. Rådata for målingene er levert av Cautus Geo. Beregningene utført i de to modellene er presentert og sammenlignet med målingene. Alle resultater er kort kommentert, imens en mer omfattende diskusjon er gitt i [Kapittel 7](#).

6.1 Målinger fra lastceller

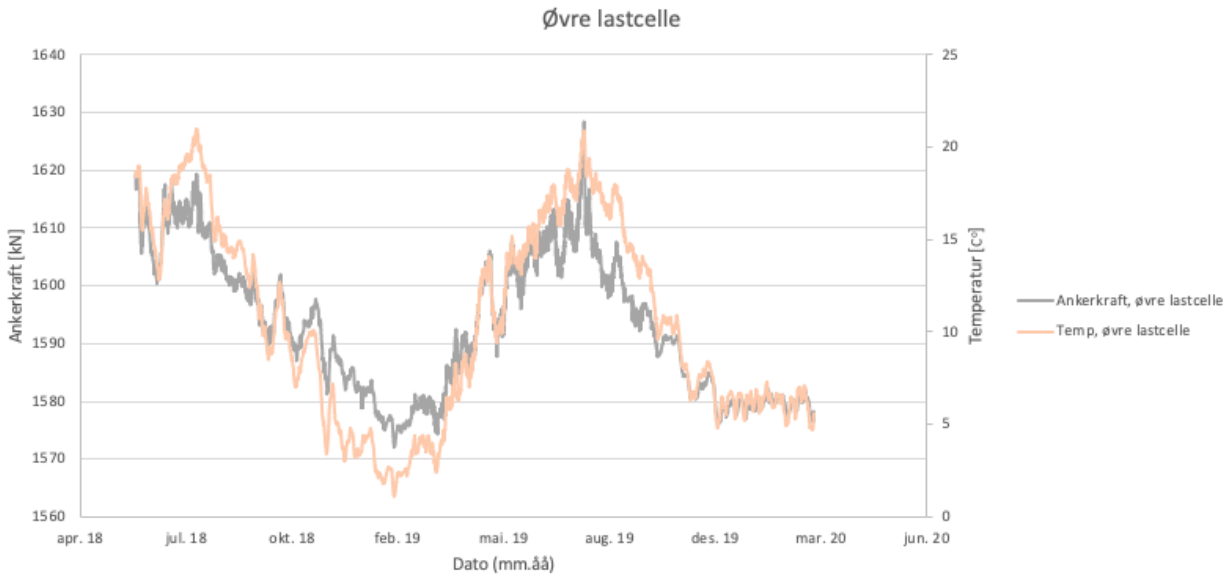
Måledata fra lastcellene installert på den aktuelle spuntkonstruksjonen er levert av Cautus Geo. Rådataene er blitt behandlet i Excel for å sammenstille temperatur og målt ankerkraft mot dato, i ett plott. Datoen refererer til det tidspunktet målingen ble utført. Det er utført 24 målinger hvert døgn, og alle målingene er inkludert i plottet i kronologisk rekkefølge.

Figur [6.1](#) viser målt temperatur og lastendring i øvre og nedre lastcelle, i perioden 01.juni 2018 til 1.mars 2020. Lastendringen er oppgitt med 1.juni 2018 som referanseverdi. Som det fremkommer av figuren svinger temperaturen i øvre lastcelle mellom $+21^{\circ}\text{C}$ og $+1,1^{\circ}\text{C}$, og har dermed en variasjon på $19,9^{\circ}\text{C}$. Temperaturen i nedre lastcelle svinger mellom $+16,9^{\circ}\text{C}$ og $+5,4^{\circ}\text{C}$, og har dermed en variasjon på $11,5^{\circ}\text{C}$.

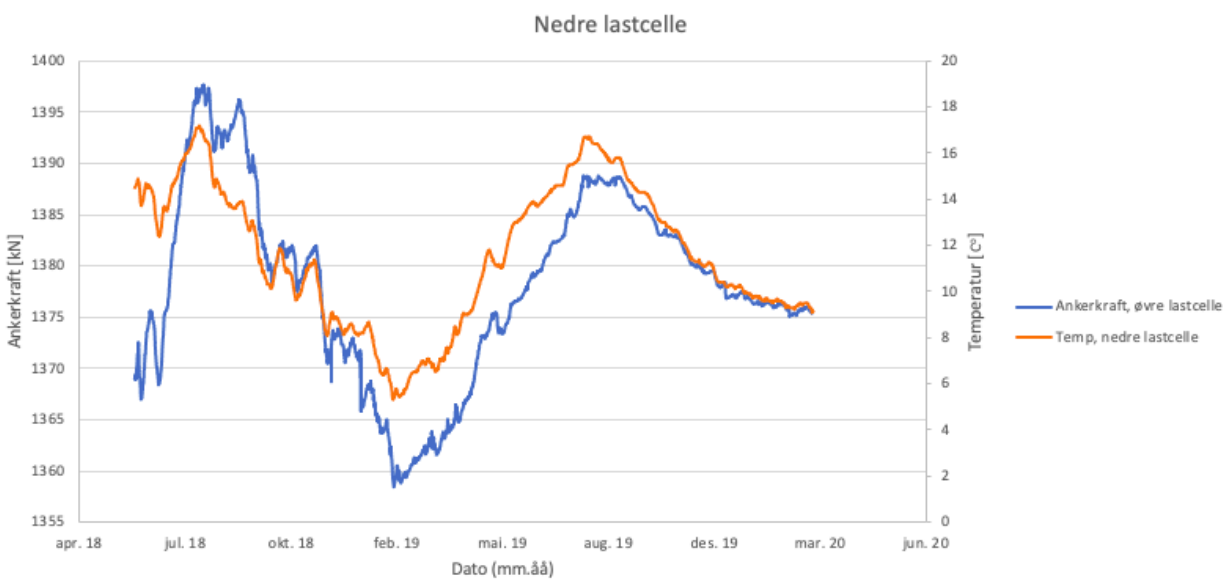


Figur 6.1: Grafen viser last målt i øvre og nedre lastcelle fra juni 2018. Startpunkt permanent fase (juni 2018) vises her som 0 kN. Temperatur internt i lastcellen er plottet for samme periode og angitt på y-aksen til venstre

Som det fremkommer av Figur 6.2 og Figur 6.3 har både målt ankerkraft og målt temp i lastcellene toppunkt i rundt juli 2018 og aug 2019 og bunnpunkt i februar 2019. Samtidig viser grafene mindre lokale hopp i temperatur, som flere steder følges av små enkelthopp i grafen for ankerkraft. I nedre lastcelle (Figur 6.3) mellom juni og oktober 2018 er dette dog ikke tilfellet. I denne perioden følger temperatur og ankerkraft ganske ulike trender, men begge grafene har lavest verdi i juni og rundt oktober og høyest verdi i august. Ankerkraften målt i øvre lastcelle varierer mellom ca. 1575 kN og 1620 kN , hvilket tilsvarer en variasjon på 45 kN . Ankerkraften målt i nedre lastcelle varierer mellom ca. 1397 kN og 1360 kN , hvilket tilsvarer en variasjon på 37 kN . For begge lastceller observeres dermed en variasjon på ca 3%.

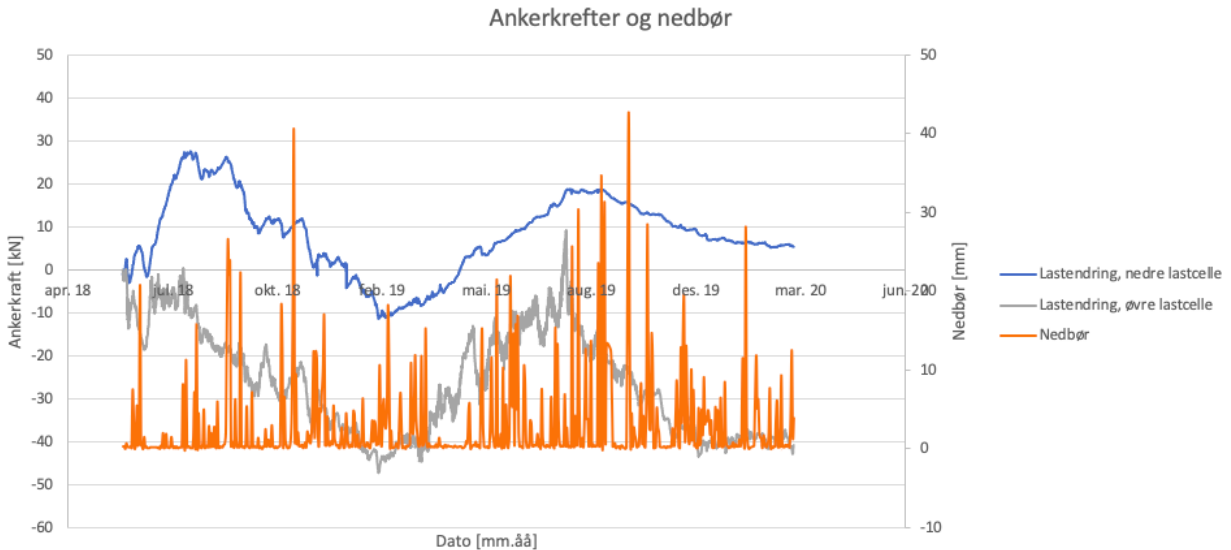


Figur 6.2: Ankerkraft og temperatur målt i øvre lastcelle



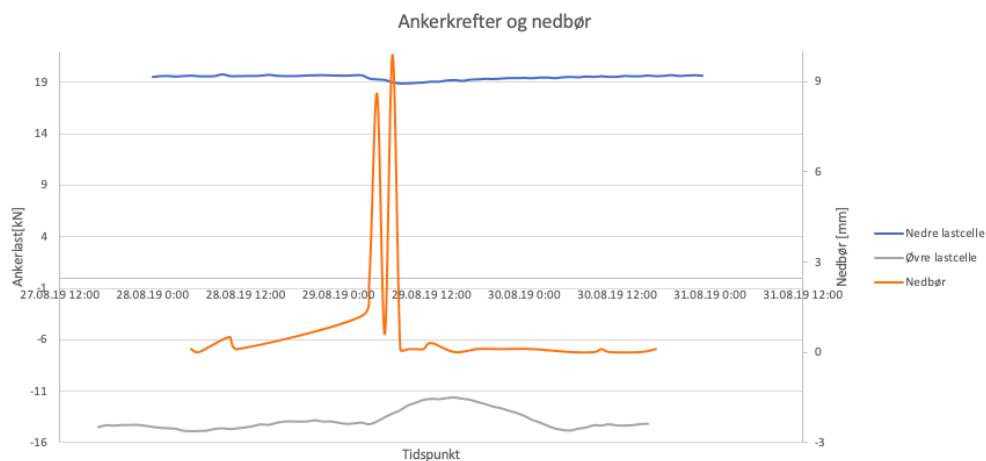
Figur 6.3: Ankerkraft og temperatur målt i nedre lastcelle

Figur 6.4 viser verdier for nedbør målt ved Blindern målestasjon i Oslo. Målingene for nedbør viser høyest verdier i perioden august-november både for 2018 og 2019. Målingene fra lastcellene viser at ankerkreftene derimot har sitt toppunkt i juli-august. Ankerkrefter og nedbør ser dermed ikke ut til å følge samme trend, sett over et større tidsrom.



Figur 6.4: Samlet plott av lastendring målt i øvre og nedre lastcelle samt nedbør målt ved Blindern målestasjon

Ved å studere kortere tidsrom kan det imidlertid se ut til at kraftige regnskyll etterfølges av små hopp i ankerkraft. Et eksempel på dette er vist i Figur 6.5. En topp på 9 mm nedbør etterfølges av en økning i ankerkraft på ca. 2 kN i øvre lastcelle og en nedgang på ca. 1 kN for nedre lastcelle. Ankerkraften for de to stegradene gjenfant omtrent samme verdi som før nedbørstoppen i løpet av ca. 12 timer.

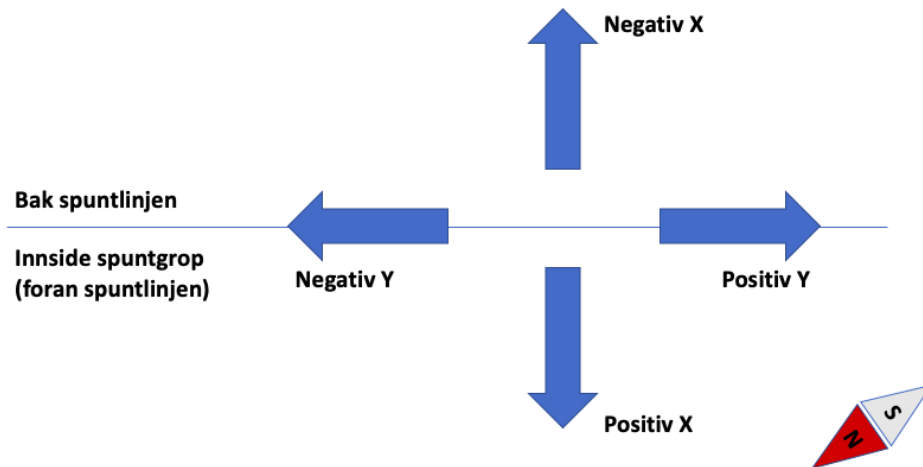


Figur 6.5: Samlet plott av endring i ankerkrefter og nedbør målt i slutten av august 2019

6.2 Målinger i inklinometre

Deformasjonen av spuntveggen er definert i to ulike retninger i horisontalplanet, illustrert i Figur 6.6. X-retningen er normalt på spuntveggen. Y-retningen er definert 90° på x-retningen, som tilsvarer langsmed spuntten, som vist i

Figur 6.6. Målingene er utført slik at positive x-verdier tilsier deformasjon inn i spuntgropa (nordvest). Tilsvarende er målingene i y-retning utført slik at positiv Y er parallelt med spuntten mot venstre (sørvest) (Langelid & Naglestad, 2019).

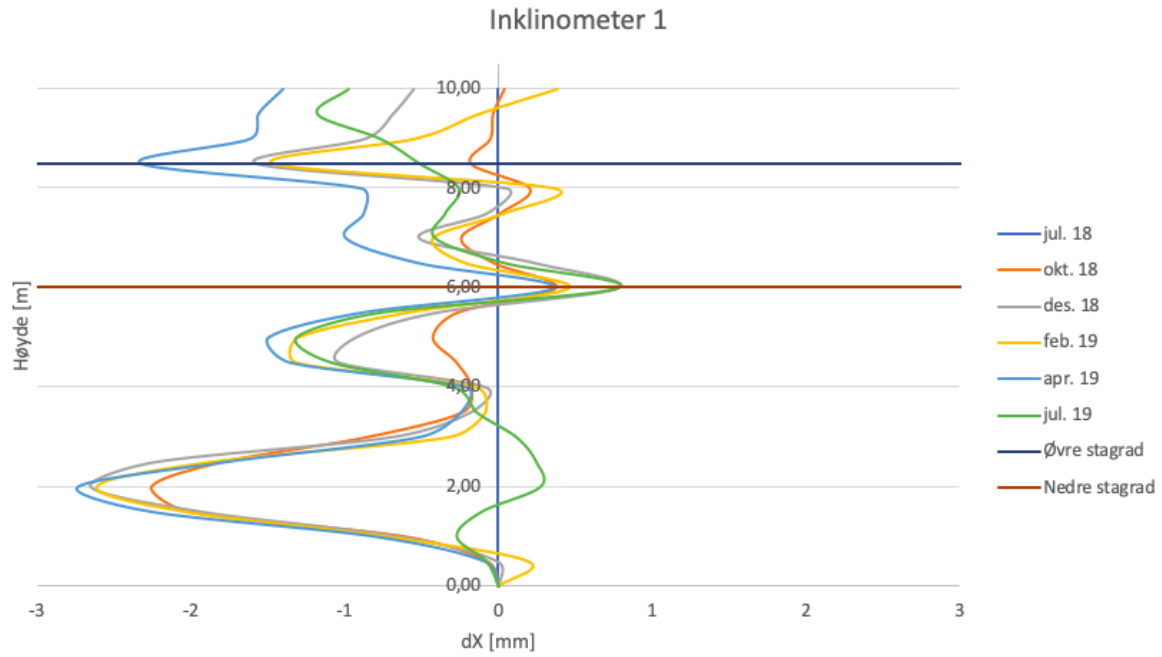


Figur 6.6: Retning for X- og Y- deformasjoner av spuntveggen. Nordsør-pila viser orientering i luftretning

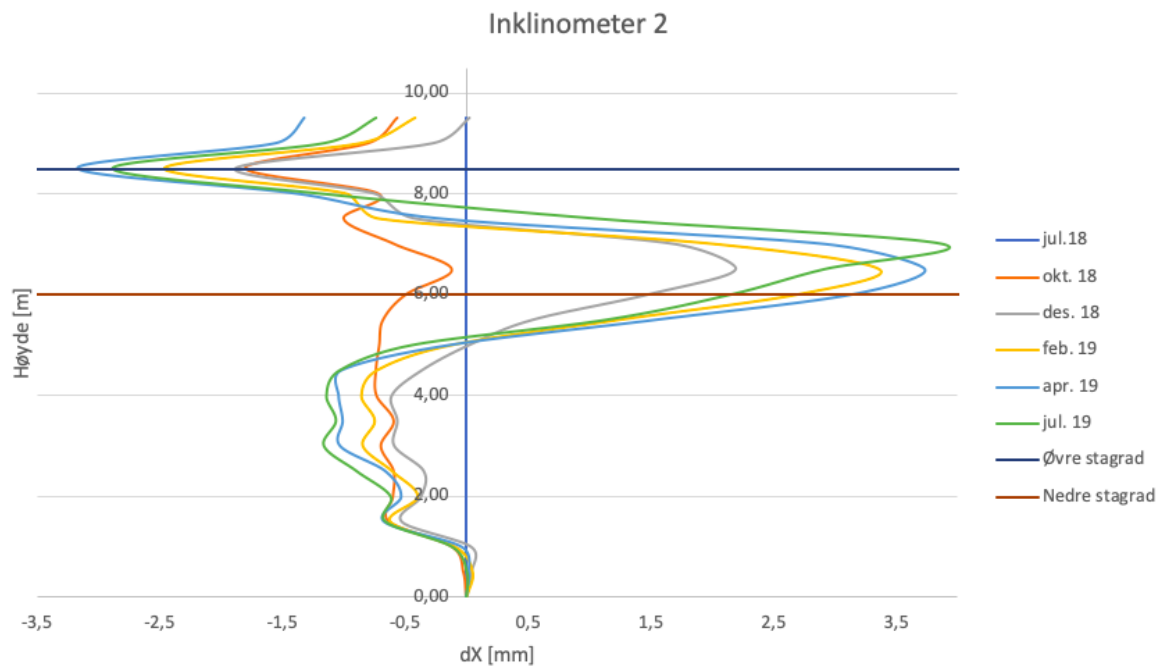
Måledata fra inklinometrene installert på den aktuelle spuntkonstruksjonen er levert av Cautus Geo. Rådataene er blitt behandlet i Excel for å presentere den relative deformasjonen for et bestemt måltidspunkt relativt i forhold til referansepunktet som her er spuntveggenes posisjon den 01.07.18., plottet mot spuntens høyde. Bunnen er ved høyde 0m og toppen av spuntten er ved høyde 10,5m. Deformasjon av spuntveggen på flere tidspunkt er sammenstilt i ett plott for hvert inklinometer. Måneden hver graf er merket med refererer til det tidspunktet målingen ble utført. Alle målingene presentert i disse plottene er utført den første dagen i den aktuelle måneden, kl. 00:00. Det er målt deformasjon i x- og y-retning (se Figur 6.6) for hver halve meter nedover med dybden.

6.2.1 X-deformasjon

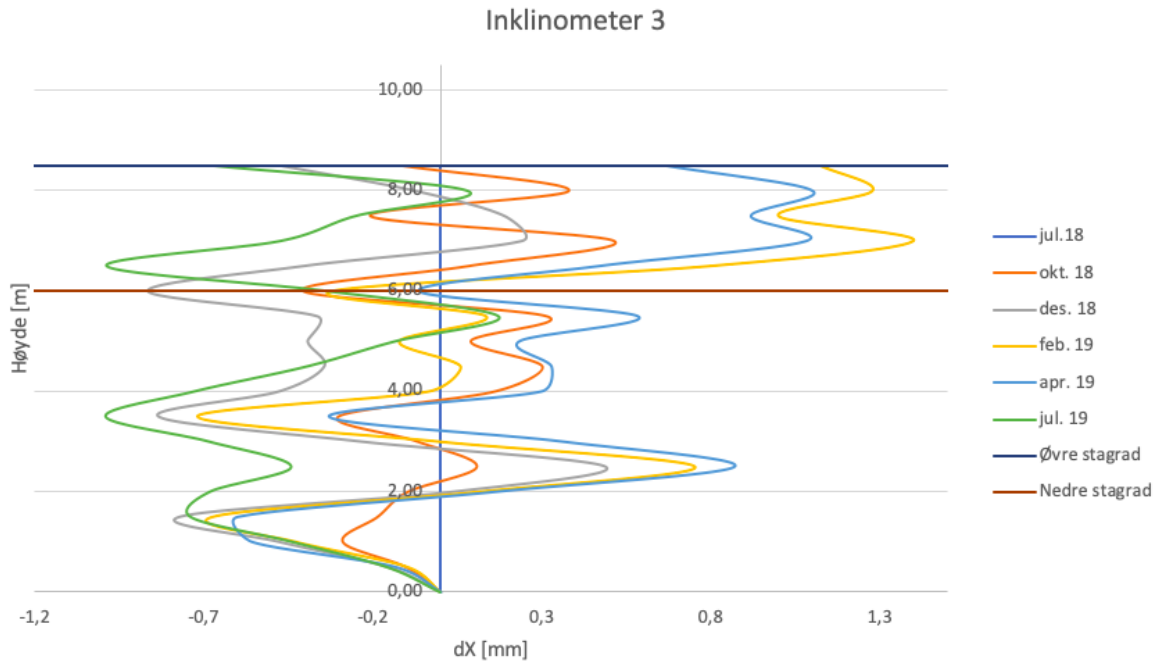
Figur 6.7, 6.8 og 6.9 viser deformasjonen i x-retning målt i inklinometer 1, 2 og 3. Det fremgår av plottene at deformasjonen i x-retning er liten. Maksimal deformasjon for ett bestemt punkt i spuntveggen er 2-4 mm for de tre inklinometerene.



Figur 6.7: Målinger av dX fra inklinometer 1 (relativt til juli 18) plottet for 6 ulike måneder

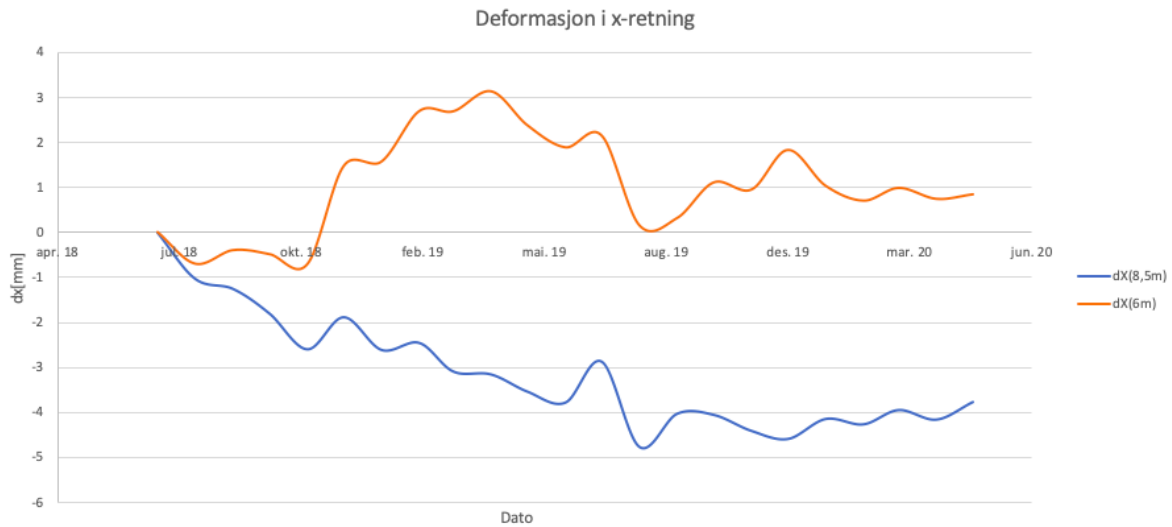


Figur 6.8: Målinger av dX fra inklinometer 2 (relativt til juli 18) plottet for 6 ulike måneder



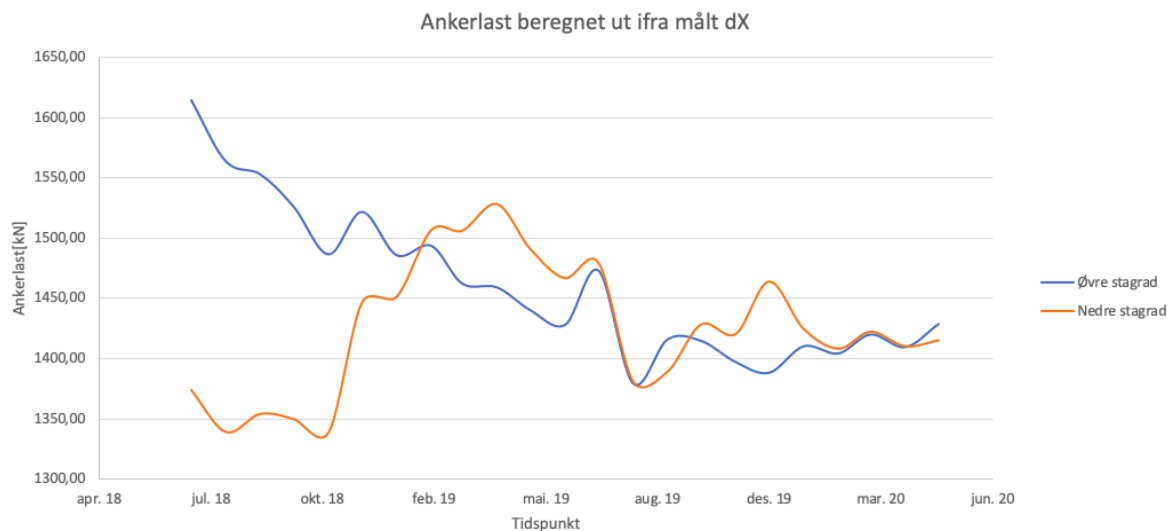
Figur 6.9: Målinger av dX fra inklinometer 3 (relativt til juli 18) plottet for 6 ulike måneder

Det er vanskelig å identifisere en tydelig sammenheng mellom temperatur og deformasjon av spuntveggen ut ifra disse plottene. Hovedfokus i denne oppgaven er stagkreftene, og det er også for stagkreftene det ble observert en sammenheng med temperatur i [Langelid og Naglestad \(2019\)](#) sin rapport. Lastcellene er plassert nærmest inklinometer 2 med ca 1-2 m avstand. Det antas derfor at målingene i lastcellene burde samsvare best med målingene i inklinometer 2. Nedre og øvre stagrad er festet til spuntveggen henholdsvis ved høyde 6m og 8,5m. I Figur 6.10 er dY målt med inklinometer 2 for disse to punktene på spunten plottet mot tid, over et tidsrom på nesten to år. For høyde 8,5m er deformasjonen i negativ x-retning økende hele veien, med unntak av lokale hopp. For høyde 6m er deformasjonen mer varierende. Kurven har to tydelige topper, en for april 19 og en for desember 19. For begge grafene er det vanskelig å identifisere en trend som kan knyttes til temperaturvariasjonene.



Figur 6.10: Deformasjon i x-retning målt i høyde 6m og 8,5 m. Målingene er hentet fra inklinometer 2.

Vi betrakter stagene som elastiske. Dermed gir Hookes lov for lineært elastiske materialer en direkte sammenheng mellom forskyvning og krefter, etter Formel 3.6 oppgitt i Kapittel 3. Denne sammenhengen gir at forskyvning av staghodet i positiv X-retning gir en kraftøkning. Det er derfor utført en beregning i henhold til denne sammenhengen, for å undersøke hvordan den målte deformasjonen i teorien ville gitt utslag i ankerkreftene. Resultatet av beregningen er vist i Figur 7.1.



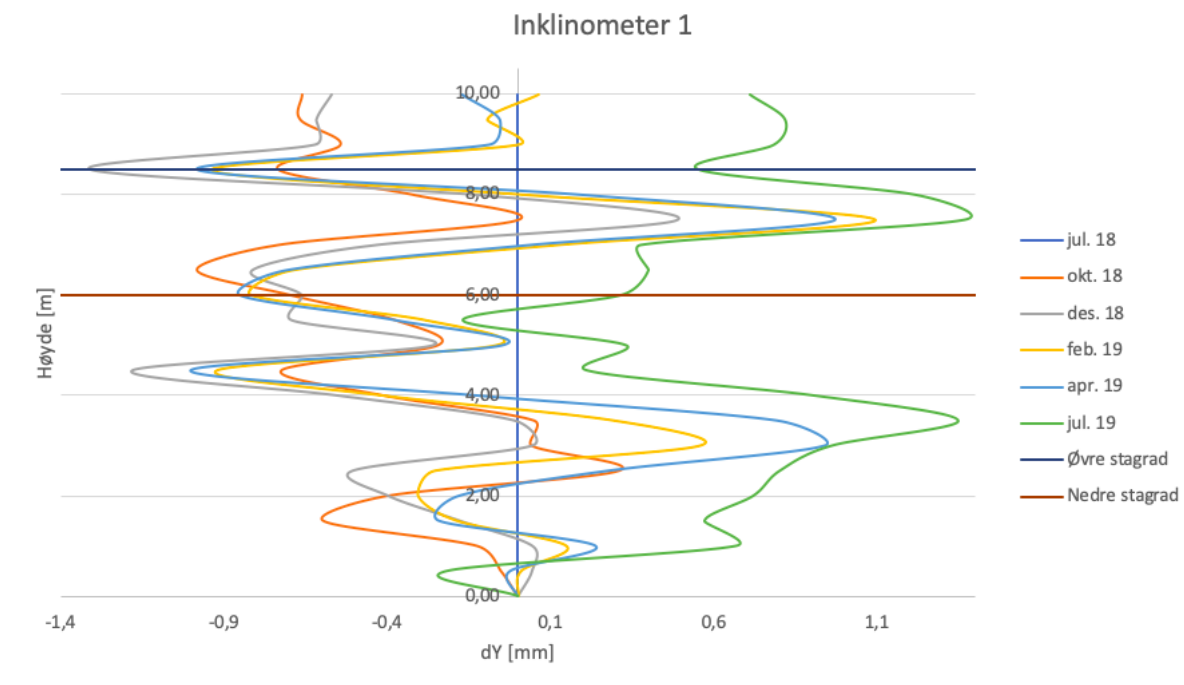
Figur 6.11: Ankerkraft beregnet ved Hookes lov ut ifra dX målt i inklinometer 2

Som følge av den lineære sammenhengen mellom forflytning/tøyning og kraft følger de beregnede kreftene i Figur 6.11 samme trend som deformasjonen dX i Figur 6.10. For nedre stagrad observeres en topp i april 19 og en i

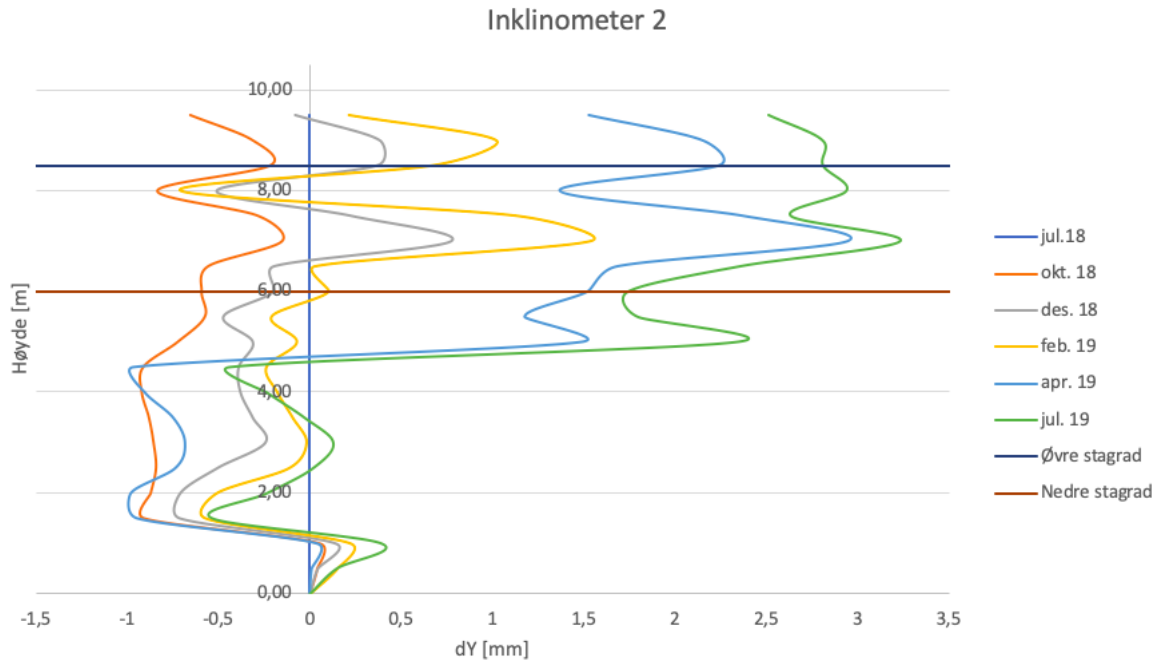
desember 19. For øvre stegrad observeres en varierende, men jevnt over synkende kraft. I mars 19 er har teoretisk beregnet ankerkraft i øvre og nedre stegrad nådd samme verdi.

6.2.2 Y-deformasjon

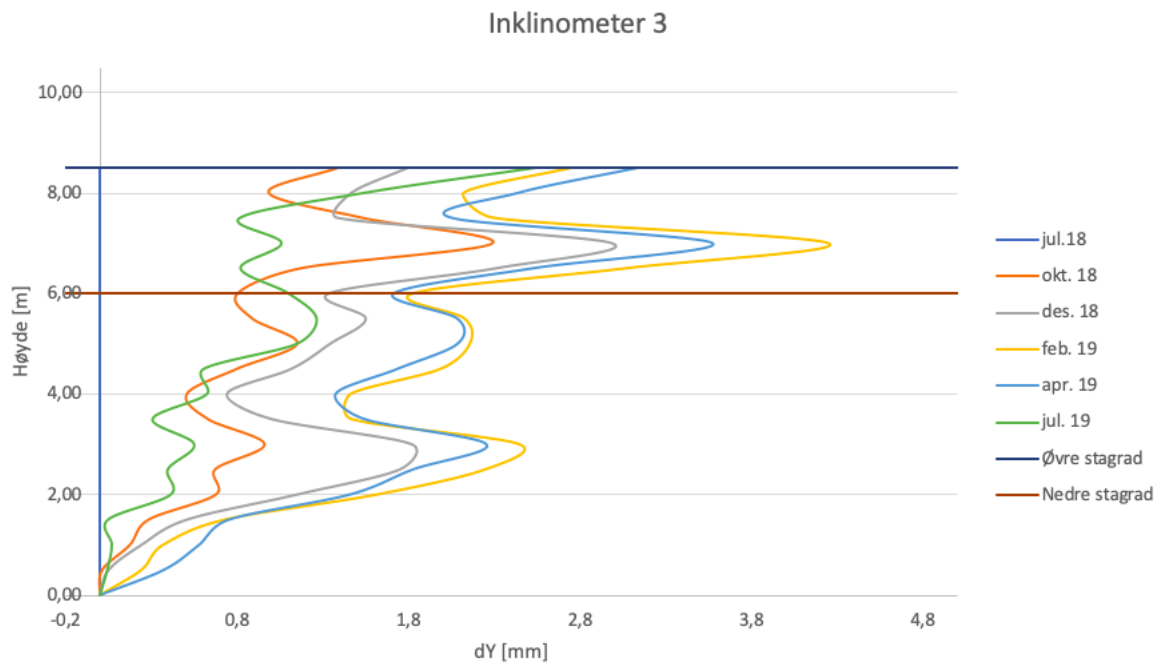
Som en indikator på økt trykk bak spuntveggen er det deformasjonen normalt på spuntlinjen (deformasjonen i x-retning) som er av interesse. Det kan imidlertid argumenteres for at inklinometeret kan ha rotert litt inne i helningskanalen, og at man derfor også bør analysere deformasjonen i y-retning. Det er derfor valgt å inkludere målingene av deformasjonen i y-retning som en del av resultatene. Y-deformasjonen er presentert i Figur 6.12, 6.13 og 6.14. Også i y-retning har veggen relativt små deformasjoner. Også her er maksimal deformasjon for ett bestemt punkt i spuntveggen er 2-4 mm for de tre inklinometerene.



Figur 6.12: Målinger fra inklinometer 1 (relativt til juli 18) plottet for 6 ulike måneder



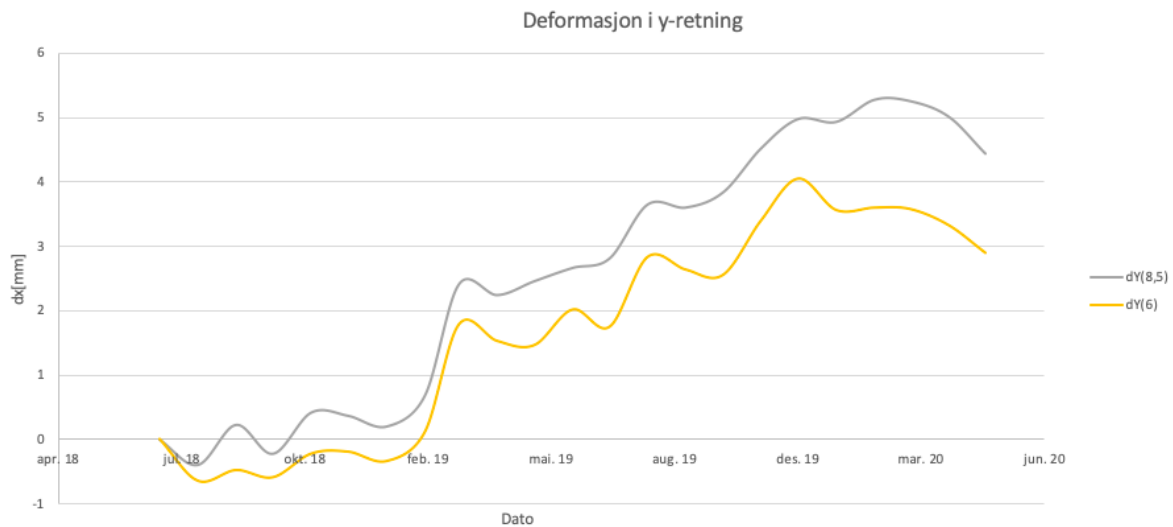
Figur 6.13: Målinger fra inklinometer 2 (relativt til juli 18) plottet for 6 ulike måneder



Figur 6.14: Målinger fra inklinometer 3 (relativt til juli 18) plottet for 6 ulike måneder

Det er vanskelig å identifisere en tydelig sammenhengen mellom temperatur og deformasjon av spuntveggen, også i y-retning. I Figur 6.15 er dY målt med inklinometer 2 for 6m og 8,5m plottet mot tid, over et tidsrom på nesten to år.

Begge kurvene følger samme trend, men det er til enhver tid høyere deformasjon for 8,5m enn 6m. Men unntak av lokale variasjoner er kurvene økende med tiden hele veien frem mot mars. Mellom mars og mai er kurvene avtagende.

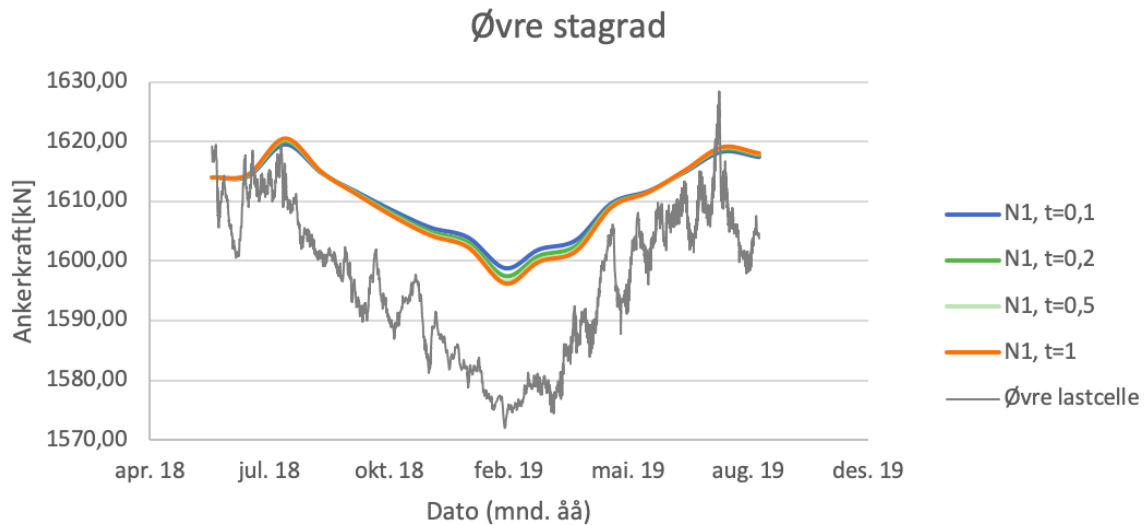


Figur 6.15: Deformasjon i y-retning målt i høyde 6m og 8,5 m. Målingene er hentet fra inklinometer 2.

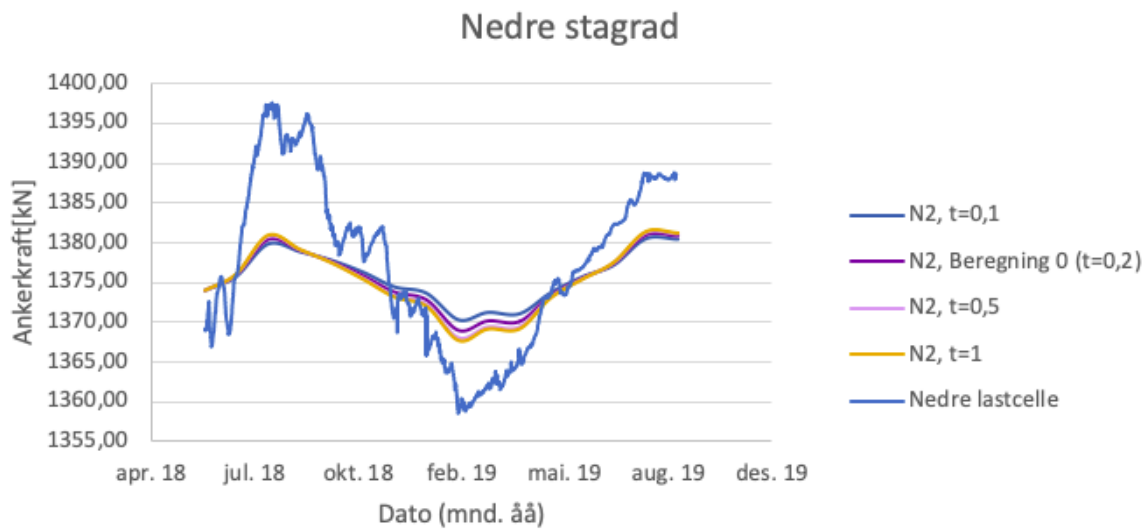
6.3 Modell A - termisk tøyning kun i spunt

6.3.1 Analyse A1

I Analyse A1 er det utført beregninger for fire ulike verdier av t . t er tykkelsen av jordlaget inntil og parallelt med spuntveggen som påvirkes av skjærdeformasjonen mellom spuntveggen og jorda. Resultatet av beregningene er gitt i Figur 6.16 og Figur 6.17. For disse resultatene kommer det frem av plottet at utslaget fra startverdi N_{juni} øker med verdien av t . $t = 1$, gir høyest verdi ved kurvenes toppunkt og lavest verdi ved kurvenes bunnpunkt. På samme måte gir $t = 0,1$ lavest verdi ved kurvenes toppunkt og høyest verdi ved kurvenes bunnpunkt. Forskjellen på resultatene for de verdiene av t som er testet i denne analysen er imidlertid liten. I februar måned er differansen mellom kurven for $t = 0,1$ og $t = 1$ ca. $3kN$ for øvre stegrad og $2kN$ for nedre stegrad. Analysen viser også at variasjonen av t ikke gir en modell som samsvarer godt med de målt ankerkraft.



Figur 6.16: Kraft i øvre stagrad (N1) beregnet for ulike verdier av t , plottet sammen med målinger i øvre lastcelle

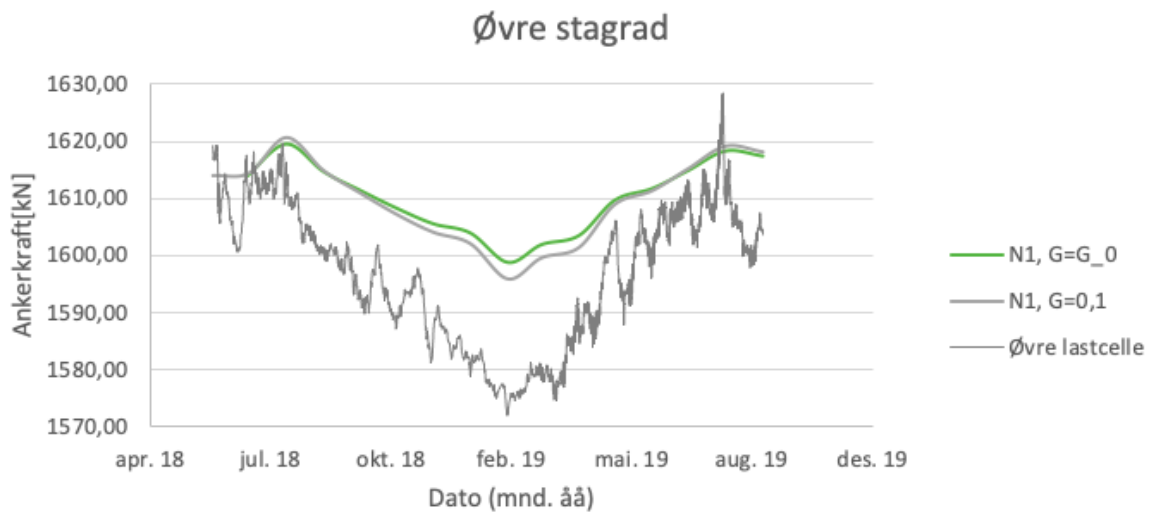


Figur 6.17: Kraft i nedre stagrad (N2) beregnet for ulike verdier av t , plottet sammen med målinger i nedre lastcelle

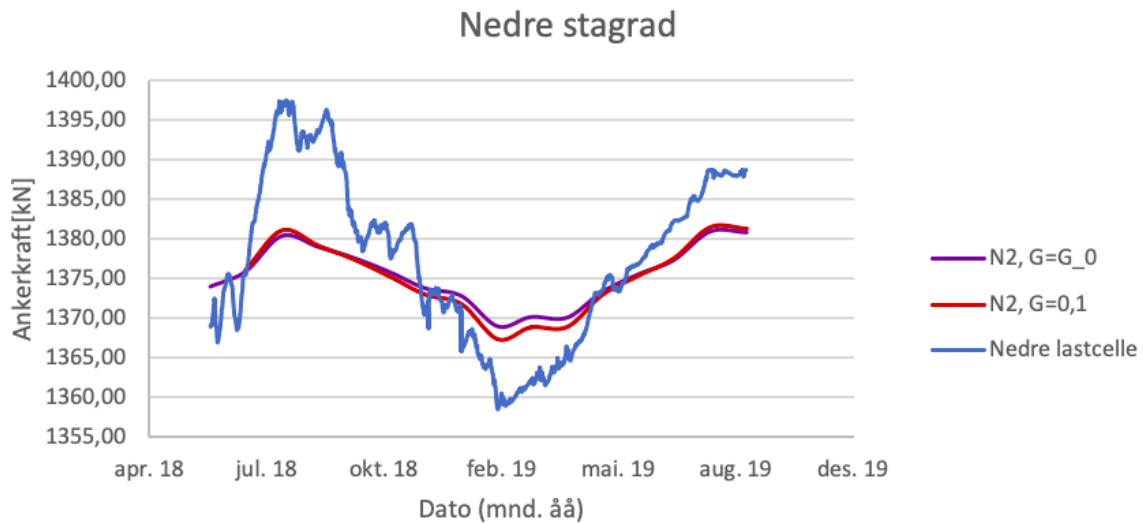
Den samlede presentasjonen av kurvene for beregningene og kurven for ankerkraft målt i lastcelle viser at beregninger og målinger har en proporsjonalitet. Der målt verdi øker, øker også beregnet verdi. Både for øvre og nedre stagrad er utslaget fra startverdien N_{juni} imidlertid mye lavere for beregningene enn for målingene. Dette medfører stort avvik i den beregnede februarverdien, N_{feb} .

6.3.2 Analyse A2

I Analyse A2 er det utført to beregninger, presenter i Figur 6.18 og 6.19. I den ene beregningen er verdien av skjærmodulen G antatt i Kapittel 5 brukt. Denne er benevnt som $G = G_0$ i figurene. I den andre er G er lik 0,1 for alle lag. Plottene viser at ved å sette $G=0,1$ kPa, øker utslaget fra startverdi N_{juni} . Sammenlignet med $G = G_0$ gir $G = 0,1$ høyere verdi ved kurvenes toppunkt og lavere verdi ved kurvenes bunnpunkt. På samme måte som for Analyse A1 er forskjellen på resultatene av de to beregningene imidlertid ikke stor. I februar måned er differansen mellom de to kurvene ca. 2 kN både for øvre og nedre stagrad.



Figur 6.18: Kraft i øvre stagrad (N1) beregnet for antatt verdi av G ($G = G_0$) og $G=0,1$ kPa, plottet sammen med målinger i øvre lastcelle

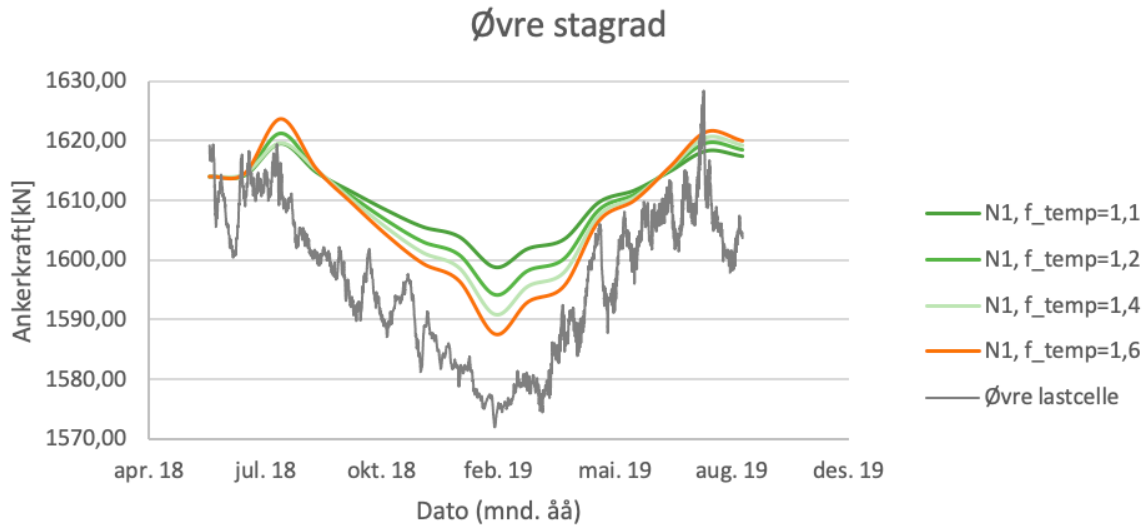


Figur 6.19: Kraft i nedre stagrad (N2) beregnet for antatt verdi av G ($G = G_0$) og $G=0,1$ kPa, plottet sammen med målinger i nedre lastcelle

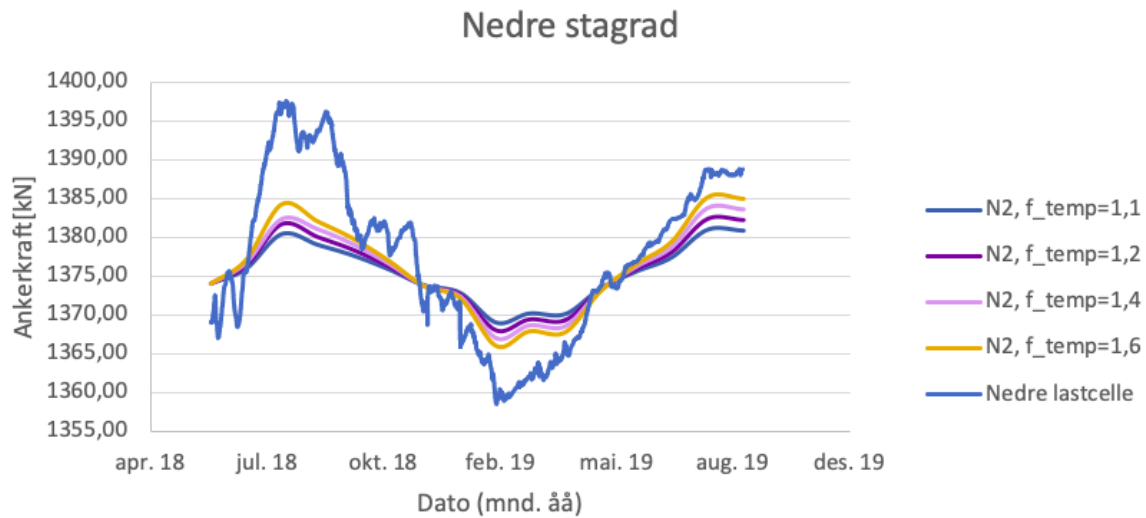
Som for Analyse A1 viser den samlede presentasjonen at beregningene og trenden for målingene er proporsjonale verdier, men at utslaget fra N_{juni} er betydelig lavere for beregningene enn for målingene.

6.3.3 Analyse A3

I Analyse A3 er beregninger for 5 verdier av temperaturfaktoren f_{temp} utført. Resultatene er presentert i Figur 6.20 og 6.21. Utslaget fra startverdi N_{juni} øker proporsjonalt med f_{temp} . I februar måned er differansen mellom beregningen for $f_{temp} = 1,1$ og $f_{temp} = 1,6$ ca. $12kN$ for øvre stagrad og ca. $4kN$ for nedre stagrad.



Figur 6.20: Kraft i øvre stegrad (N1) beregnet for ulike verdier av f_{temp} , plottet sammen med målinger i øvre lastcelle



Figur 6.21: Kraft i nedre stegrad (N2) beregnet for ulike verdier av f_{temp} , plottet sammen med målinger i nedre lastcelle

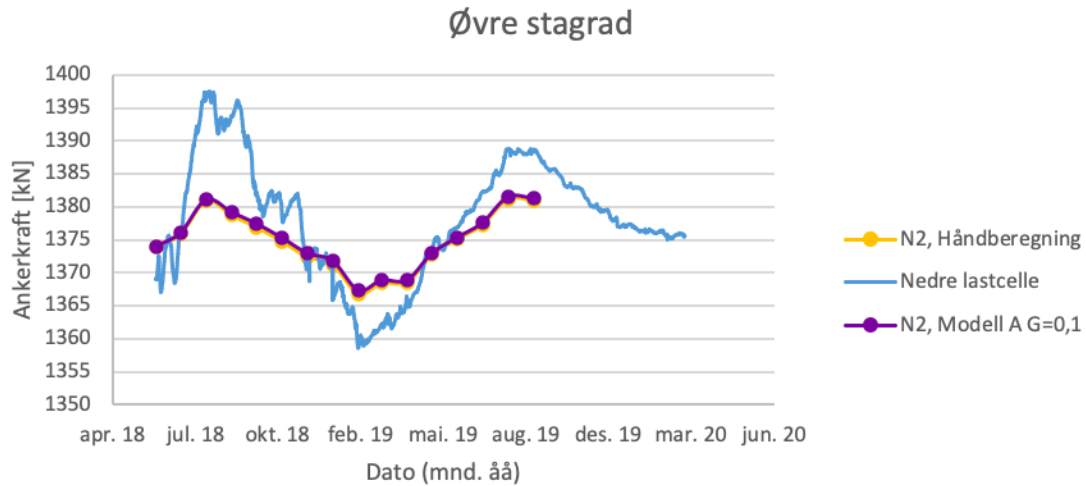
Beregningen for $f_{temp} = 1,6$ ligger betydelig nærmere målte verdier enn beregningen for $f_{temp} = 1,1$. Differansen mellom februarverdi beregnet med $f_{temp} = 1,6$ og februarverdi målt i lastcelle er ca. 13 kN for øvre og 6 kN i nedre stegrad.

6.4 Håndberegninger

I Figur 6.22 og 6.23 er håndberegningene plottet sammen med Beregning A2.1. Beregning A2.1 er beregningen utført med Modell A, dvs. beregningsmodellen for termisk tøyning kun i spunt, der $G=0,1$. Beregningene samsvarer godt.



Figur 6.22: Håndberegninger for N1 plottet med beregninger med Modell A med $G=0,1$ kPa

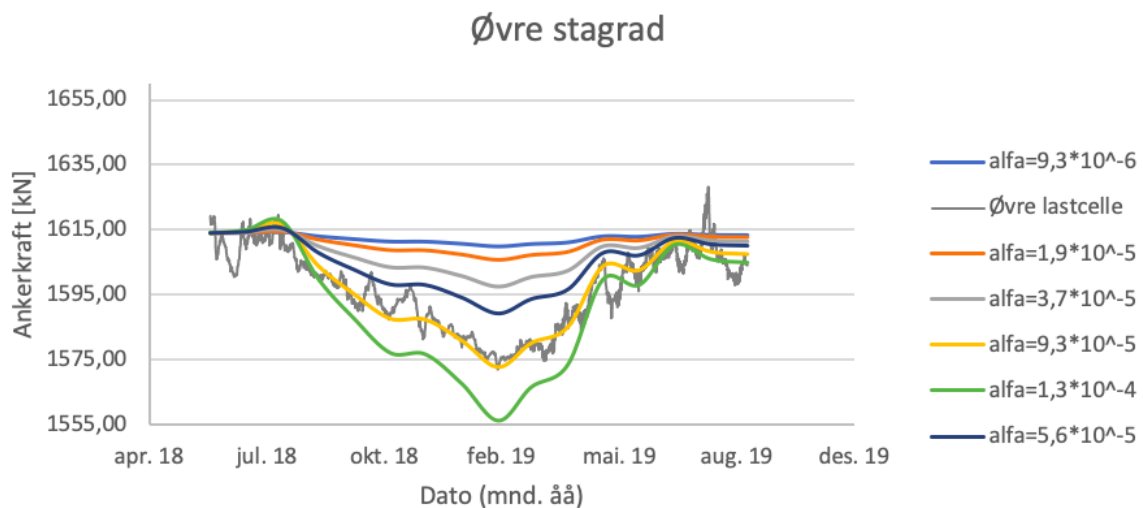


Figur 6.23: Håndberegninger for N2 plottet med beregninger med Modell A med $G=0,1$ kPa

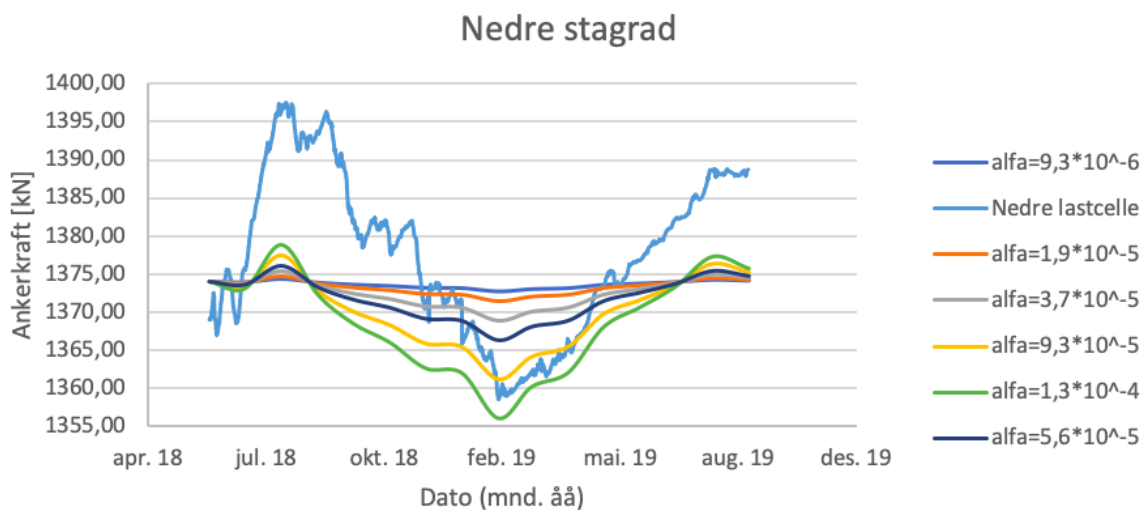
6.5 Modell B - termisk tøyning i leire

6.5.1 Analyse B1

I Analyse B1 er beregninger for 6 verdier av temperaturutvidelseskoeffisienten i jord α_{jord} utført. Resultatene er presentert i Figur 6.24 og 6.25. Resultatet av beregningene viser stor variasjon innenfor det intervallet av α som er undersøkt. Beregnet ankerkraft i februar har en variasjon på ca. 50 kN i øvre stagrad og 15 kN i nedre stagrad. Som forventet øker endring i ankerkraft med den termisk lengdeutvidelseskoeffisient slik at den høyeste α -verdien også gir størst årstidsvariasjon i ankerkraft og dermed også lavest februarverdi.



Figur 6.24: Kraft i øvre stagrad (N1) beregnet for ulike verdier av α_{jord} , plottet sammen med målinger i øvre lastcelle

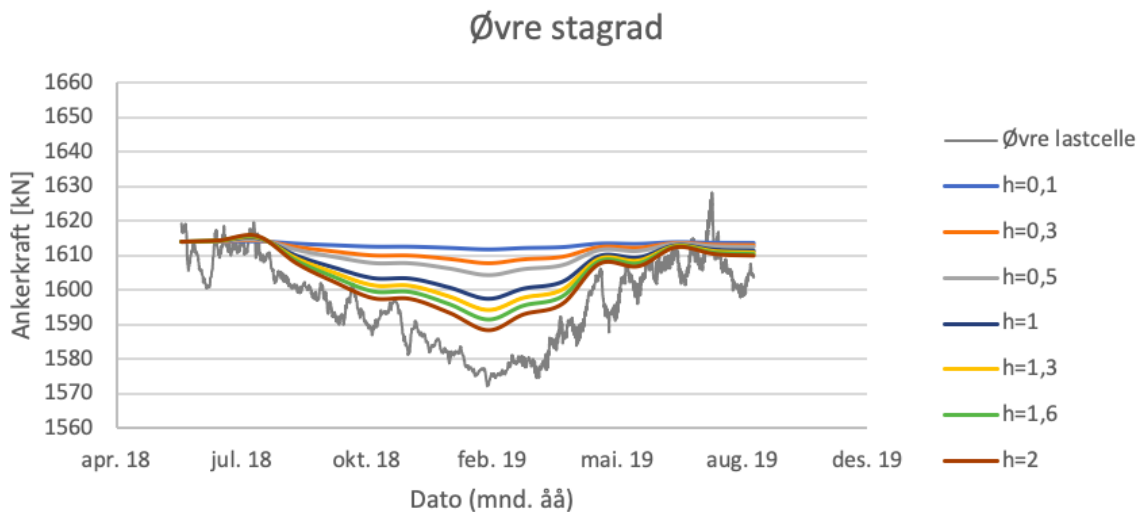


Figur 6.25: Kraft i nedre stagrad (N2) beregnet for ulike verdier av α_{jord} , plottet sammen med målinger i nedre lastcelle

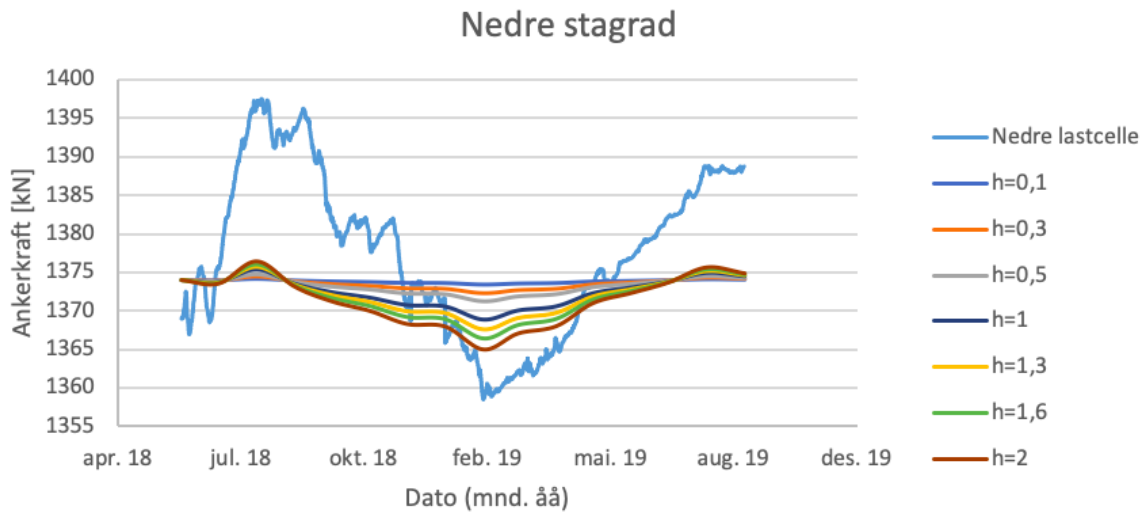
Beregningen for $\alpha_{jord} = 9,3 * 10^{-5} 1/^{\circ}C$ er nesten sammenfallende med målingene av ankerkraft i øvre stagrad. I nedre stagrad er det også denne beregningen med $\alpha_{jord} = 9,3 * 10^{-5} 1/^{\circ}C$ som ligger nærmest målingene i februar, imens $\alpha_{jord} = 1,4 * 10^{-4} 1/^{\circ}C$ ligger nærmest målte verdier i juli-august. I juni-august 2018 er det imidlertid størst avvik. Avviket mellom målt og beregnet verdi der er på ca. 20 kN.

6.5.2 Analyse B2

I Analyse B2 er beregninger for 7 verdier av h utført. h er den representative høyden av de to jordlagene hvis termiske utvidelse induserer økning i ankerkreftene. Resultatene er presentert i Figur 6.26 og 6.27. Resultatene for de ulike beregningene viser mindre variasjon i februarverdi enn Analyse B1. Beregnet ankerkraft i februar N_{feb} varierer med ca. 22 kN i øvre stagrad og 8 kN i nedre stagrad, for de syv beregningene. Årstidsvariasjonen for ankerkraft øker med verdien av h . Størst h gir størst årstidsvariasjon og dermed også lavest februarverdi.



Figur 6.26: Kraft i øvre stagrad (N1) beregnet for ulike verdier av h , plottet sammen med målinger i øvre lastcelle

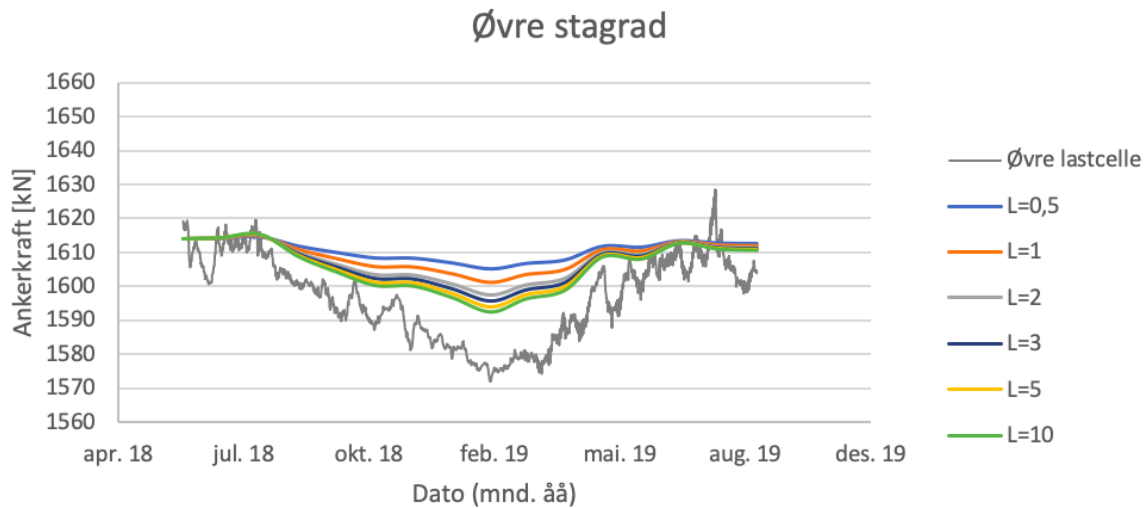


Figur 6.27: Kraft i nedre stagrad (N2) beregnet for ulike verdier av h , plottet sammen med målinger i nedre lastcelle

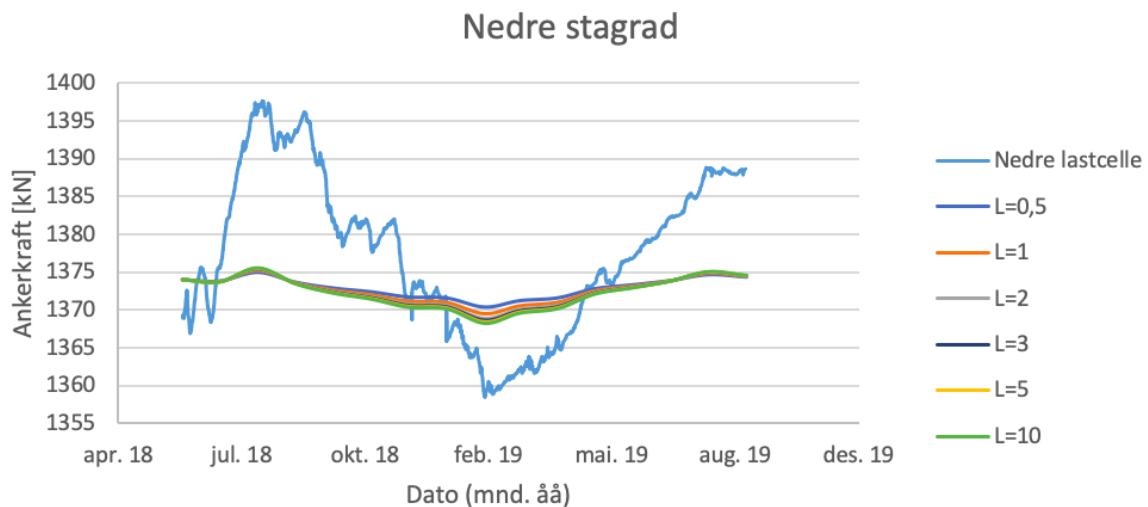
Beregningen for $h = 2$ gir resultatene som ligger nærmest målte verdier. Avviket mellom denne beregningen og målt ankerkraft i februar er ca. 10 kN i øvre og 6 kN i nedre stagrad. Beregningene gir størst avvik fra målte verdier i juni-august 2018 for nedre stagrad.

6.5.3 Analyse B3

I Analyse B3 er beregninger for 6 verdier av L utført. L er den representative lengden av jordlagene hvis termiske utvidelse induserer økning i ankerkreftene. Resultatene er presentert i Figur 6.28 og 6.29. Resultatene for de ulike beregningene noe mindre variasjon i februarverdi N_{feb} enn for Analyse B2, og betydelig mindre enn for Analyse B1. Beregnet ankerkraft i februar har en variasjon på ca. 13 kN i øvre stagrad og 3 kN i nedre stagrad. Årstidsvariasjonen for ankerkraft øker proporsjonalt med L . Størst L gir størst årstidsvariasjon og dermed også lavest februarverdi.



Figur 6.28: Kraft i øvre stagrad (N1) beregnet for ulike verdier av L , plottet sammen med målinger i øvre lastcelle



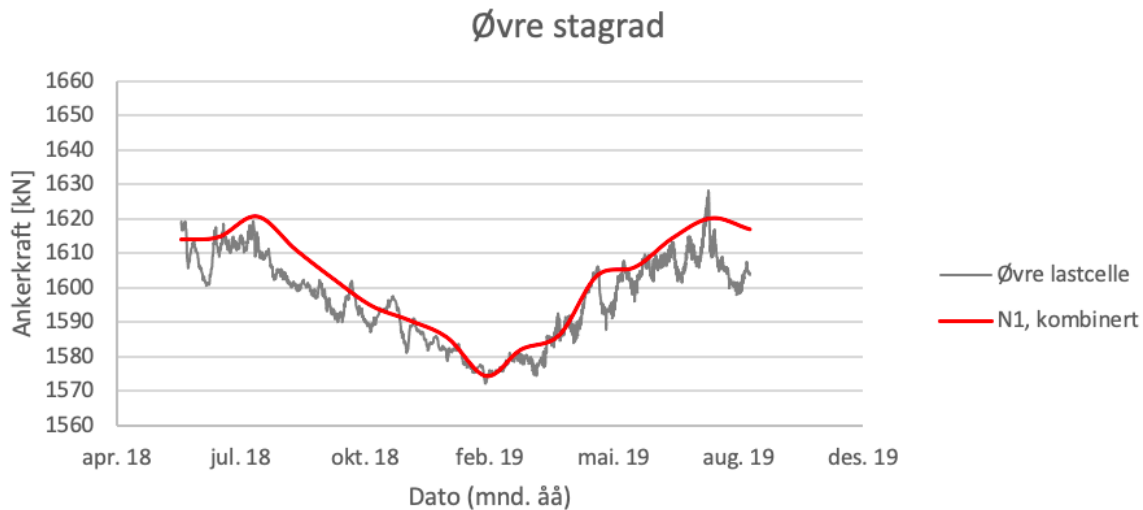
Figur 6.29: Kraft i nedre stagrad (N2) beregnet for ulike verdier av L , plottet sammen med målinger i nedre lastcelle

Beregningen for $L = 10$ gir resultatene som ligger nærmest målte verdier. Avviket mellom denne beregningen og målt ankerkraft i februar er ca. 20 kN i øvre og 8 kN i nedre stagrad. Beregningene gir størst avvik fra målte verdier i juni-august 2018 for nedre stagrad

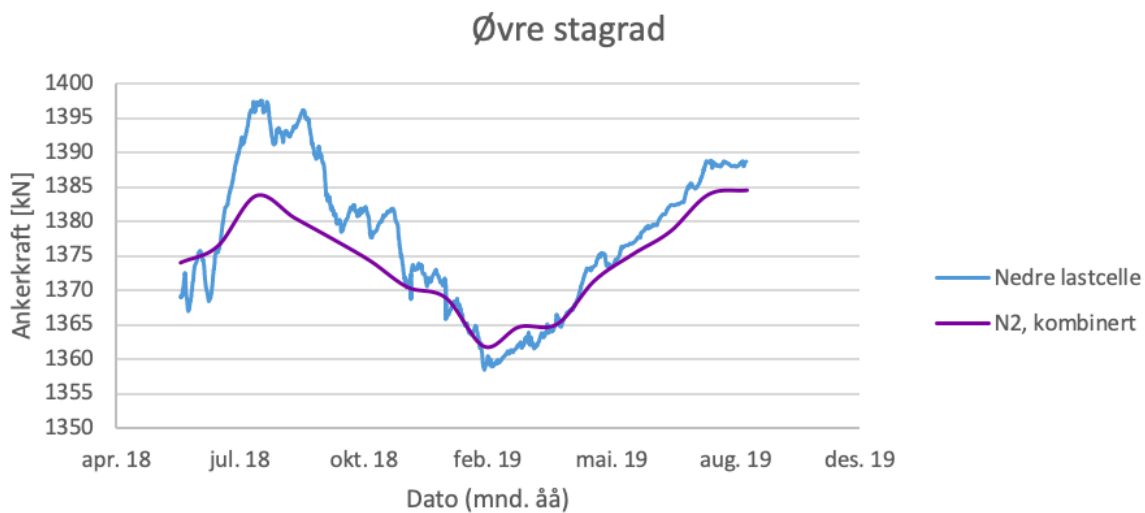
6.6 Kombinasjon av Modell A og Modell B

I siste beregning er A3.3 der $f_{temp} = 1,3$ og Beregning B0 kombinert. Denne kombinerte beregningen inkluderer både effekten av lengdeutvidelse i spunten beregnet ved Modell A, og effekten av jordutvidelse bak spunten beregnet

ved Modell B. Ut ifra teorien er det forventet at begge disse effektene er tilstede, og det er dermed beregninger som inkluderer begge som forventes å gi mest korrekte resultater. Resultatene er presentert i Figur 6.30 og 6.31 viser godt samsvar mellom målte og beregnede verdier, med unntak av juli-august 2018 i nedre stagrad. Der avviker beregningene fra målingene med omkring 10 kN .



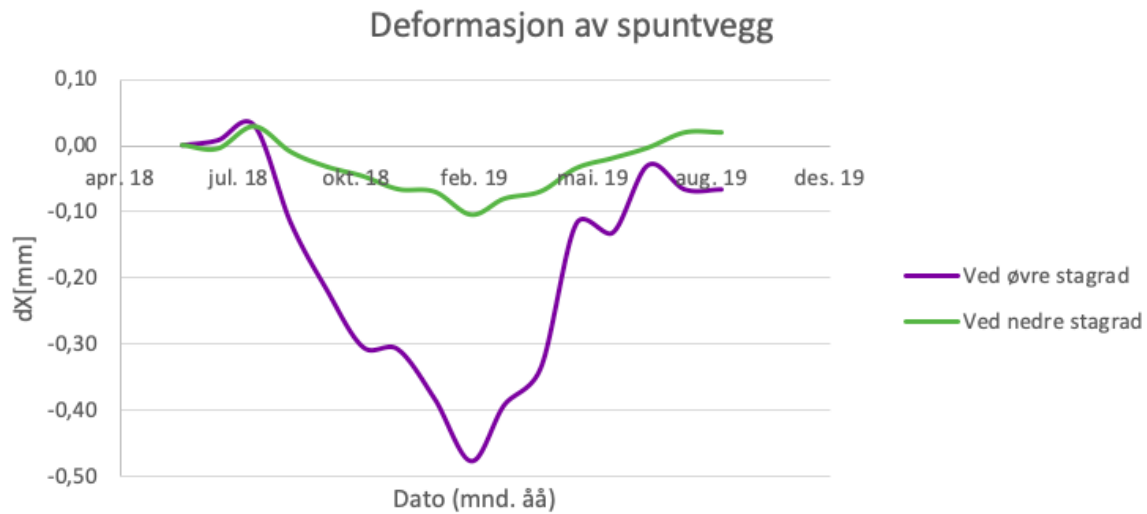
Figur 6.30: Kraft i øvre stagrad (N1) beregnet ved en kombinasjon av Modell A og Modell, plottet sammen med målinger i øvre lastcelle



Figur 6.31: Kraft i nedre stagrad (N2) beregnet ved en kombinasjon av Modell A og Modell, plottet sammen med målinger i nedre lastcelle

Som beskrevet i Kapittel 3 vil jordutvidelsen beregnet i Modell B medføre deformasjon av spuntveggen i positiv x-retning. I den kombinerte beregningen presentert her inngår Beregning B0. Basert på likningene oppgitt i Kapittel

3 kan det gjøres et anslag av deformasjonen i punktene på spuntveggen der øvre og nedre stagrad. Anslaget for Beregning B0 er plottet i Figur 6.32. Deformasjonen beregnet for de øvrige analysene med Modell B er vist i Vedlegg E. Plottet viser at jordutvidelsen medfører en forflytning i negativ x-retning når temperaturen minker (juli 2018 - februar 2019) og en forflytning i positiv x-retning når temperaturen øker (februar 2019 - august 2019). Den totale forflytning mellom juni 2018 og februar 2019 på ca. 0,5 mm i øvre stagrad og ca. 0,15 mm i nedre stagrad.



Figur 6.32: Deformasjon dX beregnet for to punkter på spuntveggen - ved øvre og nedre stagrad

Kapittel 7

Diskusjon av resultater

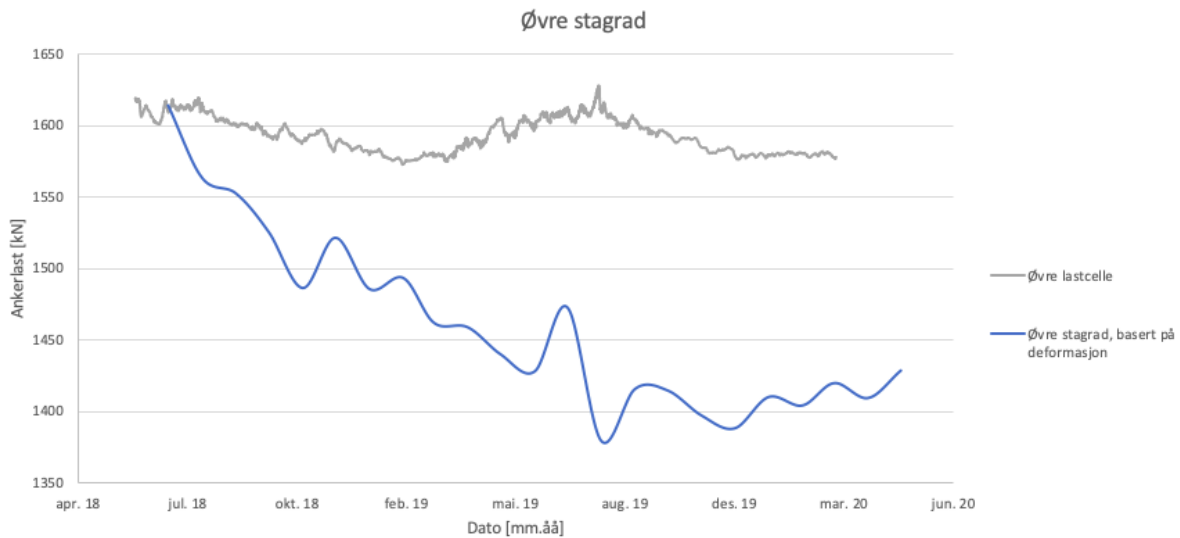
7.1 Målinger

Målingene i lastcellene viser at en tydelig korrelasjon mellom målt temperatur og ankerkraft i både øvre og nedre lastcelle. Ved temperaturøkning øker ankerkraft og ved temperaturnedgang minker ankerkraft. Det fremgår også av resultatene at både store og mindre endringer i temperatur gir utslag. Dette styrker hypotesen om at årstidsvariasjonene i ankerkraft kommer av at temperaturen endrer seg. Temperaturmålingene viste at temperaturen i øvre stagrad hadde en variasjon på $19,9^{\circ}\text{C}$, imens temperaturen i nedre stagrad kun hadde en variasjon på $11,5^{\circ}\text{C}$. Dette indikerer at øvre lastcelle er mer sensitiv for temperaturendringer, enn nedre lastcelle. Øvre stagrad er plassert 2m under jordoverflaten, og nedre stagrad er plassert $4,5\text{m}$ under jordoverflaten. Det antas derfor at sensitiviteten til temperaturendringer kommer av at øvre lastcelle er nærmere jordoverflaten og dermed vil påvirkes av temperaturendringer i luften i større grad.

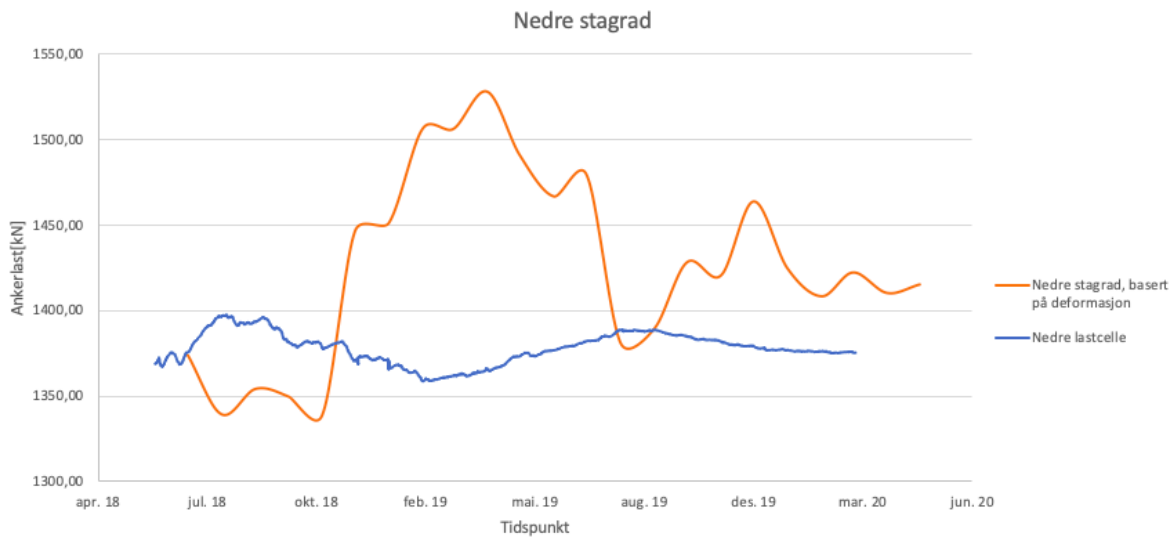
Ved sammenligning av nedbør og ankerkraft var det vanskelig å finne en sammenheng i årstidsvariasjoner. Det var imidlertid mulig å se en viss sammenheng ved analyse av kortere tidsrom. En dag med svært mye nedbør ser ut til å etterfølges av en økning i ankerkraft i øvre lastcelle og en reduksjon i nedre lastcelle. Her er det imidlertid snakk om små endringer, som kun varer i kort tid. For eksempelet vist i Kapittel 6 gjenfant ankerkraften omtrent samme verdi som før nedbørstoppen i løpet av ca. 12 timer.

Modellen for termisk utvidelse i jord foreslår en sammenheng der temperaturøkning i jorda fører til en utvidelse av jorda, og dermed økt trykk mot spuntveggen, som vil gi en deformasjon i positiv x-retning. Det er imidlertid vanskelig å identifisere en trend for inklinometermålingene som passer med temperaturvariasjonene observert gjennom året. Inklinometermålingene viste at spuntveggen kan tolkes å være relativt stabil gjennom året, med små deformasjoner både i x-retning og y-retning. En omregning fra deformasjon til endring i ankerkraft viser imidlertid at disse små deformasjonene i teorien gir et bidrag i ankerkreftene, som i denne sammenhengen blir av betydelig størrelse. I Figur 7.1 og 7.2 er det presentert en sammenligning av de ankerkraften beregnet ut ifra målt deformasjon og ankerkraft

målt i lastcellene. Som det fremgår av figurene samsvarer disse dårlig, både for øvre og nedre stagrad. Både trendene og verdiene for ankerkraften beregnet ut ifra deformasjon avviker betydelig fra verdiene målt i lastcellene. I øvre lastcelle er differanse på hele ca. 150kN mellom beregnet og målt verdi.



Figur 7.1: Ankerkraft målt i øvre lastcelle plottet sammen med ankerkraft beregnet ut ifra deformasjonen dX av spuntveggen



Figur 7.2: Ankerkraft målt i nedre lastcelle plottet sammen med ankerkraft beregnet ut ifra deformasjonen dX av spuntveggen

Forklaringen kan være at inklinometeret er plassert mellom to stagrader. Den ligger ca. 1-2 m unna lastcellene. I stedet for å måle deformasjonen ved stagfestet måler den altså deformasjonen litt bortenfor. Det kan derfor virke som at spuntveggen buler og bulker seg litt mellom stagtradene og gir mindre deformasjoner mellom ankerfestene som ikke

er opptredende rett ved ankerfestene. Det kan argumenteres for at det ideelle for analysene gjort i denne oppgaven ville vært om inklinometerene stod plassert inntil ankerfestene. Samtidig vil deformasjoner på millimeternivå, som observert mellom stagen her, ikke ha stor betydning ved bruk av inklinometerene til vanlig kontroll av spuntveggen. Dermed er det naturlig at man her kanskje har lagt vekt på andre ting, som enklere utførelse.

7.2 Beregninger

7.2.1 Modell A - termisk tøyning kun i spuntvegg

Flere av inputparametrene er usikre. Analyse A1, A2 og A4 viser hvordan inputparametrene t og G påvirker resultatene. t er jordtykkelsen inntil spuntveggen som påvirkes av skjærdeformasjonen mellom spuntveggen og jorda. I Analyse A1 varieres denne parameteren mellom 0,1 m og 1 m. Resultatene viste at variasjonen i ankerkraft øker proporsjonalt med tykkelsen t . Det vil si at jo større tykkelse av jorda som deltar i skjærdeformasjonen ved termisk utvidelse av spuntveggen, desto større blir variasjonen i ankerkraft. G er skjærmodulen i jorda. Lavere G vil i teorien gi mindre friksjon mot veggen, og dermed mindre motstand mot den termiske utvidelsen av spuntveggen ved oppvarming, som igjen gir større økning i ankerkraft. I teorien vil lavere G -modul dermed gi større variasjon i ankerkraft. Det samme ser vi i resultatene for Analyse 2. $G = 0,1 \text{ kPa}$, altså tilnærmet null, gir større variasjon i ankerkraft enn G -verdien fra parameterstudiet. Med skjærmodul tilnærmet null er også motstandskraften som ble antatt å opptre i form av friksjon, tilnærmet lik null. A3 sammenligner beregninger med ulike verdier av faktoren f_{temp} . f_{temp} er som tidligere nevnt en faktor som den beregnede temperaturendringen i punktene oppover spuntveggen ganges opp med. Resultatene av Analyse A3 viser som forventet at utslaget fra N_{juni} øker proporsjonalt med f_{temp} . Analysene tilsier at modellen gir resultater som forventet, og viser dermed ingen tegn til systematiske feil i behandlingen av disse parametrene.

Alle tre analysene viser at beregning av ankerkraft med Modell A gir resultater som er proporsjonale med målte verdier. Beregningene gir imidlertid betydelig lavere utslag fra startverdien, N_{juni} , hvilket gir relativt stort avvik mellom beregnet og målt verdi i flere punkter. Modell A beregner endring i ankerkraft som resultat av termisk tøyning i stålet i spuntveggen. Det tas ikke med i beregningen at det også vil forekomme en termisk tøyning i ankrene. En termisk tøyning eller forlengelse av ankrene ved oppvarming ville gjort at ankrene tillater større forlengelse av spuntveggen, slik at kraftøkningen i ankrene ved oppvarming ikke er like stor som den ville vært uten termisk tøyning i ankrene. Siden Modell A som en forenkling antar at det ikke er noen termisk tøyning i ankrene, er Modell A forventet å overestimere ankerkraftsendringen den termiske tøyningen i spuntveggen forårsaker. Det at beregningene allikevel notorisk underestimerer endringen i ankerkraft indikerer at det må være andre effekter som bidrar.

7.2.2 Håndberegning

Det ble utført en håndberegning for endring i ankerkraft ved termisk utvidelse av spuntveggen. Denne baserer seg i stor grad på de samme mekaniske sammenhengene som Modell A (modell for termisk utvidelse av spuntvegg).

Forskjellen er at håndberegningene ikke benytter diskret element metode, og ikke inkluderer friksjonen mot veggen som motstand mot utvidelse. Resultatene av denne beregningen sammenfaller nesten perfekt med Modell A-beregningen med $G = 0,1 \text{ kPa}$ (Beregning A2.1). Som en kontroll indikerer den at Modell A regner som forventet.

7.2.3 Modell B - termisk tøyning i leire

Som beskrevet i Kapittel 5 var det lite erfaringsdata tilgjengelig for bestemmelse av den termiske utvidelseskoeffisienten α_{jord} . Det er derfor stor usikkerhet knyttet til bestemmelsen av denne parameteren. Studiene på termisk oppførsel i leire, presentert i Kapittel 3, viser at det er mange faktorer som påvirker utvidelseskoeffisientene. Uten en laboratorieundersøkelse av leiren i det aktuelle området forblir denne parameteren derfor usikker. Det er da heller ikke gitt at jorda i dette området faktisk vil utvide seg ved temperaturøkning. Det var allikevel ønskelig å avdekke om en modell for termisk utvidelse i jord kan gi ankerkraftsvariasjoner lignende de som er observert i lastcellene.

I Analyse B1 ble det utført beregninger med Modell B for seks ulike verdier av α_{jord} . Som forventet viser analysen at økning i termisk utvidelseskoeffisient gir større årstidsvariasjon. Det vil si at beregningen med størst verdi av α_{jord} gir størst utslag fra startverdien N_{juni} . Analyse B2 tester ulike verdier av h . h er høyden av de to jordlagene hvis termiske utvidelse gir økning i ankerkreftene. Analysen viser at høyere h -verdi gir større utslag fra startverdien N_{juni} . Dette er som forventet, ettersom større h gir trykk fra et tykkere lag ved temperaturøkning, og dermed større kraftøkning i ankerene ved i de varmere månedene. Analyse B3 tester ulike verdier av L . L er den representative horisontale lengden av de to jordlagene hvis termiske utvidelse gir økning i ankerkreftene. Høyere L -verdi gir større beregnet årstidsvariasjon i ankerkraft. Dette er som forventet, ettersom større L tilsvarer temperaturutvidelse i et lang med større horisontal lengde, og dermed større trykkøkning mot spuntveggen og ankrene ved temperaturøkning. Analysene utført viser dermed at Modell B responderer på variasjoner i både parameter h , L og α_{jord} som forventet, og viser dermed ingen tegn til systematiske feil i behandlingen av disse parametrene. Denne kontrollen styrker modellen.

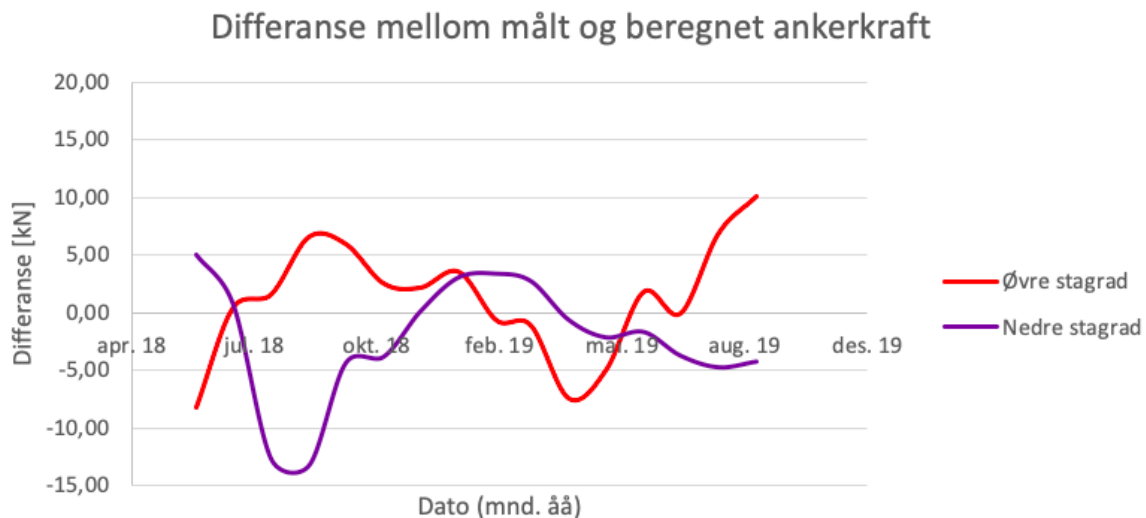
Resultatene av de tre analysene viser at beregningene gir verdier som er proporsjonale med de målte verdiene for ankerkraft. Det er imidlertid svært variert hvor stort avviket mellom beregnede og måle verdier er for de ulike analysene. For analyse A1 gir utvidelseskoeffisienten $\alpha_{jord} = 9,3 * 10^{-6}$ resultater som stemmer relativt godt med øvre stagrad. For nedre stagrad stemmer ikke beregningsresultatene like godt med målingene, selv om beregningene der $\alpha_{jord} = 9,3 * 10^{-6}$ samsvarer bedre enn for de andre α_{jord} -verdiene. I Analyse B2 og B3 er det relativt stort avvik mellom målte og beregnede verdier for alle beregningene. Felles for alle analysene utført med modell B er at det er størst avvik mellom beregningene og målingene i nedre stagrad i perioden juni-august 2018.

Analysene indikerer dermed at termisk jordutvidelse kan være en kilde til årstidsvariasjonene målt i lastcellene. Det at beregningsresultatene ikke stemmer med målingene for nedre stagrad indikerer imidlertid at modellen er ufullstendig. Der kan virke som at det er flere effekter enn termisk tøyning i spuntten som gir årstidsvariasjonene observert for ankerstagene.

7.2.4 Kombinasjon av de to modellene

Det er utført en kombinert beregning som summerer den termisk induserte endringen i ankerkraft beregnet med de to modellene. Denne kombinerte beregningen modellerer dermed endring i ankerkraft som et resultat av både termisk jordutvidelse og lengdeutvidelse i spunt. Flere kombinasjoner er testet, og kombinasjonen av Beregning A3.3 der $f_{temp} = 1,4$ og Beregning B0 ga resultater som stemte godt med de målte verdiene. Flere av inputparametrene er fortsatt usikre. Metoden brukt her med å teste ulike inputverdier og se hva som gir best match med målingene er en fremgangsmåte som kan gi falsk tillit til modellen. Det påpekes derfor at grunnlaget for det er usikkerhet forbundet med bestemmelsen av enkelte inputparametre.

Resultatene viser godt samsvar mellom målte og beregnede ankerkrefter. Figur 7.3 viser differansen mellom målt og beregnet verdi. For nedre stagrad er differansen størst i august 2018. Da er forskjellen mellom målt og beregnet verdi ca. 13 kN . Denne måneden var det som nevnt også uregelmessigheter i målt ankerkraft, som ikke så ut til å ha en annen årsak enn temperaturendring. Det er derfor ikke overraskende at beregnet verdi ikke stemmer like godt med målt verdi i dette punktet som ellers. For de andre månedene holder differansen seg under 10 kN , stort sett også under 5 kN . Som tidligere nevnt er nøyaktigheten på lastcellene 0,5% av full skala. En treffsikkerhet på nærmere 5 kN er dermed å anse som relativt godt.



Figur 7.3: Plott av differansen mellom målt og beregnet ankerkraft for kombinert modell

Resultatene for beregnet deformasjon i spuntveggen viste deformasjon i positiv x-retning ved temperaturøkning og deformasjon i negativ x-retning når temperaturen minket. Denne temperaturavhengigheten ble ikke observert i deformasjonsmålingene for noen av inklinometerene. Samtidig er årstidsvariasjonen beregnet med Modell B svært liten, med ca. $0,1\text{ mm}$ for nedre stagrad ($h = 6\text{ m}$) og $0,5\text{ mm}$ for øvre stagrad ($h = 8,5\text{ m}$). Med et inklinometer med en presisjon på $1,5\text{ mm}$ for 32 m er det derfor vanskelig å dokumentere denne variasjonen. Selv dersom inklinometerene var plassert slik at de målte deformasjon helt inntil lastcellene er det dermed lite sannsynlig at det ville vært mulig å

observere en tydelig årstidsvariasjon.

7.3 Parameterbestemmelse

Analysene gjort for modell A og B viser hvor sensitive beregningene er for variasjon av enkelte parametre innenfor intervallene som ble undersøkt. På den måten gir analysene en indikasjon på hvor treffsikker parameterbestemmelsen må være, og hvor stort utslag det vil gi om antagelsene er feil.

En oppsummering av resultatene av parameteranalysene, fra Kapittel 6, er oppgitt i Tabell 7.1. Tabellen oppgir største og minste verdi i beregningene, for hver enkelte parameter. I de to kolonnene helt til høyre oppgis differansen mellom beregnet ankerkraft i februar, N_{feb} , for disse to verdiene.

Tabell 7.1: Sammenligning av parametrene som er analysert

Beregningsmodell	Analyse	Parameter	Min.verdi	Max.verdi	Differanse N_{feb} Øvre stagrad	Differanse N_{feb} , Nedre stagrad
Modell A	A1	t	0,1	1	3 kN	2 kN
	A2	G	0,1 kPa	G_0	2 kN	2 kN
	A4	f_{temp}	1,0	1,6	12 kN	5 kN
Modell B	B1	α	$9,3 * 10^{-6}$	$1,3 * 10^{-4}$	50 kN	15 kN
	B2	h	0,1 m	2 m	19 kN	8 kN
	B3	L	0,5 m	10 m	13 kN	2 kN

Det ble utført analyser der parametrene oppgitt i tabellen ble variert fordi det var stor usikkerhet forbundet med bestemmelsen av dem. Det var derfor ønsket å få en indikasjon på hvor presis antagelsen for hver enkelt parameter må være. Hver av analysene tok for seg et sett med beregninger innenfor det området det ble ansett sannsynlig at parameteren burde ligge. Analysene av t og G i Modell A viser at variasjoner innenfor området som er testet ikke gir noen betydelig forskjell. Dette indikerer at det ikke vil gi betydelig utslag i beregningene dersom disse parametrene er noe upresist anslått. Faktoren f_{temp} som ga derimot større differanse, hvilket indikerer at feil i bestemmelse av temperaturinput kan gi betydelig utslag i beregningene. For Modell B var differansen mellom max og min N_{feb} relativt stor for alle analysene. Det er imidlertid α_{jord} som gir aller størst differanse.

Analysene tilsier dermed at både verdiene for temperatur, α_{jord} , h og L må bestemmes med relativt god presisjon. I denne avhandlingen er disse parametrene forbundet med usikkerhet. Dette understreker at resultatene presentert i denne avhandlingen ikke gir grunnlag for å verifisere modellene er undersøkt. Analysene som er gjort kan imidlertid benyttes til å undersøke om det er *mulig* at sammenhengene er korrekte og om de bør forskes videre på.

7.4 Årstidsvariasjoner i dimensjoneringsammenheng

Ankerkraftsvariasjonene observert og regnet på i dette prosjektet utgjør ca. 3% av de opptredende kreftene i stagene. Det viser at med de tiltakene som her er utført for å frostsikre og unngå store temperaturvariasjoner, vil årstidsvariasjonene ikke ha betydelig påvirkning på sikkerheten til spuntkonstruksjonen. Samtidig er det her identifisert effekter

som ser ut til å påvirke konstruksjonen ved temperaturvariasjoner. Dette funnet kan være til nytte ved vurdering av effekten hos konstruksjoner som utsettes for større temperaturvariasjoner enn de vi ser her. Eksempelvis vil en spunt som står i sola kunne bli svært varm. Modeller som disse gjør det mulig å beregne hvilken effekt dette vil gi. Det må imidlertid understrekes at denne spuntkonstruksjonen var frostsikret i permanent fase. Dersom gradestokken havner under null vil effekter som telehiv spille inn. Slike effekter er ikke tatt høyde for i denne avhandlingen, ettersom de ikke var opptredende i den permanente fasen. Det vil derfor ikke være tilstrekkelig å basere seg på modellene presentert her for spuntkonstruksjoner som ikke er frostsikret.

Med den utviklingen som skjer i verden i dag, med global oppvarming og forstyrrelse av havstrøming- og vindsystemene, spås det at klimaet vil endre seg betraktelig. Muligens kan dette medføre at temperatureffektene analysert i denne avhandlingen vil forekomme i enda større skala i fremtiden.

Kapittel 8

Konklusjon og videre arbeid

I denne avhandlingen var det ønsket å finne årsaken til årstidsvariasjoner i ankerkreftene på en spuntkonstruksjon i permanent fase. Denne spuntkonstruksjonen er bygd i forbindelse med prosjektet Kværnerdammen. Det er utført en analyse av ankerkraft- og temperaturmålinger for de øvre og nedre stegrad langs spuntten. Det er utviklet to modeller som er testet og undersøkt. Modell A beregner endring i ankerkraft som følge av termisk lengdetøyning av spuntveggen. Modell B beregner endring i ankerkraft som følge av termisk tøyning i jord. Det er utført ulike analyser for begge modellene der det er testet ulike verdier for de mest usikre parametrene. Parametrene som ikke er blitt analysert forventes å gjenspeile de faktiske forholdene godt. Det er også utført en beregning der Modell A og Modell B er kombinert. Denne kombinerte modellen betraktet følgelig både effekten av termisk tøyning i spuntvegg og i jord. Det er sett på hvordan de beregnede ankerkreftene samsvarer med målingene fra virkeligheten. Basert på disse analysene er det til slutt vurdert hvorvidt de to fenomenene Modell A og Modell B undersøker kan være årsaken til årstidsvariasjonene som er observert.

8.1 Konklusjon

Det er utbredt kjent at metaller utvider seg ved oppvarming. Spuntveggen i spuntkonstruksjonen i dette prosjektet består av stål, og vil følgelig utvide seg når temperaturen i stålet endrer seg. Modell A beregner hvordan termisk tøyning i spuntveggen påvirker ankerkreftene. Analysene utført med denne modellen viste at beregnede og målte verdier var proporsjonale, men at den beregnede endringen i ankerkraft for en gitt temperaturendring var lavere enn endringen målt i virkeligheten. Dette indikerer at termisk tøyning i spuntveggen kan være en årsak til de observerte årstidsvariasjonene i ankerkreftene. Litteraturstudiet gjennomført i Kapittel 3 avdekket at flere studier har vist at oppvarming kan medføre termisk utvidelse i leire i noen tilfeller. Basert på dette er det utviklet en beregningsmodell (Modell B) for hvordan dette kan påvirke ankerkreftene i en spuntkonstruksjon med leire på en side. Analysene utført med denne Modell B viste at beregnede og målte verdier var proporsjonale, som for Modell A. Ved å variere inputparametrene innenfor antatt realistiske områder, ga noen beregninger godt samsvar med målte verdier for øvre

stegrad, men ikke for nedre.

En beregning som summerer ankerkraft induisert ved temperaturendring beregnet med Modell A og B viste seg å gi best resultat. I denne beregningen er temperaturendringen i spunten oppjustert fra temperaturmålingene utført på jordsiden av spunten med en faktor $f_{temp} = 1,4$, ettersom det er et luftrom på andre siden av spunten, som vil være mer sensitiv til temperaturendringene i luften enn jordsiden. Beregningen samsvarer betydelig bedre med de målte verdiene enn beregningene utført med hver av de to modellene alene. En sammenligning mellom den kombinerte beregningen og målingene viser kun små avvik mellom målte og beregnede verdier, med unntak av perioden juli-august 2018. Ettersom avviket observert her skjedde tidlig i det som er definert som permanent fase og ikke går igjen i den samme perioden i 2019, antas dette avviket å være forårsaket av en ytre påvirkning som ikke har sammenheng med temperatur. Resultatene indikerer dermed at beregningen utført med den kombinerte modellen etterligner de observerte årstidsvariasjonene godt. Det fremgår dermed også av resultatene at termisk tøyning i spunt og i jorda bak spunt kan være årsakene til årstidsvariasjonen observert i ankerstagene.

Det er imidlertid store usikkerheter forbundet med bestemmelsen av flere av parametrene som inngår i de to modellene. Analysene som er utført viser at for enkelte parametre vil feil i antagelser kunne gi stort utslag i beregningsresultatene. Det er derfor behov for et utvidet parameterstudie, slik at det kan forventes større grad av presisjon i parameterbestemmelsen. Dersom et slikt studie med stor sikkerhet kan vise at parameterne antatt i den kombinerte beregningen er korrekte, vil det øke modellens troverdighet betydelig.

8.2 Forslag til videre arbeid

Det er stor usikkerhet forbundet med flere av parameterne i de to modellene, hvilket påvirker usikkerheten av beregningene betydelig. Det anbefales derfor videre å utføre et utvidet parameterstudie. Spesielt interessant hadde det vært om det ble utført et laboratorieforsøk på leire hentet fra det aktuelle området, og testet volumutvidelsen for temperaturendringer under lignende forhold og ved de temperaturnivåene som er observert.

Det kunne også vært aktuelt å gjøre noen analyser i elementprogrammet PLAXIS. PLAXIS 2D Thermal er en «add on» til PLAXIS 2D som gjør det mulig å utføre en koblet analyse der termiske effekter blir tatt med i elementanalysen. Det kunne vært interessant å sammenligne en slik beregning med beregningene som er utført i denne avhandlingen. For Modell B, som ser på termisk utvidelse av jord, kunne det også vært aktuelt å utføre en analyse i ordinær PLAXIS 2D, ved å se på utvidelse av et jordpolygon bak spuntveggen.

Oppgaven er begrenset til å kun fokusere på ett prosjekt. Det at man i dette prosjektet har valgt å fortsette overvåkning av både ankerkrefter, temperatur og deformasjon i lang tid etter ferdigstillelse er unikt. Som en videreføring av denne oppgaven ville det imidlertid vært svært interessant om dette ble gjort for flere prosjekter slik at modellene utarbeidet her kan testes for andre forhold.

Referanser

- Amundsen, H.A., Emdal, A., Grande, L., Janbu, N., Nordal, S., Sandven, R. & Senneset, K. (1970). *Geotechnics field and laboratory investigations - lecture notes msc course tba4110*. Trondheim: NTNU, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Faggruppe for geoteknikk.
- Athanasiu, C. (2020). *902336-00-memo-01-2020 - tiafa computer program. user's manual*. Oslo: Multiconsult.
- Baldi, G., Hueckel, T. & Pellegrini, R. (1988). Thermal volume changes of the mineralwater system in low-porosity clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(4), 807–825. doi: 10.1139/t88-089
- Burghignoli, A., Desideri, A. & Miliziano, S. (2000). A laboratory study on the thermomechanical behaviour of clayey soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4), 764-780. doi: 10.1139/t00-010
- Campanella, R.G. & Mitchell, J.K. (1968). Influence of temperature variations on soil behaviour. *Journal of Soil Mech. and Found. Div.*, 94(3), 709-734.
- Demars, K.R. & Charles, R.D. (1982). Soil volume changes induced by temperature cycling. *Canadian Geotechnical Journal*, 19(2), 188-194. doi: 10.1139/t82-021
- Desideri, A. (1988). Determinazione sperimentale dei coefficienti di dilatazione termica delle argille. In *Proceedings, Convegno del Gruppo Nazionale di Coordinamento per gli Studi di Ingegneria Geotecnica sul tema: Deformazioni dei terreni ed interazione terreno-struttura in condizioni di esercizio, Monselice, Italy, 5–6, 1(5-6)*, 193-206.
- EDS. (2017). *Dekke over kjeller, detaljer 2b-211*. Ingeniørene Seim & Hultgren.
- Emdal, A., Grande, L., Nordal, S., Eiksund, G. & Grimstad, G. (2006). *Geoteknikk : beregningsmetoder : kompendium for bruk i emne tba4105 vår 2006*. Trondheim: NTNU, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Faggruppe for geoteknikk.
- Geosense. (2019). *Viv anchor load cell vwlc-5000 series*. England: Geosense.
- Habibagahi, K. (1977). Temperature effects and the concept of effective void ratio. *Indian Geotechnical Journal*, 7, 14-34.
- Hallseth, E., Haugan, J., Hjelman, K.E. & Isnes, A. (1990). *Fysikk for ingeniører - bind 1*. Bekkestua: NKI forlaget.
- Hofstad, K. (2018). Utvidelseskoeffisient. *Store Norske Leksikon*. Hentet 14.04.2020 fra https://snl.no/eksoterm_prosess
- Houston, S.L., Houston, W.N. & Williams, N.D. (1985). Thermo mechanical behavior of seafloor sediments. *Journal*

- of Geotechnical Engineering*, 111(11), 1249-1263. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:11(1249)
- Hueckel, T. & Pellegrini, R. (1989). Modeling of thermal failure of saturated clays. *ISMES publication*, 264.
- Institutt for biovitenskap. (2011). *Konveksjon*. Hentet 14.05.2020 fra <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/k/konveksjon.html>
- Knutsen, M. (2017a). *128517-1-rig-not-007 - permanent sikringskonstruksjon mot g/s-vei*. Oslo: Multiconsult.
- Knutsen, M. (2017b). *128517-1-rig-not-009 - grunnforsterkning*. Oslo: Multiconsult.
- Knutsen, M. (2017c). *128517-1-rig-not-011 - prosedyrer for etablering av permanent sikringskonstruksjon og fundamentering*. Oslo: Multiconsult.
- Knutsen, M. (2017d). *128517-rig-not-008 - etablering av byggegrop*. Oslo: Multiconsult.
- Langelid, S.B. & Naglestad, B. (2019). Permanent sheet pile walls in complex soil conditions– monitoring and safety. I *Fjellspregningsteknikk bergmekanikk/geoteknikk 2019*. Multiconsult og Cautus Geo.
- Lien, J.R. (2000). *Mekanikk* (vol. Del 1). Bergen: Fysisk institutt, Universitetet i Bergen.
- Lingnau, B.E., Graham, J. & Tanaka, N. (1995). Isothermal modeling of sand-bentonite mixtures at elevated temperatures. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(1), 78–88.
- Measureand. (2019). *Measureand saaf model 003*. Canada: Measureand.
- Miliziano, S. (1992). Influenza della temperatura sul comportamento meccanico delle terre coesive. *Tesi di Dottorato in Ingegneria Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza," Rome, Italy*.
- Nielsen, E. (2016). *128517-1-rig-rap-001 - geoteknisk grunnundersøkelse, datarapport*. Oslo: Multiconsult.
- Nielsen, E. & Frossard, R. (2017). *128517-1-RIG-BER-006a Beregningsnotat006A - Plaxis input*. Oslo: Multiconsult.
- Nordal, S. (2019). *Geotechnical engineering advanced course*. Trondheim: NTNU, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Faggruppe for geoteknikk.
- OBOS. (2019). *Kværnerbyen blir til*. Hentet 14.05.2020 fra <https://www.obos.no/privat/ny-bolig/boligprosjekter/oslo/kvarnerbyen/kvarnerbyen-blir-til>
- Sandbakk, T.S. (2017). *Kværnerdammen, felt f1 - tegning nr. a14.3010*. ARCASA.
- Sem, H.V. (2020). *Dimensjonering og overvåkning av ankerlaster på permanent spuntkonstruksjon*. Prosjektoppgave. Norges teknisk- og naturvitenskapelige universitet.
- Shorokhova, M. (2016). *128517-rig-not-001 - grunnforhold og geotekniske problemstillinger*. Oslo: Multiconsult.
- Shorokhova, M., Egel, A., Sanda, Ulvestad, A. & Thorn, E. (2018). *Lodalen: Fra industri til boligby - fra store åpenbare, til krevende skjulte geotekniske utfordringer*. Oslo: Multiconsult.
- Towhata, I., Kuntiwattanaku, P., Seko, I. & Ohishi, K. (1993). Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests. *Soils and foundations*, 33(4), 170–183. doi: 10.3208/sandf1972.33.4_170
- Ulvestad, A.B. (2017). *128517-1-rig-not-010 - overvåkning, oppfølging og kontrollplan*. Oslo: Multiconsult.
- Walberg, N.A. (2017). *Brukermanual cautus web kværnerdammen* (1. utg.). Oslo: Cautus Geo ASA.

Vedlegg A

Symboler

A.1 Norsk

A Areal

c_V Konsolideringskoeffisient

E Youngs modul eller elastisitetsmodul

e Poretall

F Betegnelse for kraft

G Skjærmodul

h Høyde

k Fjærstivhet

L Lengde

ΔL Lengdeendring

N Betegnelse for kraft

S Betegnelse for kraft

t Tykkelse

t_p Primær konsolideringstid

T Temperatur

ΔT Temperaturendring

A.2 Gresk

α Temperaturutvidelseskoeffisient

β Vinkel mellom ankerstag og spuntvegg

γ Skjærtøyning

γ_w Tyngdetetthet for vann

δ Deformasjon eller forflytning

ϵ Tøyning

$G\epsilon_V$ Volumtøyning

ν Poissons tall

σ Spenning

Σ Sum

τ Skjærspenning

A.3 Forkortelser

CAU_a "Consolidated anisotropic undrained active shear test"

CAU_p "Consolidated anisotropic undrained passive shear test"

NC Normalkonsolidert

OC Overkonsolidert

OCR Overkonsolideringsgrad

GV Grunnvannstand

A.4 SI-enheter

m Meter

N Newton $N = kg \times m/s^2$

Pa Pascal $Pa = N/m^2$

kPa kilopascal $kPa = kN/m^2$

MPa megapascal $MPa = MN/m^2 = N/mm^2$

Vedlegg B

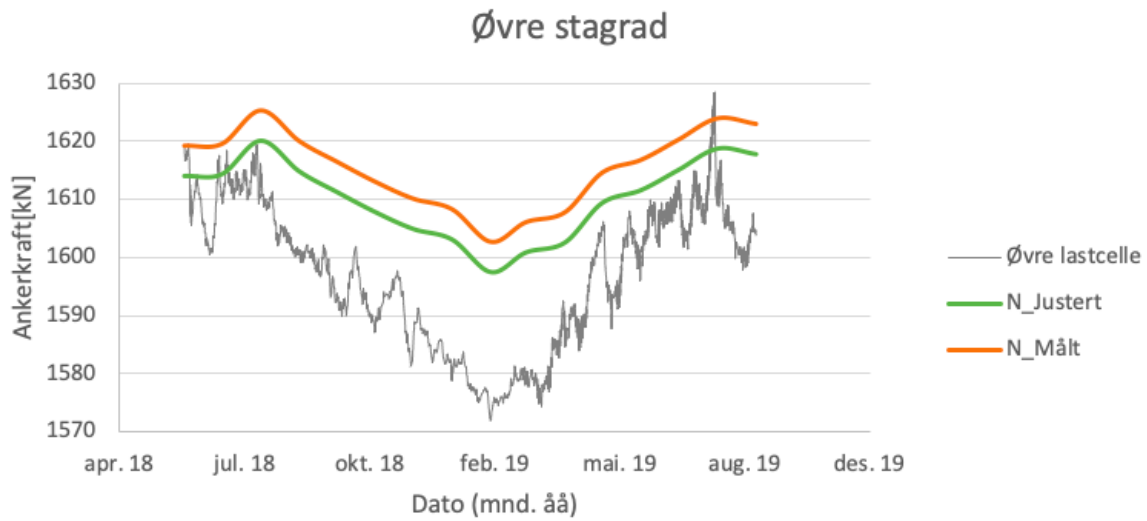
Justering av referanseverdi

Det ble brukt en justert referanseverdi for ankerkraften 1.juni 2018, i beregningene utført med Modell A, håndberegninger og Modell B. I det følgende er beregninger med justert verdi beregninger med målt verdi plottet sammen med målinger i lastcellene for sammenligning. Både målt og justert referanseverdi er oppgitt i Tabell B.1.

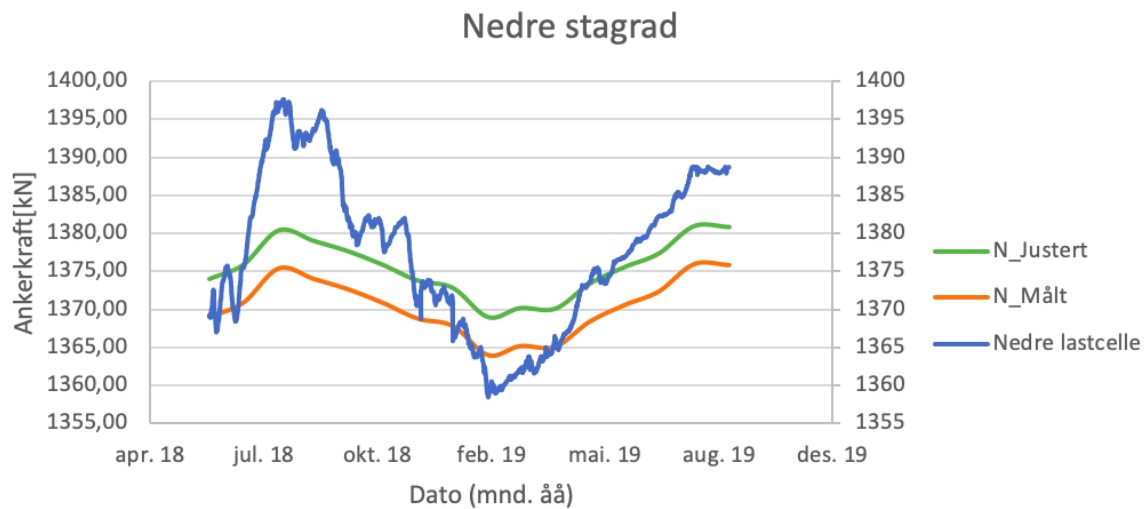
Det er utført en sammenligning for Modell A og en sammenligning med Modell B der inputparametrene antatt i Kapittel 5 er brukt for begge modellene. Dette tilsvarer Beregning A0 og Beregning B0.

Tabell B.1: Opprinnelig og justert referanseverdi for ankerkraft

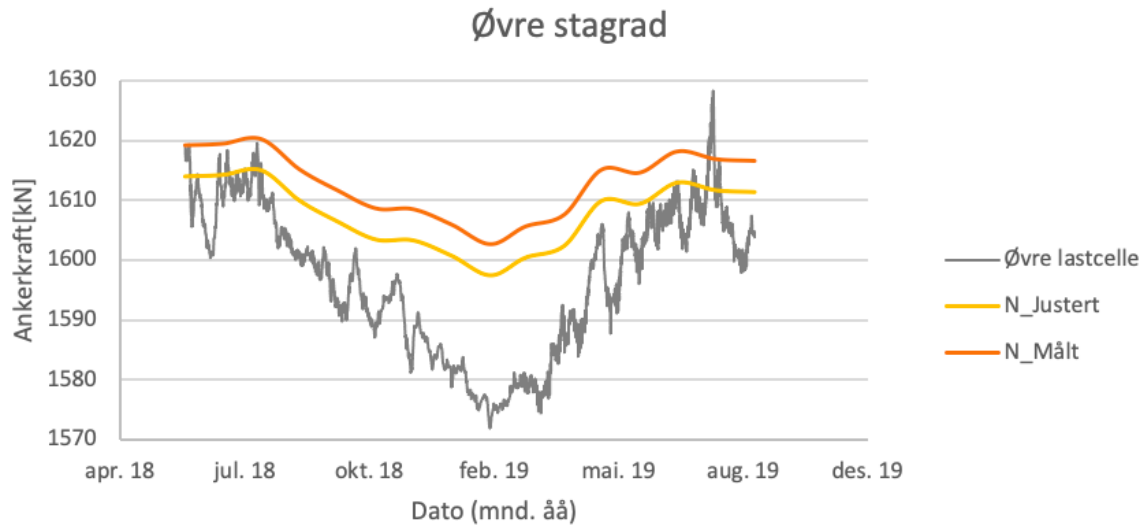
	Referanseverdi, ankerkraft i øvre stegrad [kN]	Referanseverdi, ankerkraft i nedre stegrad [kN]
Verdi målt 01.06.18 kl. 00:00	1619,21	1368,996
Justert verdi	1614	1374



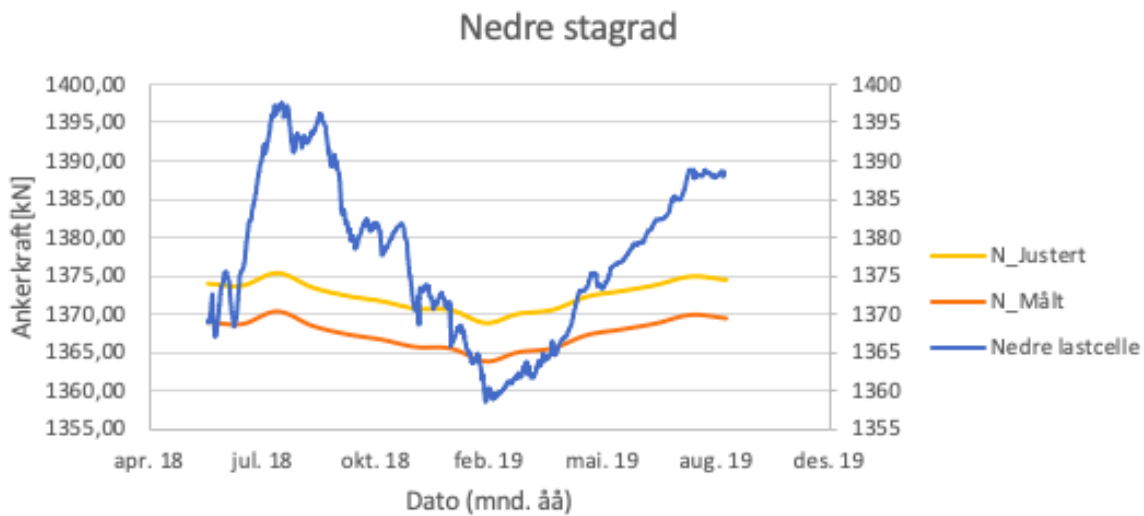
Figur B.1: Plott av Beregning A1.2 for målt og justert referanseverdi



Figur B.2: Plott av Beregning A1.2 for målt og justert referanseverdi



Figur B.3: Plott av Beregning A1.2 for målt og justert referanseverdi



Figur B.4: Plott av Beregning A1.2 for målt og justert referanseverdi

Denne sammenligningen viser at resultatene som virker å være forskjøvet sammenlignet med målingene, med $N_{målt}$ som referanseverdi. $N_{justert}$ gir resultater som stemmer bedre med målingene.

Vedlegg C

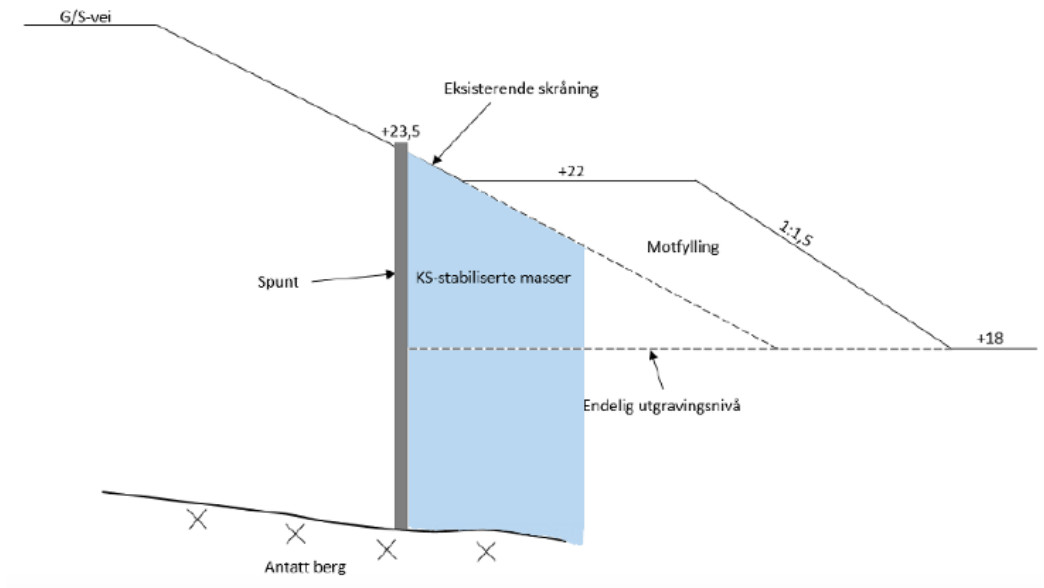
Vedlegg til Kapittel 4

I følgende vedlegg er det gitt en mer detaljert beskrivelse av utgravingsprosessen, KS-stabilisering og permanente stag ved etablering av spuntkonstruksjonen i prosjekt Kværnerdammen.

C.1 Utgravingsprosessen

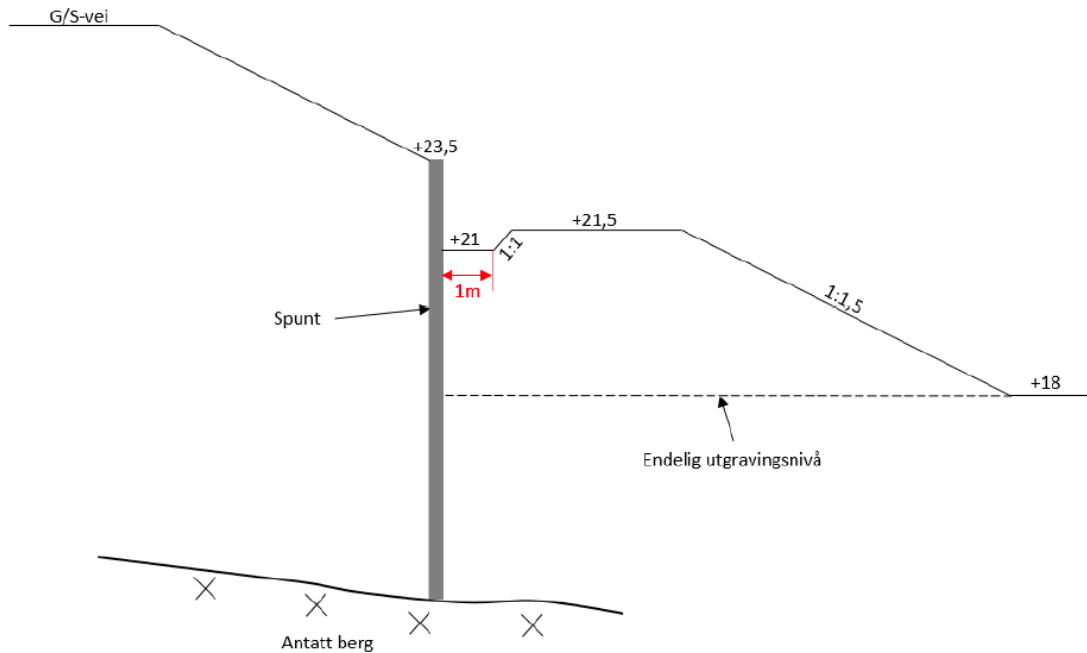
Utgravingsprosessen ble delt inn i fem ulike faser. I det følgende er hver fase beskrevet i henhold til [Knutsen \(2017d\)](#).

Fase 0: Initialfasen er den initielle situasjonen før utgraving begynner. I forkant er motfylling etablert inn mot eksisterende skråning, med topp på ca. kote +22. Spunt installert og forankret med spuntfot i berg og kalksement-stabilisering er utført.



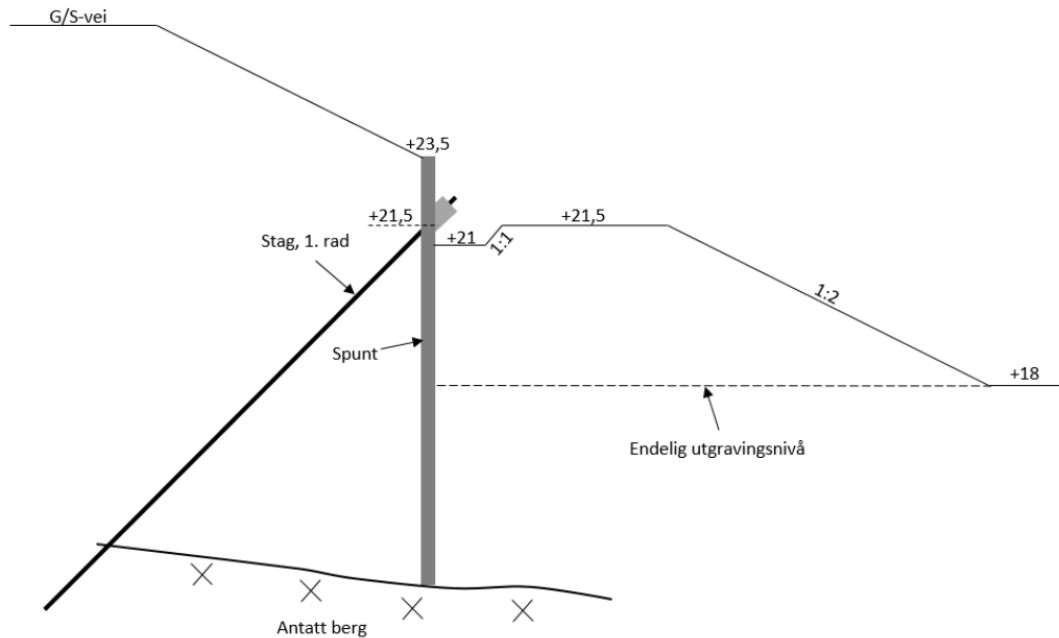
Figur C.1: Snitt av den ferdigstilte spuntkonstruksjonen før siste utgravingsfase ([Knutsen, 2017d](#))

Fase 1: Ved første utgravingsfase utføres en utgraving til kote +21 i grøft mot spunt, i en bredde på 1 meter. Arbeidsplattformens gravenivå er kote +21,5.



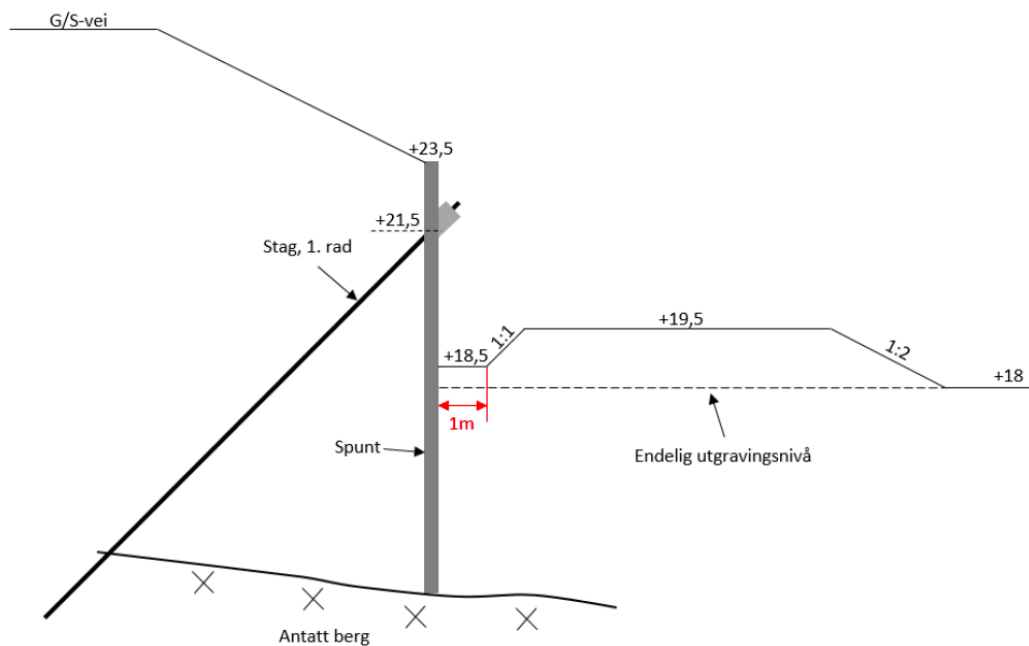
Figur C.2: Fase 1 av utgravingsprosessen (Knutsen, 2017d)

Fase 2: Første stagrad ble etablert på kote +21,5 med 45 graders helning og senteravstand 2,8 m. Dobbel UNP 400-profil benyttes som pute. Denne tilpasses stagenes helning ved bruk av trekantknekter. For forsterkning lokalt brukes stagavstivere på begge profiler. Stagene skal ha minst 5 m frilengde og 6 m forankringslengde. Total innboring i godt berg skal være minst 10,5 m. Stagene prøveoppspennes og testes.



Figur C.3: Fase 2 av utgravingsprosessen (Knutsen, 2017d)

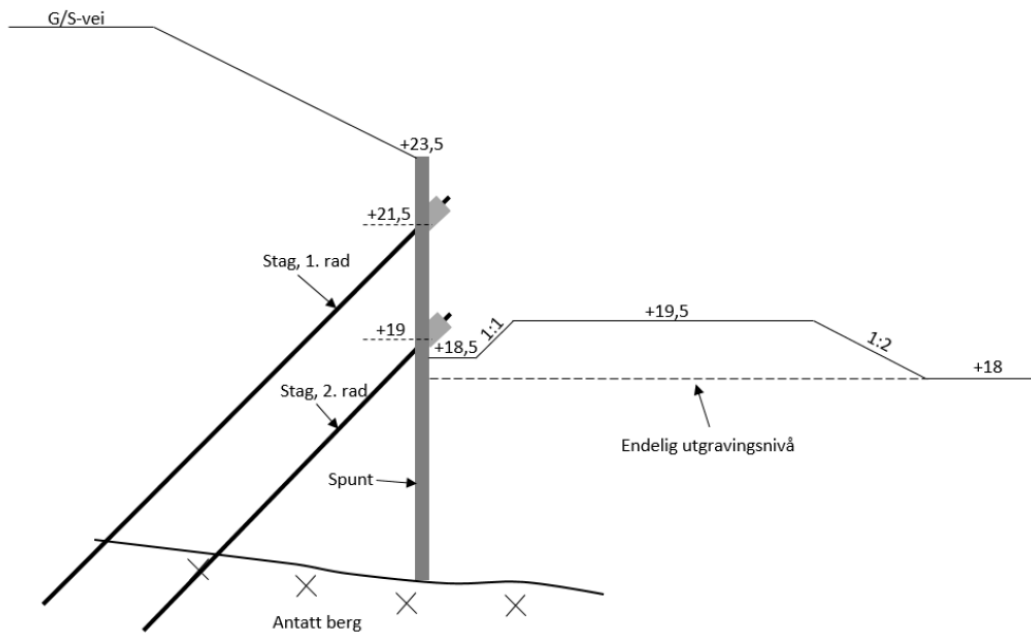
Fase 3: Det graves seksjonsvis til kote +18,5 21 i grøft mot spunt, i en bredde på 1 meter. Arbeidsplattformens gravenivå er kote +19,5. Tillatt skråningshelning mellom arbeidsplattform og nivå inntil spunt er maks 1:1.



Figur C.4: Fase 3 av utgravingsprosessen (Knutsen, 2017d)

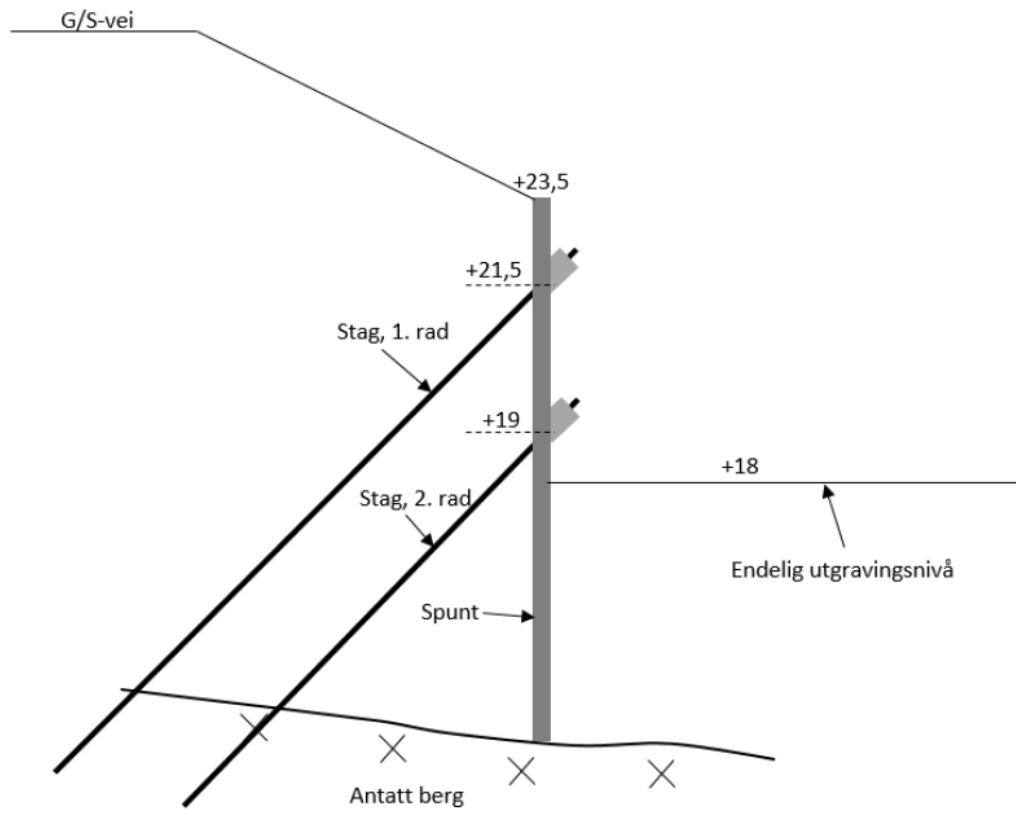
Fase 4: Andre stegrad ble etablert på kote +19 med 45 graders helning og senteravstand 2,8 m. Da dette er perma-

nente stag skal lissene innstalleres med avstandsholdere. Dobbel UNP 400-profil benyttes som pute. Denne tilpasses stagenes helning ved bruk av trekantknekter. For forsterkning lokalt brukes stagavstivere på begge profil. Stagene skal ha minst 5 m frilengde og 6 m forankringslengde. Total innboring i godt berg skal være minst 10,5 m. Stagene prøveoppennes og testes.



Figur C.5: Fase 4 av utgravingsprosessen (Knutson, 2017d)

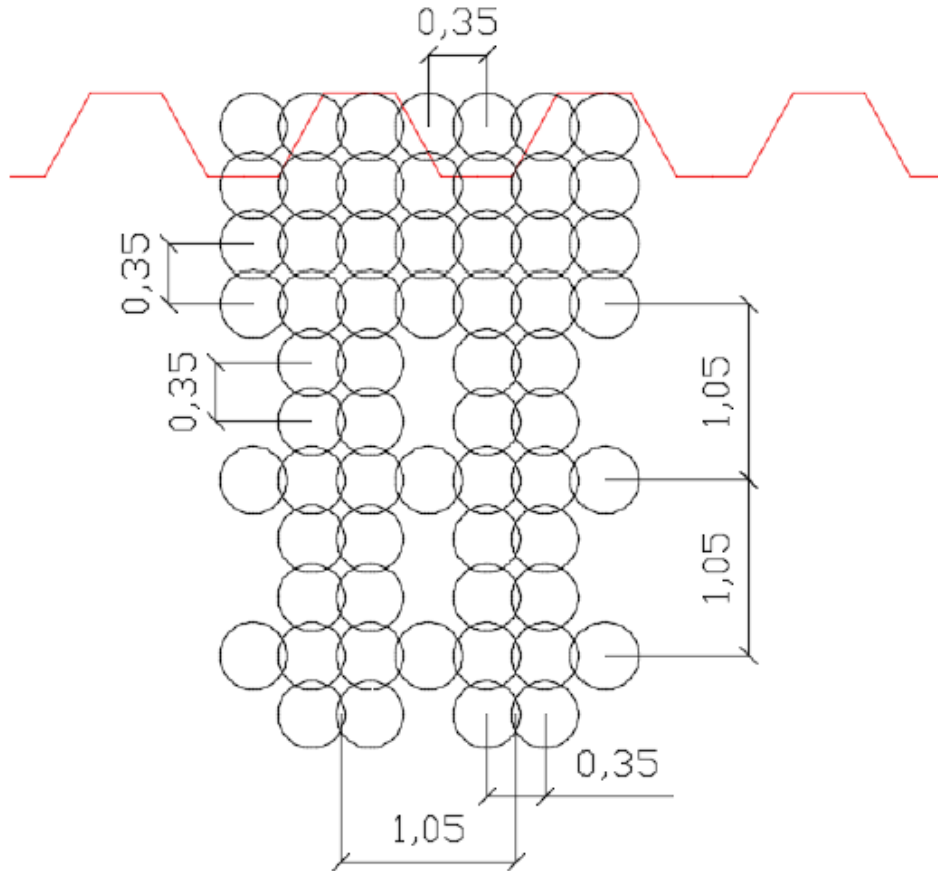
Fase 5: Det graves ned til endelig utgravingsnivå ca. kote +18.



Figur C.6: Fase 5 av utgravingsprosessen (Knutsen, 2017d)

C.2 KS-stabilisering

KS-pælene blir installert i et gittermøster, og skal etableres helt i kontakt med spunt. Dette er illustrert i Figur C.7 ved å tegne pæler som overlapper spuntet. I virkeligheten er det ikke kalksement bak/øst for spuntet.



Figur C.7: Skisse av mønster for installasjon av kalksementpæler (Knutsen, 2017b)

C.3 Etablering av permanente stag

For å etablering av permanente stag er boring av stag og tetting av borhull utført. Prosedyren for dette er hentet fra [Knutsen \(2017c\)](#):

1. Boring av foringsrør/berghull
2. Montering av pakkeren, som benyttes for injeksjon i berghullet, i toppen av berghullet, på nedsiden av avsluttet foringsrør. Berghullet injiseres.
3. Fylling av foringsrør med vann for å kontrollere for lekkasje ved overgang mellom berg og foringsrør
4. Ved lekkasje utføres ny injeksjon med pakker ved bunn foringsrør
5. Foringsrøret fylles med vann og det kontrolleres igjen for lekkasje ved overgang mellom berg og foringsrør (ved lekkasje gjentas pkt. 4+5)
6. Når vannstanden er stabil i foringsrøret og det ikke er lekkasje over gitt intervall (min. 1 time) kan berghullet gjenoppbores og klargjøres for montering av stag.

Utenom forankringssonen skal spenntauene være fettete med smørende og korrosjonshindrende middel og plastbelagt på normal anerkjent måte fra fabrikk. Stagene er omsluttet av omsluttet av korrugerte plastrør. Ytre/indre diameter på røret er tilpasset borhulldiameter og stagtykkelse. I forankringssonen er avstanden mellom borhullsrør og korrugert rør minst 15mm, imens avstanden mellom spenntau og korrugert rør skal være minst 10mm. Spenntauene skal være montert slik i forankringssonen at man kan garantere mørtel rundt hvert enkelt spenntau. De korrugerte rørene er forsynt med styreribber som skal sikre sentrisk plassering i borhullet.

Umiddelbart før staget skal settes ned skal det kontrolleres at staghullet er rent ved å spyle fra bunnen til rent spylevann kommer opp av stålrøret. Spenntauene føres ned i hullet til 0,5 m over bunnen av borhullet. I vannfylt hull fylles gysemørtel(B35) opp nedenfra. Hullet skal hele tiden være vannfylt over gysemørtelen. Innpumping stanses når utgående masse har samme konsistens som inngående gysemasse. Umiddelbart montering av stag skal gysemørtelen ertsattes med vann ved spyling ned til 1,0 m under toppen av foringsrøret ([Knutsen, 2017a](#)).

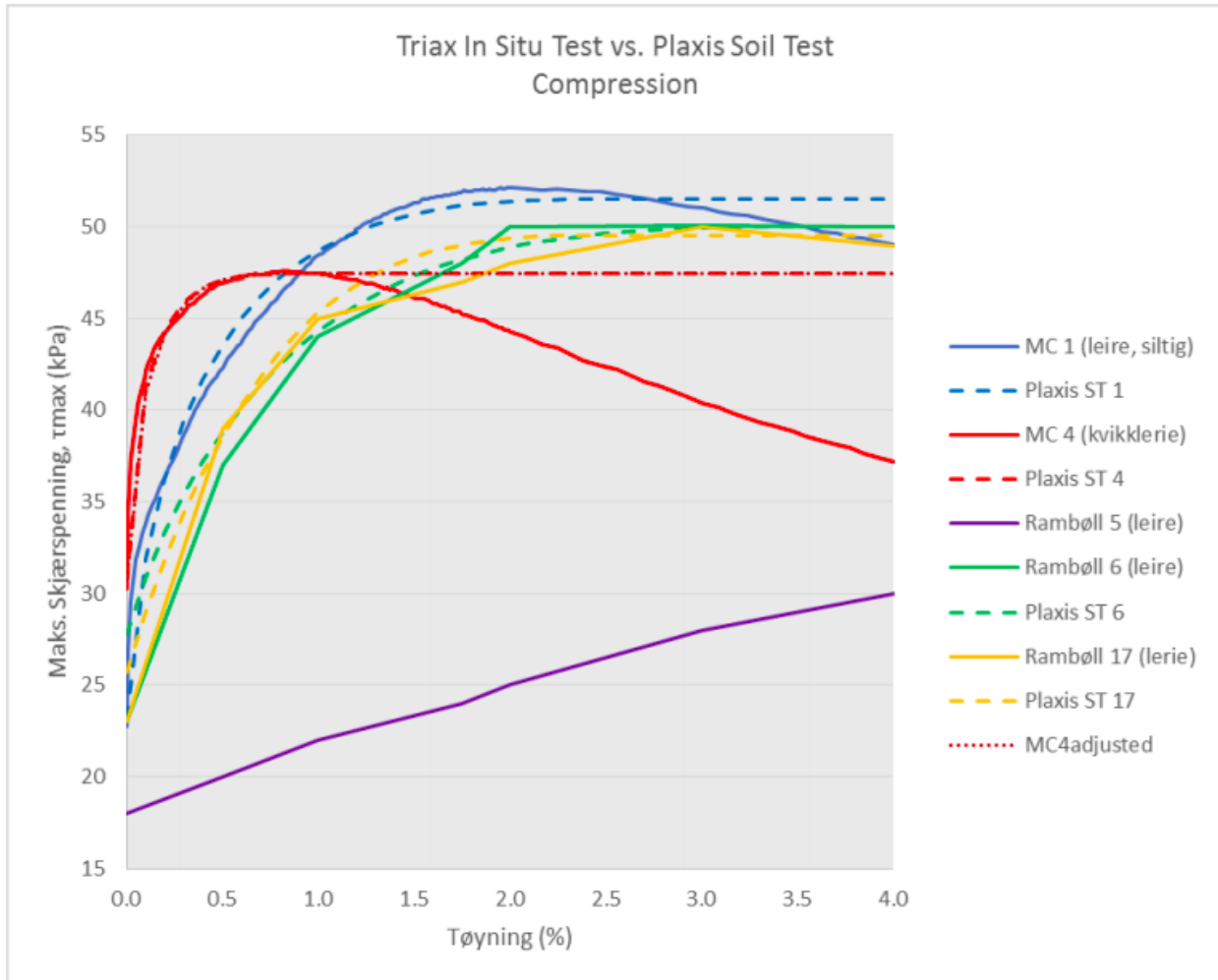
Vedlegg D

Vedlegg til Kapittel 5

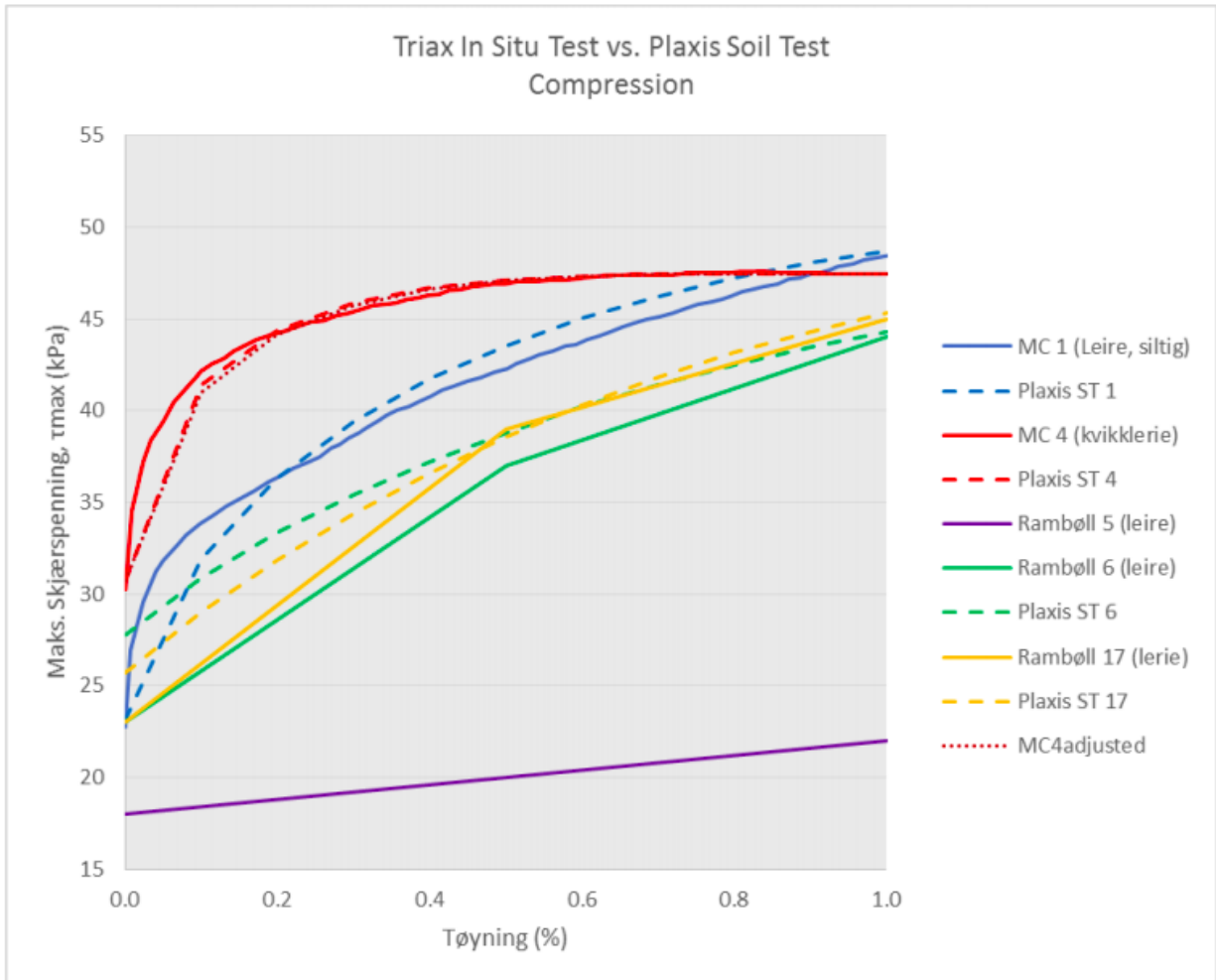
Følgende vedlegg inneholder et utvalg av bakgrunnsmateriale benyttet ved valg av lagdeling og inputparametre.

D.1 Tilpasning i PLAXIS Soil test

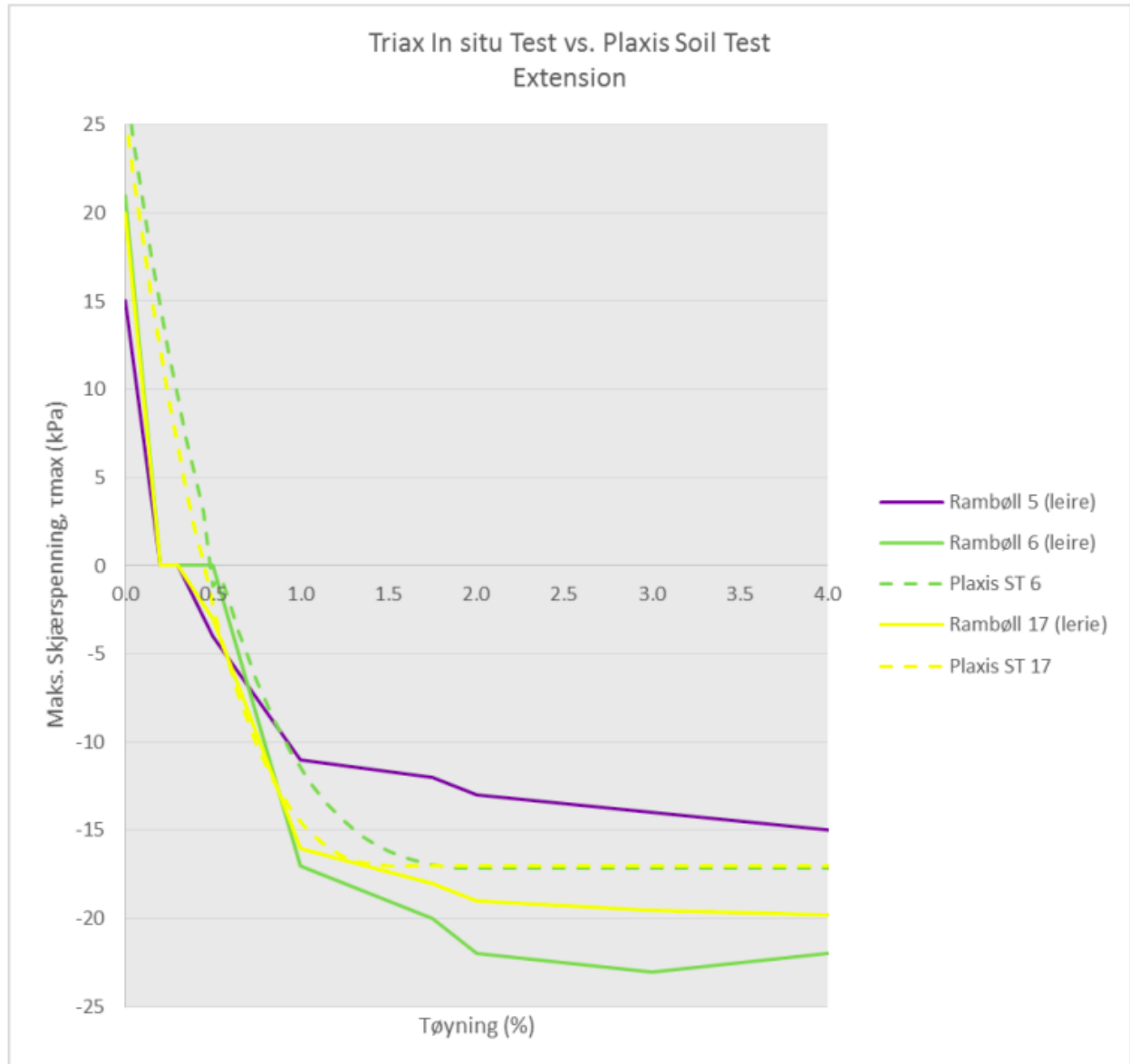
I Figur [D.1](#), [D.2](#) og [D.3](#) presenteres tilpasning av stivhetsparametere i PLAXIS Soil test, tilsendt av Multiconsult. Figurene er presentert i Kapittel [5](#), men her gitt i et større format. I Figur [D.4](#) er plassering av MC1 og MC3 vist på kart.



Figur D.1: Triaxprøver for kompresjon plottet mot resultater i PLAXIS Soil test (Nielsen & Frossard, 2017)



Figur D.2: Triaxprøver for kompresjon plottet mot resultater i PLAXIS Soil test (Nielsen & Frossard, 2017)



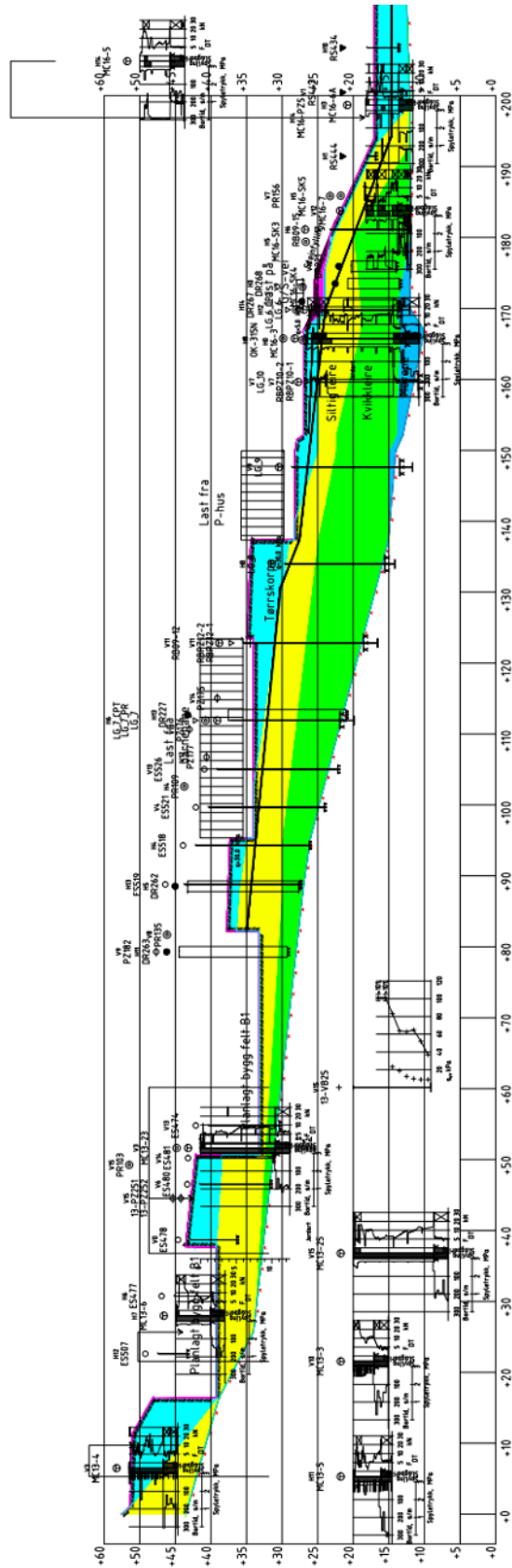
Figur D.3: Triaxprøver for forlengelse plottet mot resultater i PLAXIS Soil test (Nielsen & Frossard, 2017)

D.2 Temperaturmålinger

Temperaturen er målt for hver halve meter i inklinometerene. Input for temperaturendring i modellene brukt i denne avhandlingen er basert på temperaturmålinger fra inklinometer 1. I Tabell [D.1](#) er temperaturmålingene for kl. 00:00:0 første dag i hver måned oppgitt. Det er disse dataene de beregnede temperaturendringene (ΔT) i [Kapittel 5](#) er basert på.

D.3 Lagdeling

Figur D.5 viser grunnundersøkelser brukt ved valg av lagdeling, tilsendt av Multiconsult. Det er kun lagdelingen ved spuntveggen (til venstre på figuren) som har vært relevant i denne avhandlingen.



Figur D.5: Sonderinger og tolket lagdeling (Nielsen & Frossard, 2017)

Vedlegg E

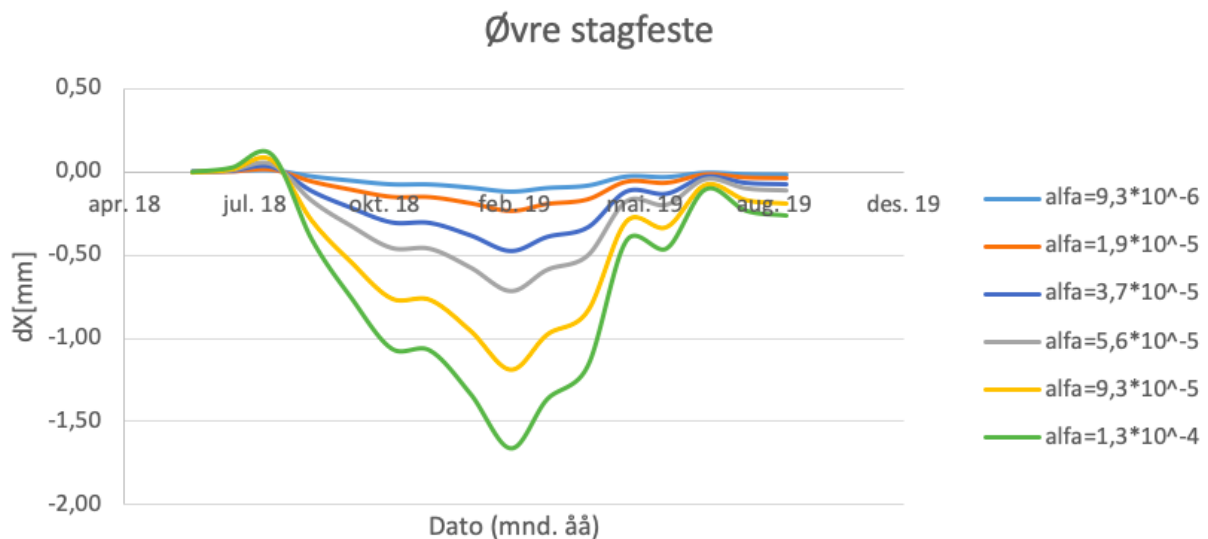
Vedlegg til Kapittel 6

I følgende vedlegg er supplerende resultater av beregningene, som ikke ble tatt med i avhandlingen, presentert.

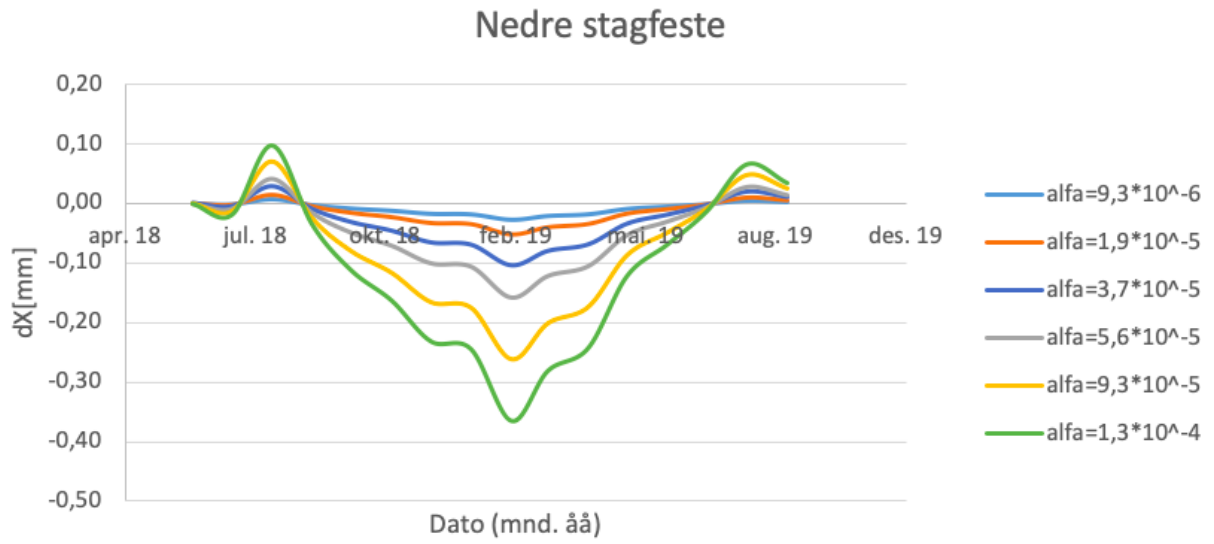
E.1 Deformasjon beregnet med Modell B

Deformasjonen av spuntveggen i x-retning ved øvre og nedre staghode dvs. høyde 8,5 m og 6,0 m på veggen, er beregnet med Modell B.

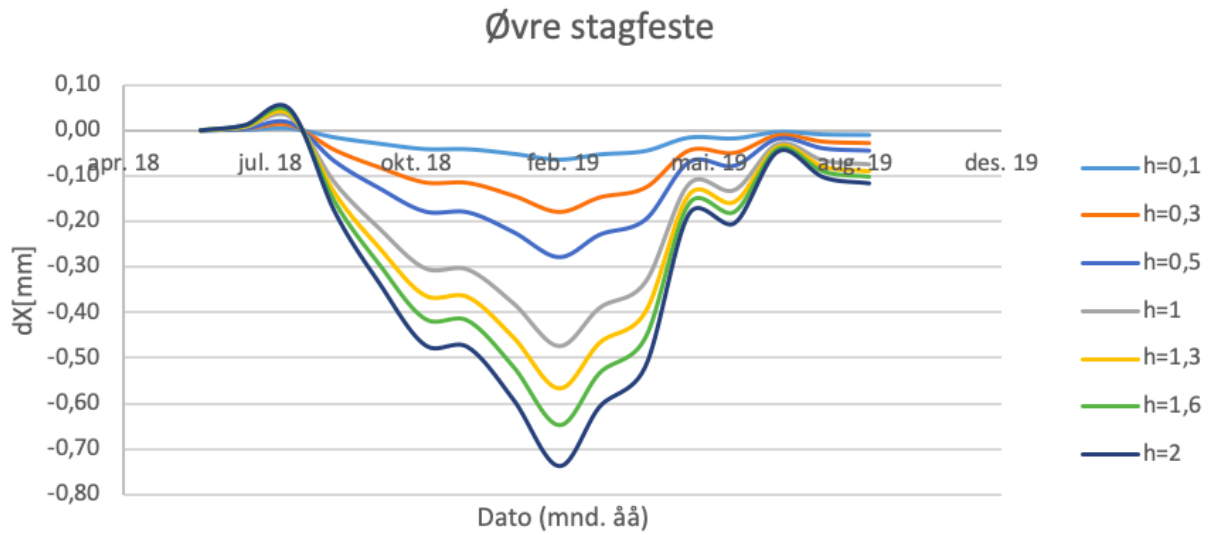
E.1.1 Analyse B1



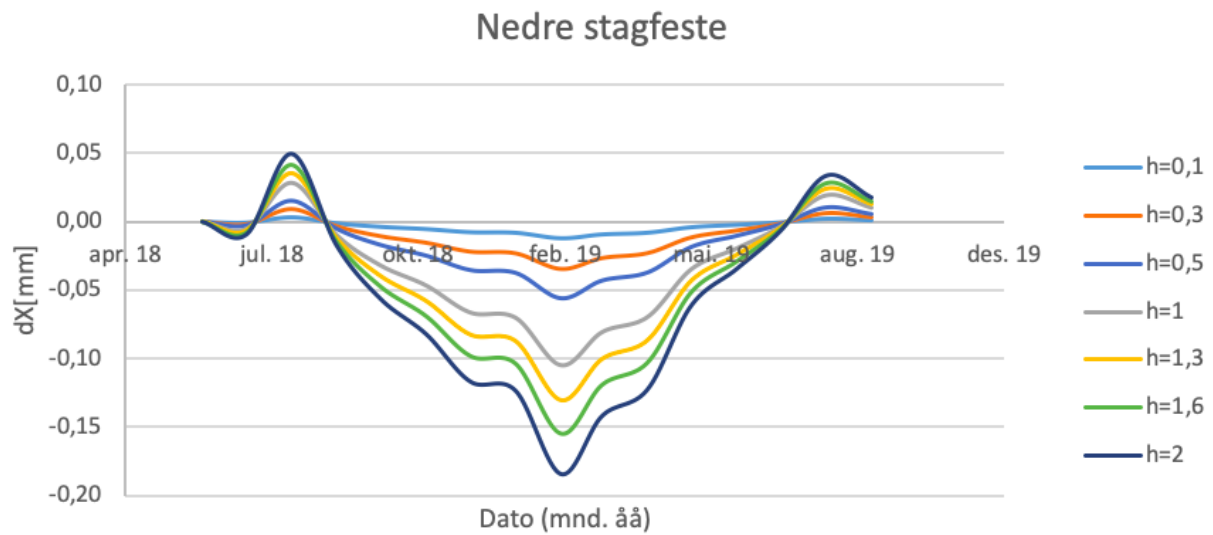
Figur E.1: Beregnet deformasjon ved øvre stagfeste for Analyse B1



Figur E.2: Beregnet deformasjon ved nedre stagfeste for Analyse B1

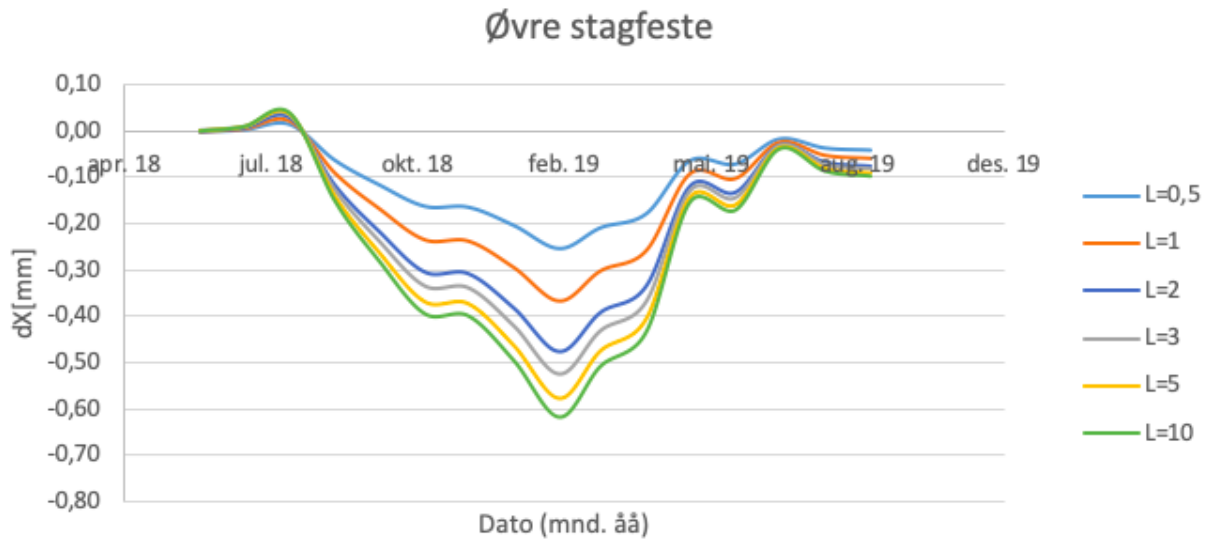
E.1.2 Analyse B2

Figur E.3: Beregnet deformasjon ved øvre stagfeste for Analyse B2

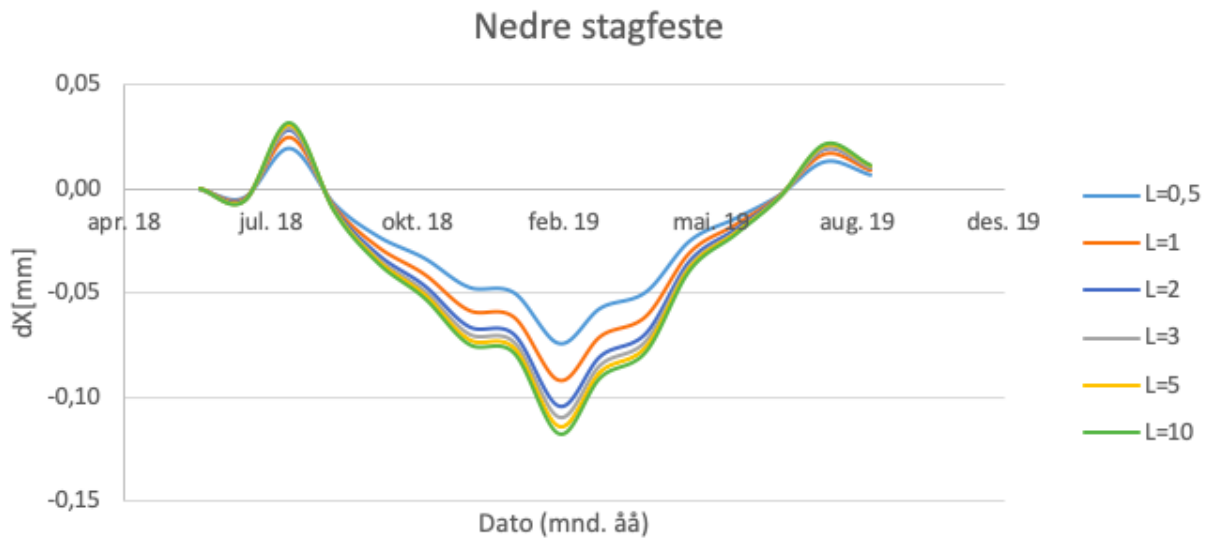


Figur E.4: Beregnet deformasjon ved nedre stagfeste for Analyse B2

E.1.3 Analyse B3



Figur E.5: Beregnet deformasjon ved øvre stagfeste for Analyse B3



Figur E.6: Beregnet deformasjon ved nedre stagfeste for Analyse B3