

Tredimensjonale effekter på rørpressingsgrop ved pressing

Kjetil Kildal

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Steinar Nordal, BAT

Medveileder: Trond Føyn, Norconsult AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



Oppgavens tittel: Tredimensjonale effekter på rørpressingsgrop ved pressing	Dato: 06.06.2016		
	Antall sider (inkl. bilag): 210		
	Masteroppgave	x	Prosjektoppgave
Navn: Kjetil Kildal			
Faglærer/veileder: Steinar Nordal			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Trond Føyn (Norconsult)			

<p>Ekstrakt: Rørpressing fra spuntgrop har i de senere år blitt en anerkjent og velbrukt metode som en gravefri metode for å legge rør. Metoden baserer seg på at kraftige sylindere, med bakspenn mot spuntveggen, presser seksjoner av rør inn i jorda. Vanlig praksis ved dimensjonering mot grunnbrudd er i dag å benytte seg av håndberegninger eller mer avanserte dataprogram i en plan tøyings-situasjon. Pressegrovene er oftest sterkt rektangulære (lengre i presseretning) og det tas dermed ikke hensyn til skjærkrefter på langsiden eller en eventuell lastspredning av pressekraften. Prosjektoppgaven som denne masteroppgaven bygger videre på ga klare indikasjoner på slike tredimensjonale effekter på et drenert tilfelle i sand.</p> <p>Formålet med denne masteroppgaven er å undersøke om tredimensjonale effekter virker å ha en vesentlig effekt også i jordmaterialer med udrenert oppførsel. Oppgaven vil også forsøke å forklare hvorfor Plaxis 2D i det drenerte tilfellet gir så forskjellige resultater fra håndberegning og Plaxis 3D. I tillegg vil det benyttes mer avanserte materialmodeller for å bedre kunne estimere oppførselen.</p> <p>Det er valgt å ta utgangspunkt i en generell pressesjakt og modellere denne i elementmetodeprogrammet Plaxis. Resultater fra håndberegning, 2D- og 3D versjonen av Plaxis er sammenlignet for å vurdere tredimensjonale effekter. Materialmodellen Hardening Soil Small er benyttet for drenert materiale, mens NGI-ADP benyttes for udrenert materiale.</p> <p>Resultatene gir klare indikasjoner på tredimensjonale effekter. Visuelt vises effekten av lastspredning på bruddflatene observert fra Plaxis 3D i det drenerte tilfellet. Både drenert og udrenert vises det at maksimal mulig pressekraft før grunnbrudd kan økes med ca. 300% ved å regne i Plaxis 3D i stedet for Plaxis 2D.</p>

Stikkord:

1. Rørpressing
2. Tredimensjonale effekter
3. Plaxis
4. Spunt

Kjetil Kildal

(sign.)

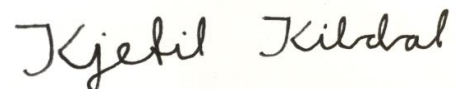
Forord

Forord

Denne masteroppgaven innen geoteknikk er skrevet våren 2016 som en del av en mastergrad i Bygg- og Miljøteknikk ved NTNU i Trondheim. Oppgaven er skrevet i samarbeid med Norconsult, der idéen kom opp under sommerjobb.

Det rettes takk til Trond Føyn og Ragnhild Saarem hos Norconsult for nyttige innspill og ikke minst for å skape interesse rundt temaet ved befaring. I tillegg vil jeg takke Steinar Nordal og Gustav Grimstad for gode bidrag i diskusjoner underveis. Olimb AS har også bidratt ved Arne Valle til å skape praktisk forståelse.

Trondheim, 2016-06-06



Kjetil Kildal

Sammendrag

Rørpressing fra spuntgrop har i de senere år blitt en anerkjent og velbrukt metode som en gravefri metode for å legge rør. Metoden baserer seg på at kraftige sylindere, med bakspenn mot spuntveggen, presser seksjoner av rør inn i jorda. Vanlig praksis ved dimensjonering mot grunnbrudd er i dag å benytte seg av håndberegninger eller mer avanserte dataprogram i en plan tøyningssituasjon. Pressegrope er oftest sterkt rektangulære (lengre i presseretning) og det tas dermed ikke hensyn til skjærkrefter på langsiden eller en eventuell lastspredning av pressekraften. Prosjektoppgaven som denne masteroppgaven bygger videre på ga klare indikasjoner på slike tredimensjonale effekter på et drenert tilfelle i sand.

Formålet med denne masteroppgaven er å undersøke om tredimensjonale effekter virker å ha en vesentlig effekt også i jordmaterialer med udrenert oppførsel. Oppgaven vil også forsøke å forklare hvorfor Plaxis 2D i det drenerte tilfellet gir så forskjellige resultater fra håndberegning og Plaxis 3D. I tillegg vil det benyttes mer avanserte materialmodeller for å bedre kunne estimere oppførselen.

Det er valgt å ta utgangspunkt i en generell pressesjakt og modellere denne i elementmetodeprogrammet Plaxis. Resultater fra håndberegning, 2D- og 3D versjonen av Plaxis er sammenlignet for å vurdere tredimensjonale effekter. Materialmodellen Hardening Soil Small er benyttet for drenert materiale, mens NGI-ADP benyttes for udrenert materiale.

Resultatene gir klare indikasjoner på tredimensjonale effekter. Visuelt vises effekten av lastspredning på bruddflatene observert fra Plaxis 3D i det drenerte tilfellet. Der kan en se at bruddflatene tar en slags lyspære-form der flatene sprer seg utenfor bredden på pressegrope. Det vises også at det kan virke en betydelig skjærkraft (eller friksjon) på sideveggene til pressegrope. Både drenert og udrenert vises det at maksimal mulig pressekraft før grunnbrudd kan økes med ca. 300 % ved å regne i Plaxis 3D i stedet for Plaxis 2D. Dette indikerer at en kan lage en mindre pressegrop ved 3D-beregninger med tanke på grunnbrudd. Oppgaven viser at en pressegrop med dimensjoner 11 m x 3 m x 7,3 m (Lengde x Bredde x Dybde) regnet i Plaxis 3D har omtrent samme kapasitet mot grunnbrudd som en med dimensjoner på ca. 11 m x 9 m x 7,3 m regnet i Plaxis 2D.

Det er samtidig vist at kreftene i konstruksjonselementene (blant annet spunt og pute/stiver) kan øke om man søker å utnytte disse tredimensjonale effektene ved å lage smalere pressegrope. Praktisk betyr det at man kan spare kostnader ved å kunne lages smalere pressegrope ved å regne 3D, men spuntene må kanskje samtidig ha større kapasitet.

I prosjektoppgaven, som denne masteroppgaven bygger videre på, ble det observert at i et drenert tilfelle gav Plaxis 2D svært lav mulig pressekraft sammenlignet med håndberegning og Plaxis 3D. Kort fortalt vises det at for

Sammendrag

utsiden av spuntveggen som utsettes for bakspenn, virker det en lavere ruhet r i Plaxis 2D enn både i Plaxis 3D og beregnet for hånd. Dette er nødvendig for å tilfredsstille vertikal likevekt i plan- tøyning. Denne reduserte ruheten fører igjen til mindre passivt jordtrykk som bidrar til å motstå pressekraften. I Plaxis 3D bidrar også sideveggene med nedad rettet skjær og dette er nok til å balansere den store mengden oppad rettet skjær på utsiden av bakveggen. Sideveggene bidrar altså til å holde pressegrova nede. Ruheten må dermed ikke reduseres i Plaxis 3D for å oppnå vertikal likevekt.

Abstract

Pipe jacking from sheet pile shafts has become a common method for making pipelines without digging extensive trenches. The method utilizes powerful hydraulic jacks, against the shaft wall, to push sections of pipes into the soil. Today, to determine the capacity against failure in the soil the calculations are usually based on hand calculations or more advanced modelling in computer software, both in plane strain. The pipe jacking shafts are often strongly rectangular and shear forces along the sidewalls or load distribution are therefore not taken into account. The project work, in which this master thesis is based on, showed clear indications of such three-dimensional effects on a drained case in sand.

The goal of this master thesis is to investigate if three-dimensional effects appear to be significant in materials with undrained behavior as well. The thesis will also try to explain why Plaxis 2D in the drained case gives very different results compared to hand calculations and Plaxis 3D. In addition, the thesis will take in use more advanced soil models.

It is chosen to consider a basic pipe-jacking shaft and to model this in the finite element software Plaxis. Results from hand calculations, 2D- and 3D version of Plaxis will be compared to evaluate three-dimensional effects. The material model Hardening Soil is used for drained material and NGI-ADP is used for undrained material.

The results give clear indications of three-dimensional effects. Visually the effect of load distribution is seen on the failure surfaces from Plaxis 3D in the drained case. It is seen that the failure surfaces look somewhat like a lightbulb where the surfaces are wider than the width of the jacking shaft. It is also shown that there may appear a significant shear force (or friction) along the sides of the shaft. Both drained and undrained it is shown that the jacking force before soil-failure can be increased with about 300 % by calculating in Plaxis 3D rather than Plaxis 2D. The results indicate that a smaller jacking shaft can be used when calculating in 3D, considering soil failure. The thesis shows that a jacking shaft with dimensions 11 m x 3 m x 7,3 m (Length x With x Depth) calculated in Plaxis 3D, has approximately the same capacity against soil failure as one with dimensions 11 m x 9 m x 7,3 m calculated in Plaxis 2D.

At the same time it is shown that, the forces in the structural elements (as sheet pile and wailing beam) may increase if these three-dimensional effects are utilized by creating a smaller jacking shaft. In application this means that costs may be reduced by creating smaller jacking shafts, but the sheet pile may at the same time need larger capacity.

In the project work, in which this master is based on, it was observed that a drained case gave very different results in possible jacking force. Plaxis 2D gave a very low value. It is shown that a lower roughness ratio r is acting on the jacking wall in Plaxis 2D compared to Plaxis 3D and hand calculations. This is necessary to obtain vertical equilibrium in plane strain. This reduced roughness ratio leads

Abstract

to reduced passive earth pressure resisting the jacking force. In Plaxis 3D the sides of the shaft contribute to hold the jacking shaft down and therefore the roughness ratio is not reduced in order to maintain vertical equilibrium.

Innholdsfortegnelse

FORORD	II
SAMMENDRAG	III
ABSTRACT	V
INNHOLDSFORTEGNELSE	VII
FIGURLISTE	XI
TABELLISTE	XVII
1 INNLEDNING	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	3
1.3 Litteraturstudie	3
1.3.1 Introduksjon til <i>No-dig</i> -metoder	4
1.3.1.1 Mikrotunnelering	4
1.3.1.2 Styrt boring	7
1.3.1.3 Hammerboring	8
1.4 Målformulering	9
1.5 Begrensninger	9
1.6 Tilnærming	10
1.7 Leserveiledning	11
2 TEORI	12
2.1 Jordtrykk	12
2.1.1 Aktivt jordtrykk	12
2.1.2 Passivt jordtrykk	12
2.2 Elementmetoden	18
2.3 <i>Hardening Soil</i> materialmodell	18
2.4 <i>NGI-ADP</i> materialmodell	22
2.5 Bruk av <i>interface</i> -elementer i Plaxis	24
2.6 Numeriske kontrollparametere for beregningsfaser	25

Innholdsfortegnelse

2.6.1	Maks steg	26
2.6.2	Tolerert feil	26
2.6.3	Maks avlastingssteg	27
2.6.4	Maks antall iterasjoner	27
2.6.5	Ønsket minimum og ønsket maksimum antall iterasjoner	27
2.6.6	Buelengde-kontroll	27
3	PARAMETERBESTEMMELSE FOR PLAXIS	29
3.1	Spunt/plate-parametere i Plaxis	29
3.1.1	Plaxis 2D	29
3.1.2	Plaxis 3D	30
4	MODELL OG MATERIALPARAMETERE	32
4.1	Generelt	32
4.1.1	Geometri	32
4.1.2	Materialparametere for jord	33
4.1.2.1	Drenert tilfelle i sand	33
4.1.2.2	Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden	34
4.1.2.3	Udrenert tilfelle i leire med konstant udrenert skjærstyrke (50 kPa)	36
4.2	Plaxis 2D	37
4.2.1	Modell	37
4.2.2	Elementinndeling (mesh)	37
4.2.3	Materialparametere for konstruksjonselementer	38
4.2.4	Beregningsfaser	38
4.2.5	Numeriske kontrollparametere benyttet i pressefase	39
4.3	Plaxis 3D	40
4.3.1	Modell	40
4.3.2	Elementinndeling (mesh)	41
4.3.3	Materialparametere for konstruksjonselementer	42
4.3.4	Beregningsfaser	43
4.3.5	Numeriske kontrollparametere benyttet i pressefase	43
5	RESULTATER	45
5.1	Håndberegninger	46
5.1.1	Drenert tilfelle i sand	46
5.1.1.1	Jordtrykk	46
5.1.1.2	Skjærspenning	48
5.1.2	Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden	49
5.1.2.1	Jordtrykk	49
5.1.2.2	Skjærspenning	50
5.1.3	Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke (50 kPa)	51
5.1.3.1	Jordtrykk	51
5.1.3.2	Skjærspenning	52
5.2	Plaxis 2D	53
5.2.1	Drenert tilfelle i sand	53
5.2.1.1	Bruddflater	53
5.2.1.2	Påført pressekraft/last-forskyvningskurve	55
5.2.1.3	Jordtrykk	56
5.2.1.4	Skjærspenning	57
5.2.1.5	Forskyvning av pressegrup	59

Innholdsfortegnelse

5.2.2	Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden	60
5.2.2.1	Bruddflater	60
5.2.2.2	Påført pressekraft/last-forskyvningskurve	62
5.2.2.3	Jordtrykk	63
5.2.2.4	Skjærspenning	64
5.2.2.5	Forskyvning av pressegrup	66
5.2.3	Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke (50 kPa)	68
5.2.3.1	Bruddflater	68
5.2.3.2	Påført pressekraft/last-forskyvningskurve	69
5.2.3.3	Jordtrykk	70
5.2.3.4	Skjærspenning	71
5.2.3.5	Forskyvning av pressegrup	72
5.3	Plaxis 3D	74
5.3.1	Drenert tilfelle i sand	74
5.3.1.1	Bruddflater	74
5.3.1.2	Påført pressekraft/last-forskyvningskurve	77
5.3.2.3	Jordtrykk	78
5.3.2.4	Horisontal skjærspenning på sidevegger	82
5.3.2.5	Vertikal skjærspenning	84
5.3.2.6	Forskyvning av pressegrup	89
5.3.2	Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden	91
5.3.2.1	Bruddflater	91
5.3.2.2	Påført pressekraft/last-forskyvningskurve	94
5.3.2.3	Jordtrykk	95
5.3.2.4	Horisontal skjærspenning	99
5.3.2.5	Vertikal skjærspenning	102
5.3.2.6	Forskyvning av pressegrup	107
5.3.3	Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke (50 kPa)	109
5.3.1.1	Bruddflater	109
5.3.2.2	Påført pressekraft/last-forskyvningskurve	112
5.3.2.3	Jordtrykk	112
5.3.2.4	Horisontal skjærspenning	116
5.3.2.5	Vertikal skjærspenning	120
5.3.2.6	Forskyvning av pressegrup	125
6	DISKUSJON	126
6.1	Bruddflater	126
6.2	Påført pressekraft	127
6.3	Jordtrykk	128
6.3.1	Drenert tilfelle i sand	128
6.3.2	Udrenert tilfelle i leire med økende styrke	132
6.3.3	Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke	137
6.4	Horisontal skjærspenning	140
6.5	Vertikal skjærspenning	140
6.6	Forskyvning av pressegrup	141
6.7	Vurdering av nøyaktighet av resultatene	144
6.8	Krefter i konstruksjonselementer	146
6.8.1	Spunt	147
6.8.2	Pute/stiver	149

Innholdsfortegnelse

7	KONKLUSJON	151
8	ANBEFALINGER FOR VIDERE ARBEID	152
9	REFERANSER	153
A	VEDLEGG – RESULTATER	154
A.1	Krefter på konstruksjonselementer	154
A.1.1	Plaxis 2D	154
A.1.1.1	Drenert tilfelle i sand	154
A.1.1.2	Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden	156
A.1.1.3	Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden	157
A.1.2	Plaxis 3D	159
A.1.2.1	Drenert tilfelle i sand	159
A.1.2.2	Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden	165
A.1.2.3	Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden	172
A.1.2.3	Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden pålastet til 771 kPa	178
A.2	Sikkerhet etter fase med full utgraving	185
A.2.1	Plaxis 2D	185
A.2.1.1	Drenert tilfelle i sand	185
A.2.1.2	Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden	185
A.2.1.3	Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden	186
A.2.2	Plaxis 3D	186
A.2.2.1	Drenert tilfelle i sand	186
A.2.2.2	Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden	187
A.2.2.3	Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden	187
A.3	Kraftresultanter og angrepspunkt på pressegrup under pressing	188
A.3.1	Plaxis 2D	188
A.3.1.1	Drenert tilfelle i sand	188
A.3.1.2	Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden	188
A.3.1.3	Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden	188
A.3.2	Plaxis 3D	189
A.3.2.1	Drenert tilfelle i sand	189
A.3.2.2	Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden	189
A.3.2.3	Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden	190
B	VEDLEGG – KORRESPONDANSE	191
B.1	Ragnhild Saarem (Norconsult)	191
B.2	Notat skrevet etter samtale med Arne Valle (Olimb)	191

Figurliste

Figur 1 Rørpressing fra pressegrøp til mottaksgrøp	1
Figur 2 Bruddflate pressegrøp i Plaxis 3D	2
Figur 3 Sammenligning av jordtrykk utside bakvegg.....	3
Figur 4 Pressegrøp av spunt sett ovenfra med hydrauliske jekker for pressing. Her presses betongrør med diameter 2 m. (Føyn og Lauritzen, 2014).....	5
Figur 5 (a) Åpen front med graveutstyr. Porter kan stenges for å bedre stoffstabiliteten ved dårlige masser (b) Åpen front uten graveutstyr (Føyn og Lauritzen, 2014)	6
Figur 6 Lukket front (Direct Industry, 2015).....	6
Figur 7 Trykkluse (Føyn og Lauritzen, 2014).....	7
Figur 8 Styrt boring (Olimb AS, 2013)	8
Figur 9 Hammerboring (Olimb AS, 2013)	9
Figur 10 Jordtrykk – prinsipp (Aarhaug, 1984).....	13
Figur 11 Sammenheng mellom jordtrykk og horisontal veggforskyvning (Aarhaug, 1984).....	13
Figur 12 Ruhetens innvirkning på bruddflate og ruhetens fortegn (Statens Vegvesen, 2014).....	14
Figur 13 Jordtrykkskoeffisienter ved effektivspenningsanalyse (Emdal et al., 2013).....	16
Figur 14 Jordtrykkskoeffisienten for totalspenningsanalyse	17
Figur 15 Lineært elastisk perfekt-plastisk modell (Plaxis, 2015a)	18
Figur 16 Hyperbolsk spenning-tøyningsammenheng for konvensjonell drenert trekstest (Plaxis, 2015a)	19
Figur 17 Plastiske flytegrenser i hardening soil (Nordal, 2014).....	19
Figur 18 Formulering av dilatans i Hardening Soil (Plaxis, 2015a)	20
Figur 19 Karakteristisk sammenheng mellom stivhet og tøying for typiske tøyingverdier (Plaxis, 2015a)	20
Figur 20 Definisjon av E_{50}^{ref} og E_{ur}^{ref} for drenert treksial test (Plaxis, 2015a)...	21
Figur 21 Definisjon av E_{oed}^{ref} for resultater fra oedometer (Plaxis, 2015a).....	22
Figur 22 Stivhetsparametere E_{50} , E_{ur} og $E_0 = 2G_0(1 + \nu_{ur})$ i Hardening Soil Small for treksial test (Plaxis, 2015a)	22
Figur 23 Typiske spenningsstier og spenning-tøyningskurver for aktiv (største hovedspenning vertikalt) og passiv (største hovedspenning horisontalt) trekstest (Plaxis, 2015a)	23
Figur 24 Udrenert skjærstyrke i leire avhenger av hovedspenningsretning (Ukritchon og Boonyatee, 2015).....	23
Figur 25 Numeriske kontrollparametere	26
Figur 26 Beregnet løsning kontra eksakt løsning (Plaxis, 2015b)	27
Figur 27 Buelengde-kontroll (Plaxis, 2015b)	28
Figur 28 Beregning av vekt for plate i Plaxis	29
Figur 29 Definisjon av lokalt aksesystem Plaxis 2D (Plaxis, 2015c).....	29
Figur 30 Definisjon av lokalt aksesystem og parametre Plaxis 3D (Plaxis, 2015c)	30
Figur 31 Geometri på spuntgrøp i horisontalsnitt.....	32
Figur 32 Geometri på spuntgrøp i vertikalsnitt.....	33
Figur 33 Modell i Plaxis 2D	37
Figur 34 Mesh i Plaxis 2D	38

Figurliste

Figur 35 Numeriske kontrollparametere i pressefase Plaxis 2D drenert.....	39
Figur 36 Numeriske kontrollparametere i pressefase Plaxis 2D udrenert økende su.....	40
Figur 37 Numeriske kontrollparametere i pressefase Plaxis 2D udrenert konstant su.....	40
Figur 38 Modell i Plaxis 3D	41
Figur 39 Problem med modell i Plaxis 3D for drenert tilfelle	41
Figur 40 Mesh i Plaxis 3D	42
Figur 41 Numeriske kontrollparametere i pressefase Plaxis 3D drenert.....	43
Figur 42 Numeriske kontrollparametere i pressefase Plaxis 3D udrenert økende su.....	44
Figur 43 Numeriske kontrollparametere i pressefase Plaxis 3D udrenert konstant su.....	44
Figur 44 Beskrivelse av betegnelser brukt for presentasjon av resultater (vertikalsnitt).....	45
Figur 45 Beskrivelse av betegnelser brukt for presentasjon av resultater (horisontalsnitt)	45
Figur 46 Skisse for å beskrive hvilke spenninger med retning som presenteres	46
Figur 47 Jordtrykk på bakvegg ved pressing etter håndberegning drenert.....	47
Figur 48 Jordtrykk på fremvegg ved pressing etter håndberegning drenert.....	47
Figur 49 Vertikal skjærspenning på bakvegg ved håndberegning av pressing drenert.....	48
Figur 50 Vertikal skjærspenning på fremvegg ved håndberegning av pressing drenert.....	48
Figur 51 Jordtrykk på bakvegg ved pressing etter håndberegning udrenert økende su.....	49
Figur 52 Jordtrykk på fremvegg ved pressing etter håndberegning udrenert økende su.....	50
Figur 53 Vertikal skjærspenning på bakvegg ved håndberegning av pressing udrenert økende su	50
Figur 54 Vertikal skjærspenning på fremvegg ved håndberegning av pressing udrenert økende su	51
Figur 55 Jordtrykk på bakvegg ved pressing etter håndberegning udrenert konstant su.....	52
Figur 56 Jordtrykk på fremvegg ved pressing etter håndberegning udrenert konstant su.....	52
Figur 57 Vertikal skjærspenning på bakvegg ved håndberegning av pressing udrenert konstant su=50 kPa	53
Figur 58 Vertikal skjærspenning på fremvegg ved håndberegning av pressing udrenert konstant su=50 kPa.....	53
Figur 59 Deformert mesh Plaxis 2D drenert.....	54
Figur 60 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 2D drenert.....	54
Figur 61 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 2D drenert	55
Figur 62 Påført last mot forskyvning Plaxis 2D drenert.....	56
Figur 63 Jordtrykk ved pressing Plaxis 2D drenert.....	57
Figur 64 Vertikal skjærspenning på bakvegg ved pressing Plaxis 2D drenert.....	58
Figur 65 Vertikal skjærspenning på fremvegg ved pressing Plaxis 2D drenert...	58
Figur 66 Skjærspenning under betongplate ved pressing Plaxis 2D drenert	59
Figur 67 Forskyvning av pressegrøp i Plaxis 2D drenert.....	59

Figurliste

Figur 68 Horisontal forskyvning av bakvegg i Plaxis 2D drenert	60
Figur 69 Deformert mesh Plaxis 2D udrenert økende su.....	61
Figur 70 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 2D udrenert økende su	61
Figur 71 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 2D udrenert økende su...	62
Figur 72 Påført last mot forskyvning Plaxis 2D udrenert økende su	63
Figur 73 Jordtrykk ved pressing Plaxis 2D udrenert økende su	64
Figur 74 Vertikal skjærspenning på bakvegg ved pressing Plaxis 2D udrenert økende su.....	65
Figur 75 Vertikal skjærspenning på fremvegg ved pressing Plaxis 2D udrenert økende su.....	65
Figur 76 Skjærspenning under betongplate ved pressing Plaxis 2D udrenert økende su.....	66
Figur 77 Forskyvning av pressegrøp i Plaxis 2D udrenert økende su	67
Figur 78 Horisontal forskyvning av bakvegg i Plaxis 2D udrenert økende su.....	67
Figur 79 Deformert mesh Plaxis 2D udrenert konstant su.....	68
Figur 80 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 2D udrenert konstant su	69
Figur 81 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 2D udrenert konstant su	69
Figur 82 Påført last mot forskyvning Plaxis 2D udrenert konstant su	70
Figur 83 Jordtrykk ved pressing Plaxis 2D udrenert konstant su	71
Figur 84 Vertikal skjærspenning på bakvegg ved pressing Plaxis 2D udrenert konstant su.....	72
Figur 85 Vertikal skjærspenning på fremvegg ved pressing Plaxis 2D udrenert konstant su.....	72
Figur 86 Forskyvning av pressegrøp i Plaxis 2D udrenert konstant su	73
Figur 87 Horisontal forskyvning av bakvegg i Plaxis 2D udrenert konstant su ...	73
Figur 88 Deformert mesh Plaxis 3D drenert.....	74
Figur 89 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 3D drenert.....	75
Figur 90 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 3D drenert	75
Figur 91 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 3D drenert sett ovenfra	76
Figur 92 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 3D sett ovenfra	76
Figur 93 Påført last mot forskyvning Plaxis 3D drenert.....	77
Figur 94 Påført last mot forskyvning Plaxis 3D drenert grovere mesh til større forskyvning.....	78
Figur 95 Jordtrykk i midtsnitt under pressing Plaxis 3D drenert.....	79
Figur 96 Jordtrykk på utsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D drenert.....	79
Figur 97 Jordtrykk på innsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D drenert....	80
Figur 98 Jordtrykk på utsiden av fremvegg under pressing Plaxis 3D drenert....	80
Figur 99 Jordtrykk på innsiden av fremvegg under pressing Plaxis 3D drenert .	81
Figur 100 Horisontal skjærspenning på utside av langside under pressing Plaxis 3D drenert.....	82
Figur 101 Horisontal skjærspenning midtsnitt på utside av langside under pressing Plaxis 3D drenert	83
Figur 102 Horisontal skjærspenning på innside av langside under pressing Plaxis 3D drenert.....	83
Figur 103 Horisontal skjærspenning midtsnitt på innside av langside under pressing Plaxis 3D drenert	84
Figur 104 Vertikal skjærspenning valgt snitt på bakvegg under pressing Plaxis 3D drenert.....	85

Figurliste

Figur 105 Vertikal skjærspenning midtsnitt på fremvegg under pressing Plaxis 3D drenert.....	85
Figur 106 Vertikal skjærspenning valgt snitt på sidevegg under pressing Plaxis 3D drenert.....	86
Figur 107 Vertikal skjærspenning på utside av bakvegg under pressing Plaxis 3D drenert.....	86
Figur 108 Vertikal skjærspenning på innside av bakvegg under pressing Plaxis 3D drenert.....	87
Figur 109 Vertikal skjærspenning på utside av fremvegg under pressing Plaxis 3D drenert.....	87
Figur 110 Vertikal skjærspenning på innside av fremvegg under pressing Plaxis 3D drenert.....	88
Figur 111 Vertikal skjærspenning på innside av sidevegg under pressing Plaxis 3D drenert.....	88
Figur 112 Vertikal skjærspenning på utside av sidevegg under pressing Plaxis 3D drenert.....	89
Figur 113 Horisontal forskyvning av bakvegg i Plaxis 2D drenert.....	90
Figur 114 Forskyvning av pressegrøp i Plaxis 3D drenert.....	90
Figur 115 Deformert mesh Plaxis 3D udrenert økende su.....	91
Figur 116 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 3D udrenert økende su.....	92
Figur 117 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 3D udrenert økende su	92
Figur 118 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 3D udrenert økende su sett ovenfra.....	93
Figur 119 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 3D udrenert økende su sett ovenfra.....	93
Figur 120 Påført last mot forskyvning Plaxis 3D udrenert økende su.....	94
Figur 121 Påført last mot forskyvning Plaxis 3D udrenert økende su grovere mesh til større forskyvning.....	95
Figur 122 Jordtrykk i midtsnitt under pressing Plaxis 3D udrenert økende su...	96
Figur 123 Jordtrykk på utsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su.....	96
Figur 124 Jordtrykk på innsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su.....	97
Figur 125 Jordtrykk på utsiden av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su.....	97
Figur 126 Jordtrykk på innsiden av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su.....	98
Figur 127 Jordtrykk på undersiden av betongplate under pressing Plaxis 3D udrenert økende su.....	98
Figur 128 Horisontal skjærspenning på utside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert økende su.....	99
Figur 129 Horisontal skjærspenning midtsnitt på utside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert økende su.....	100
Figur 130 Horisontal skjærspenning på innside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert økende su.....	100
Figur 131 Horisontal skjærspenning midtsnitt på innside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert økende su.....	101
Figur 132 Horisontal skjærspenning på underside av betongplate under pressing Plaxis 3D udrenert økende su.....	101

Figurliste

Figur 133 Horisontal skjærspenning midtsnitt på underside av betongplate under pressing Plaxis 3D udrenert økende su	102
Figur 134 Vertikal skjærspenning midtsnitt på bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su	103
Figur 135 Vertikal skjærspenning midtsnitt på fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su	103
Figur 136 Vertikal skjærspenning midtsnitt på sidevegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su	104
Figur 137 Vertikal skjærspenning på utside av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su	104
Figur 138 Vertikal skjærspenning på innsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su	105
Figur 139 Vertikal skjærspenning på utside av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su	105
Figur 140 Vertikal skjærspenning på innside av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su	106
Figur 141 Vertikal skjærspenning på innside av sidevegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su	106
Figur 142 Vertikal skjærspenning på utside av sidevegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su	107
Figur 143 Horisontal forskyvning av bakvegg i Plaxis 3D udrenert økende su	108
Figur 144 Forskyvning av pressegrøp i Plaxis 3D udrenert økende su	108
Figur 145 Deformert mesh Plaxis 3D udrenert konstant su	109
Figur 146 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 3D udrenert konstant su	110
Figur 147 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 3D udrenert konstant su	110
Figur 148 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 3D udrenert konstant su sett ovenfra	111
Figur 149 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 3D udrenert konstant su sett ovenfra	111
Figur 150 Påført last mot forskyvning Plaxis 3D udrenert konstant su	112
Figur 151 Jordtrykk i midtsnitt under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	113
Figur 152 Jordtrykk på utsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	113
Figur 153 Jordtrykk på innsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	114
Figur 154 Jordtrykk på utsiden av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	114
Figur 155 Jordtrykk på innsiden av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	115
Figur 156 Jordtrykk på undersiden av betongplate under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	115
Figur 157 Horisontal skjærspenning på utside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	116
Figur 158 Horisontal skjærspenning midtsnitt på utside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	117
Figur 159 Horisontal skjærspenning på innside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	117

Figurliste

Figur 160 Horisontal skjærspenning midtsnitt på innside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	118
Figur 161 Horisontal skjærspenning på underside av betongplate under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su.....	118
Figur 162 Horisontal skjærspenning midtsnitt på underside av betongplate under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	119
Figur 163 Vertikal skjærspenning midtsnitt på bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	120
Figur 164 Vertikal skjærspenning midtsnitt på fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su.....	121
Figur 165 Vertikal skjærspenning midtsnitt på sidevegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	121
Figur 166 Vertikal skjærspenning på utside av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	122
Figur 167 Vertikal skjærspenning på innside av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su.....	122
Figur 168 Vertikal skjærspenning på utside av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su.....	123
Figur 169 Vertikal skjærspenning på innside av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su.....	123
Figur 170 Vertikal skjærspenning på innside av sidevegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su.....	124
Figur 171 Vertikal skjærspenning på utside av sidevegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su	124
Figur 172 Forskyvning av bakvegg i Plaxis 3D udrenert konstant su.....	125
Figur 173 Forskyvning av pressegrøp i Plaxis 3D udrenert konstant su.....	125
Figur 174 Bruddflate i drenert tilfelle indikerer tredimensjonal effekt.....	126
Figur 175 Sammenligning av jordtrykk utside bakvegg drenert	129
Figur 176 Sammenligning av vertikal skjærspenning bakvegg drenert	130
Figur 177 Sammenligning av jordtrykk innside bakvegg drenert.....	131
Figur 178 Sammenligning av jordtrykk innside fremvegg drenert	131
Figur 179 Sammenligning av jordtrykk utside fremvegg drenert.....	132
Figur 180 Sammenligning av jordtrykk utside bakvegg økende su for kontroll	133
Figur 181 Sammenligning av jordtrykk innside bakvegg økende su for kontroll	133
Figur 182 Sammenligning av jordtrykk innside fremvegg økende su for kontroll	134
Figur 183 Sammenligning av jordtrykk utside fremvegg økende su for kontroll	134
Figur 184 Sammenligning av jordtrykk utside bakvegg udrenert økende su.....	135
Figur 185 Sammenligning av jordtrykk innside bakvegg udrenert økende su ..	136
Figur 186 Sammenligning av jordtrykk innside fremvegg udrenert økende su	136
Figur 187 Sammenligning av jordtrykk utside fremvegg udrenert økende su...	137
Figur 188 Sammenligning av jordtrykk utside bakvegg udrenert konstant su..	138
Figur 189 Sammenligning av jordtrykk innside bakvegg udrenert konstant su	139
Figur 190 Sammenligning av jordtrykk innside fremvegg udrenert konstant su	139
Figur 191 Sammenligning av jordtrykk utside fremvegg udrenert konstant su	140

Tabelliste

Figur 192 Forskyvninger av pressegrup. Venstre sider viser forskyvninger fra Plaxis 2D, høyre Plaxis 3D. Øverst vises det drenerte tilfellet, midten viser udrenert med økende styrke og nederst vises tilfellet med konstant udrenerte styrke.....	141
Figur 193 Sammenslåtte krefter på pressegrup Plaxis 2D drenert.....	142
Figur 194 Sammenslåtte krefter på pressegrup Plaxis 3D drenert.....	142
Figur 195 Sammenslåtte krefter på pressegrup Plaxis 2D udrenert økende su	143
Figur 196 Sammenslåtte krefter på pressegrup Plaxis 3D udrenert økende su	143
Figur 197 Sammenslåtte krefter på pressegrup Plaxis 2D udrenert konstant su	144
Figur 198 Sammenslåtte krefter på pressegrup Plaxis 3D udrenert konstant su	144
Figur 199 Antall elementer i mesh plottet mot mulig pressekraft i Plaxis 2D....	145
Figur 200 Antall elementer i mesh plottet mot mulig pressekraft i Plaxis 3D....	146
Figur 201 Gjengivelse av definisjon av lokalt aksesystem og parametere for plate Plaxis 3D (Plaxis, 2015c)	148
Figur 202 Definisjon av lokalt aksesystem og parametre for bjelke Plaxis 3D (Plaxis, 2015c)	150

Tabelliste

Tabell 1 Praktisk beregningsgang for jordtrykk ved effektivspenningsanalyse..	15
Tabell 2 Praktisk beregningsgang for jordtrykk ved totalspenningsanalyse.....	17
Tabell 3 Parametere for Hardening Soil i Plaxis	21
Tabell 4 Ekstra parametere for Hardening Soil Small	21
Tabell 5 Parametere for NGI-ADP	24
Tabell 6 Input for materialparametere for plate i Plaxis 2D	29
Tabell 7 Input for materialparametere for plate i Plaxis.....	31
Tabell 8 Anbefalte sammenhenger for materialparametere for plater i Plaxis 3D (Plaxis, 2015a).....	31
Tabell 9 Materialparametere for løst lagret sand	34
Tabell 10 Materialparametere for leire med økende styrke i dybden	35
Tabell 11 Materialparametere for leire med økende styrke i dybden for sammenligning mot håndberegning	35
Tabell 12 Materialparametere for leire med økende styrke i dybden med Hardening Soil Small.....	36
Tabell 13 Materialparametere for leire med konstant styrke i dybden	36
Tabell 14 Materialparametere for spunt og betongplate Plaxis 2D	38
Tabell 15 Materialparametere for stiver/pute Plaxis 2D.....	38
Tabell 16 Beregningsfaser Plaxis 2D	39
Tabell 17 Materialparametere for spunt og betongplate Plaxis 3D	42
Tabell 18 Materialparametere for stiver/pute Plaxis 3D.....	43
Tabell 19 Beregningsfaser Plaxis 3D.....	43
Tabell 20 Kraftresultanter fra jordtrykk ved håndberegning av pressing drenert	47
Tabell 21 Kraftresultanter fra skjær ved håndberegning av pressing drenert	48
Tabell 22 Kraftresultanter fra jordtrykk ved håndberegning av pressing udrenert økende su.....	49

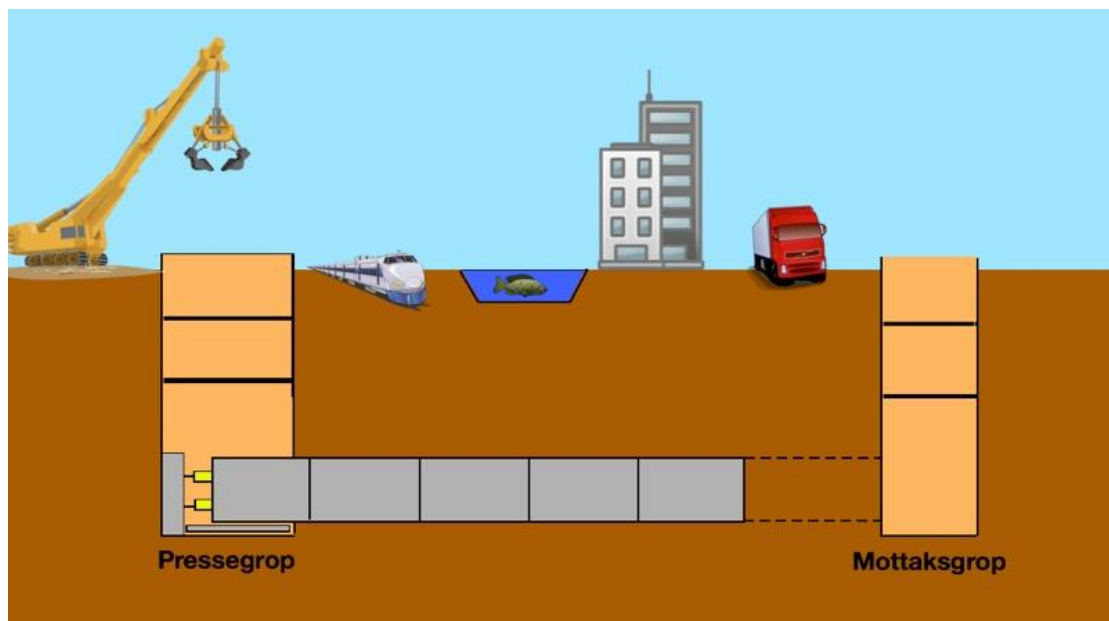
Tabelliste

Tabell 23 Kraftresultanter fra skjær ved håndberegning av pressing udrenert økende su.....	50
Tabell 24 Kraftresultanter fra jordtrykk ved håndberegning av pressing udrenert konstant su.....	51
Tabell 25 Kraftresultanter fra skjær ved håndberegning av pressing udrenert konstant su.....	52
Tabell 26 Kraftresultanter fra jordtrykk Plaxis 2D drenert	56
Tabell 27 Kraftresultanter fra skjær Plaxis 2D drenert	57
Tabell 28 Kraftresultanter fra jordtrykk Plaxis 2D udrenert økende su.....	63
Tabell 29 Kraftresultanter fra skjær Plaxis 2D udrenert økende su.....	64
Tabell 30 Kraftresultanter fra jordtrykk Plaxis 2D udrenert konstant su.....	70
Tabell 31 Kraftresultanter fra skjær Plaxis 2D udrenert konstant su.....	71
Tabell 32 Kraftresultanter fra jordtrykk Plaxis 3D drenert	78
Tabell 33 Kraftresultanter fra horisontal skjær Plaxis 3D drenert	82
Tabell 34 Kraftresultanter fra vertikal skjær Plaxis 3D drenert	84
Tabell 35 Kontroll av vertikallikevekt Plaxis 3D drenert.....	85
Tabell 36 Kraftresultanter fra jordtrykk Plaxis 3D udrenert økende su.....	95
Tabell 37 Kraftresultanter fra horisontal skjær Plaxis 3D udrenert økende su...	99
Tabell 38 Kraftresultanter fra vertikal skjær Plaxis 3D udrenert økende su.....	102
Tabell 39 Kontroll av vertikallikevekt Plaxis 3D udrenert økende su	103
Tabell 40 Kraftresultanter fra jordtrykk Plaxis 3D udrenert konstant su.....	113
Tabell 41 Kraftresultanter fra horisontal skjær Plaxis 3D udrenert konstant su	116
Tabell 42 Kraftresultanter fra vertikal skjær Plaxis 3D udrenert konstant su...	120
Tabell 43 Kontroll av vertikallikevekt Plaxis 3D udrenert konstant su	120
Tabell 44 Sammenligning av bidrag til pressekraft og total pressekraft drenert	127
Tabell 45 Sammenligning av bidrag til pressekraft og total pressekraft udrenert økende su.....	127
Tabell 46 Sammenligning av bidrag til pressekraft og total pressekraft udrenert konstant su.....	128
Tabell 47 Utvalgte maksimalverdier av krefter på spunt under pressefase Plaxis 2D	147
Tabell 48 Utvalgte maksimalverdier av krefter på spunt under pressefase Plaxis 3D	148
Tabell 49 Utvalgte maksimalverdier av krefter på spunt under pressefase Plaxis 3D for det udrenerte tilfellet i leire med konstant su med pressekraft på 771 kPa.....	148
Tabell 50 Maksimalverdier av krefter på pute/stiver under pressefase Plaxis 2D	149
Tabell 51 Utvalgte maksimalverdier av krefter på pute/stiver under pressefase Plaxis 3D	149

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

No dig er en teknikk for å etablere underjordiske rør uten å grave. Ved å for eksempel presse rør fra en start-/pressegrøp til en mottaksgrøp (Figur 1) kan rør etableres under opparbeidede områder, veier, elver, jernbane og bygg. Den store fordelen med *No dig*-metoder er små inngrep på overflaten, da man unngår åpne grøfter. Rørpressing eller andre gravefrie løsninger er derfor i mange tilfeller eneste reelle metode for røretablering, særlig i urbane områder.

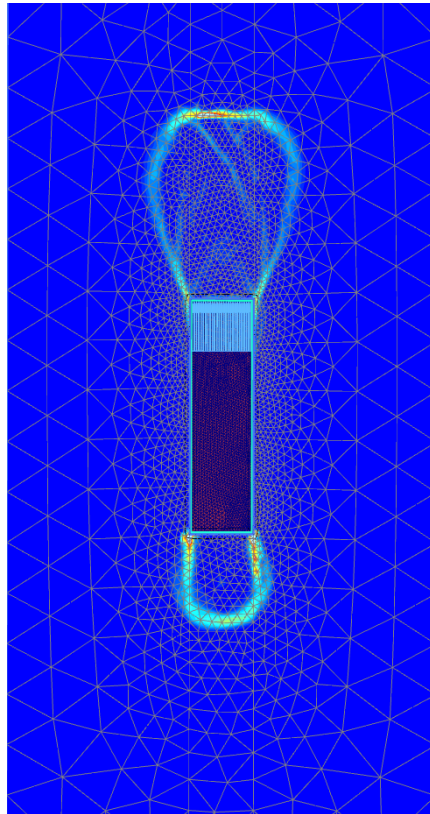


Figur 1 Rørpressing fra pressegrøp til mottaksgrøp

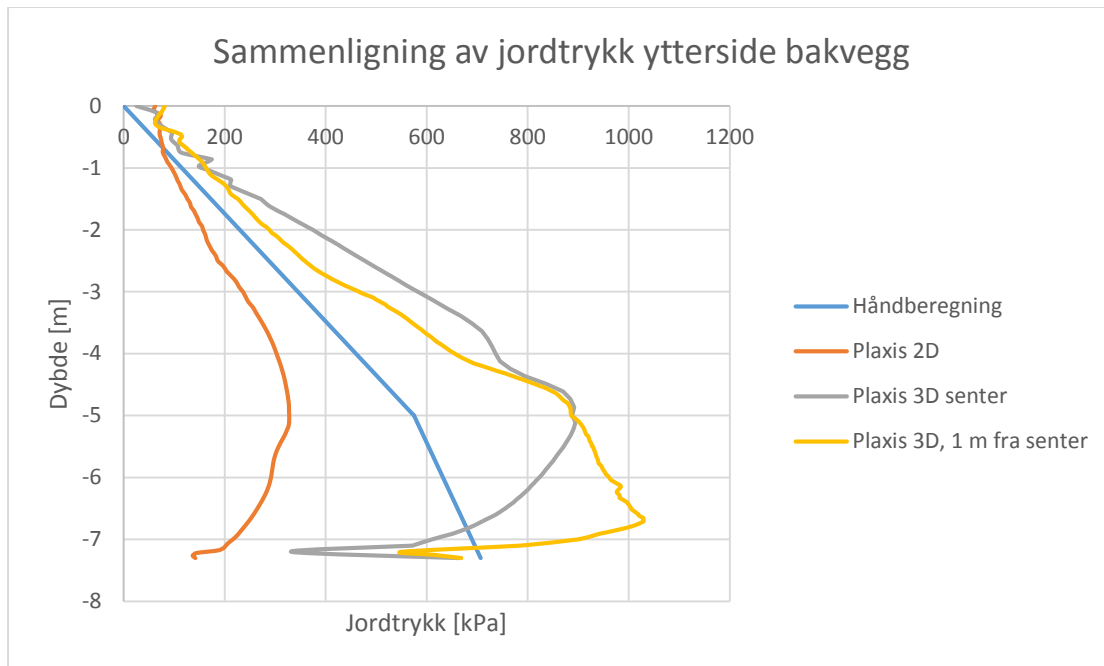
Pressegropene er ofte sjakter av spunt, der spuntålene (i Norge) kan være over 20 m og utgravingsnivå noe mindre. Vanlig pressesdybde i Norge er ifølge personlig kommunikasjon (Valle, 2015) normalt 4-5 m. Bakveggen i spuntsjakt utsettes for en enorm kraft, da den fungerer som mothold for presseriggen. I dimensjoneringen av spuntsjakt må dette tas hensyn til. Etter personlig kommunikasjon med Ragnhild Saarem hos Norconsult (Saarem, 2015) ble det fortalt at de dimensjonerer spuntsjakt i hovedsak etter jordtrykksberegninger i plan tøyning, der eventuelle skjærkrefter langs sideveggene sees bort fra. Sjaktene er derimot oftest sterkt rektangulære (lengre i presseretning) og intuitivt virker det åpenbart at det finnes tredimensjonale effekter som bør ha innvirkning på dimensjoneringen.

I prosjektoppgaven, som denne masteroppgaven er et videre arbeid av, ble det undersøkt en pressegrøp på 11 m x 3 m (L x B) i en drenert tilstand i sand. Spuntålene var 7,3 m med et utgravingsnivå på -5 m. Bakveggen ble antatt brukt som bakspenn i en høyde på 2 m og i full bredde på 3 m ved hjelp av en forankringskloss. Det ble utført håndberegninger og beregninger i Plaxis 2D og Plaxis 3D for å undersøke hvor stor pressekraft som kunne benyttes før det

oppsto grunnbrudd. Resultatene indikerte at tredimensjonale effekter, visuelt vist i Figur 2, økte mulig pressekraft fra motstående jordtrykk med så mye som 40 % sammenlignet med håndberegnet teori. Det ble også vist at skjærkrefter på sideveggene kan være betydelig og stå for ca. 15 – 20 % av bidraget til total pressekraft (resterende bidrag er jordtrykk). Jordtrykket på bakveggen er det klart største bidraget og er det som i hovedsak er forskjellig ved beregningsmåtene som vist i Figur 3. Det bemerkes at Plaxis 2D gir svært lavt jordtrykk på bakveggen og den totale pressekraften mulig å påføre var omtrent halvert ved Plaxis 2D kontra Plaxis 3D. Dette blir spesielt interessant når man vet at Plaxis 2D ofte brukes for å dimensjonere slike spuntgroper.



Figur 2 Bruddflate pressegrup i Plaxis 3D



Figur 3 Sammenligning av jordtrykk utside bakvegg

1.2 Problemstilling

Formålet med denne masteroppgaven er å undersøke om tredimensjonale effekter virker å ha en vesentlig effekt også i jordmaterialer med udrenert oppførsel. Oppgaven vil også forsøke å forklare hvorfor Plaxis 2D gir så forskjellige resultater fra håndberegning og Plaxis 3D. Nøyaktigheten til resultatene i oppgaven vil også vurderes. I tillegg vil det benyttes mer avanserte materialmodeller for å bedre kunne estimere oppførselen. Det drenerte tilfellet undersøkt i prosjektoppgaven vil også beregnes med en mer avansert materialmodell.

1.3 Litteraturstudie

Det er funnet svært lite litteratur på området omkring dimensjonering av pressegrøper, men med tanke på grunnbrudd kan pressegrøpa sees på som et jordtrykksproblem. Teori om jordtrykk basert på spenningsfelt som undervist ved NTNU er beskrevet nærmere i avsnitt 2.1. De to mer avanserte materialmodellene tatt i bruk (*NGI-ADP* og *Hardening Soil Small*) er forklart i avsnitt 2.3 og 2.4 med vekt på praktisk virkemåte og forståelse. I avsnitt 2.5 er bruken av *interface*-elementer i Plaxis, som er essensielt ved modellering av en interaksjon mellom jord og konstruksjon, beskrevet. Underveis i oppgaven ble det oppdaget at det ofte var nødvendig å justere de numeriske kontrollparameterne for å få beregningsfasene til å kjøre som ønsket i Plaxis. Disse parameterne er derfor forklart i avsnitt 2.6. I det følgende er det valgt å gjennomføre en mindre litteraturstudie av de forskjellige *No-dig*-metodene da dette er metoder som er lite kjent og det er viktig å forstå hvordan metodene utføres i praksis.

1.3.1 Introduksjon til *No-dig*-metoder

I følge Føyn og Lauritzen (2014) er det ingen klare definisjoner for de ulike *No-dig*-metodene, men nedenfor er de mest utbredte metodene omtalt.

1.3.1.1 Mikrotunnelering

Betegnelsen brukes når rørene presses mellom en start-/pressegrøp og en mottaksgrøp. I pressegrøpa bruker man kraftige sylindre/jekker til å presse de spesialkonstruerte rørene gjennom jorda. Valle (2015) forteller at Olimb, som er et av de største norske firmaene innen *No-dig*, har pressesylindere med en samlet kapasitet på ca. 1200 tonn (eller 12 000 kN). Det er vanlig å bruke spesielle betong-, stål- eller glassfiberrør. Mulig presselengde varierer med grunnforhold og rørdimensjon, men med bruk av mellomtrykkstasjoner i skjøten mellom rørene kan det presses opptil 1-2 km. Når en seksjon av røret er presset inn heiser en kran inn neste rør som skjøtes på de eksisterende og syklusen gjentas til en treffer mottaksgrøpa. Det benyttes vanligvis bentonittslam som smøring på yttersiden av rørene for å minske friksjon. Bentonitten pumpes ut fra dyser i rørene.

Foran rørene som presses bruker man en spesiell front som må hentes opp av mottaksgrøpa når man er gjennom. Fronten kan styres vha. sylindre/jekker. Type front varierer etter grunnforholdene og eventuelle forventede hindringer i rørtraseen.



Figur 4 Pressegrøp av spunt sett ovenfra med hydrauliske jekker for pressing. Her presses betongrør med diameter 2 m. (Føyn og Lauritzen, 2014)

Åpen front

Med en åpent front som vist i Figur 5 har man fysisk tilgang til massene foran rørene som presses. Da kan man fjerne eventuelle hindringer som bygningsrester. Stein og fjell kan sprenges ut eller håndgraves. Massene transporteres vanligvis ut ved hjelp av en skuff. Denne metoden er dominerende i leire uten fritt vann til stede.



Figur 5 (a) Åpen front med graveutstyr. Porter kan stenges for å bedre stoffstabiliteten ved dårlige masser (b) Åpen front uten graveutstyr (Føyn og Lauritzen, 2014)

Lukket front

En lukket front (Figur 6) består av et roterende borhode som løsriver og knuser materialet. Massene fjernes oftest enten ved å bli skrudd ut, ved spyling eller med et boreslamsystem. En lukket front benyttes vanligvis i friksjonsmasser der man har fritt vann til stede.



Figur 6 Lukket front (Direct Industry, 2015)

Overtrykk

For å hindre vanninntrenging og/eller bedre stoffstabilitet kan man ved mikrotunnelering bruke overtrykk med både åpen og lukket front. En trykkluse (Figur 7) monteres bak fronten, og masser samt eventuelt mannskap som skal inn/ut sluses gjennom denne.

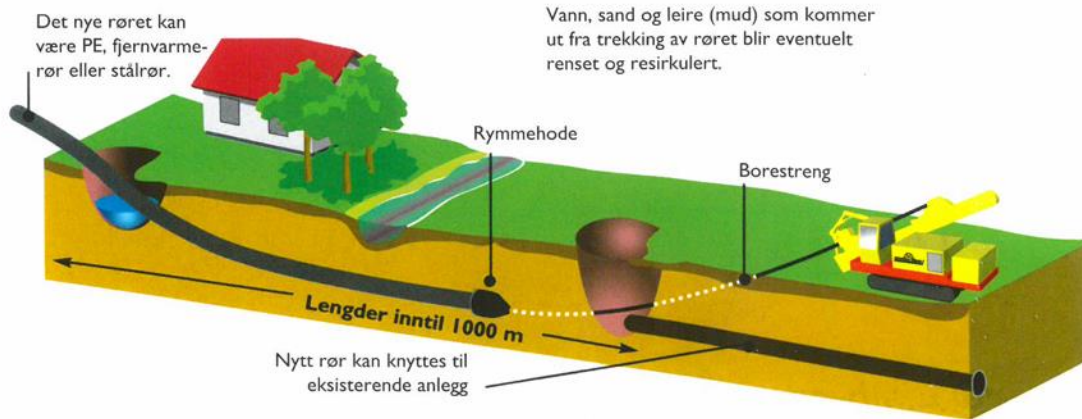


Figur 7 Trykkluse (Føyn og Lauritzen, 2014)

1.3.1.2 Styrte boring

Ved styrt boring utføres det først en pilotboring. En boring med liten diameter på borestrengen og et lite såkalt pilothode. Pilothodet har en skrå plate og virker derfor omtrent som en skje. Ved å dreie på pilothodet som trykkes/bores inn i massene kan boringen styres i alle retninger. I pilothodet er det plassert en sonde som angir posisjon til et peileapparat. Boringen kan derfor utføres svært nøyaktig, men radiusen man kan bore med er begrenset til cirka 100 m. Når pilotboringen er gjennomført bytter man pilothodet med en *rømmer* eller rymmekrone. Denne rymmekrona er noe større enn røret man skal legge og det spyles samtidig ut borevæske av det. Dette for å redusere friksjon, stabilisere borhullet og transportere de borede massene ut. Borestrengen trekkes så tilbake med det nye røret (Figur 8) som vanligvis er et helsveiset PE-rør. Ved styrt boring benyttes vanligvis en beltegående rigg fra overflaten, men Valle (2015) forteller at styrt boring fra spuntsjakt også forekommer.

Styrt boring var tidligere vanskelig i morene og løsmasser med innslag av blokk og stein, men har i senere tid blitt videreutviklet til såkalt AT-boring (*All terrain-boring*). Ved å benytte en rulleborkrone kan man bore gjennom alt fra morene til fjell (men ikke armert betong og stålpunt). Styring sikres ved bruk av doble borstenger og en liten vinkel på rulleborkrona. Den indre borstanga er drivaksel for rulleborkrona, mens den ytre brukes til å styre. Holland Boring AS (2014) oppgir at de med AT-boring kan bore med en minste radius på 300 meter.



Figur 8 Styrte boring (Olimb AS, 2013)

1.3.1.3 Hammerboring

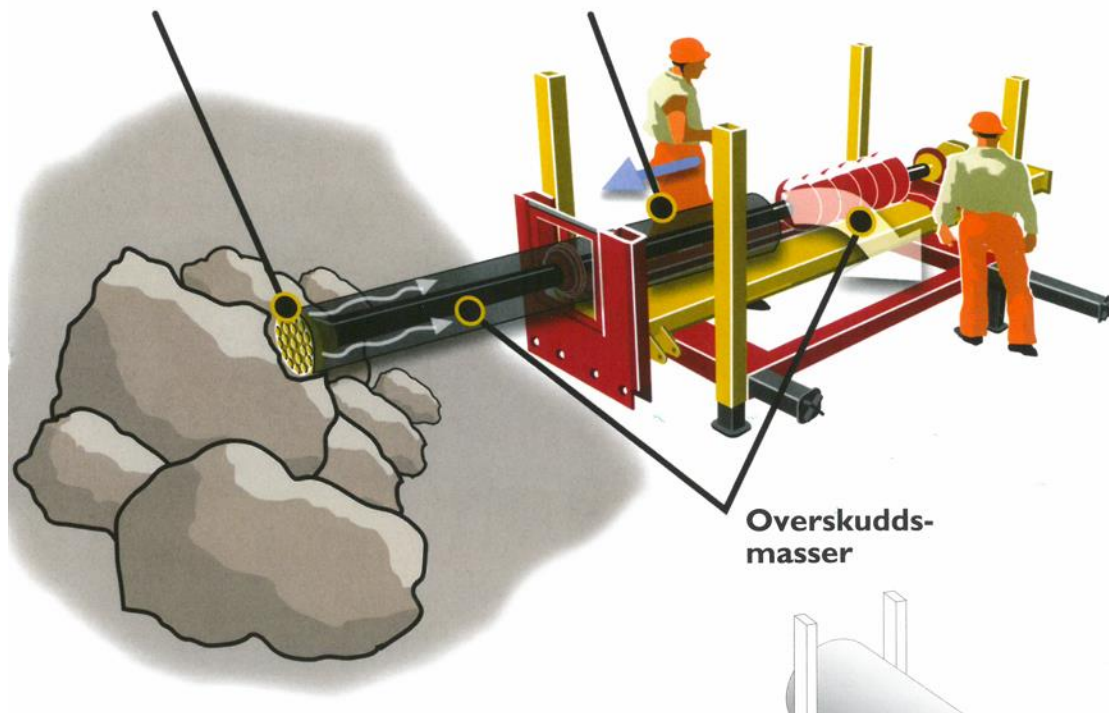
Hammerboring benyttes vanligvis i kombinasjonsmasser av fjell og løsmasser eller rent fjell. Ved hammerboring benyttes vanligvis såkalt senkboring. Det vil si at kraften fra hammeren overføres helt fremme ved borkrona. Hammeren drives ved høytrykksluft mens borkrona roteres via borestrengen. Riggen for hammerboring trenger dermed ikke bakspenn. Massene skruses som regel ut av borehullet etter hvert som det bores. I kombinerte løsmasser og fjell trekker hammeren med seg et varerør i stål (for rør i rør) slik at løsmassene ikke raser inn i borhullet. Med et slikt varerør kan hammerboring ikke styres. I stabilt berg kan varerør droppes og dermed kan boringen også styres.

Hammerboret

slår og roterer gjennom alle typer masser.

Nytt rør

Hammerboret trekker med seg et stålrør (varerør) inn i borehullet.



Figur 9 Hammerboring (Olimb AS, 2013)

1.4 Målformulering

Mål:

1. Undersøke tredimensjonale effekter på pressegrup ved pressing i udrenert tilstand ved å simulere pressing i Plaxis 2D og Plaxis 3D.
2. Sammenligne skjærkrefter og jordtrykk fra håndberegning, Plaxis 2D og Plaxis 3D.
3. Forklare hvorfor Plaxis 2D gir så lav mulig pressekraft sammenlignet med håndberegning og Plaxis 3D.
4. Vurdere nøyaktigheten til resultatene.
5. Vurdere om mer avanserte materialmodeller påvirker resultatene.

1.5 Begrensninger

Det er valgt å ta utgangspunkt i en pressegrup med gitte dimensjoner og eventuelle tredimensjonale effekter må forventes å variere med forskjellige dimensjoner på pressegruppa. Spesielt må det forventes at en eventuell tredimensjonal effekt på jordtrykket relativt sett blir mindre jo bredere pressegruppa er. Drenert sees det kun på et tilfelle i sand (løst lagret). Udrenert sees det på leire med økende styrke i dybden og konstant styrke (middels fast til fast leire). Tilfellet med udrenert økende styrke i dybden har en svært lav styrke øverst i jordlaget før det øker lineært. En så lav styrke i toppen av jordlaget er kanskje ikke så reel da man veldig ofte har et lag med tørrskorpe.

1.6 Tilnærming

Håndberegninger vil være basert på jordtrykksberegninger som undervist ved NTNU, basert på spenningsfelt. Fordi opptredende jordtrykk er forskyvningsbasert vil jordtrykk i virkeligheten være nokså forskjellig fra håndberegninger, særlig ved bruk av stivere. En numerisk analyse i Plaxis tar derimot hensyn til denne effekten og modellerer mer realistiske opptredende jordtrykk. Plaxis 2D vil bli brukt for å modellere en plan-tøyningstilstand der man direkte kun får opptredende jordtrykk på bak- og fremvegg. Plaxis 3D vil bli brukt for å modellere full tredimensjonal situasjon.

Valgt materialmodell er *Hardening Soil Small*. Dette er en materialmodell som er mer avansert enn den enkle *Mohr-Coulomb* som ble benyttet i prosjektoppgaven. *Hardening Soil* er overlegen *Mohr-Coulomb* ved at den blant annet kan inkludere plastiske tøyninger før brudd, prekonsolidering og spenningsbasert stivhet. *Hardening Soil* gir også muligheten for å angi en annen stivhet ved avlastning enn normal pålastning. Den store fordelen med *Hardening Soil* er at til tross for å være relativt kompleks matematisk har parameterne til modellen en eksplisitt fysisk mening og kan bestemmes ved konvensjonelle geotekniske forsøk. For mer detaljer om *Hardening Soil* henvises det til kapittel 2.3. Siden analysene i Plaxis vil kjøres til brudd kan man diskutere nødvendigheten av mer avanserte materialmodeller. De mer avanserte modellene kommer mer til sin rett i en bruksgrensetilstand. Siden det i prosjektoppgave ble benyttet den enkle *Mohr-Coulomb* gir det et sammenligningsgrunnlag og effekten kan vurderes.

I udrenert analyse med Plaxis 3D ble det observert det man kaller *volum-locking* ved bruk av *Hardening Soil Small*. Dette kjennetegnes ved at det oppstår enorme forskjeller i poretrykk innad i et element i modellen. Ved en effektivspenningsanalyse kan dette føre til kavitasjon om poretrykket synker under damptrykket. Ved lavt poretrykk blir dessuten effektivspenningen stor og materialet viser stor styrke. Motsatt, ved svært høyt poretrykk, kan effektivspenningene gå fra trykk til strekk og skape strekkbrudd i jorda. Denne *locking* skaper dermed noen merkelige resultater. Etter konsultasjon med professor Gustav Grimstad ble det besluttet at løsningen var å benytte en materialmodell på totalspenningsbasis. *Hardening Soil (Small)* kan benyttes i Plaxis i måten *Undrained B*, hvilket betyr at stivhetene er basert på effektivspenninger, mens styrken kan angis med en udrenert skjærstyrke. Men på grunn av *Hardening Soils* formulering vil, ifølge Plaxis (2015c), stivhetene ikke lenger bli spenningsavhengig og modellen utviser ikke lenger noen trykkherding. Modellen er da egentlig ikke noe særlig bedre enn *Mohr-Coulomb* der man faktisk kan angi en økende stivhet med dybden. Valget falt dermed på *NGI-ADP* som tar hensyn til anisotropien leire viser ved udrenert oppførsel. *NGI-ADP* er beskrevet i kapittel 2.4.

For å vurdere nøyaktigheten til resultatene vil det bli foretatt gradvis finere elementinndeling for å se om resultatet av mulig påført pressekraft konvergerer mot en verdi.

1.7 Leserveiledning

Oppgaven gir i en mindre litteraturstudie først en introduksjon til *No-dig*-metoder og utførelse.

Den tar så for seg teori om jordtrykk basert på spenningsfelt som undervist ved NTNU og beregningsgang ved jordtrykksproblemer.

Det gis noen svært korte kommentarer om elementmetoden der det henvises til relevant litteratur.

Materialmodellen *Hardening Soil (Small)* presenteres og dens muligheter og virkemåte beskrives.

NGI-ADP ble valgt som materialmodell ved udrenert analyse og presenteres.

Oppgavens tema omhandler interaksjon mellom jord og konstruksjon og *interface*-elementer som sørger for denne interaksjonen i Plaxis blir beskrevet.

Numeriske kontrollparametere forklares for å vise hvordan de kan brukes til å justere de numeriske beregningene.

Deretter blir det presentert parameterbestemmelse for spunt/plate i Plaxis. De fleste andre parametere brukt i modellen kan angis relativt direkte, men fordi plateelementene i Plaxis antas å ha rektangulært tverrsnitt må det tas spesielle hensyn ved bruk av spunt som har korrugert form.

Oppgaven gjennomgår deretter fremgangsmåten for opprettelse av modellene i Plaxis. Dette inkluderer geometri, materialparametere, elementinndeling (mesh) og beregningsfaser.

Videre presenteres resultatene i form av jordtrykk, skjærspenning og resultanter av disse på pressegruppa for håndberegninger, simuleringer i Plaxis 2D og simuleringer i Plaxis 3D. For håndberegninger ble det laget et regneark i Excel. For å finne resultanter fra jordtrykk og skjærspenninger i Plaxis er det hentet ut resultater som så er bearbeidet i Excel.

En diskusjon av resultatene følger før det blir gitt en konklusjon og anbefaling til videre arbeid.

2 Teori

2.1 Jordtrykk

Jordtrykk betegner de spenningskomponenter (normal og skjær) som oppstår i en vertikal grenseflate mellom jord og konstruksjon (Emdal et al., 2013). Drives en spunt/vegg ned i jorden og massene graves ut fås situasjonen som vist i Figur 10. Lasten F som må påføres for å holde veggene i likevekt avhenger av bevegelsen til veggene. Holdes veggene i ro oppstår et trykk lik hviletrykket bak veggene.

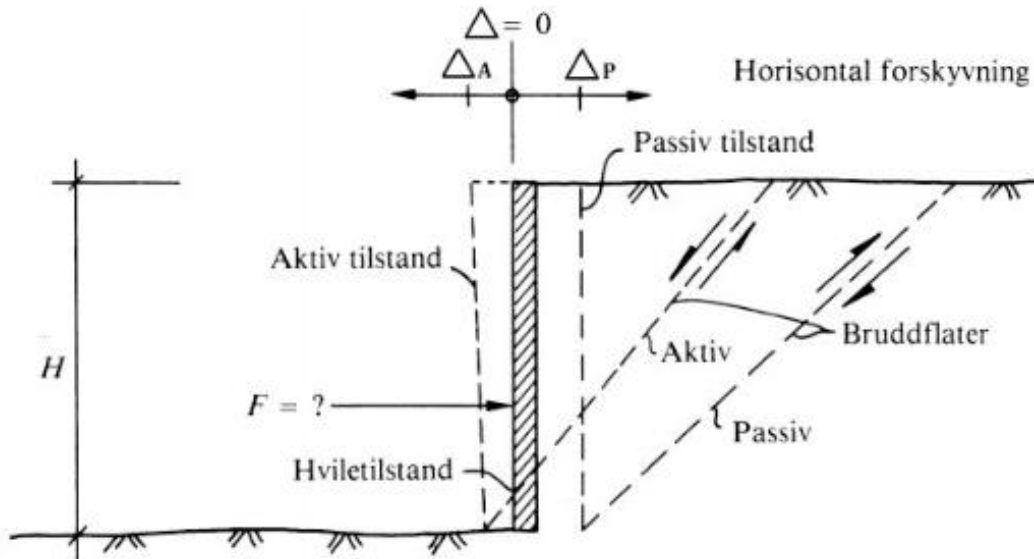
2.1.1 Aktivt jordtrykk

Lar man veggene unnvike fra jorden ved å redusere F vil trykket bak veggene reduseres. Dette betegnes som aktivt trykk. Jorden er den aktive part i situasjonen. Reduseres kraften ytterligere vil det etter hvert oppstå brudd langs den aktive bruddflaten som vist i Figur 10. Jordkilen, begrenset av veggene og bruddplanet, vil gli ned etter veggene. Jordtrykket vil fra dette punkt være konstant lik σ_A , se Figur 11 (Aarhaug, 1984). Situasjonen oppstår når $F=1$ i jorden. Ved en sikkerhetsfaktor større enn 1 vil aktivt jordtrykk være større enn σ_A .

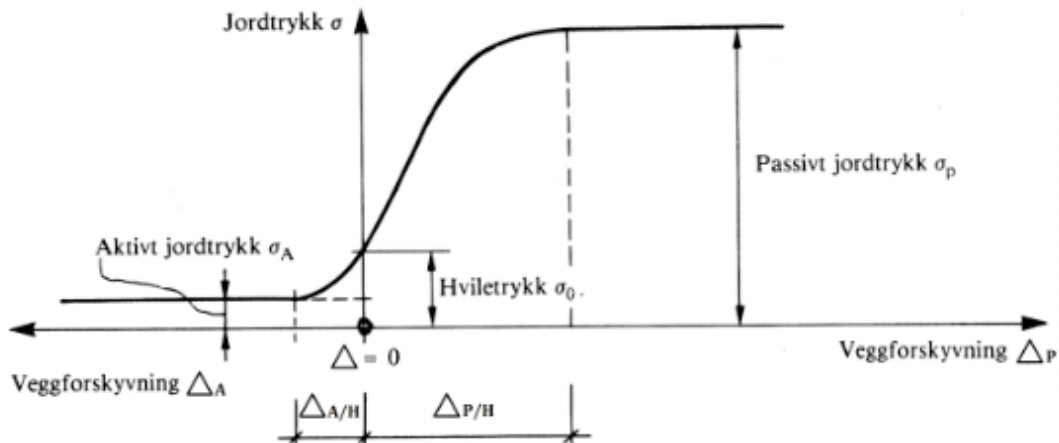
2.1.2 Passivt jordtrykk

Om man prøver å presse veggene inn mot jorden må kraften F økes betraktelig og trykket øker bak veggene. Dette betegnes som passivt trykk. Økes F nok oppstår brudd langs en passiv bruddflate og en jordkile mellom veggene og passivt bruddplan vil skyves opp og vekk fra veggene (Figur 10). Jordtrykket vil fra nå av ha konstant verdi lik σ_P , se Figur 11 (Aarhaug, 1984). Situasjonen oppstår når $F=1$ i jorden. Ved en sikkerhetsfaktor større enn 1 vil passivt jordtrykk være mindre enn σ_P .

Det er imidlertid forskjell i deformasjon nødvendig for å mobilisere fullt aktivt og fullt passivt jordtrykk, som vist i Figur 11. Som illustrert skal det betraktelig større deformasjon til for å mobilisere passivt jordtrykk. Forsøk har vist at en deformasjon av størrelsesorden 0,5 % av støttekonstruksjonens høyde vil medføre aktivt jordtrykk i leire og ca 0,1 % i sand. For utvikling av passivt jordtrykk vil det være snakk om deformasjon på 2-3 % av konstruksjonshøyden (Statens Vegvesen, 2014).



Figur 10 Jordtrykk - prinsipp (Aarhaug, 1984)



Figur 11 Sammenheng mellom jordtrykk og horisontal veggforskyvning (Aarhaug, 1984)

Langs veggen vil jordlegemenes bevegelse føre til skjærkrefter i kontaktflaten mellom veggen og jorda. Friksjonen eller ruheten r i kontaktflaten vil føre til at jorda henger seg opp på konstruksjonen eller prøver å løfte den opp. Dette har dermed en betydelig innvirkning på størrelsen av jordtrykket.

Ruheten r mellom en støttekonstruksjon og bakenforliggende jord kan defineres som forholdet mellom skjærspenningen τ som er mobilisert langs støtteveggen og den mobiliserte skjærfastheten i jorda som vist i ligning 1 (Statens Vegvesen, 2014).

$$r = \frac{\tau}{\tau_c} \quad (1)$$

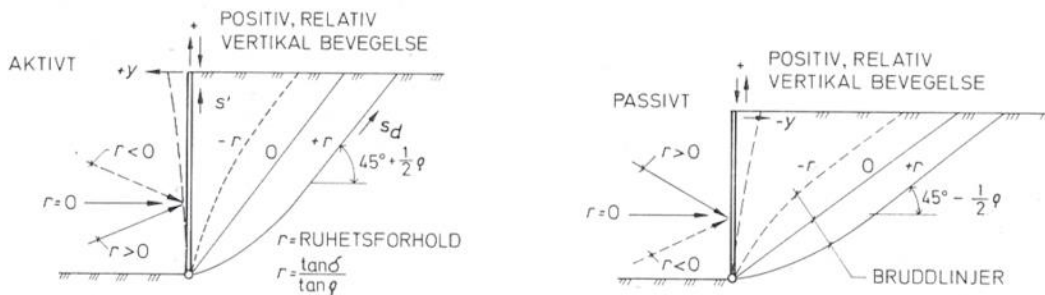
På effektivspenningsbasis får man som vist i ligning 2:

$$r = \frac{\tau}{\tan \rho * (p' + a)} \quad (2)$$

På totalspenningsbasis beskriver man ruheten som vist i ligning 3:

$$r = \frac{\tau}{\frac{S_u}{F}} \quad (3)$$

Retningen på skjærspenningen vil ha betydning. De ulike variantene av fortegn på r er vist i Figur 12. Ved aktivt jordtrykk betegnes positiv ruhet ved at jorda henger seg på veggen. Negativ ruhet kan man få ved at veggen beveger seg mer nedover enn jorda og jorda prøver da å løfte veggen. En spuntvegg som er forankret med skråstag kan gi negativ ruhet. Ved passivt jordtrykk sier man at positiv ruhet er når jorda prøver å løfte veggen. Negativ ruhet får man når veggen beveger seg mer opp enn jorda.

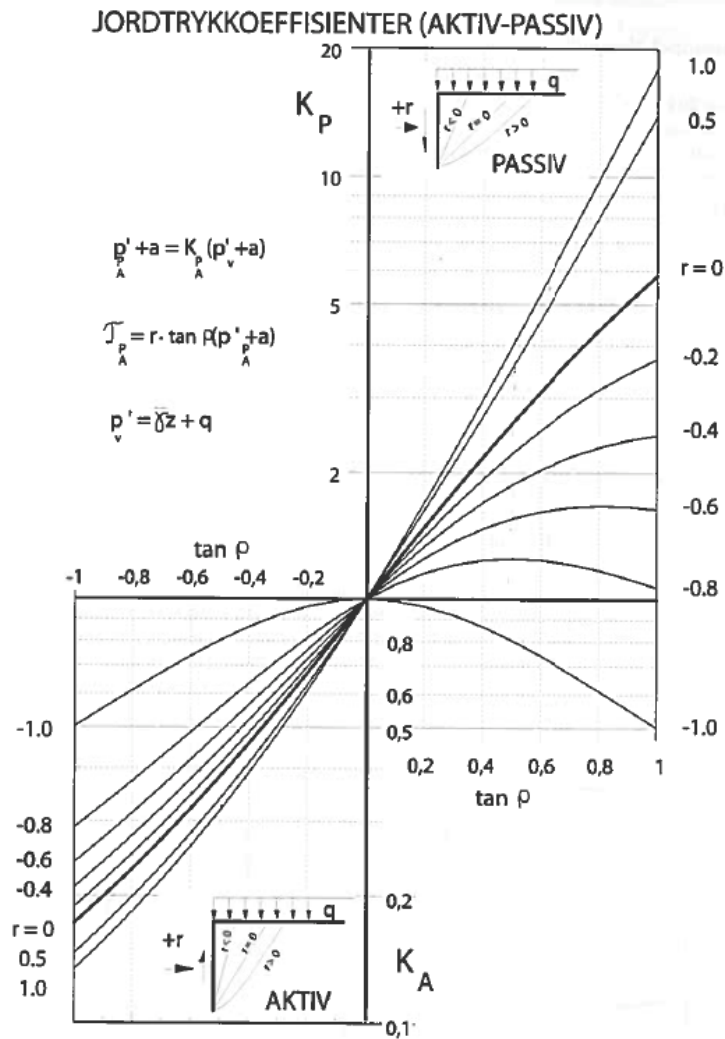


Figur 12 Ruhetens innvirkning på bruddflate og ruhetens fortegn (Statens Vegvesen, 2014)

Ofte benyttes symbolet p i stedet for spenningsbetegnelsen σ i praktiske jordtrykksberegninger. Oppskriften for jordtrykksberegninger ved effektivspenningsanalyse i Tabell 1 er hentet fra Emdal et al. (2013). Jordtrykkskoeffisientene er som vist i Figur 13 avhengig av ruheten r og mobilisert friksjon $\tan \rho$. For utledning av jordtrykkskoeffisientene basert på spenningsfelt henvises det til Emdal et al. (2013).

1.	Beregn total vertikal overlaging i karakteristiske dybder, skisser i diagram	$p_v = \gamma * z + q$	(4)
2.	Beregn poretrykk u i de samme dybdene		
3.	Beregn effektiv overlaging i de samme dybdene	$p_v' = p_v - u$	(5)
4.	Vurder hva som er aktive og passive jordsoner, vurder tilhørende ruhetsverdier r og fortegn		
5.	Vurder eller beregn skjærmobiliseringen $\tan \rho$ dersom mobiliseringsgraden er gitt		
6.	Bestem jordtrykkskoeffisienten etter diagram eller ved formler utledet fra spenningsfelt		
7.	Bestem effektive jordtrykk	$P'_P + a = K_P(p'_v + a)$	(6)
		$\tau_P = r * \tan \rho (p'_P + a)$	(7)
8.	Adder poretrykkene igjen for å få de fulle jordtrykkene som virker på veggen	$P_P = P'_P + u$	(8)
9.	Kontroller at støtteveggen er i horisontal og vertikal likevekt ut fra dine forutsetninger om oppstøttingen av veggen. Gjør dette ved å integrere opp jordtrykkene til horisontale og vertikale kraftresultanter		

Tabell 1 Praktisk beregningsgang for jordtrykk ved effektivspenningsanalyse

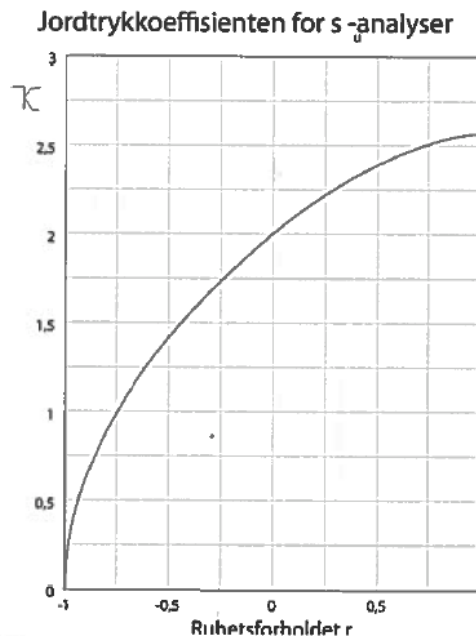


Figur 13 Jordtrykkskoeffisienter ved effektivspenningsanalyse (Emdal et al., 2013)

For jordarter med tilnærmet udrenert oppførsel benyttes en totalspenningsanalyse også kalt S_u -analyse. Beregningsgangen er beskrevet i Tabell 2 som er hentet fra Emdal et al. (2013). Jordtrykkskoeffisienten er ved totalspenningsanalyse kun avhengig av ruheten r som vist i Figur 14. For utledning av jordtrykkskoeffisienten ved totalspenningsanalyse henvises det til Emdal et al. (2013).

1.	Beregn total vertikal overlaging i karakteristiske dybder, skisser i diagram	$p_v = \gamma * z + q$	
2.	Vurder hva som er aktive og passive jordsoner, vurder tilhørende ruhetsverdier r og fortegn		
3.	Vurder eller beregn skjærmobiliseringen $\tan \rho$ dersom mobiliseringsgraden er gitt		
4.	Bestem jordtrykkskoeffisienten etter diagram eller ved formler utledet fra spenningsfelt		
5.	Bestem totale jordtrykk	$P_P = p_v \pm \kappa * \tau_c$ A	(9)
		$\tau_P = r * \tau_c$ A	(10)
9.	Kontroller at støtteveggen er i horisontal og vertikal likevekt ut fra dine forutsetninger om oppstøttingen av veggen. Gjør dette ved å integrere opp jordtrykkene til horisontale og vertikale kraftresultanter		

Tabell 2 Praktisk beregningsgang for jordtrykk ved totalspenningsanalyse



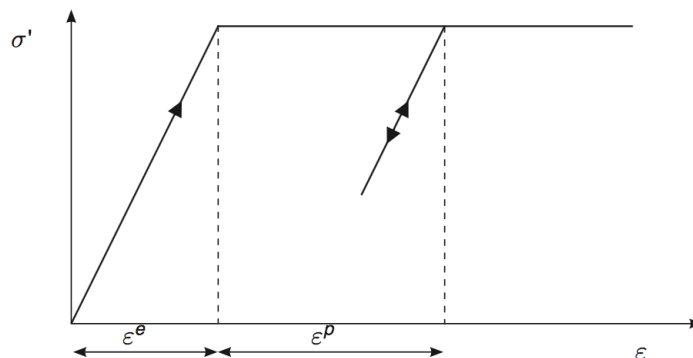
Figur 14 Jordtrykkkoeffisienten for totalspenningsanalyse

2.2 Elementmetoden

Elementmetoden (*Finite Element Method*) er en av de viktigste numeriske løsningsmetoder som man i dag besitter. Metoden er ikke eksakt, men gir ofte svært gode tilnæringer til problemer. Hovedprinsippet bak elementmetoden er at legemet det undersøkes deles inn i mindre elementer. Disse mindre elementene fungerer som byggesteiner for den totale oppførselen til legemet. For en mer detaljert beskrivelse av elementmetoden henvises det til Bell (2013).

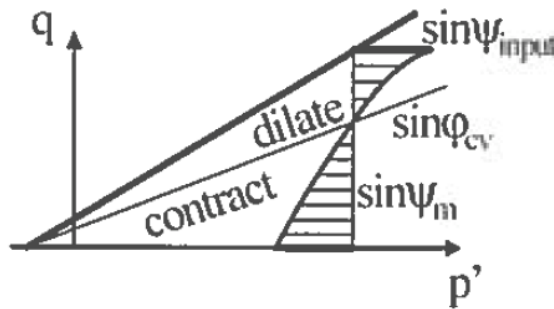
2.3 Hardening Soil materialmodell

Den enkle lineært elastisk perfekt-plastiske materialmodellen *Mohr-Coulomb* antar at alle tøyninger er elastiske og stivheten konstant inntil bruddflaten nåes, som vist i Figur 15. Deretter kan det oppstå ubegrensede plastiske tøyninger. Det er allment kjent at oppførselen til jord ikke er så enkel som dette. *Hardening Soil* er en elastoplastisk materialmodell som inkluderer plastiske tøyninger under bruddflaten beskrevet av *Mohr-Coulomb*. Modellen har også en formulering som gjør stivheten avhengig av effektivspenningen. Som vist i Figur 16 brukes en hyperbel for å beskrive hvordan elastiske og plastiske tøyninger øker gradvis i en konvensjonell treakstest. Figur 16 viser også at modellen benytter en elastisk avlastnings- og rebelastningsmodul med høy stivhet sammenlignet med den ved førstegangspålastning. Flere forskjellige stivhetsparametere brukes for å beskrive pålastning i skjær (deviatorisk), volumetrisk last og avlastning. Prekonsolidering og dilatans er også inkludert i modellen. I tillegg finnes *Hardening Soil Small* som tar hensyn til at jord viser svært høy stivhet ved små tøyninger sammenlignet med hva som måles i klassisk laborietesting. Det er i det følgende valgt å legge vekt på den praktiske forståelsen av materialmodellen, for mer detaljert beskrivelse henvises det til Plaxis (2015a).



Figur 15 Lineært elastisk perfekt-plastisk modell (Plaxis, 2015a)

Dilatans er formulert i modellen slik at den varierer med graden av mobilisert friksjon og blir lik angitt verdi av dilatans ved brudd som vist i Figur 18. Det bemerkes at dilatansen settes til 0 for $\sin \varphi_m < \frac{3}{4} \sin \varphi$.



Nonassociated cone flow:

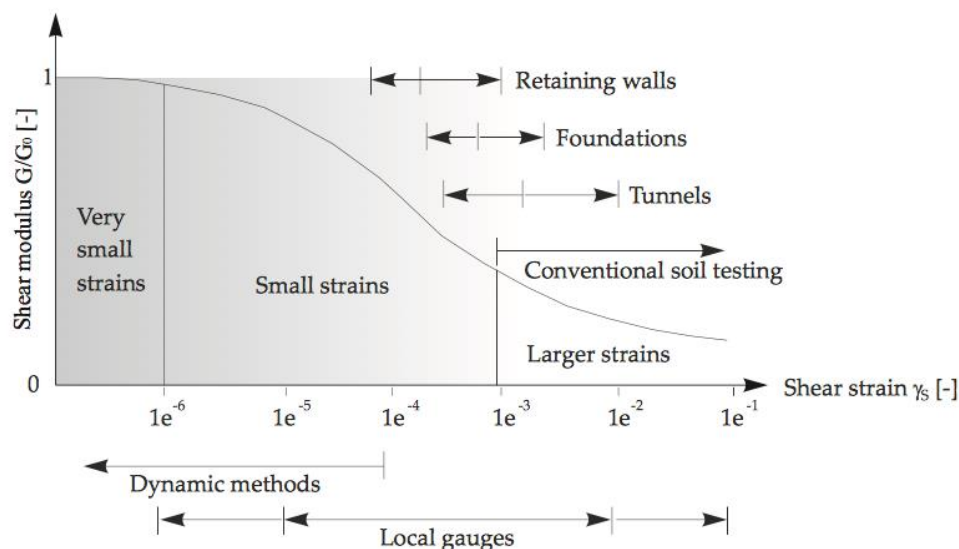
$$\sin \psi_m = \frac{\sin \varphi_m - \sin \varphi_{cv}}{1 - \sin \varphi_m \sin \varphi_{cv}}$$

$\varphi_m = \rho =$ mobilized friction

$e_{max} \rightarrow$ dilatancy cut off

Figur 18 Formulering av dilatans i Hardening Soil (Plaxis, 2015a)

Hardening Soil antar elastisk oppførsel under av- og rebelastning. Figur 19 viser derimot at området jord faktisk kan antas virkelig elastisk er svært lite. Med økende tøyning avtar stivheten ikke-lineært. Figuren viser også at ved konvensjonell laboratorietesting er jordens stivhet ofte redusert til under halve av den originale verdien. I tillegg til alle mulighetene ved *Hardening Soil* tar *Hardening Soil Small* hensyn til dette. Problemet som *Hardening Soil Small* løser ble for alvor oppdaget med økende maskinkraft og mulighet til bruk av større modeller i elementmetodeprogram. I stedet for økt nøyaktighet oppdaget man at resultatene for eksempel kunne gi urealistisk store forskyvninger og setninger. Dette fordi mange elementer ofte opplevde små forskyvninger i store modeller og hadde dermed for liten stivhet.



Figur 19 Karakteristisk sammenheng mellom stivhet og tøyning for typiske tøyningverdier (Plaxis, 2015a)

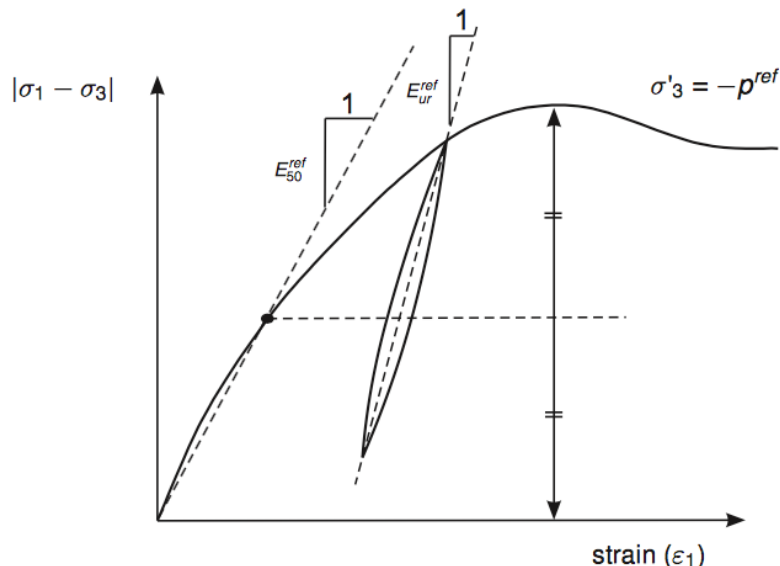
I Tabell 3 og Tabell 4 er input parametere for *Hardening Soil* og *Hardening Soil Small* i Plaxis vist. Stivhetsparameterne som i hovedsak skiller *Hardening Soil* fra *Mohr-Coulomb* er videre forklart og vist i Figur 20 til Figur 22.

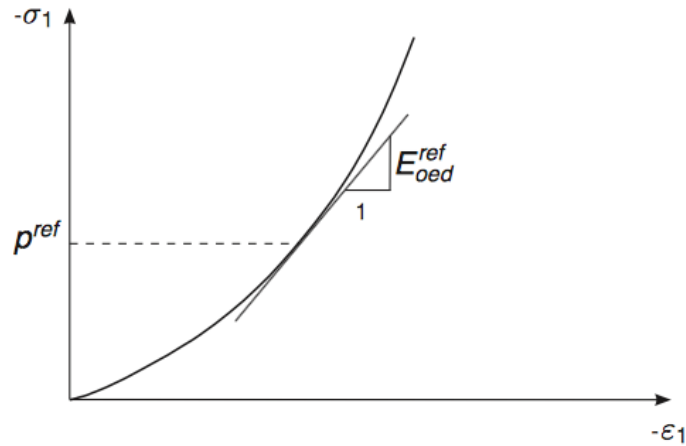
Parameter	Enhet	Definisjon/forklaring
E_{50}^{ref}	kN/m^2	Sekantstivhet i standard drenert treaksialt forsøk.
E_{oed}^{ref}	kN/m^2	Tangentstivhet for oedometerpålasting i NC-område.
E_{ur}^{ref}	kN/m^2	Av- og rebelastningsstivhet (default $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$).
m	-	Potens for å styre stivhetens spenningsavhengighet. Settes ofte lik 1 for leire og 0.5 for sand.
c	kN/m^2	Kohesjon (samme som for Mohr-Coulomb).
φ	$^\circ$	Friksjonsvinkel (samme som for Mohr-Coulomb).
ψ	$^\circ$	Dilatans (samme som for Mohr-Coulomb).
σ_t	kN/m^2	Strekkestyrke (settes default lik 0).
ν_{ur}	-	Poisson tall for av- og rebelastning (default lik 0.2 og er mest sannsynlig i området 0.1-0.2).
p^{ref}	kN/m^2	Referansespenning for stivheter (default lik 100 kN/m^2).
K_0^{nc}	-	K_0 -verdi for normal konsolidering (default $K_0^{nc} = 1 - \sin \varphi$).
R_f	-	Bruddforhold q_f/q_a (default $R_f = 0.9$) som vist i Figur 16.

Tabell 3 Parametere for Hardening Soil i Plaxis

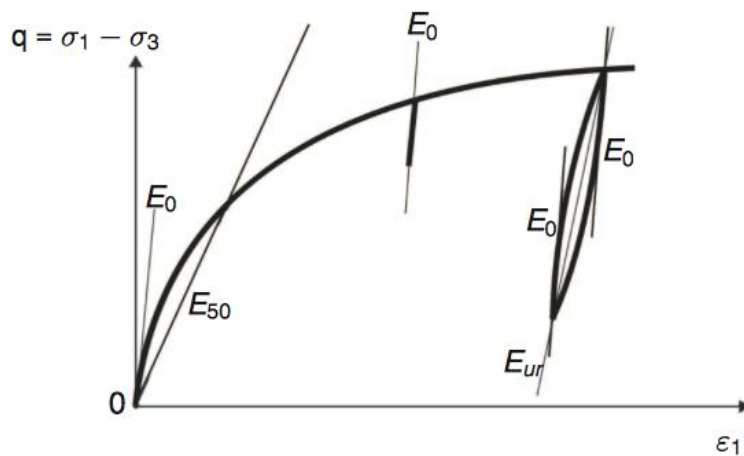
Parameter	Enhet	Definisjon/forklaring
G_0^{ref}	kN/m^2	Skjærmodul ved svært små tøyninger ($\varepsilon < 10^{-6}$)
$\gamma_{0.7}$	-	Skjærtøyning hvor skjærmodulen er redusert til omtrent 70% (0.722) av G_0

Tabell 4 Ekstra parametere for Hardening Soil Small

Figur 20 Definisjon av E_{50}^{ref} og E_{ur}^{ref} for drenert treaksial test (Plaxis, 2015a)



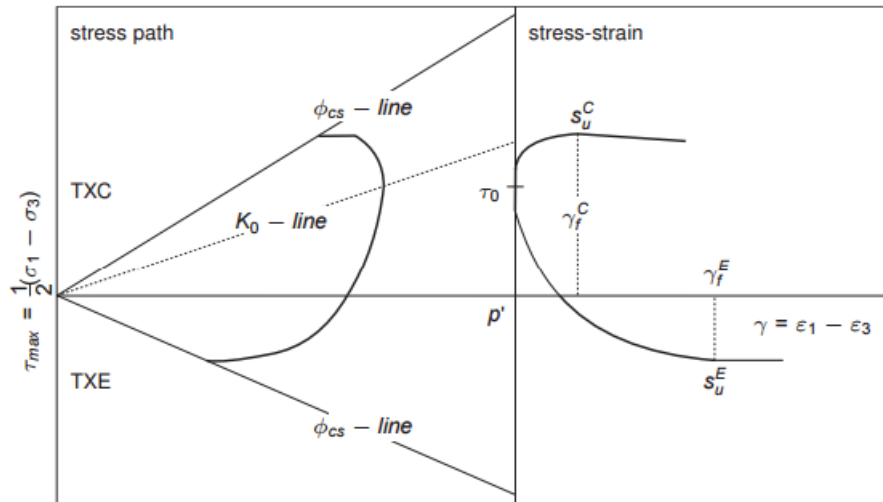
Figur 21 Definisjon av E_{oed}^{ref} for resultater fra oedometer (Plaxis, 2015a)



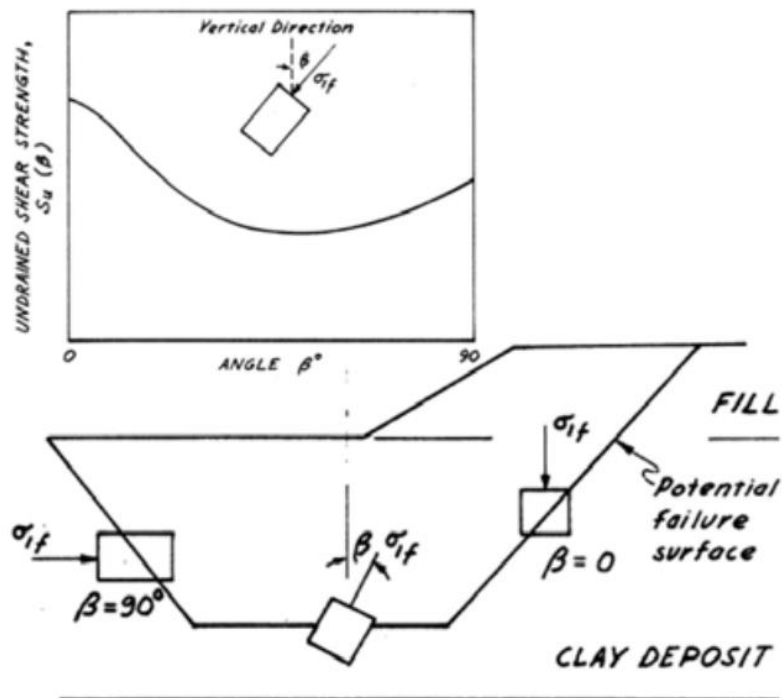
Figur 22 Stivhetsparametere E_{50} , E_{ur} og $E_0 = 2G_0(1 + \nu_{ur})$ i Hardening Soil Small for treaksial test (Plaxis, 2015a)

2.4 NGI-ADP materialmodell

Leire viser en anisotropisk udrenert spenning-tøyning respons og udrenert skjærstyrke som vist i Figur 23 og Figur 24. *NGI-ADP* er en elastoplastisk konstituerende materialmodell med direkte input av udrenert skjærstyrke som realistisk kan simulere dette. Viktigheten av å inkludere dette i en materialmodell vises i Figur 24 der man kan se at jordelementer langs en potensiell bruddlinje utsettes for forskjellig hovedspenningsretning. Det bemerkes at *NGI-ADP* ikke inkluderer tension cut-off, altså at strekkspenninger sees bort ifra. For en detaljert formulering av modellen henvises det til Plaxis (2015a).



Figur 23 Typiske spenningsstier og spenning-tøyningskurver for aktiv (største hovedspenning vertikalt) og passiv (største hovedspenning horisontalt) breakstest (Plaxis, 2015a)



Figur 24 Udrenert skjærstyrke i leire avhenger av hovedspenningsretning (Ukritchon og Boonyatee, 2015)

I Tabell 5 er inputparameterne for materialmodellen vist og forklart.

Parameter	Enhet	Definisjon/forklaring
G_{ur}/S_{u^A}	-	Forhold mellom av- og rebelastningsskjærmodul og (plan-tøyning) aktiv skjærstyrke.
γ_f^C	%	Skjærtøyning ved brudd i aktiv treakstest.
γ_f^E	%	Skjærtøyning ved brudd i passiv treakstest.
γ_f^{DSS}	%	Skjærtøyning ved brudd i skjærforsøk.
$S_{u^A,ref}$	kN/m ²	(Plan-tøyning) aktiv skjærstyrke ved referansenivå
$S_{u^C,TX}/S_{u^A}$	-	Forhold mellom aktiv skjærstyrke og (plan-tøyning) aktiv skjærstyrke. Forhåndsvalgt til 0,99 og kan ikke endres.
y_{ref}	m	Referansedybde. Over referansedybden er skjærstyrken konstant lik $S_{u^A,ref}$, under øker den med $S_{u^A,inc}$.
$S_{u^A,inc}$	kN/m ² /m	Økning i aktiv skjærstyrke med dybde.
S_{u^P}/S_{u^A}	-	Forhold mellom (plan tøyning) passiv skjærstyrke og (plan-tøyning) aktiv skjærstyrke
τ_0/S_{u^A}	-	Initiell mobilisering. Forhåndsvalgt til 0,7.
$S_{u^{DSS}}/S_{u^A}$	-	Forhold mellom direkte skjærstyrke og (plan-tøyning) aktiv skjærstyrke
ν_u	-	Tverrkontraksjonstall

Tabell 5 Parametere for NGI-ADP

2.5 Bruk av *interface*-elementer i Plaxis

Interface-elementer må benyttes for å simulere en interaksjon mellom jord og konstruksjonskomponenter som for eksempel spunt. I overgangen mellom jord og spunt vil ruheten til spuntene avgjøre hvor mye skjærspenninger som overføres til den fra jorda. Uten bruk av *interface*-elementer vil spenningene fra jorda overføres direkte til konstruksjonskomponenten i full størrelse.

Interaksjonen styres ved at man til et *interface* kan velge et materiale, der verdien R_{inter} justerer styrken og stivheten til *interfacet*. I hovedsak er *interfacet* svakere og mindre stiv enn den omkringliggende jorda og dermed bør verdien av R_{inter} være mindre enn 1. Egenskapene til *interfacet* er beregnet fra jordparameterne og R_{inter} med sammenhenger som vist i ligning 11 til 15:

$$c_i = R_{inter}c_{soil} \quad (11)$$

$$\tan\varphi_i = R_{inter}\tan\varphi_{soil} \leq \tan\varphi_{soil} \quad (12)$$

$$E_{oed,i} = 2G_i \frac{1 - \nu_i}{1 - 2\nu_i} \quad (13)$$

$$G_i = R_{inter}^2 G_{soil} \leq G_{soil} \quad (14)$$

$$\nu_i = 0,45 \quad (15)$$

hvor φ_i og c_i er friksjonsvinkel og kohesjon, G_i er skjærmodulen og $E_{oed,i}$ er kompresjonsmodulen til *interfacet*.

Hvert *interface* angis også en virtuell tykkelse for å definere materialparameterne til *interfacet*. Jo høyere den virtuelle tykkelsen er jo mer elastiske deformasjoner genereres (Plaxis, 2015b). *Interface*-elementer skal i hovedsak generere svært små elastiske deformasjoner og derfor bør den virtuelle tykkelsen være liten. Den virtuelle tykkelsen t_i er bestemt av faktoren virtuell tykkelse (angis på *interfacet*, default er 0,1) ganget med den globale elementstørrelsen. For *interface*-elementene benyttes den elasto-plastiske modellen *Mohr-Coulomb* for å skille mellom elastisk deformasjon, hvor små forskyvninger kan oppstå innenfor *interfacet*, og plastisk deformasjon hvor permanente forskyvninger kan oppstå. For at *interfacet* skal forbli elastisk er skjærspenningen gitt ved ligning 16:

$$|\tau| < -\sigma_n \tan \varphi_i + c_i \quad (16)$$

hvor σ_n er den effektive normalspenningen.

For plastisk oppførsel er skjærspenningen gitt av ligning 17:

$$|\tau| = -\sigma_n \tan \varphi_i + c_i \quad (17)$$

Størrelsen av de elastiske forskyvningene er gitt av ligning 18 og 19:

$$\text{Elastisk forskyvning parallelt til interface} = \frac{\sigma t_i}{E_{oed,i}} \quad (18)$$

$$\text{Elastisk forskyvning normalt på interface} = \frac{\tau t_i}{G_i} \quad (19)$$

For lave verdier av R_{inter} kan *interface*-stivheten bli urealistisk lav på grunn av den kvadratiske avhengigheten av R_{inter} . Det vil da kreves større forskyvninger for å mobilisere spenningene på *interfacet* enn hva som kanskje er realistisk. Det er også viktig å passe på at den virtuelle tykkelsen ikke blir for stor av samme årsak.

2.6 Numeriske kontrollparametere for beregningsfaser

Når plastisitet av jord er involvert i elementmetodeberegninger blir ligningene ikke-lineære. Dette betyr at problemet må bli løst i en serie av beregningssteg. I løpet av hvert beregningssteg blir feilen av likevekt i løsningen litt etter litt redusert ved hjelp av en serie iterasjoner. En svært viktig del av løsningsmetoden er valget av stegstørrelse og løsningsalgoritme. Plaxis har en automatisk laststeg-prosedyre for løsning av ikke-lineære plastiske problemer (Plaxis, 2015b). Denne prosedyren er kontrollert av de numeriske kontrollparameterne som vist i Figur 25. Standardparameterne gir for de fleste problemer en god balanse mellom robusthet, nøyaktighet og effektivitet, men med manuell justering kan man oppnå større kontroll. Hvis stegstørrelsen er for

liten vil svært mange steg være nødvendig for å nå det ønskede lastnivået og beregningstiden vil bli lang. Er derimot stegstørrelsen for stor kan antallet nødvendige iterasjoner bli stor eller løsningen kan divergere. Videre vil noen av de viktigste parameterne bli forklart. For fullstendig beskrivelse av alle parametere henvises det til Plaxis (2015b).

Numerical control parameters	
Solver type	Picos (mul ▼)
Max cores to use	256
Max number of steps stored	1
Use default iter parameters	<input checked="" type="checkbox"/>
Max steps	250
Tolerated error	0,01000
Max unloading steps	5
Max load fraction per step	0,5000
Over-relaxation factor	1,200
Max number of iterations	60
Desired min number of iterations	6
Desired max number of iterations	15
Arc-length control type	On ▼
Use line search	<input type="checkbox"/>
Use gradual error reduction	<input type="checkbox"/>

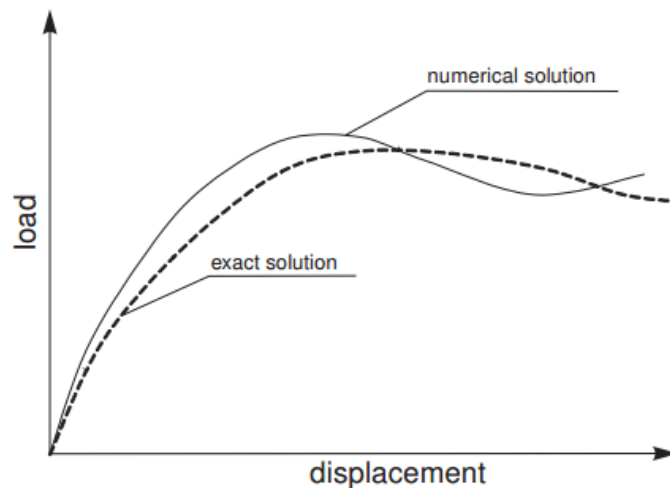
Figur 25 Numeriske kontrollparametere

2.6.1 Maks steg

Maks antall steg spesifiserer det maksimale antallet beregningssteg (laststeg) som kan utføres i en beregningsfase. Denne verdien kan justeres til et tall mellom 1-10 000.

2.6.2 Tolerert feil

Som vist i Figur 26 vil den beregnede løsningen ved hjelp av elementmetode avvike noe fra den eksakte. Ved hjelp av verdien for tolerert feil kan man angi feilen i likevekt løsningen skal iterere seg under før Plaxis går videre til neste steg. Hvis verdien settes høyt vil beregningen gå raskere, men kan bli unøyaktig.



Figur 26 Beregnet løsning kontra eksakt løsning (Plaxis, 2015b)

2.6.3 Maks avlastingssteg

Denne verdien angir hvor mange avlastingssteg Plaxis skal tillate før den avgjør om jorden har gått til brudd. Standardverdien er 5 og ved skiftende mekanismer kan man se en liten avlastning før neste mekanisme overtar og man kan laste på mer. Denne mindre avlastingen er ingen kollaps av hele modellen, siden lasten senere kan bli større. Dermed kan det i visse tilfeller være nødvendig å sette denne verdien høyere og senere vurdere kollaps basert på lastkurven.

2.6.4 Maks antall iterasjoner

Verdien angir maks tillatte iterasjoner innenfor et beregningssteg. Parameteren er kun nødvendig for å begrense at beregningstiden blir unødvendig stor på grunn av feil i spesifiseringen av beregningen.

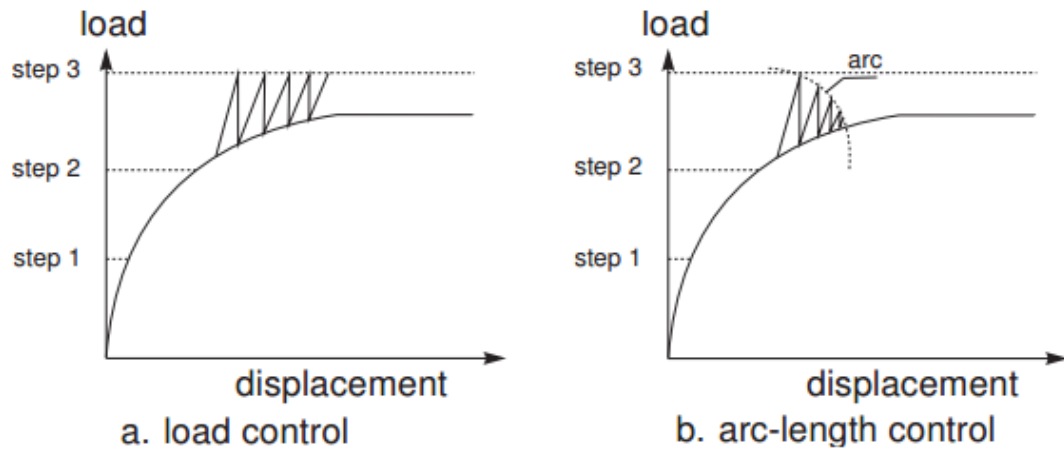
2.6.5 Ønsket minimum og ønsket maksimum antall iterasjoner

Disse to parameterne kontrollerer i hovedsak algoritmen som bestemmer stegstørrelsen. Hvis løsningen når tolerert feil i likevekt med et antall iterasjoner mindre enn det ønskede minimum blir størrelsen på lastinkrementet doblet. Hvis løsningen når tolerert feil i likevekt med et antall større enn det ønskede maksimum blir lastinkrementet halvert. Om antallet iterasjoner ligger i mellom ønsket minimum og maksimum vil størrelsen på lastinkrementet forbli uforandret. Hvis materiale med relativt høy friksjonsvinkel benyttes, eller hvis høyere ordens jordmodeller brukes anbefaler Plaxis (2015b) å sette ønsket minimum til 8 og ønsket maksimum til 20. I tillegg anbefales det da å sette maks antall iterasjoner til 80.

2.6.6 Buelengde-kontroll

Når en nærmer seg en bruddlast vil ikke løsningen konvergere uten buelengde-kontroll som vist i Figur 27 a. Med denne parameteren på vil programmet

automatisk evaluere størrelsen av last som må påføres før kollaps som vist i Figur 27 b.



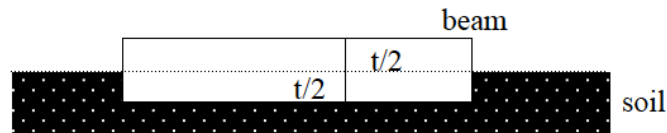
Figur 27 Buelengde-kontroll (Plaxis, 2015b)

3 Parameterbestemmelse for Plaxis

3.1 Spunt/plate-parametere i Plaxis

For å modellere spunt i Plaxis benyttes det strukturelle elementet plate. I Plaxis tegner man plater som rette linjer som "overlapper" jorda. For å beregne den korrekte totale vekten av jorda og platen i modellen på grunn av "overlappingen" bør vekten av jorda trekkes fra vekten av platen (Plaxis, 2015b). Figur 28 er hentet fra forelesningsnotater i TBA4116 og viser hvordan man kan justere denne vekten. Siden spunt opptar relativt lite volum kan vekten per enhetsareal, som oppgis fra produsentene, benyttes direkte. Plateelementene i Plaxis antas å ha rektangulært tverrsnitt, så den korrugerte formen til spuntvegger tas hensyn til ved å benytte anisotropiske materialparametere og gjøre noen antagelser. Ofte må også mange geometriske parametere beregnes for bruk av Plaxis 3D da spuntprodusentene kun oppgir spuntens dimensjon, tverrsnitt og motstandsmoment/annet arealmoment om sterk akse.

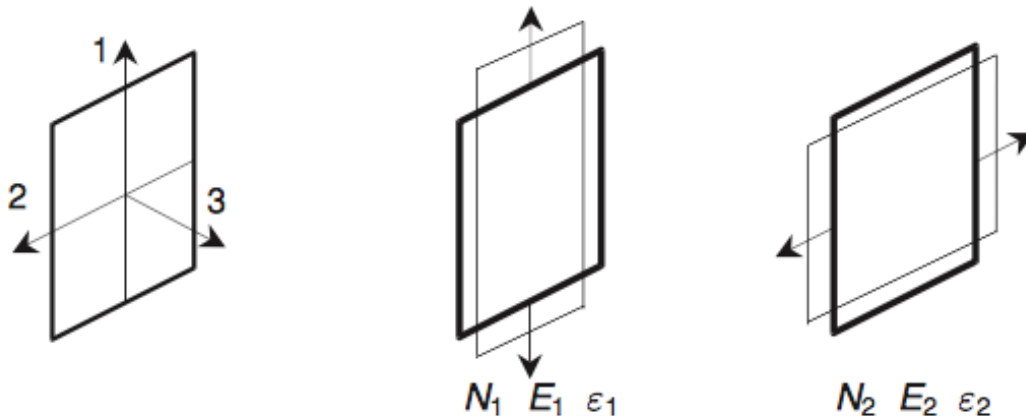
$$w = \gamma_b \cdot t/2 + (\gamma_b - \gamma) \cdot t/2$$



Figur 28 Beregning av vekt for plate i Plaxis

3.1.1 Plaxis 2D

Nedenfor er materialparameterne for input i Plaxis vist i Tabell 6. Det lokale aksesystemet for materialparameterne er vist i Figur 29.



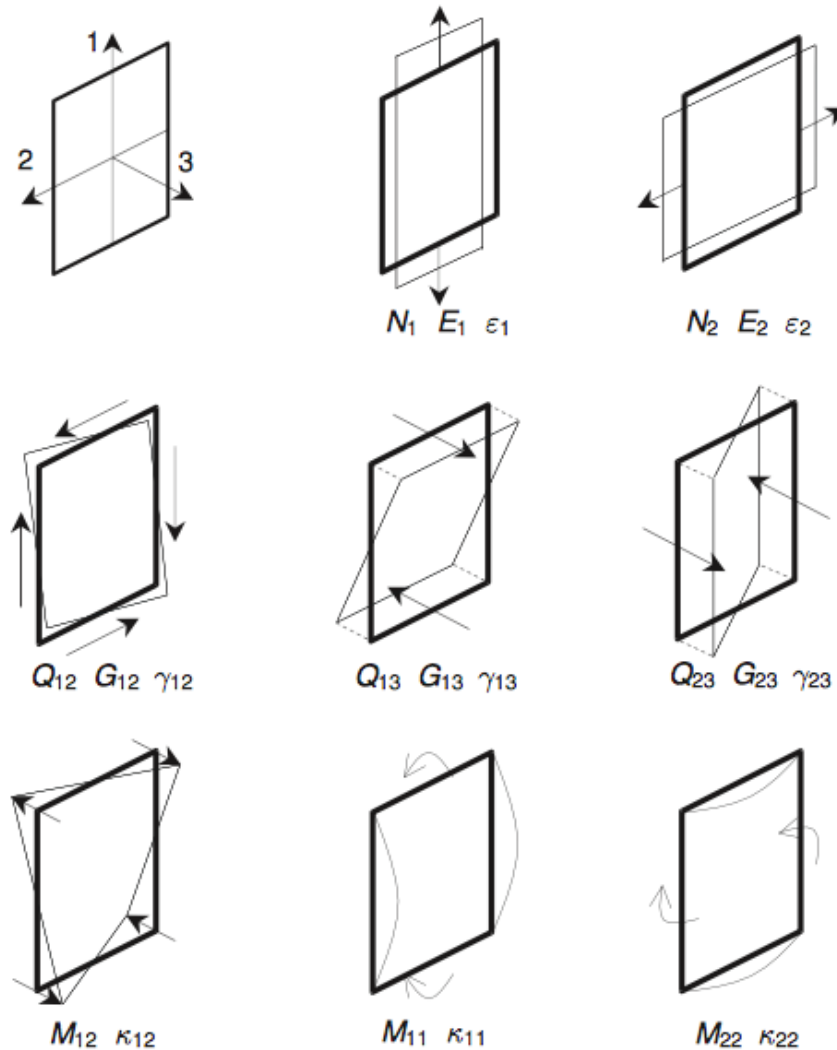
Figur 29 Definisjon av lokalt aksesystem Plaxis 2D (Plaxis, 2015c)

Parameter	Enhet	Definisjon/forklaring
EA ₁	kN/m	Stivhet i 1-retning (normalstivhet)
EA ₂	kN/m	Stivhet i 2-retning (ut av planet)
EI	kNm ² /m	Bøystivhet om 2-retning (ut av planet)
v	-	Tverrkontraksjon (Anbefales satt lik 0 for spunt)
w	kN/m/m	Vekt

Tabell 6 Input for materialparametere for plate i Plaxis 2D

3.1.2 Plaxis 3D

For Plaxis 3D er aksessystem og materialparametere vist i Figur 30 og Tabell 7. For å benytte plateelementene i Plaxis 3D for geometrisk anisotrope plater, anbefaler Plaxis (2015a) sammenhengene som vist i Tabell 8 når bøyning er antatt å være den viktigste deformasjonen. I Tabell 8 er A_1 effektivt materialverrsnitt for aksialkrefter i 1-retning. A_2 er effektivt materialverrsnitt for aksialkrefter i 2-retning. A_{12} er effektivt materialverrsnitt for skjærkrefter Q_{12} . A_{13} er effektivt materialverrsnitt for skjærkrefter Q_{13} . A_{23} er effektivt materialverrsnitt for skjærkrefter Q_{23} . I_1 er annet arealmoment mot bøyning om akse 1. I_2 er annet arealmoment mot bøyning om akse 2 og I_{12} er annet arealmoment mot torsjon.



Figur 30 Definisjon av lokalt aksessystem og parametre Plaxis 3D (Plaxis, 2015c)

Parameter	Enhet	Definisjon/forklaring
d	m	Ekvivalent tykkelse
γ	kN/m ³	Enhetsvekten av platen
E ₁	kN/m ²	E-modul i 1-retning
E ₂	kN/m ²	E-modul i 2-retning
ν_{12}	-	Tverrkontraksjon
G ₁₂	kN/m ²	Skjærmodul i planet
G ₁₃	kN/m ²	Skjærmodul ut av planet relatert til skjær i 1-retning
G ₂₃	kN/m ²	Skjærmodul ut av planet relatert til skjær i 2-retning

Tabell 7 Input for materialparametere for plate i Plaxis

Parameter	Gitt av sammenheng	
E ₁	$\frac{12EI_1}{d^3}$	(20)
E ₂	$\frac{12EI_2}{d^3}$	(21)
ν_{12}	ν	(22)
G ₁₂	$\frac{6EI_{12}}{(1 + \nu)d^3}$	(23)
G ₁₃	$\frac{EA_{13}}{2(1 + \nu)d}$	(24)
G ₂₃	$\frac{EA_{23}}{2(1 + \nu)d}$	(25)
γ	$A(\gamma_{\text{steel}} - \gamma_{\text{soil}})/d$	(26)

Tabell 8 Anbefalte sammenhenger for materialparametere for plater i Plaxis 3D (Plaxis, 2015a)

4 Modell og materialparametere

4.1 Generelt

4.1.1 Geometri

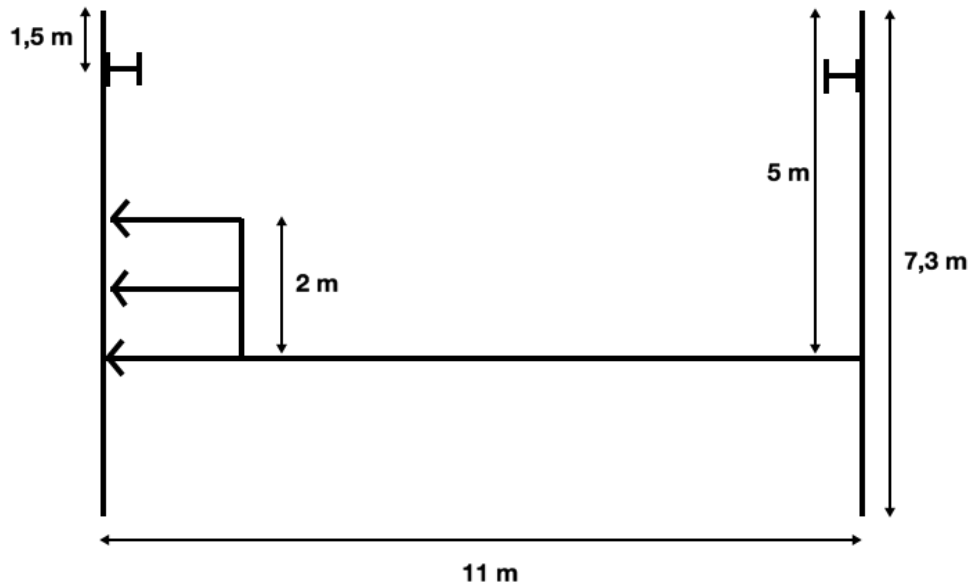
Geometri på modell er valgt på bakgrunn av personlig kommunikasjon med Olimb AS (Valle 2015), som oppgir at nødvendig bredde på pressesjakta er ca. 3 m og nødvendig lengde opp til 11 m. De ble også oppgitt at vanlig pressesdybde var rundt 5 m. Geometrien er vist i Figur 31 og Figur 32. Tverrgående avstivning vil gjøre det vanskelig å få rør og presseutstyr ned i sjakta og avstivningen vil derfor være kombinert med putene som påsveises innsiden av spuntveggene i valgt nivå (-1,5 m). Lengden på spuntten ble bestemt vilkårlig til 7,3 m og det ble sjekket at sikkerhetsfaktoren ved håndberegning var større enn 1. Grunnvannet er antatt i nivå -5 m og det oppstår da ingen grunnvannsstrømning. Før pressing antas det at det støpes en 30 cm betongplate i bunn av sjakta for å sikre en plan og solid plattform for presseutstyret. Det antas at pressekraften på bakveggen fordeles jevnt i en høyde på 2 m over bunn av sjakta og i hele bredden som er 3 m. Praktisk løses dette ved en forankringskloss/betongkloss som støpes mot bakveggen. Videre i oppgaven vil spuntveggen det presses mot omtales som bakveggen og den motsatte fremveggen.

Horisontalsnitt



Figur 31 Geometri på spuntgrop i horisontalsnitt

Vertikalsnitt



Figur 32 Geometri på spuntgrop i vertikalsnitt

4.1.2 Materialparametere for jord

Både i det drenerte og udrenerte tilfellet er ruheten antatt lik 0,3 før det presses. Dette på bakgrunn av at jorda da i hovedsak glir vertikalt på spuntveggen. Vertikalt er spunten nemlig relativt glatt. Horisontalt vil derimot spuntens korrugerte form antageligvis føre til at et brudd i praksis går gjennom jorda og ikke i kontaktflaten spunt-jord. Dermed en ruhet på 1, men for å være litt konservativ er det valgt en ruhet på 0,9. Langsidene er derfor gitt en ruhet på 0,9 under pressefasen siden jorda da i hovedsak glir horisontalt på spunt. På grunn av en så lav ruhet som 0,3 er faktoren for virtuell tykkelse til *interfacet* redusert fra 0,1 til 0,01 for å unngå for store elastiske deformasjoner som forklart i avsnitt 2.5

4.1.2.1 Drenert tilfelle i sand

For det drenerte tilfellet i sand er materialparameterne angitt i Tabell 9 for materialmodellen *Hardening Soil Small*.

Materialparameter	Enhet	Løst lagret sand
γ	kN/m ³	17
E_{50}^{ref}	kN/m ²	20 000
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	20 000
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	60 000
m	-	0,5
c	kN/m ²	0
φ	°	35
ψ	°	0
σ_t	kN/m ²	0
ν_{ur}	-	0,2
p^{ref}	kN/m ²	100
K_0^{nc}	-	0,4264
R_f	-	0,9
G_0^{ref}	kN/m ²	100 000
$\gamma_{0.7}$	-	0,0002
R eller r (ruhet)	-	0,3 og 0,9 (langsider ved pressing)
Ko (initiell)	-	0,4264

Tabell 9 Materialparametere for løst lagret sand

4.1.2.2 Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden

Det er valgt å modellere i leire med materialparametere som vist i Tabell 10. I leira er det antatt udrenerte forhold og det er valgt dreneringstypen *Undrained C* i materialmodellen *NGI-ADP*. Ved håndberegninger er det den udrenerte styrken lik S_u^A (aktiv skjærstyrke) som er valgt. For å kontrollere håndberegninger mot Plaxis 2D er det valgt å også kjøre en analyse der forholdet mellom skjærstrykene i *NGI-ADP* er satt til 1 som vist i Tabell 11. Man kan selvsagt diskutere om det heller er bedre å benytte S_u^P eller en mellomting ved håndberegning siden jorden bak spuntgropa (som har størst effekt på mulig pressekraft) i hovedsak belastes passivt. Det ville det nok også, men siden man her ikke er ute etter å dimensjonere fra håndberegninger men kun sammenligne spiller det ingen rolle når man kjører en kontroll der forholdet mellom skjærstyrkene er 1.

Opprinnelig var tanken å benytte *Hardening Soil Small* også for å modellere udrenert oppførsel i leire. Som tidligere nevnt oppsto det problemer med volumlocking i Plaxis 3D med *Hardening Soil Small* udrenert. I 2D fungerte det derimot helt fint og en analyse med materialparametere som vist i Tabell 12 er tatt med for sammenligning. Det nevnes at det er parameterne gitt i Tabell 12 som er bakgrunnen for S_u^A -profilen valgt å benytte for *NGI-ADP*. Denne skjærstyrken er funnet ved å kjøre en aktiv treakstest i Plaxis *SoilTest* på materialet angitt i Tabell 12.

Materialparameter	Enhet	Leire
γ	kN/m ³	19
G_{ur}/S_{u^A}	-	500
γ_f^C	%	2
γ_f^E	%	5
γ_f^{DSS}	%	4
$S_{u^A,ref}$	kN/m ²	2,33
$S_{u^C,TX}/S_{u^A}$	-	0,99
y_{ref}	m	0
$S_{u^A,inc}$	kN/m ² /m	5,8
S_{u^P}/S_{u^A}	-	0,4
τ_0/S_{u^A}	-	0,7
$S_{u^{DSS}}/S_{u^A}$	-	0,7
v_u	-	0,495
R eller r (ruhet)	-	0,3 og 0,9 (langsider ved pressing)
Ko (initiell)	-	0,5774

Tabell 10 Materialparametere for leire med økende styrke i dybden

Materialparameter	Enhet	Leire
γ	kN/m ³	19
G_{ur}/S_{u^A}	-	500
γ_f^C	%	2
γ_f^E	%	5
γ_f^{DSS}	%	4
$S_{u^A,ref}$	kN/m ²	2,33
$S_{u^C,TX}/S_{u^A}$	-	0,99
y_{ref}	m	0
$S_{u^A,inc}$	kN/m ² /m	5,8
S_{u^P}/S_{u^A}	-	1
τ_0/S_{u^A}	-	0,7
$S_{u^{DSS}}/S_{u^A}$	-	1
v_u	-	0,495
R eller r (ruhet)	-	0,3 og 0,9 (langsider ved pressing)
Ko (initiell)	-	0,5774

Tabell 11 Materialparametere for leire med økende styrke i dybden for sammenligning mot håndberegning

Materialparameter	Enhet	Leire
γ	kN/m ³	19
E_{50}^{ref}	kN/m ²	3 000
E_{oed}^{ref}	kN/m ²	2 000
E_{ur}^{ref}	kN/m ²	6 000
m	-	1
c	kN/m ²	2,33
ϕ	°	25
ψ	°	0
σ_t	kN/m ²	0
v_{ur}	-	0,2
p^{ref}	kN/m ²	100
K_{0nc}	-	0,5774
R_f	-	0,9
G_0^{ref}	kN/m ²	20 000
$\gamma_{0.7}$	-	0,0002
R eller r (ruhet)	-	0,3 og 0,9 (langsider ved pressing)
Ko (initiell)	-	0,5774

Tabell 12 Materialparametere for leire med økende styrke i dybden med Hardening Soil Small

4.1.2.3 Udrenert tilfelle i leire med konstant udrenert skjærstyrke (50 kPa)

Det er også valgt å se på et udrenert tilfelle i leire der den aktive udrenerte skjærstyrken er konstant lik 50 kPa, som vist i Tabell 13. En leire med udrenert skjærstyrke på 50 kPa er definert som middels fast til fast.

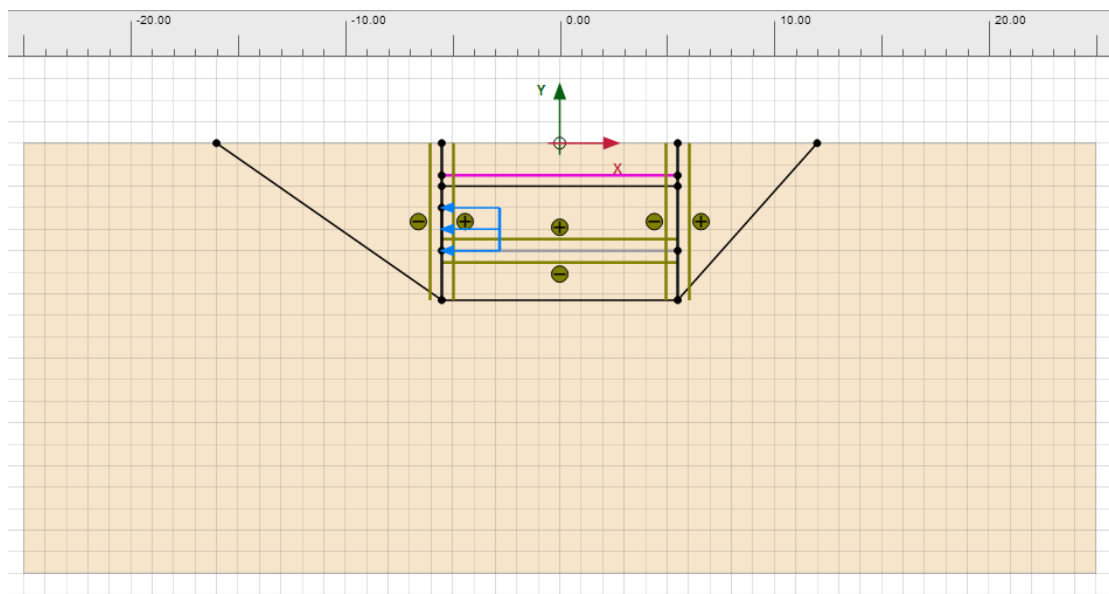
Materialparameter	Enhet	Leire
γ	kN/m ³	19
G_{ur}/S_u^A	-	500
γ_f^C	%	2
γ_f^E	%	5
γ_f^{DSS}	%	4
$S_{u^A,ref}$	kN/m ²	50
$S_{u^C,TX}/S_{u^A}$	-	0,99
y_{ref}	m	0
$S_{u^A,inc}$	kN/m ² /m	0
S_{u^P}/S_{u^A}	-	0,4
τ_0/S_{u^A}	-	0,7
$S_{u^{DSS}}/S_{u^A}$	-	0,7
v_u	-	0,495
R eller r (ruhet)	-	0,3 og 0,9 (langsider ved pressing)
Ko (initiell)	-	0,5774

Tabell 13 Materialparametere for leire med konstant styrke i dybden

4.2 Plaxis 2D

4.2.1 Modell

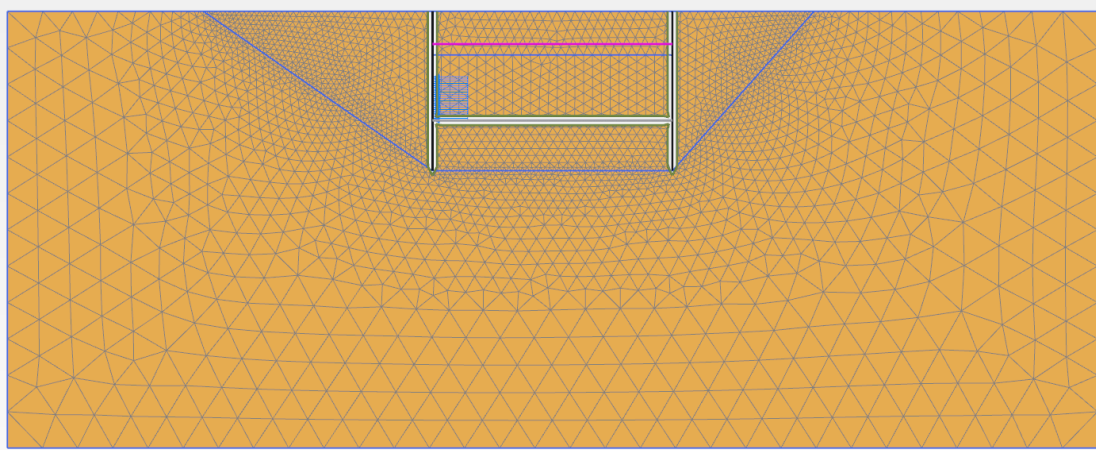
I modellen benyttes det 15-nodede elementer. Det er vanlig å benytte seg av aksesymmetri ved dimensjonering av rektangulær spunt i flatt terreng, men siden det presses i en retning, her i negativ x-retning som vist i Figur 33, er ikke det hensiktsmessig. Modellen er totalt 50 m i lengderetning (x-retning) og 20 m dyp(y-retning). Det benyttes *interfaces* for å angi en ruhet mellom konstruksjon og jord. Modellen benytter seg av standard randbetingelser som betyr at høyre og venstre rand er fastholdt mot forskyvning i horisontal retning, mens bunnen er fastholdt i både vertikal og horisontal retning. De skrå linjene man kan se i Figur 33 fra spuntbunn til overflaten er kun laget for å lettere kunne lage finere elementinndeling lokalt i området der bruddet skjer.



Figur 33 Modell i Plaxis 2D

4.2.2 Elementinndeling (mesh)

Det er modellert med flere forskjellige mesh for å kunne vurdere nøyaktigheten til resultatene. Felles for de alle er at meshet er gjort lokalt finere i området der bruddet ventes å skje. I Figur 34 vises det fineste meshet (flestep elementer) som består av 5 751 elementer og 46 893 noder.



Figur 34 Mesh i Plaxis 2D

4.2.3 Materialparametere for konstruksjonselementer

Parameterne for konstruksjonselementene angitt i Plaxis er gjengitt i Tabell 14 og Tabell 15. Konstruksjonselementene er alle modellert elastisk, som vil si at de aldri går til brudd. Elastisk momentkapasitet er derfor sjekket mot oppredende moment fra resultatene underveis og dimensjonene justert slik at man finner realistiske dimensjoner med tilhørende realistiske stivheter. For å finne et utgangspunkt ble spunt og stiver/pute initielt valgt på bakgrunn av grove håndberegninger. Parametere for betongplata er forenklet beregnet uarmert.

Materialparameter	Enhet	Spunt AU 20	Betongplate 30 cm
EA ₁	kN/m	3,7*10 ⁶	7,5*10 ⁶
EA ₂	kN/m	1,7*10 ⁵	7,5*10 ⁶
EI	kNm ² /m	89,1*10 ³	56,25*10 ³
v	-	0	0,2
w	kN/m/m	1,36	4,65 (sand), 4,35 (leire)

Tabell 14 Materialparametere for spunt og betongplate Plaxis 2D

Materialparameter	Enhet	HE-B 300
EA	kN	1,043*10 ⁶
L _{spacing}	m	1

Tabell 15 Materialparametere for stiver/pute Plaxis 2D

4.2.4 Beregningsfaser

Beregningsfasene kjørt i modellen er gjengitt i Tabell 16. Fasene representerer en tenkt anleggsprosess. I den initielle fasen etableres de eksisterende spenningstilstandene i den uberørte jorda. Så presser en ned spunt og graver ut 2 m jord innenfor spunt i fase 1. Deretter monteres stivere/puter i nivå -1,5 m i fase 2. I fase 3 foretas utgravning til full dybde, altså ned til -5 m. Støp av betongplate i bunnen av gropa gjøres så i fase 4. Deretter forsøkes det presset med 2000 kPa på bakveggen i fase 5. Fase 6 kjøres for å undersøke utgravningssikkerheten etter fase 3 der det ble gravd fullt ut.

Fase	Nr	Start fra fase	Beregning
Initiell fase	0		KO prosedyre
Utgraving til -2 m	1	Initiell fase	Plastisk
Montering av stiver i -1,5m	2	Utgraving til -2m	Plastisk
Utgraving til -5 m	3	Montering av stiver i -1,5m	Plastisk
Støp av betongplate	4	Utgraving til -5m	Plastisk
Pressing	5	Støp av betongplate	Plastisk
Sikkerhetsanalyse utgraving	6	Utgraving til -5m	Sikkerhet

Tabell 16 Beregningsfaser Plaxis 2D

4.2.5 Numeriske kontrollparametere benyttet i pressefase

Det er i de fleste beregningsfasene benyttet de forhåndsvalgte numeriske kontrollparametere, men særlig i pressefasen ble det erfart at å justere på parameterne enten var nødvendig eller kunne korte ned beregningstiden. Det som oftest ble gjort var å justere opp maks antall steg, endre på antall avlastingssteg tillatt, øke maks antall iterasjoner og justere ønsket maks og ønsket minimum antall iterasjoner. Maks antall avlastingssteg var helt nødvendig å justere for å virkelig kjøre helt til brudd og ikke bare oppdage skiftende mekanismer. Effekten av å justere de andre parameterne er forklart i avsnitt 2.6. I Figur 35 er kontrollparametere brukt for pressefasen i det drenerte tilfellet i sand vist. Figur 36 viser i det udrenerte tilfellet med økende styrke i dybden, mens Figur 37 viser det udrenerte tilfellet med konstant styrke.

Numerical control parameters	
Max cores to use	256
Max number of steps stored	1
Use default iter parameters	<input type="checkbox"/>
Max steps	10000
Tolerated error	0,01000
Max unloading steps	50
Max load fraction per step	0,5000
Over-relaxation factor	1,200
Max number of iterations	250
Desired min number of iterations	100
Desired max number of iterations	200
Arc-length control type	On ▼
Use line search	<input type="checkbox"/>
Use gradual error reduction	<input type="checkbox"/>

Figur 35 Numeriske kontrollparametere i pressefase Plaxis 2D drenert

Numerical control parameters	
Max cores to use	256
Max number of steps stored	1
Use default iter parameters	<input type="checkbox"/>
Max steps	10000
Tolerated error	0,01000
Max unloading steps	2
Max load fraction per step	0,5000
Over-relaxation factor	1,200
Max number of iterations	60
Desired min number of iterations	6
Desired max number of iterations	15
Arc-length control type	On ▼
Use line search	<input type="checkbox"/>
Use gradual error reduction	<input type="checkbox"/>

Figur 36 Numeriske kontrollparametere i pressefase Plaxis 2D udrenert økende su

Numerical control parameters	
Max cores to use	256
Max number of steps stored	1
Use default iter parameters	<input type="checkbox"/>
Max steps	1000
Tolerated error	0,01000
Max unloading steps	20
Max load fraction per step	0,5000
Over-relaxation factor	1,200
Max number of iterations	60
Desired min number of iterations	6
Desired max number of iterations	15
Arc-length control type	On ▼
Use line search	<input type="checkbox"/>
Use gradual error reduction	<input type="checkbox"/>

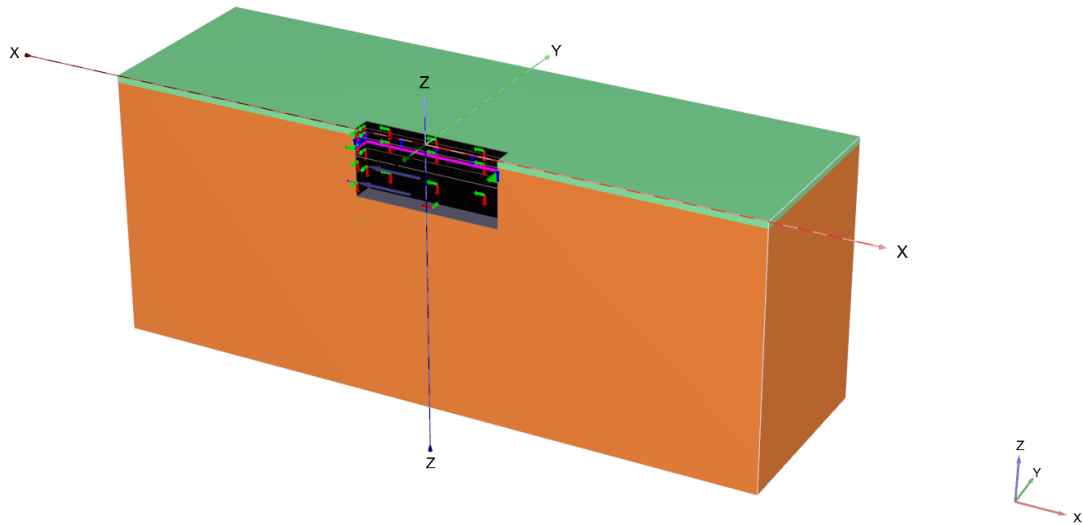
Figur 37 Numeriske kontrollparametere i pressefase Plaxis 2D udrenert konstant su

4.3 Plaxis 3D

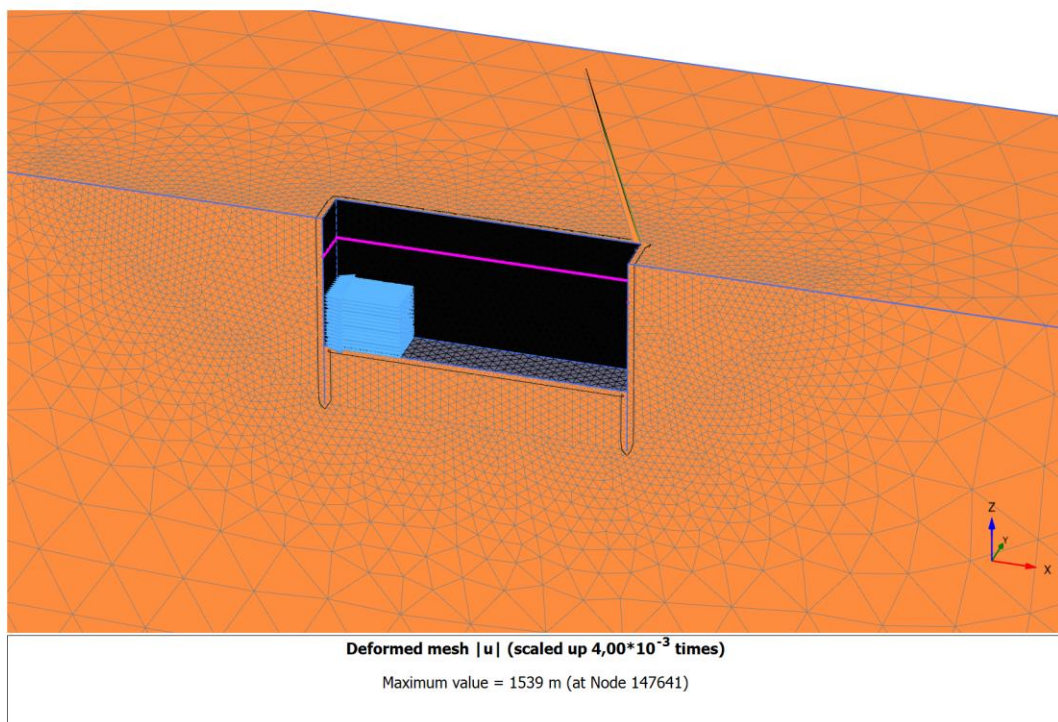
4.3.1 Modell

Modellen er totalt 50 m i lengderetning (x-retning), 15 m bred (y-retning) og 20 m dyp (z-retning) som vist i Figur 38. I modellen utnyttet det at det er symmetri om x-aksen. Dermed kan halve bredden fra den virkelige situasjonen modelleres. Det gjør at man kan spare mye beregningstid. Det presses i negativ x-retning og puter/stivere er orientert slik at momentet opptas om den sterke aksen. Det benyttes også her *interfaces* for å angi en ruhet mellom konstruksjon og jord. Modellen benytter seg av standard randbetingelser som i 3D betyr at vertikale rander er fastholdt mot forskyvning i horisontal retning, mens bunnen er fastholdt i både vertikal og horisontal retning.

I det drenerte tilfellet måtte *tension-cut off* skrues av i øverste del av jordlaget. Dette ble gjort i en tykkelse på 0,5 m. Med *tension cut-off* på viste det seg at noen elementer i hjørnet ved fremveggen fikk vannvittige deformasjoner (over 1 km!) som vist i Figur 39.



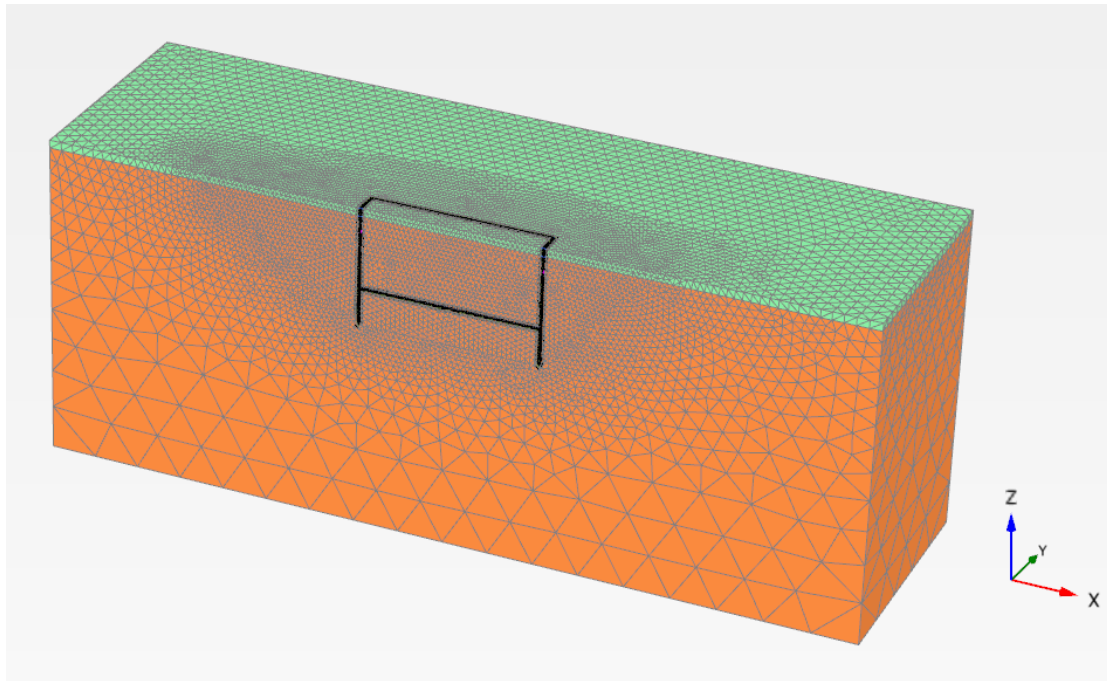
Figur 38 Modell i Plaxis 3D



Figur 39 Problem med modell i Plaxis 3D for drenert tilfelle

4.3.2 Elementinndeling (mesh)

Det er modellert med flere forskjellige mesh for å kunne vurdere nøyaktigheten til resultatene. Felles for de alle er at meshet er gjort lokalt finere i området der bruddet ventes å skje. I Figur 40 vises et av meshene brukt i Plaxis 3D. Det består av 172 390 elementer og 257 483 noder.



Figur 40 Mesh i Plaxis 3D

4.3.3 Materialparametere for konstruksjonselementer

Materialparametere for konstruksjonselementene valgt i Plaxis er gjengitt i Tabell 17 og Tabell 18. Det er valgt å benytte de samme dimensjonene på konstruksjonselementene i Plaxis 3D som 2D. For å finne materialparametere som angis i Plaxis 3D for spunt, er sammenhengende anbefalt fra Tabell 8 og ligning 20-26 benyttet. Det er gjort noen videre antagelser etter forslag fra Plaxis (2015a). Effektivt tverrsnitt for skjær over vertikal retning A_{13} er antatt lik $1/3$ av det totale tverrsnittet, mens effektivt tverrsnitt for skjær over horisontal retning A_{23} er antatt $1/10$ av det totale. I_2 er antatt lik $I_1/500$ etter nærmere overslag, selv om Plaxis (2015a) her foreslår $I_1/20$. I_{12} er antatt lik $I_1/50$ og også nedjustert fra forslaget på $I_1/10$.

Materialparameter	Enhet	Spunt AU 20	Betongplate 30 cm
d	m	0,42	0,3
γ	kN/m ³	2,6 (sand), 2,5 (leire)	15,5 (sand), 14,5 (leire)
E ₁	kN/m ²	14,4*10 ⁶	25*10 ⁶
E ₂	kN/m ²	28,9*10 ³	25*10 ⁶
ν_{12}	-	0	0,2
G ₁₂	kN/m ²	14,4*10 ⁴	10,42*10 ⁶
G ₁₃	kN/m ²	14,8*10 ⁵	10,42*10 ⁶
G ₂₃	kN/m ²	44,3*10 ⁴	10,42*10 ⁶

Tabell 17 Materialparametere for spunt og betongplate Plaxis 3D

Materialparameter	Enhet	HE-B 300
A	m ²	14,9*10 ⁻³
γ	kN/m ³	78,5
E	kN/m ²	210*10 ⁶
I ₃	m ⁴	251,7*10 ⁻⁶
I ₂	m ⁴	85,6*10 ⁻⁶

Tabell 18 Materialparametere for stiver/pute Plaxis 3D

4.3.4 Beregningsfaser

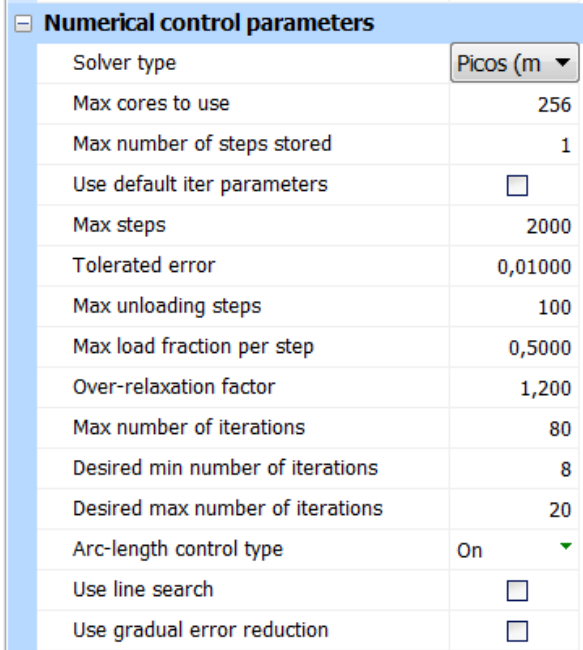
Beregningsfasene er identiske som i Plaxis 2D, bortsett fra at pressekraften i fase 5 er satt til 4000 kPa i stedet for 2000 kPa, samtidig som ruheten på sideveggen justeres fra 0,3 til 0,9.

Fase	Nr	Start fra fase	Beregning
Initiell fase	0		KO prosedyre
Utgraving til -2m	1	Initiell fase	Plastisk
Montering av stiver i -1,5m	2	Utgraving til -2m	Plastisk
Utgraving til -5m	3	Montering av stiver i -1,5m	Plastisk
Støp av betongplate	4	Utgraving til -5m	Plastisk
Pressing	5	Støp av betongplate	Plastisk
Sikkerhetsanalyse utgraving	6	Utgraving til -5m	Sikkerhet

Tabell 19 Beregningsfaser Plaxis 3D

4.3.5 Numeriske kontrollparametere benyttet i pressefase

Figur 41 til Figur 43 viser de numeriske kontrollparameterne benyttet for pressefase i Plaxis 3D for de forskjellige tilfellene.



Numerical control parameters	
Solver type	Picos (m)
Max cores to use	256
Max number of steps stored	1
Use default iter parameters	<input type="checkbox"/>
Max steps	2000
Tolerated error	0,01000
Max unloading steps	100
Max load fraction per step	0,5000
Over-relaxation factor	1,200
Max number of iterations	80
Desired min number of iterations	8
Desired max number of iterations	20
Arc-length control type	On
Use line search	<input type="checkbox"/>
Use gradual error reduction	<input type="checkbox"/>

Figur 41 Numeriske kontrollparametere i pressefase Plaxis 3D drenert

Numerical control parameters	
Solver type	Picos (mul) ▼
Max cores to use	256
Max number of steps stored	50
Use default iter parameters	<input type="checkbox"/>
Max steps	200
Tolerated error	0,01000
Max unloading steps	2
Max load fraction per step	0,5000
Over-relaxation factor	1,200
Max number of iterations	60
Desired min number of iterations	6
Desired max number of iterations	15
Arc-length control type	On ▼
Use line search	<input type="checkbox"/>
Use gradual error reduction	<input type="checkbox"/>

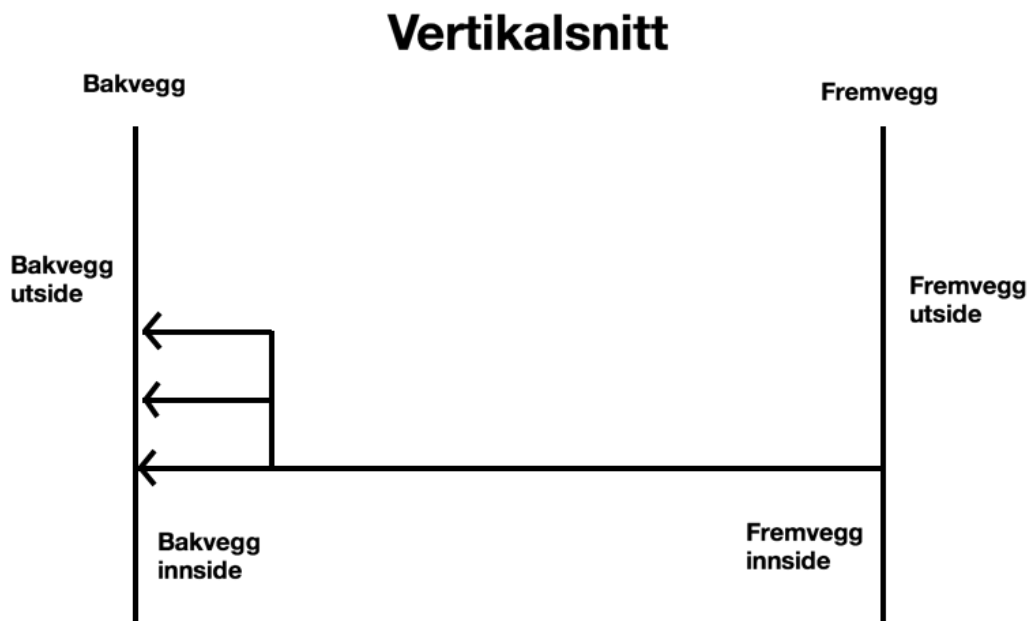
Figur 42 Numeriske kontrollparametere i pressefase Plaxis 3D udrenert økende su

Numerical control parameters	
Solver type	Picos (mul) ▼
Max cores to use	256
Max number of steps stored	50
Use default iter parameters	<input type="checkbox"/>
Max steps	200
Tolerated error	0,01000
Max unloading steps	2
Max load fraction per step	0,5000
Over-relaxation factor	1,200
Max number of iterations	60
Desired min number of iterations	6
Desired max number of iterations	15
Arc-length control type	On ▼
Use line search	<input type="checkbox"/>
Use gradual error reduction	<input type="checkbox"/>

Figur 43 Numeriske kontrollparametere i pressefase Plaxis 3D udrenert konstant su

5 Resultater

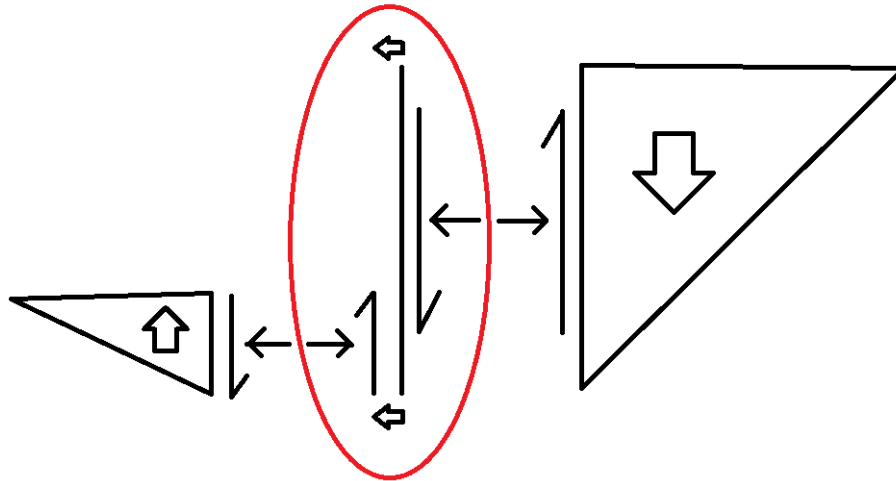
I presentasjonen av resultatene er det benyttet forskjellige betegnelser for å beskrive hvor resultatene stammer fra. I Figur 44 og Figur 45 er disse betegnelse vist. Spuntveggen det presses mot betegnes som bakveggen, mens den motsatte betegnes fremveggen. Utside betegnes som flaten vendt bort fra pressegruppa, mens innside er vendt inn. Når det vises skjærspenning på spuntveggene er blått utsiden, mens grått beskriver innsiden. Pilene som beskriver retninger viser jordens virkning på pressegruppa, som vist med rød markering i Figur 46. Skjærspenningsdiagrammene viser dermed jordens relative forskyvning i forhold til pressegruppa. I Plaxis er trykkspenninger definert med negativ verdi.



Figur 44 Beskrivelse av betegnelser brukt for presentasjon av resultater (vertikalsnitt)



Figur 45 Beskrivelse av betegnelser brukt for presentasjon av resultater (horizontalsnitt)



Figur 46 Skisse for å beskrive hvilke spenninger med retning som presenteres

5.1 Håndberegninger

Jordtrykkene er beregnet etter beregningsgangen vist i Tabell 1 for drenert tilfelle (effektivspenningsanalyse) og Tabell 2 for udrenert tilfelle (totalspenningsanalyse). Det er antatt positiv ruhet både på aktiv og passiv side. Det er ikke medregnet at vekten av pressegruppa vil føre til økte vertikalspenninger under pressegruppa.

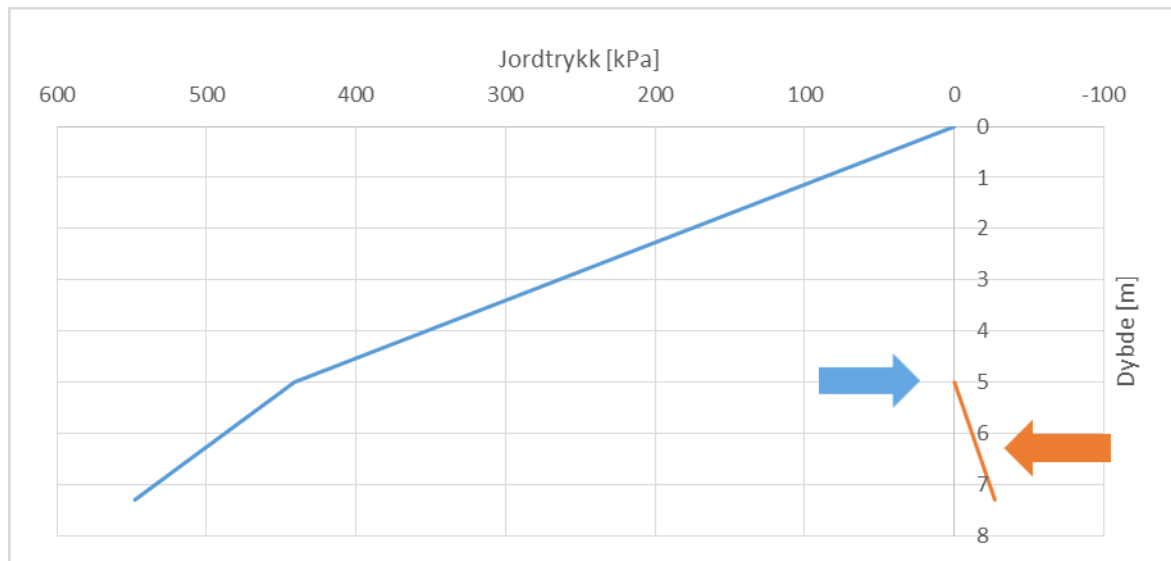
5.1.1 Drenert tilfelle i sand

5.1.1.1 Jordtrykk

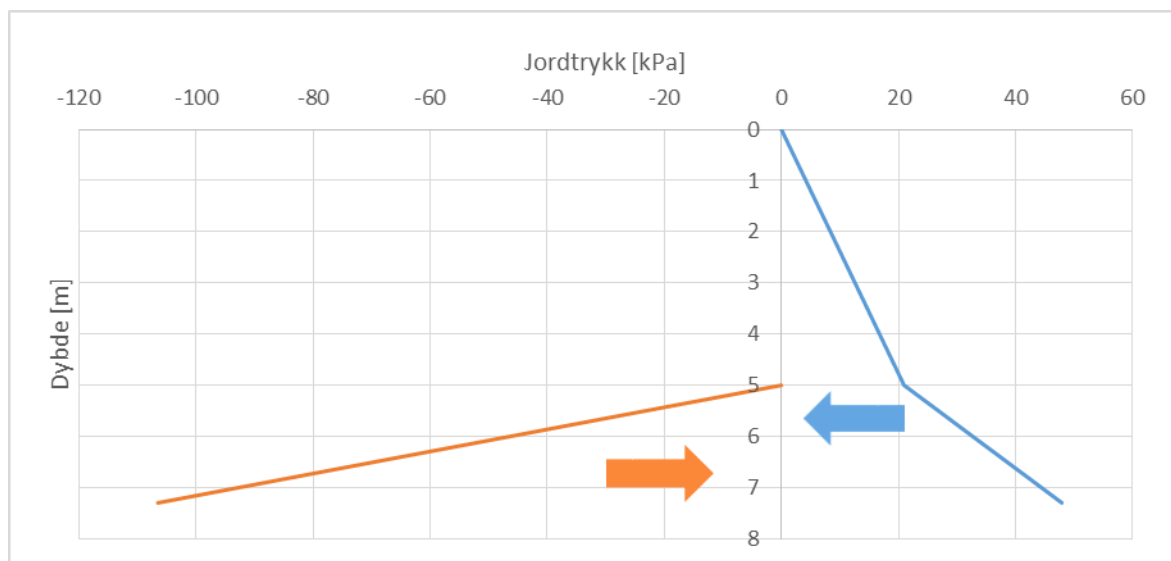
I Figur 47 er jordtrykk på bakveggen under pressing vist, mens Figur 48 viser jordtrykkene på fremveggen. De blå linjene viser jordtrykket på utsiden, mens de oransje viser på innsiden av pressegruppa. Det vises en tydelig knekk i jordtrykket på 5 m, som skyldes grunnvannsnivået. Ved pressing vil det på utsiden av bakveggen oppnås passivt jordtrykk. På innsiden av bakveggen vil det oppstå aktivt jordtrykk. Om det mobiliseres fullt passivt jordtrykk ser man fra Tabell 20 at det fås en total kraftresultant tilsvarende 2210 kN/m. Over 2 m (høyden på forankringsklossen) tilsvarer dette 1105 kPa. På fremveggen fås aktivt jordtrykk på utsiden, men det på innsiden oppstår passivt jordtrykk. Ved håndberegning bør man da ved full mobilisering kunne presse med 1455,5 kPa på bakgrunn av jordtrykk på frem og bakvegg.

Kraftresultant fra passivt jordtrykk bakvegg	2241 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk bakvegg	-31 kN/m
Sum bakvegg	2210 kN/m
Bidrag fra bakvegg til maksimal pressekraft	1105 kPa
Kraftresultant fra passivt jordtrykk fremvegg	122,5 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk fremvegg	-131,5 kN/m
Sum fremvegg	-9 kN/m
Bidrag fra fremvegg til maksimal pressekraft	-4,5 kPa
Totalt bidrag fra frem og bakvegg til pressekraft	1100,5 kPa

Tabell 20 Kraftresultanter fra jordtrykk ved håndberegning av pressing drenert



Figur 47 Jordtrykk på bakvegg ved pressing etter håndberegning drenert



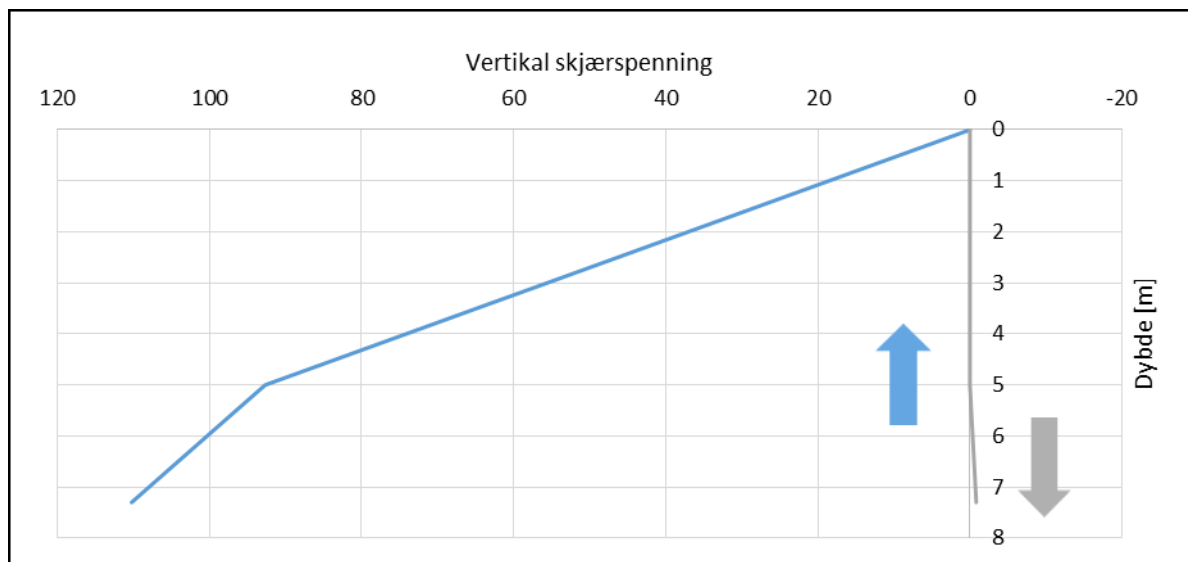
Figur 48 Jordtrykk på fremvegg ved pressing etter håndberegning drenert

5.1.1.2 Skjærspenning

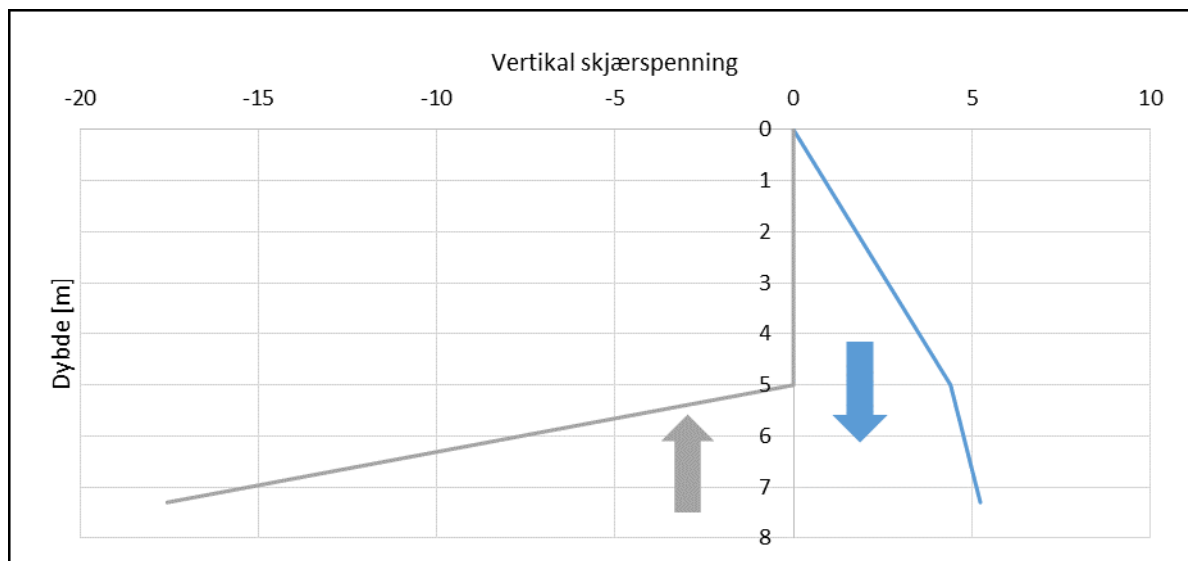
Skjærspenningene som kan opptre på pressegrøpa er vist i Figur 49 og Figur 50. Blå beskriver utside, mens grå viser innsiden. Pilene viser i hvilken retning skjærspenningene virker. Det legges merke til den store oppad rettede skjærspenningen på bakveggen og at den totale summen, vist i Tabell 21, er langt ifra å tilfredsstillende vertikale likevekt.

Kraftresultant fra skjær utside bakvegg	465 kN/m
Kraftresultant fra skjær innside bakvegg	-1 kN/m
Sum bakvegg	464 kN/m
Kraftresultant fra skjær utside fremvegg	-22 kN/m
Kraftresultant fra skjær innside fremvegg	20 kN/m
Sum fremvegg	-2 kN/m
Totalt fra frem og bakvegg	462 kN/m

Tabell 21 Kraftresultanter fra skjær ved håndberegning av pressing drenert



Figur 49 Vertikal skjærspenning på bakvegg ved håndberegning av pressing drenert



Figur 50 Vertikal skjærspenning på fremvegg ved håndberegning av pressing drenert

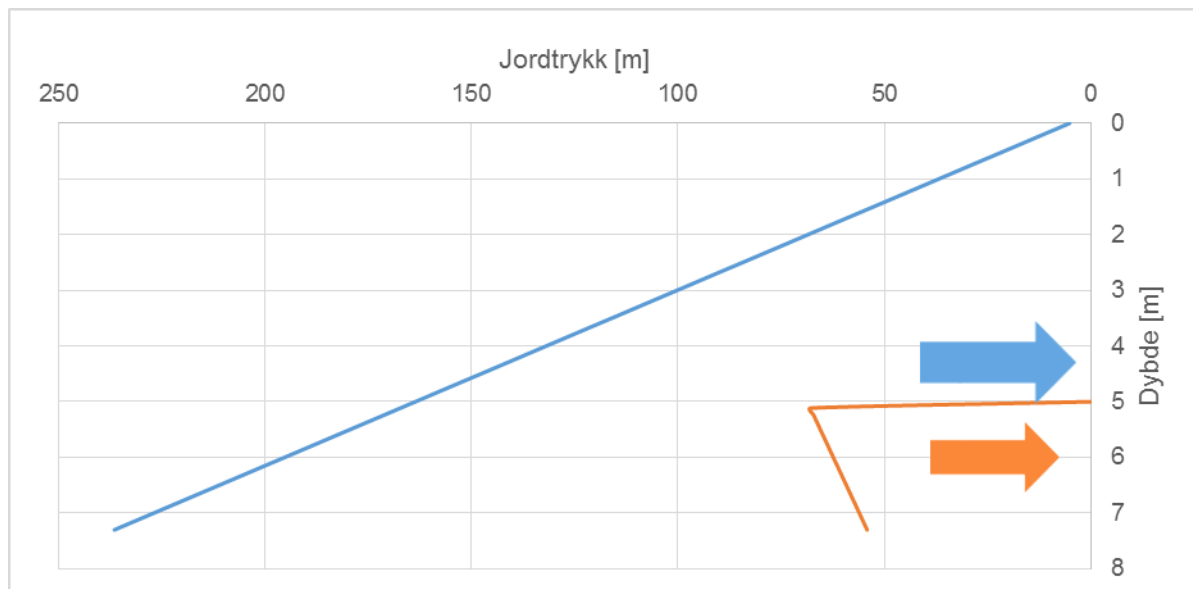
5.1.2 Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden

5.1.2.1 Jordtrykk

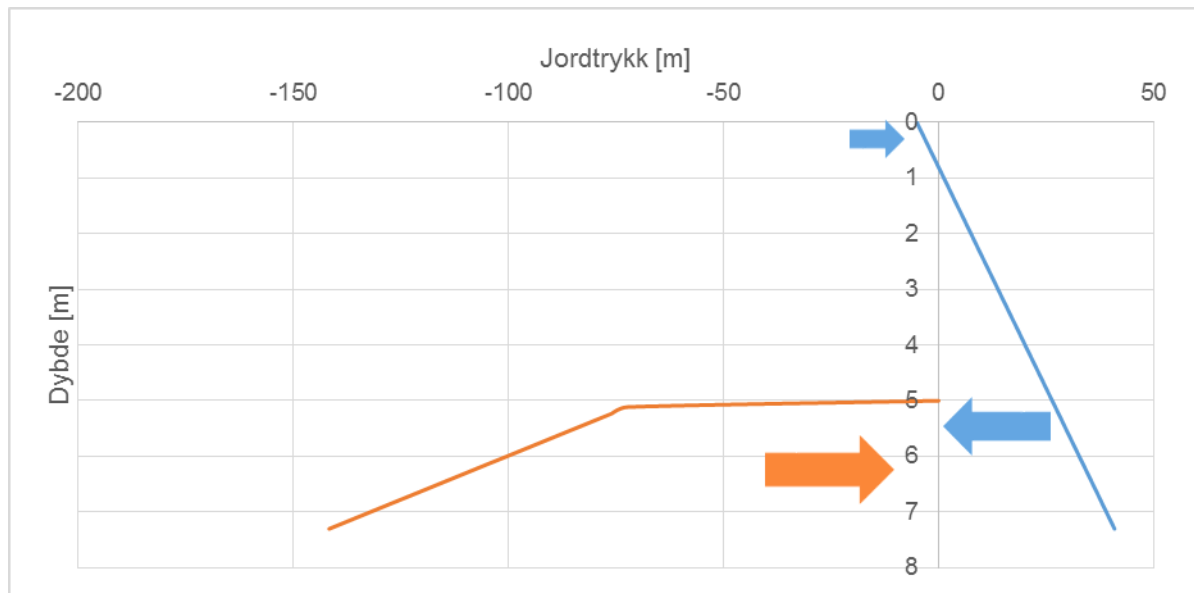
I dette det udrenert tilfellet, med økende styrke i dybden, fås noen steder en strekkstyrke eller sug som vist i Figur 51 og Figur 52. Det vises på innsiden av bakveggen og i toppen på fremveggen. Dette suget bidrar til å øke pressekraften man kan bruke og det kan diskuteres om dette er noe man reelt kan utnytte. Om pålastningen skjer i et svært kort tidsrom i en tett leire kan man antageligvis få dette suget. Over en litt lengre periode er det vanlig at man ser bort ifra det. Om det går lenger tid kan en også tenke seg at det dannes en sprekk som kan fylles med vann og dermed skape et vanntrykk. Derfor er det valgt å inkludere suget som et tillegg i parentes i Tabell 22. Hvis man faktisk skulle dimensjonere en pressegrøp er det nemlig naturlig å iallfall se bort fra det om ikke også anta vannfylt sprekk.

Kraftresultant fra passivt jordtrykk bakvegg	882 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk bakvegg	(137) kN/m
Sum bakvegg	882 (1019) kN/m
Bidrag fra bakvegg til maksimal pressekraft	441 (509,5) kPa
Kraftresultant fra passivt jordtrykk fremvegg	238 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk fremvegg	-132,5 (-130,5) kN/m
Sum fremvegg	105,5 (107,5) kN/m
Bidrag fra fremvegg til maksimal pressekraft	53 (54) kPa
Totalt bidrag fra frem og bakvegg til pressekraft	494 (563) kPa

Tabell 22 Kraftresultanter fra jordtrykk ved håndberegning av pressing udrenert økende su



Figur 51 Jordtrykk på bakvegg ved pressing etter håndberegning udrenert økende su



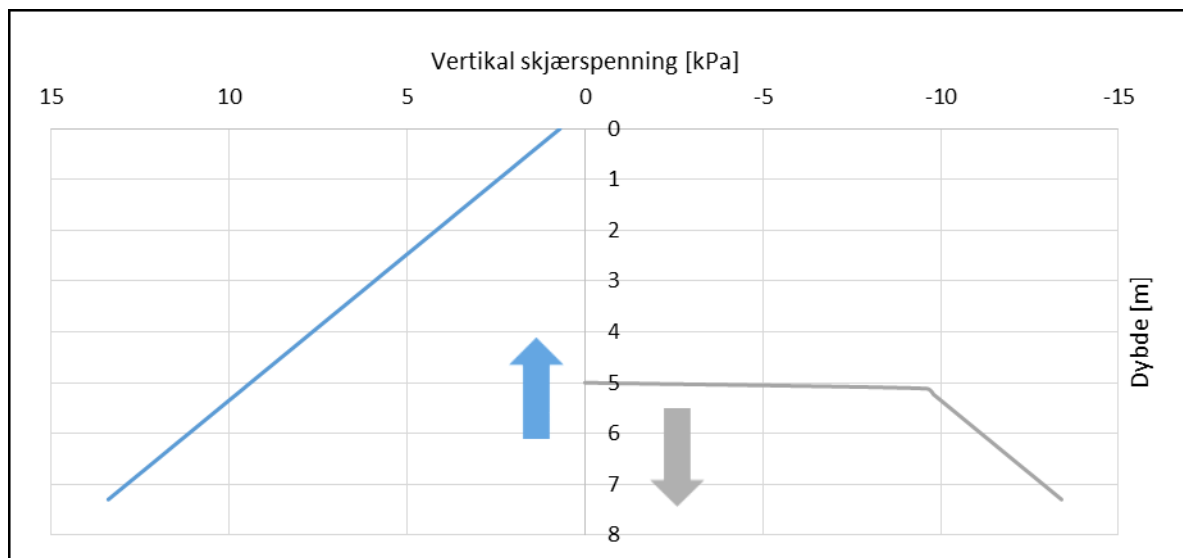
Figur 52 Jordtrykk på fremvegg ved pressing etter håndberegning udrenert økende su

5.1.2.2 Skjærspenning

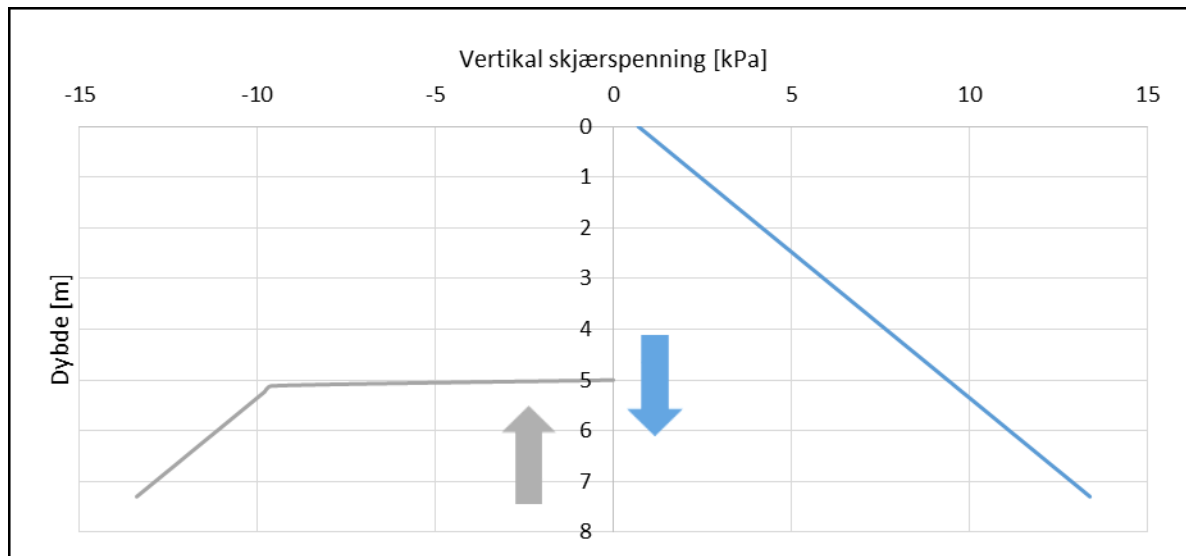
Av Figur 53 og Figur 54 vises det at skjærspenningene blir like for bakvegg og fremvegg, men motsatt rettet. Resultantene fra Tabell 23 viser at det dermed er vertikal likevekt.

Kraftresultant fra skjær utside bakvegg	51,5 kN/m
Kraftresultant fra skjær innside bakvegg	-26 kN/m
Sum bakvegg	25,5 kN/m
Kraftresultant fra skjær utside fremvegg	-51,5 kN/m
Kraftresultant fra skjær innside fremvegg	26 kN/m
Sum fremvegg	-25,5kN/m
Totalt fra frem og bakvegg	0 kN/m

Tabell 23 Kraftresultanter fra skjær ved håndberegning av pressing udrenert økende su



Figur 53 Vertikal skjærspenning på bakvegg ved håndberegning av pressing udrenert økende su



Figur 54 Vertikal skjærspenning på fremvegg ved håndberegning av pressing udrenert økende s_u

5.1.3 Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke (50 kPa)

5.1.3.1 Jordtrykk

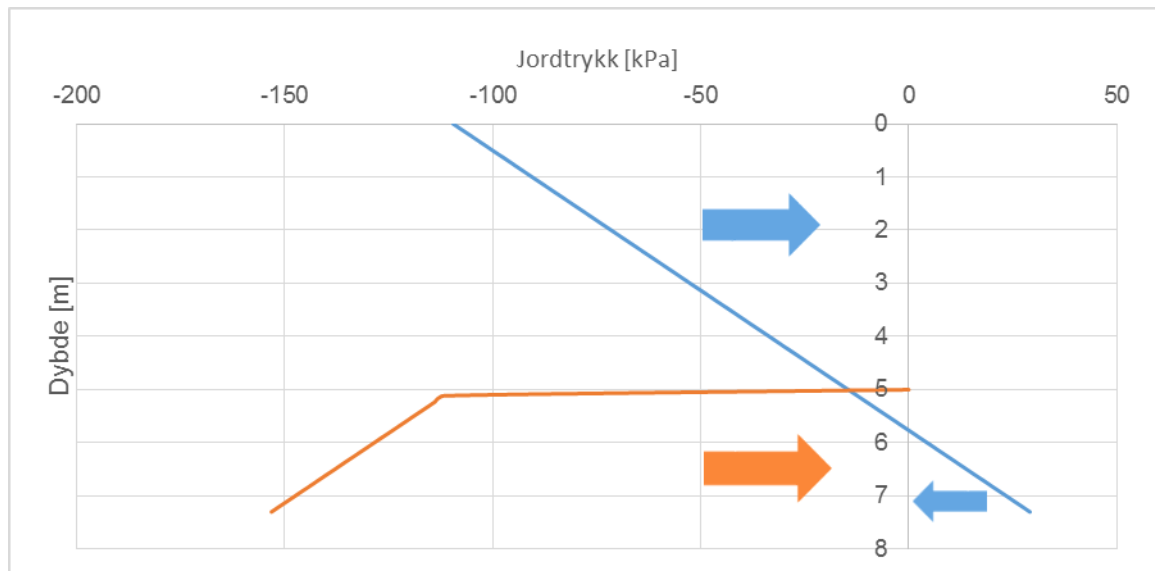
Av jordtrykkene vist i Figur 55 og Figur 56 legges det spesielt merke til det store suget på utsiden av fremveggen og innsiden av bakveggen. Dette er, som tidligere nevnt, bidrag til pressekraft som kan diskuteres. De er derfor, som tidligere, inkludert i parentes i Tabell 24.

Kraftresultant fra passivt jordtrykk bakvegg	1306 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk bakvegg	(195,5) kN/m
Sum bakvegg	1306 (1501,5) kN/m
Bidrag fra bakvegg til maksimal pressekraft	653 (751) kPa
Kraftresultant fra passivt jordtrykk fremvegg	296 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk fremvegg	-22,5 (293,5) kN/m
Sum fremvegg	273,5 (589,5) kN/m
Bidrag fra fremvegg til maksimal pressekraft	137 (295) kPa
Totalt bidrag fra frem og bakvegg til pressekraft	790 (1046) kPa

Tabell 24 Kraftresultanter fra jordtrykk ved håndberegning av pressing udrenert konstant s_u



Figur 55 Jordtrykk på bakvegg ved pressing etter håndberegning udrenert konstant su



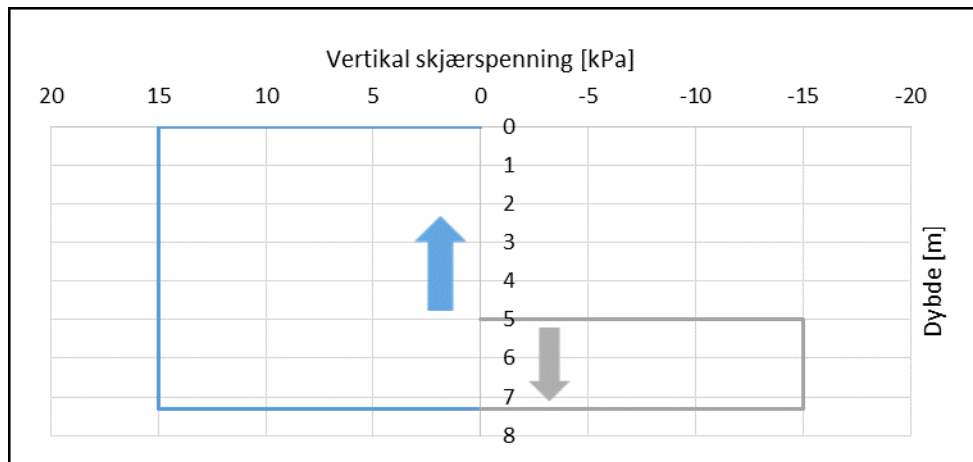
Figur 56 Jordtrykk på fremvegg ved pressing etter håndberegning udrenert konstant su

5.1.3.2 Skjærspenning

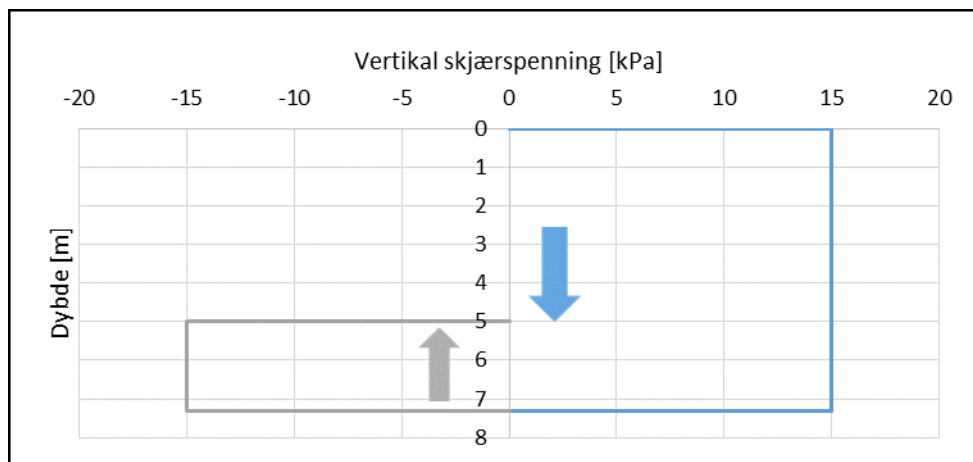
Figur 57 og Figur 58 viser at skjærspenningene blir like, men motsatt rettet. Dermed er det vertikal likevekt som vist i Tabell 25.

Kraftresultant fra skjær utside bakvegg	109,5 kN/m
Kraftresultant fra skjær innside bakvegg	-34,5 kN/m
Sum bakvegg	75 kN/m
Kraftresultant fra skjær utside fremvegg	-109,5 kN/m
Kraftresultant fra skjær innside fremvegg	34,5 kN/m
Sum fremvegg	-75/m
Totalt fra frem og bakvegg	0 kN/m

Tabell 25 Kraftresultanter fra skjær ved håndberegning av pressing udrenert konstant su



Figur 57 Vertikal skjærspenning på bakvegg ved håndberegning av pressing udrenert konstant $s_u=50$ kPa



Figur 58 Vertikal skjærspenning på fremvegg ved håndberegning av pressing udrenert konstant $s_u=50$ kPa

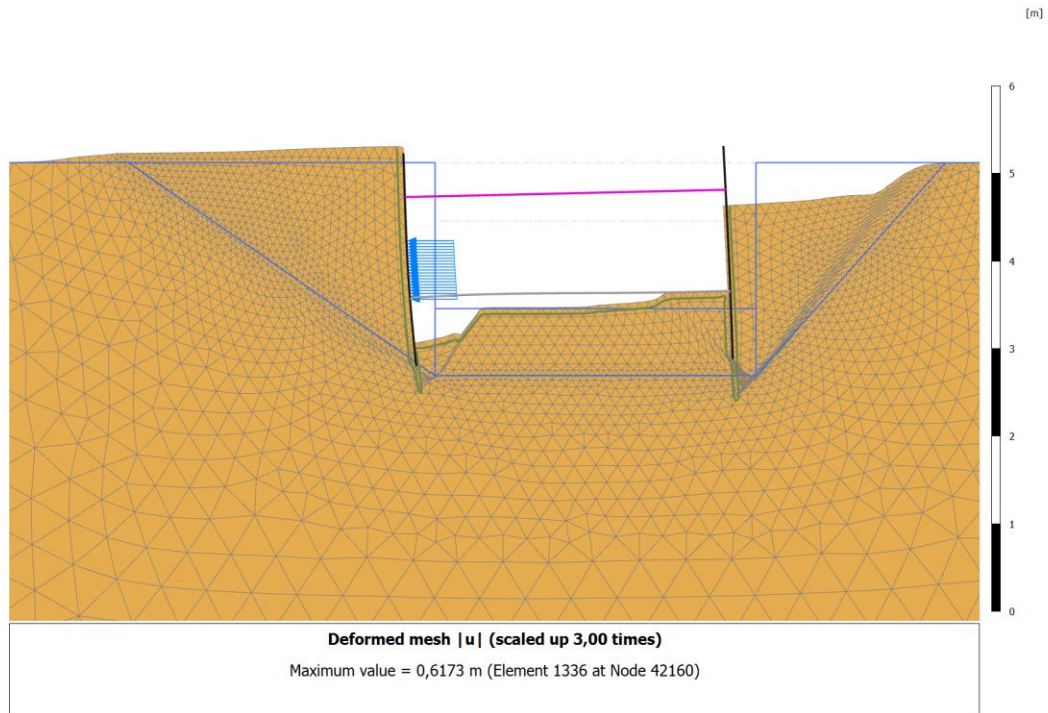
5.2 Plaxis 2D

I det følgende er resultatene med finest elementinndeling (*mesh*) vist.

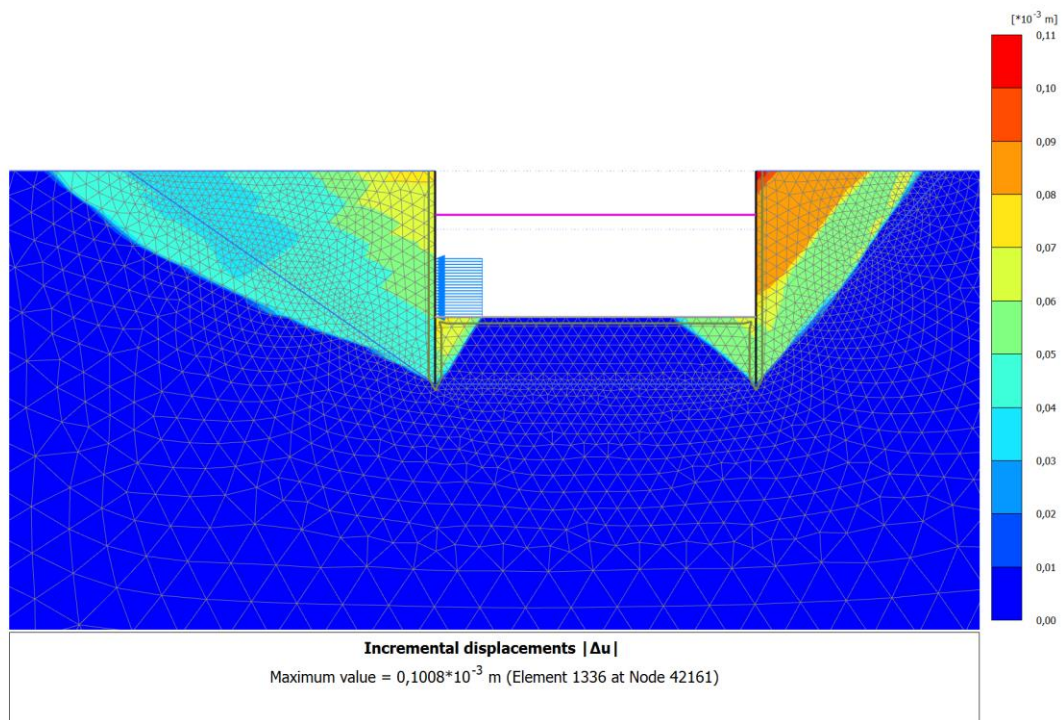
5.2.1 Drenert tilfelle i sand

5.2.1.1 Bruddflater

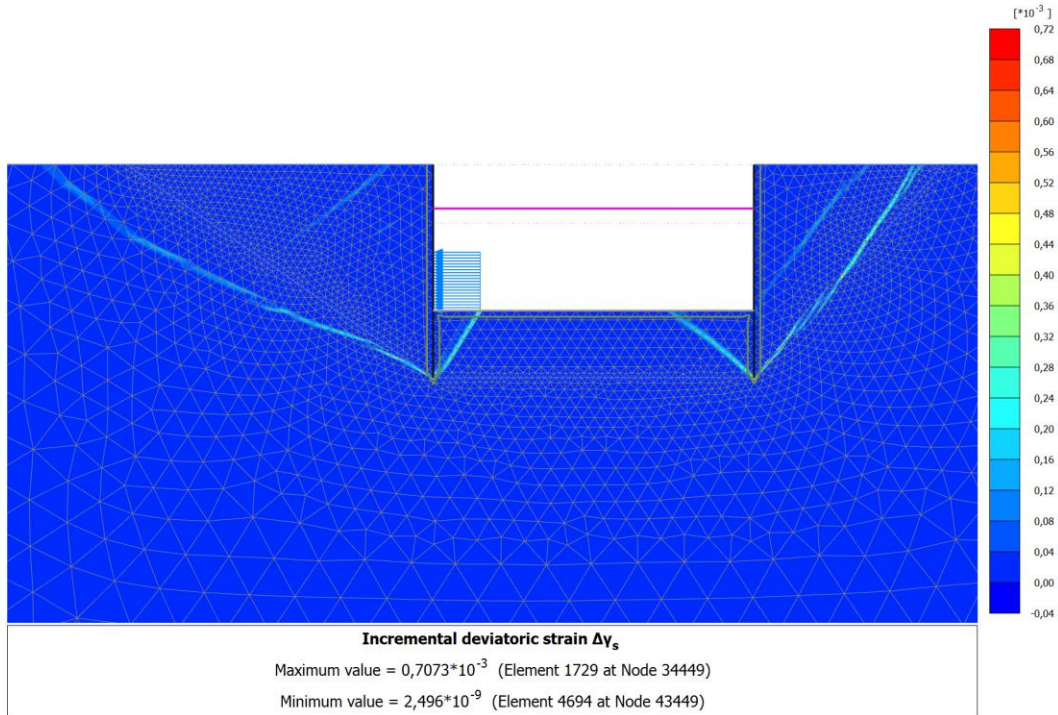
Etter pressing observeres det som vist i Figur 59 at en jordkile glir ned langs veggene i forkant, mens en større jordkile presses opp i bakkant. Det observeres også en jordkile som glir ned på innsiden av bakveggen og en som glir opp på innsiden av fremveggen. Bruddlinjene observeres enda klarere med inkrementelle forskyvninger og inkrementelle deviatoriske tøyninger som vist i Figur 60 og Figur 61.



Figur 59 Deformert mesh Plaxis 2D drenert



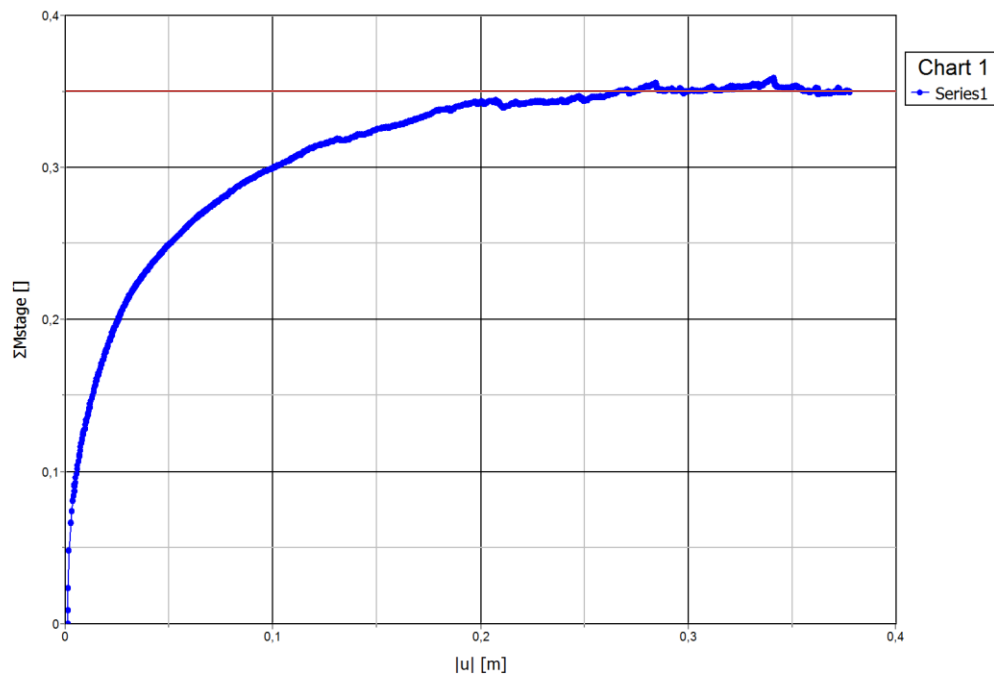
Figur 60 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 2D drenert



Figur 61 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 2D drenert

5.2.1.2 Påført pressekraft/last-forskyvningskurve

Det ble som tidligere nevnt i Plaxis 2D forsøkt påført en last på 2000 kPa. Denne lasten har Plaxis påført stegvis helt til den observerer et grunnbrudd definert av maks antall avlastingssteg tillatt. I enkelte tilfeller, som her, er pressefasen stoppet manuelt når det av last-forskyvningskurven virker å gå til brudd. I Figur 62 kan man se pålastningen plottet mot forskyvningen av punkt A, som er toppen av bakveggen. Man kan vurdere hva som kan være en fornuftig bruddlast ved å trekke den røde linjen i Figur 62. Da kommer man frem til 0,35 ganget med 2000 kPa som er 700 kPa i bruddlast.



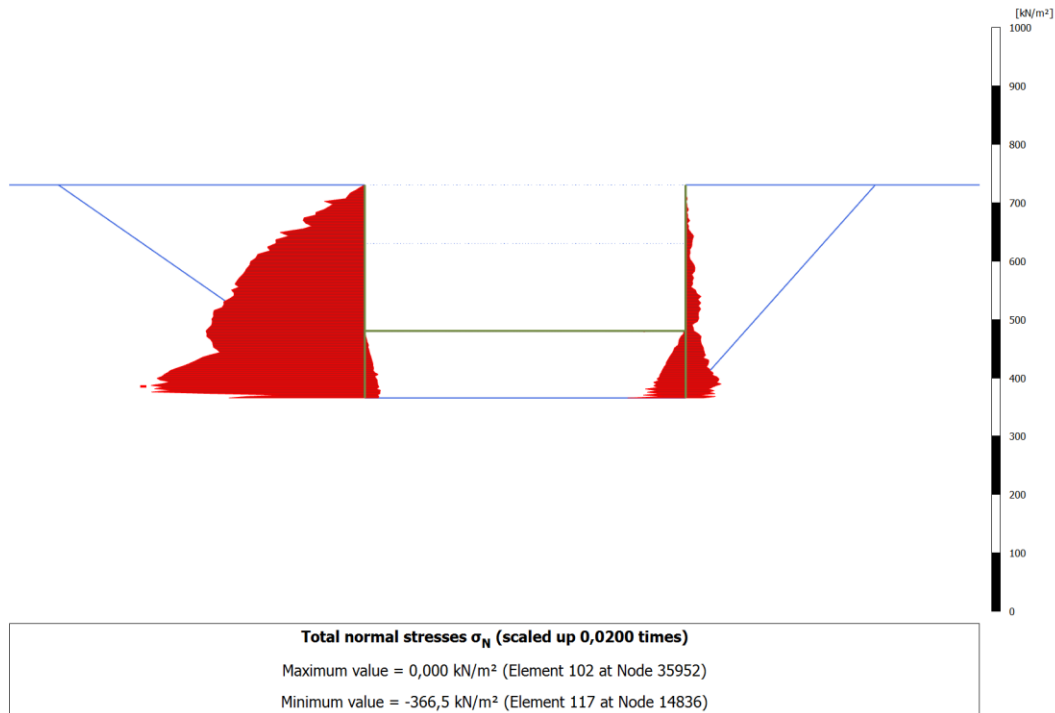
Figur 62 Påført last mot forskyvning Plaxis 2D drenert

5.2.1.3 Jordtrykk

Som vist i Figur 63 øker jordtrykkene relativt lineært mot dybden. Figuren viser også at jordtrykket under betongplata er neglisjerbart. Kraftresultantene fra jordtrykkene er vist i Tabell 26 og summen stemmer bra med pålastningen på 700 kPa i Plaxis.

Kraftresultant fra passivt jordtrykk bakvegg	1503,5 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk bakvegg	-31,5 kN/m
Sum bakvegg	1492 kN/m
Bidrag fra bakvegg til maksimal pressekraft	736 kPa
Kraftresultant fra passivt jordtrykk fremvegg	77 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk fremvegg	-143,5 kN/m
Sum fremvegg	-66,5 kN/m
Bidrag fra fremvegg til maksimal pressekraft	-33 kPa
<u>Totalt bidrag fra frem og bakvegg til pressekraft</u>	<u>703 kPa</u>

Tabell 26 Kraftresultanter fra jordtrykk Plaxis 2D drenert



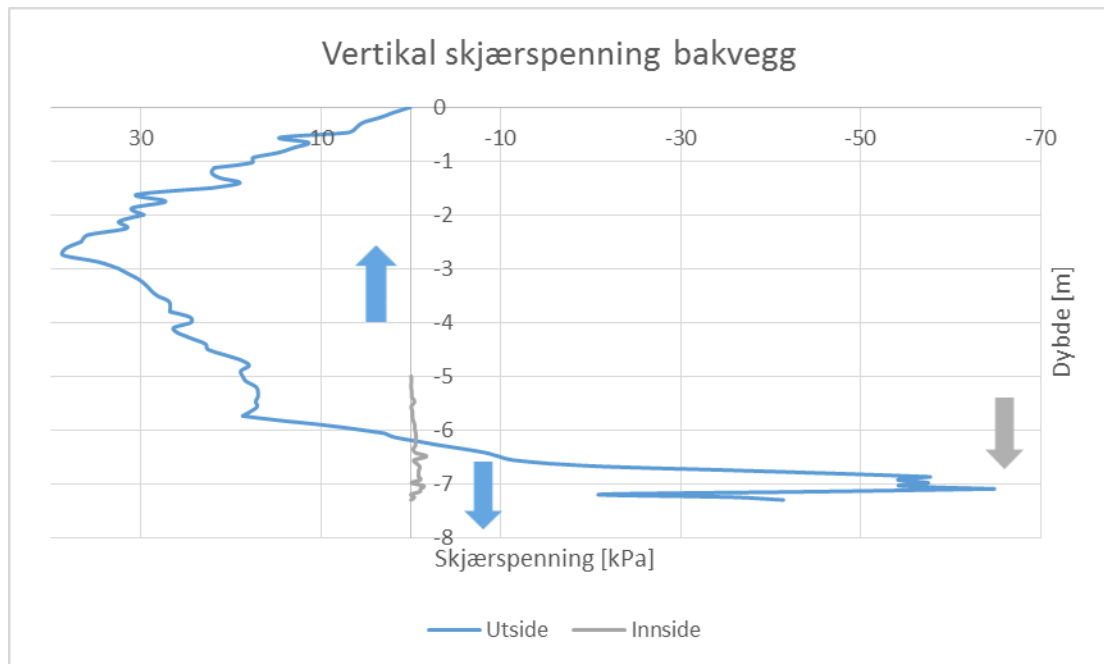
Figur 63 Jordtrykk ved pressing Plaxis 2D drenert

5.2.1.4 Skjærspenning

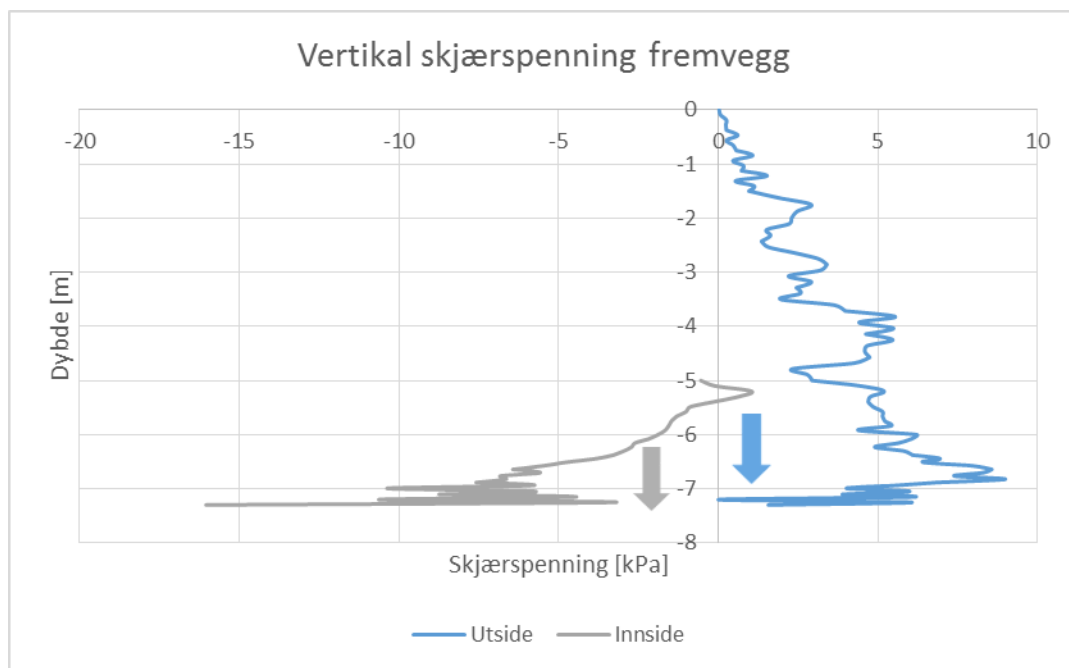
I Figur 64 og Figur 65 vises den opprettede vertikale skjærspenningen på henholdsvis bakveggen og fremveggen. Det bemerkes at skjærspenningen på utsiden av bakveggen øker relativt lineært mot -3m før den avtar og faktisk snur retning mot spuntbunn. Skjærspenningen under betongplata viser seg å være neglisjerbar som vist i Figur 66. Tabell 27 viser kraftresultantene fra skjær på pressegrøpa. Vekten av pressegrøpa (spunt og betongplate) er ca. -71 kN/m og dermed er de tilnærmede resultatene i nærheten av vertikal likevekt. Det viser seg at skjærspenningen på innsiden av fremveggen virker nedover. Jorda i den passive jordtrykkssonen på innsiden av fremveggen prøver altså å holde igjen for forskyvningen vist i Figur 67. For å lese av skjærspenningsretningene er det sett på aksialkraftdiagrammene til spuntene. Dette fordi det ikke var helt lett å forstå hvilken retning Plaxis angir i sine skjærspenningsdiagrammer.

Kraftresultant fra skjær utside bakvegg	103 kN/m
Kraftresultant fra skjær innside bakvegg	-1 kN/m
Sum bakvegg	102 kN/m
Kraftresultant fra skjær utside fremvegg	-24,5 kN/m
Kraftresultant fra skjær innside fremvegg	-7,5 kN/m
Sum fremvegg	-32 kN/m
Totalt fra frem og bakvegg	70 kN/m

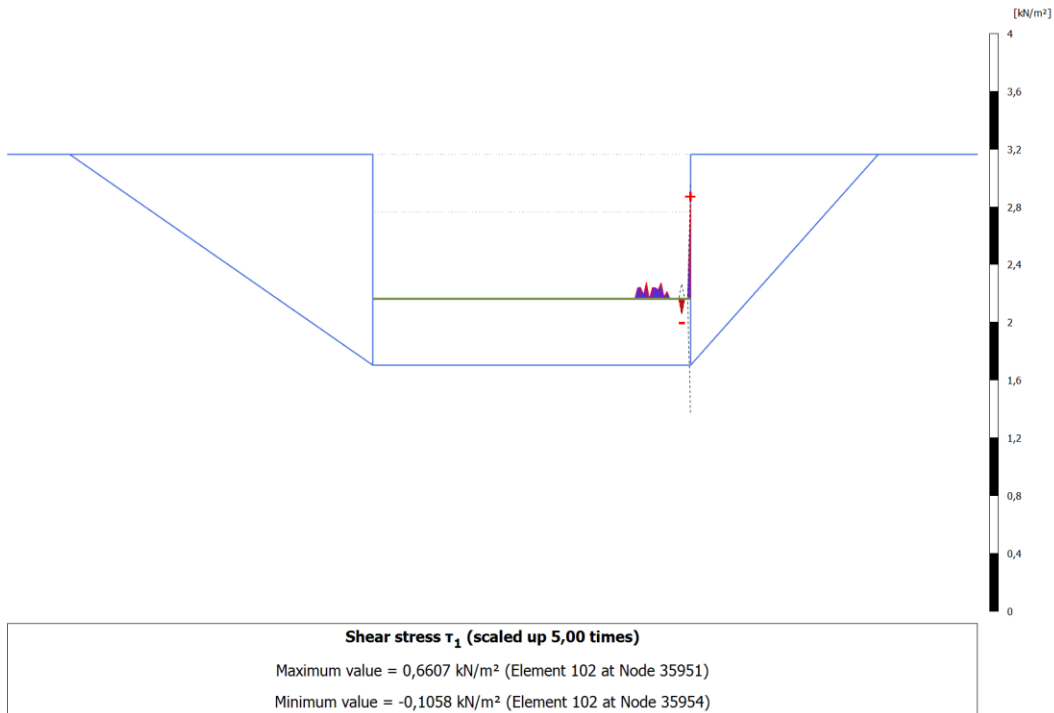
Tabell 27 Kraftresultanter fra skjær Plaxis 2D drenert



Figur 64 Vertikal skjærspenning på bakvegg ved pressing Plaxis 2D drenert



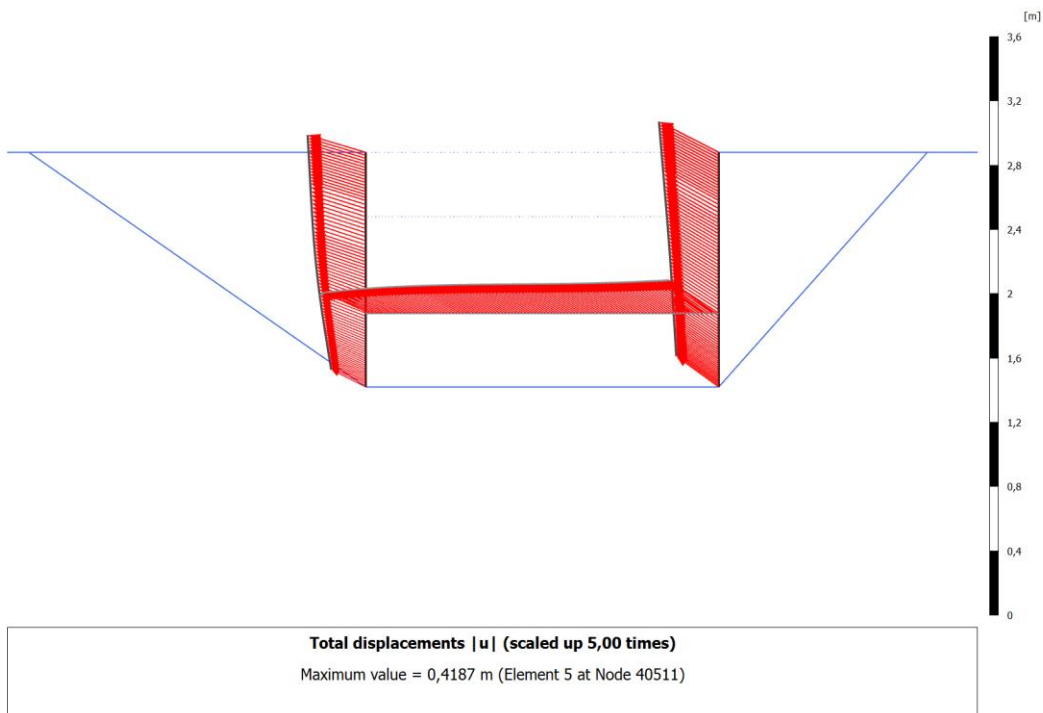
Figur 65 Vertikal skjærspenning på fremvegg ved pressing Plaxis 2D drenert



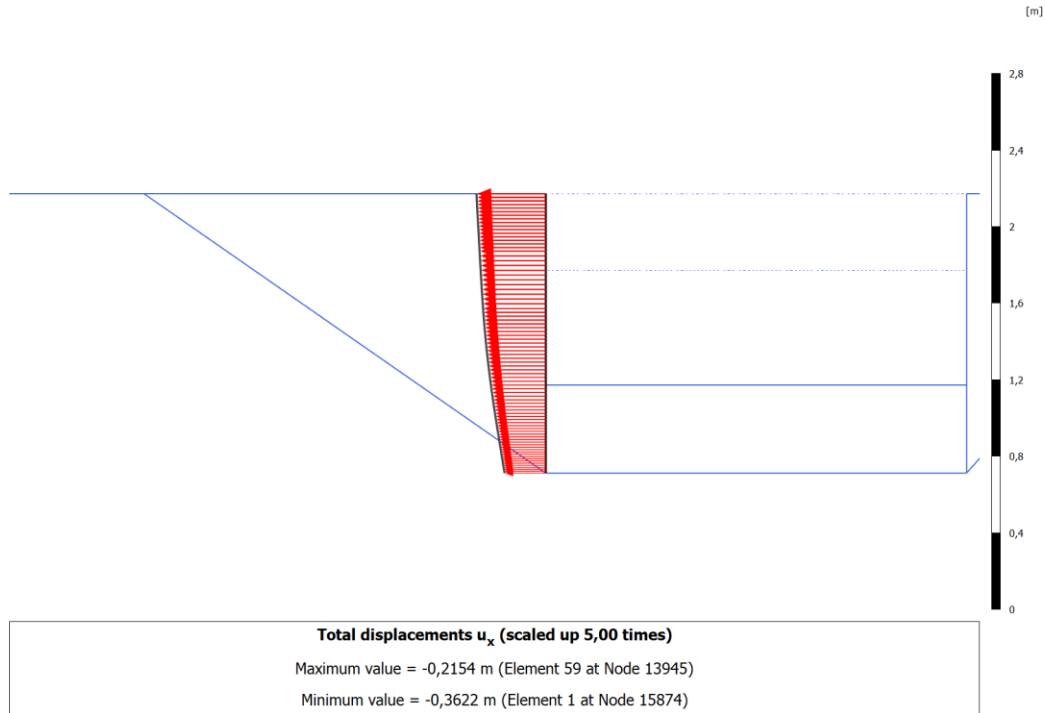
Figur 66 Skjærspenning under betongplate ved pressing Plaxis 2D drenert

5.2.1.5 Forskyvning av pressegrøp

Man ser av Figur 67 at pressegrøpa totalt sett blir presset opp, men mest i fremkant, og at hele grøpa viser en tendens til rotasjon mot klokka. Ellers viser figuren at den horisontale forflytningen av spuntveggene avtar noe med dybden. Figur 68 viser den horisontale forskyvningen av bakveggen.



Figur 67 Forskyvning av pressegrøp i Plaxis 2D drenert



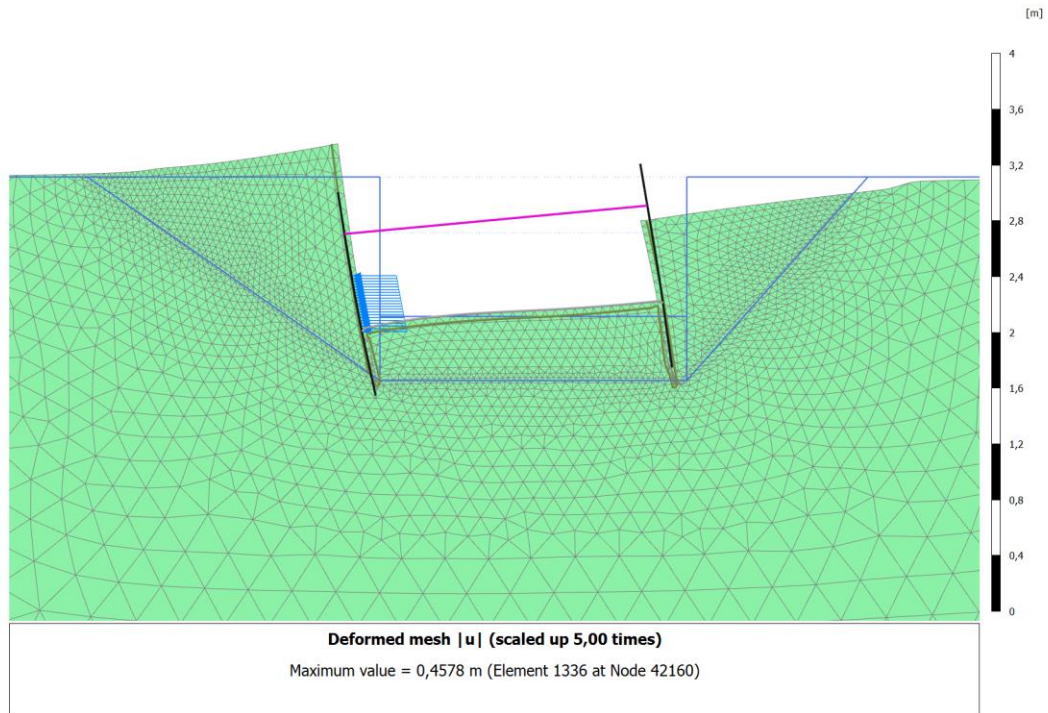
Figur 68 Horisontal forskyvning av bakvegg i Plaxis 2D drenert

5.2.2 Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden

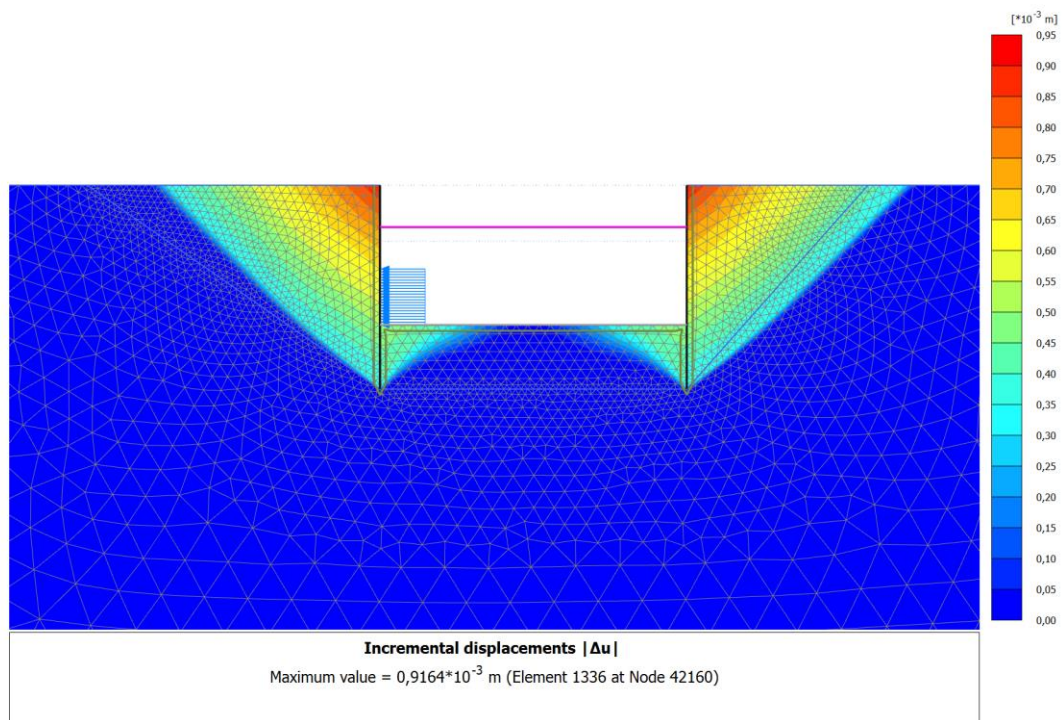
I det følgende er resultater fra analyse med materialparametere som angitt i Tabell 10 vist. Resultater fra analyser med materialparametere fra Tabell 11 (*NGI-ADP* kontroll) og Tabell 12 (*Hardening Soil Small*) vises ikke spesielt, men inngår i diskusjonen av resultatene da oppførselen totalt sett er svært lik.

5.2.2.1 Bruddflater

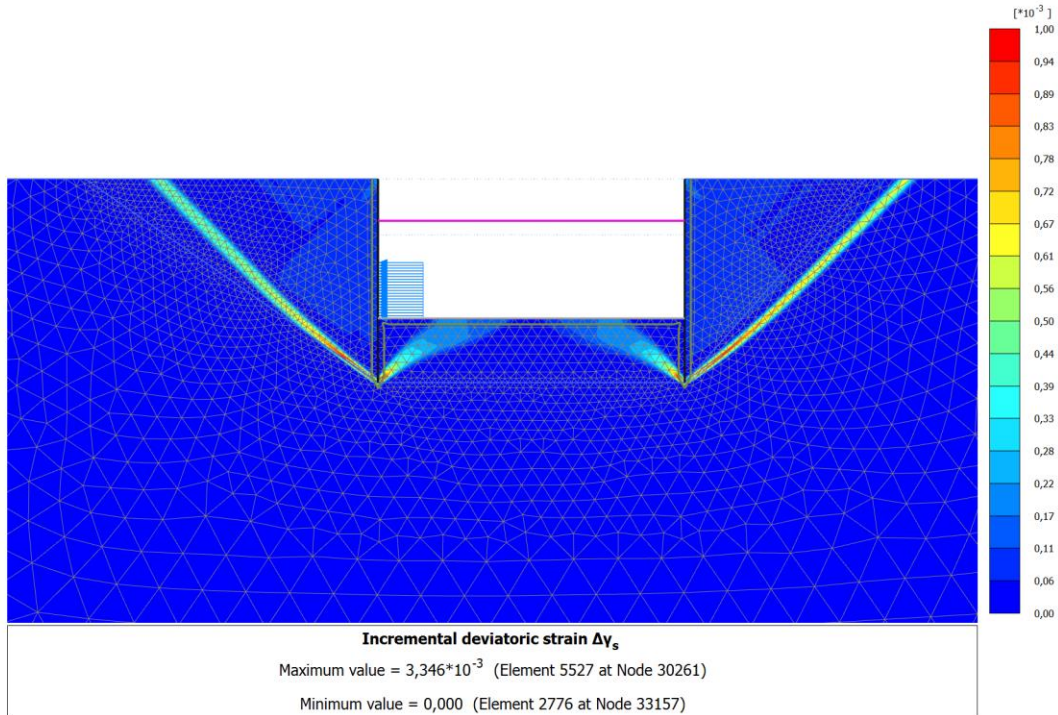
Av Figur 69 observeres en jordkile som glir ned på fremsiden og en med lik størrelse som glir opp på baksiden. På innsiden kan man også observere at en mindre jordkile glir opp på fremsiden og en tilsvarende ned i bakkant. Bruddflatene vises tydeligere i Figur 70 og Figur 71 og det vises at sonene har parvis lik geometri.



Figur 69 Deformert mesh Plaxis 2D udrenert økende su



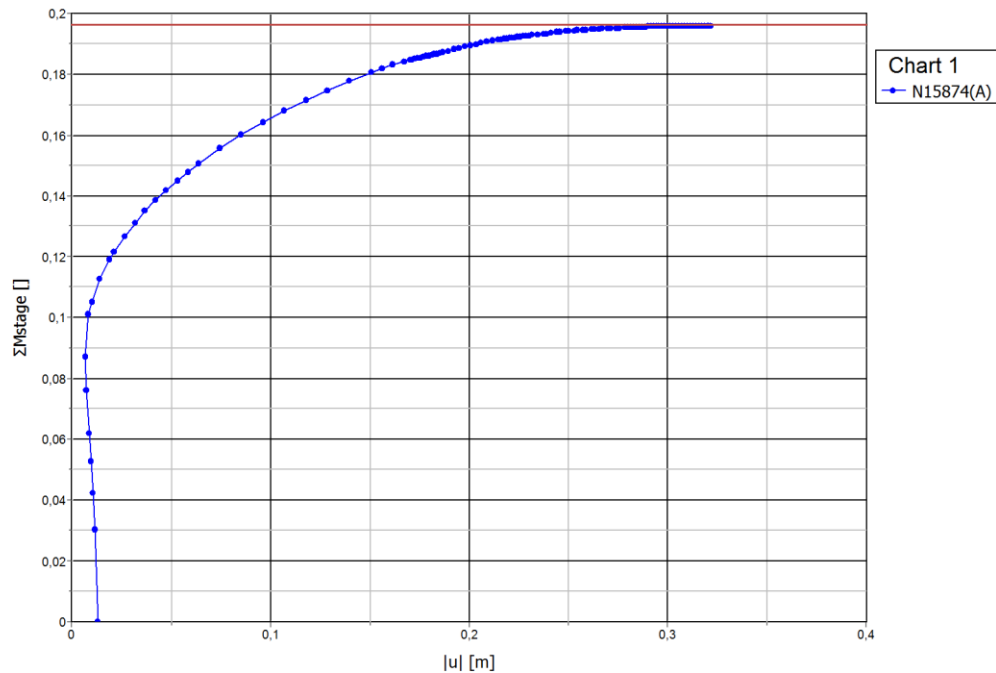
Figur 70 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 2D udrenert økende su



Figur 71 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 2D udrenert økende su

5.2.2.2 Påført pressekraft/last-forskyvningskurve

Av Figur 72 kan man lese ut at man kan presse med en kraft på 392 kPa. Det ble opprinnelig modellert med mange avlastingssteg før Plaxis avslutter og betegner brudd. Da så man derimot av last-forskyvningskurven at det ikke var noen skiftende mekanismer og man fikk kun store forskyvninger uten økning i påført kraft. Det ble derfor valgt å sette maks antall avlastingssteg til kun 2 som vist i Figur 36. Dette gav lettere og tydeligere avlesing av jordtrykkene.



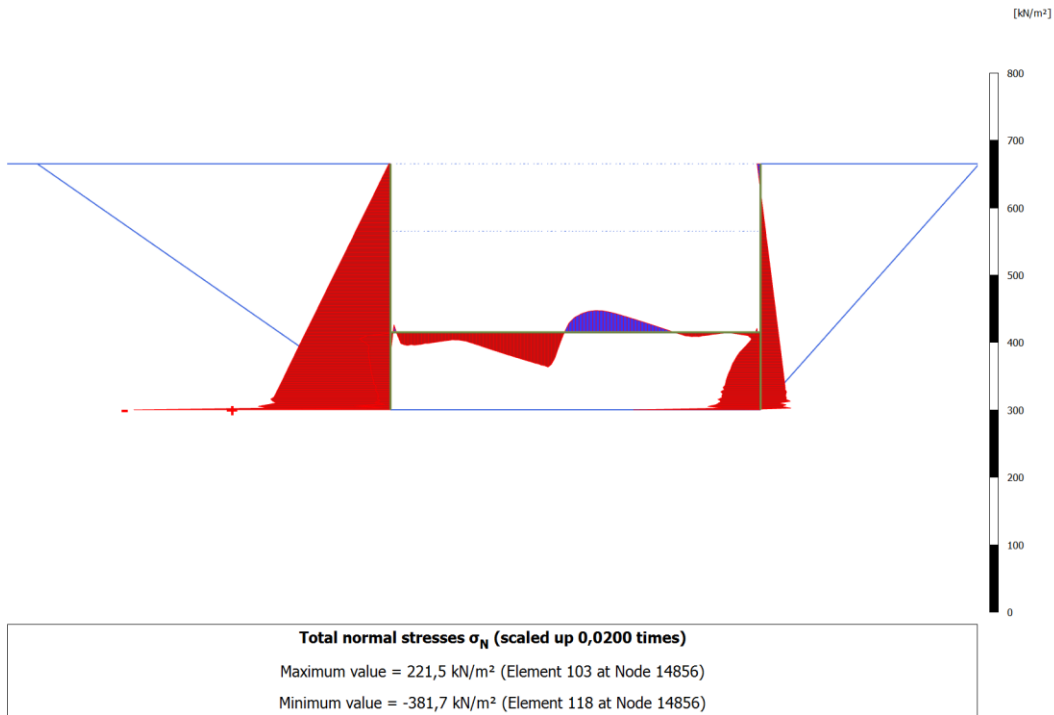
Figur 72 Påført last mot forskyvning Plaxis 2D udrenert økende su

5.2.2.3 Jordtrykk

Figur 73 viser jordtrykkene på pressegruppa. Kraftresultantene er vist i Tabell 28 og det er tydelig at jordtrykkene ikke stemmer overens med maks påført pressekraft funnet av Figur 72 på 392 kPa. Dette kommer av at det er en betydelig skjærkraft under betongplata i bunn av pressegruppa, som vist i Figur 76. Man ser også at man er i nærheten av horisontal likevekt når strekk/sug er tatt med. Dette kan virke forvirrende siden det i Plaxis er satt som standard at sug sees bort ifra. Suget man i Plaxis kan velge å se bort ifra er derimot kun sug i form av poretrykk og dette sugets virkning på effektivspenningene. Grunnen til strekkspenningene er at NGI-ADP ikke inkluderer *tension cut-off* (Plaxis, 2015a).

Kraftresultant fra passivt jordtrykk bakvegg	676 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk bakvegg	0 (62) kN/m
Sum bakvegg	676 (738) kN/m
Bidrag fra bakvegg til maksimal pressekraft	338 (369) kPa
Kraftresultant fra passivt jordtrykk fremvegg	100 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk fremvegg	-132 (-130) kN/m
Sum fremvegg	-32 (-30) kN/m
Bidrag fra fremvegg til maksimal pressekraft	-16 (-15) kPa
Totalt bidrag fra frem og bakvegg til pressekraft	322 (354) kPa
Kraftresultant fra skjær under betongplate	70 kN/m
Bidrag fra skjær til maksimal pressekraft	35 kPa
Totalt bidrag fra jordtrykk og skjær til pressekraft	357 (389) kPa
Kraftresultant fra jordtrykk under betongplate	72 kN/m

Tabell 28 Kraftresultanter fra jordtrykk Plaxis 2D udrenert økende su



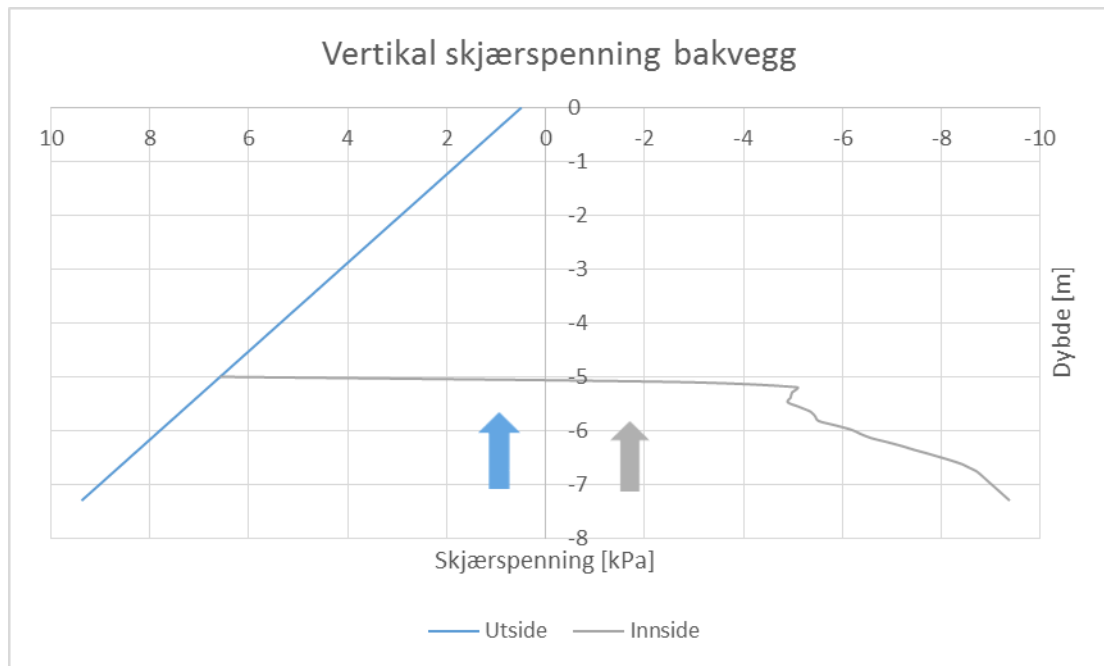
Figur 73 Jordtrykk ved pressing Plaxis 2D udrenert økende su

5.2.2.4 Skjærspenning

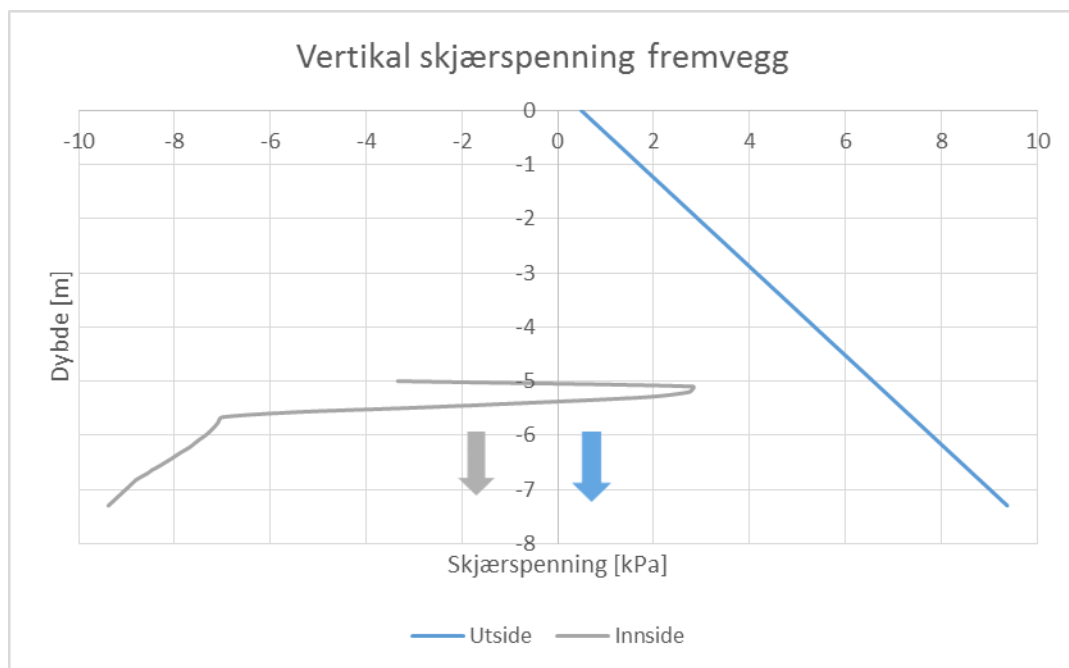
Det observeres av Figur 74 og Figur 75 at skjærspenningene er tilnærmet like for bakvegg og fremvegg, men med motsatt retning. Om man undersøker vertikal likevekt må man ta med bidraget fra jordtrykk under betongplata på 72 kN/m og vekten av pressegruppa på -71 kN/m. Også her kan retningen på skjærspenningene virke noe overraskende, men de forklares av forskyvningen av pressegruppa som vist i Figur 77.

Kraftresultant fra skjær utside bakvegg	36 kN/m
Kraftresultant fra skjær innside bakvegg	15 kN/m
Sum bakvegg	51 kN/m
Kraftresultant fra skjær utside fremvegg	-36 kN/m
Kraftresultant fra skjær innside fremvegg	-14 kN/m
Sum fremvegg	-50 kN/m
Totalt fra frem og bakvegg	1 kN/m
Kraftresultant fra skjær under betongplate	70 kN/m

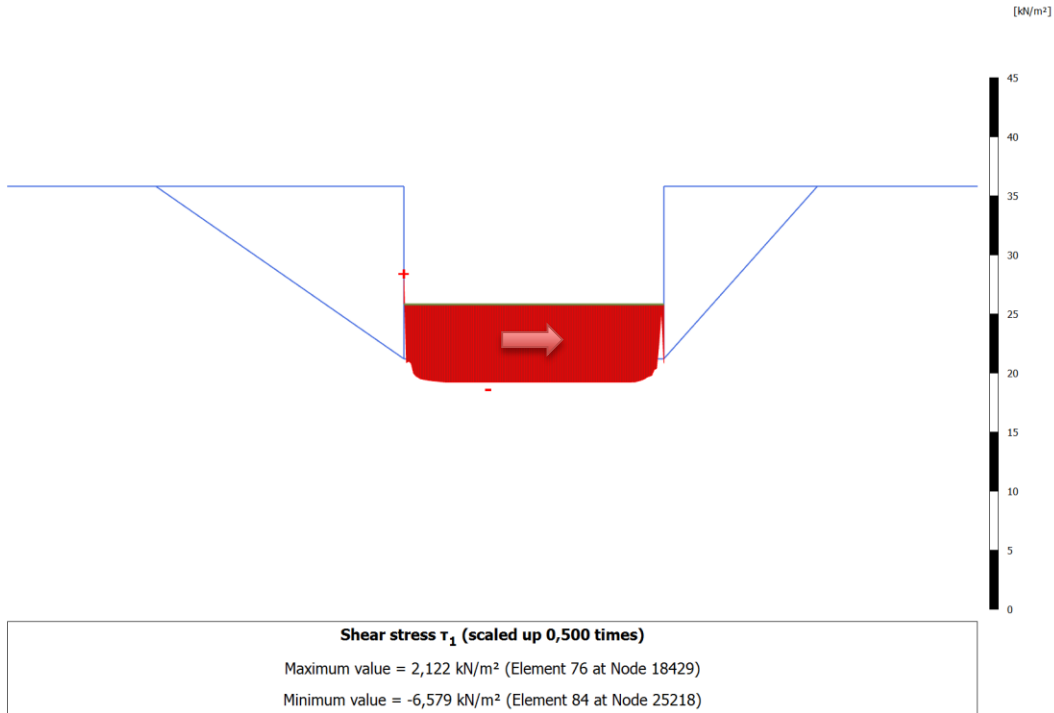
Tabell 29 Kraftresultanter fra skjær Plaxis 2D udrenert økende su



Figur 74 Vertikal skjærspenning på bakvegg ved pressing Plaxis 2D udrenert økende s_u



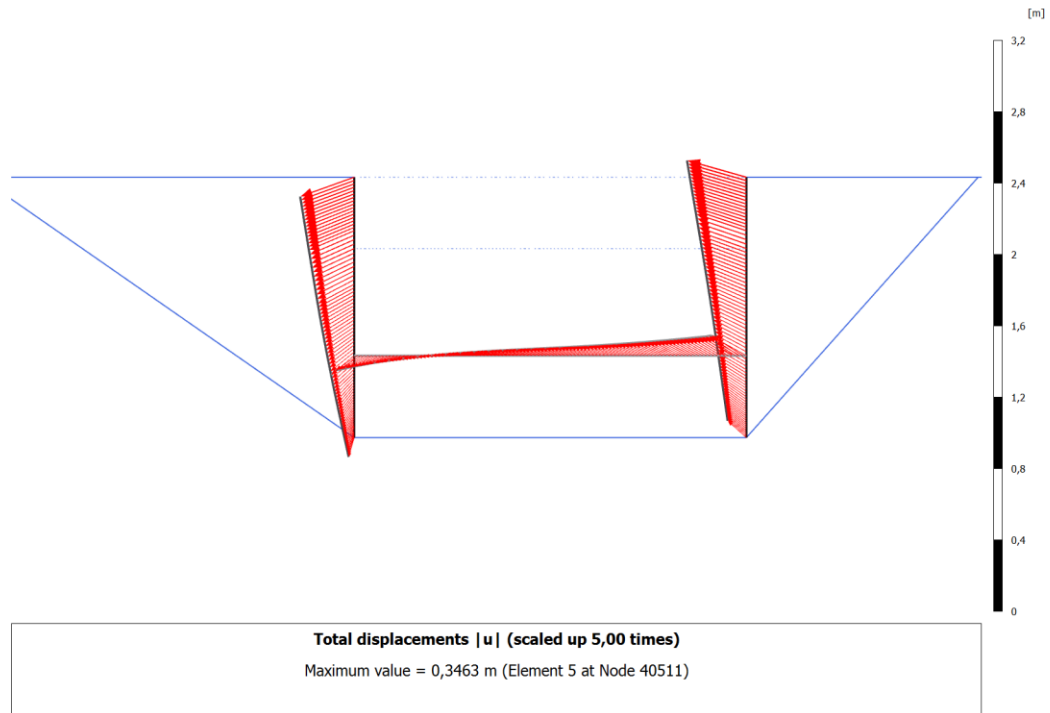
Figur 75 Vertikal skjærspenning på fremvegg ved pressing Plaxis 2D udrenert økende s_u



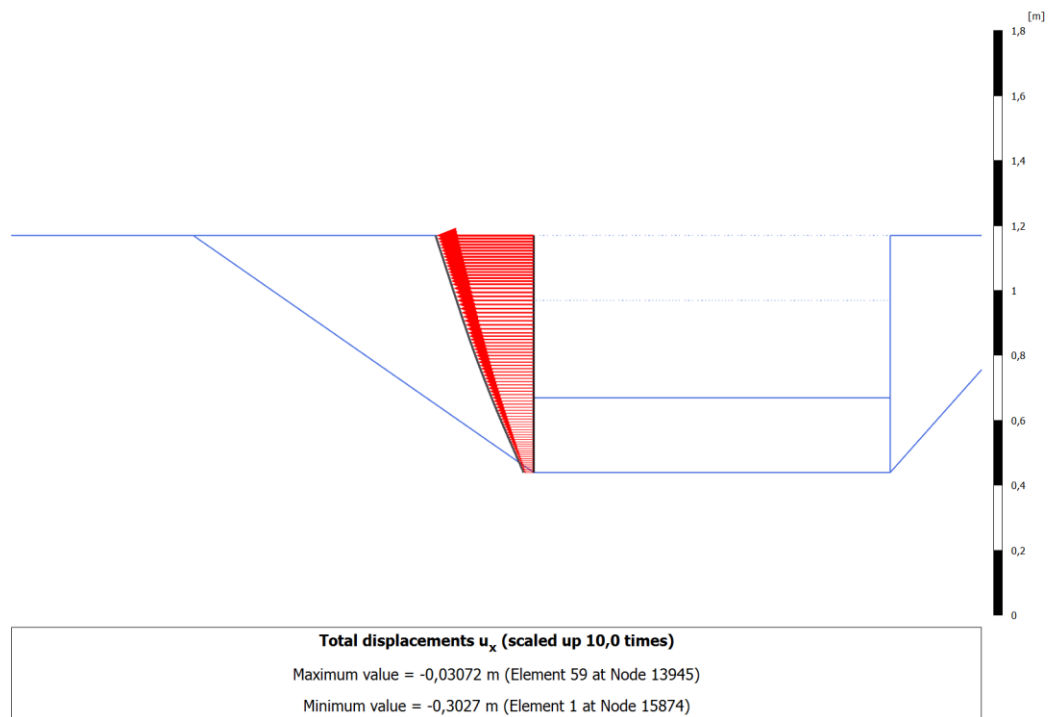
Figur 76 Skjærspenning under betongplate ved pressing Plaxis 2D udrenert økende su

5.2.2.5 Forskyvning av pressegrøp

Figur 77 viser at pressegrøpa blir forskjøvet ned i bakkant og opp i fremkant i en rotasjon mot klokka. De horisontale forskyvningene reduseres også mot dybden. Figur 78 viser at de horisontale forskyvningene på bakveggen avtar dramatisk mot dybden.



Figur 77 Forskyvning av pressegrøp i Plaxis 2D udrenert økende su

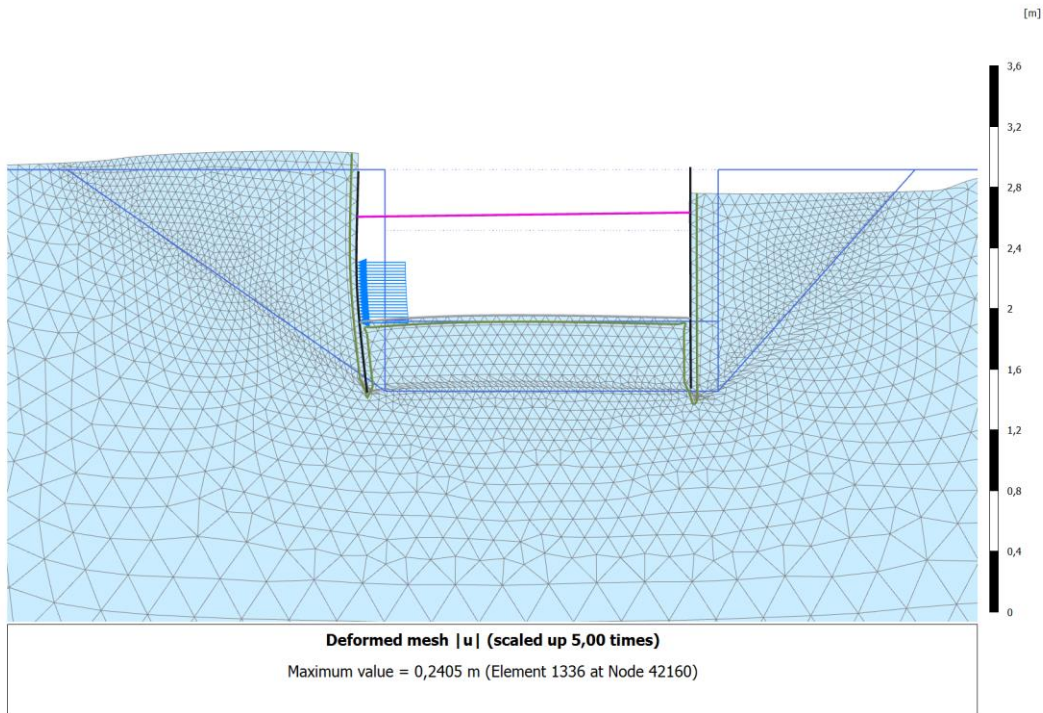


Figur 78 Horizontal forskyvning av bakvegg i Plaxis 2D udrenert økende su

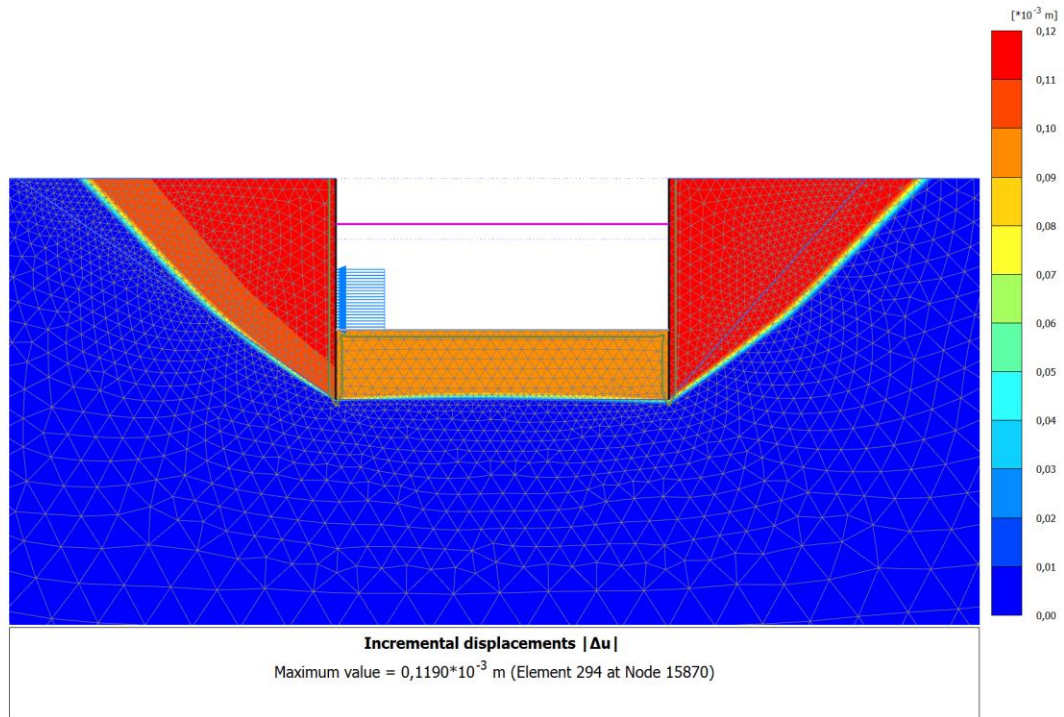
5.2.3 Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke (50 kPa)

5.2.3.1 Bruddflater

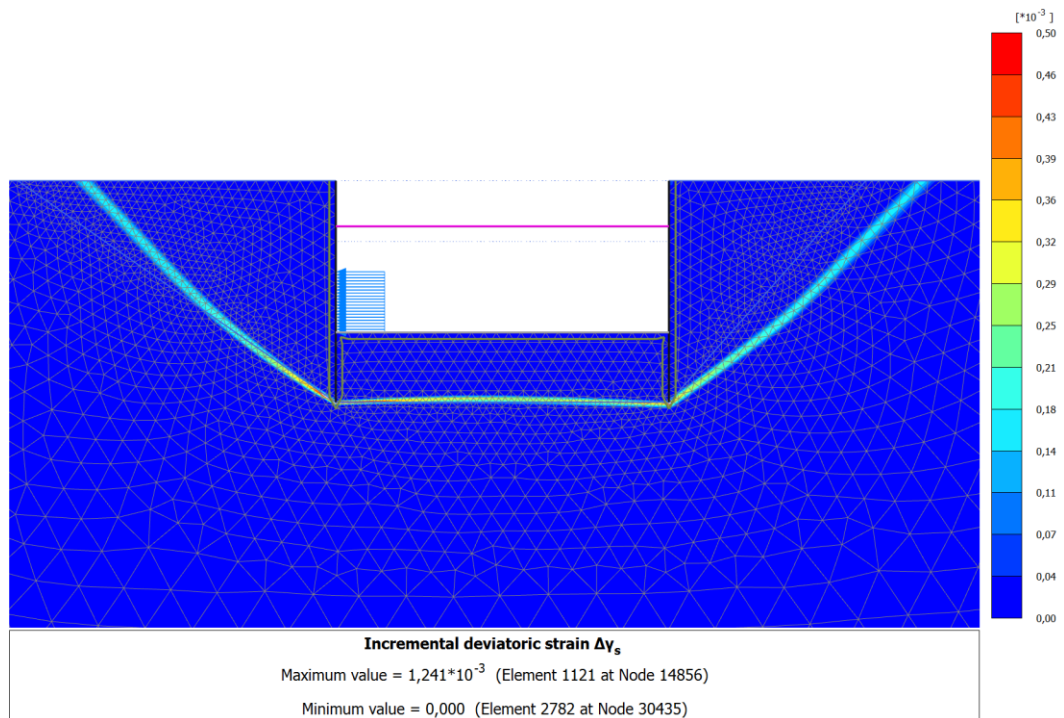
Av Figur 79 observeres den kjente jordkilen som beveger seg nedover på utsiden av fremveggen og opp på utsiden av bakveggen. Nå observeres det derimot ikke en passiv og aktiv sone på innsiden av veggene. Bruddet går i stedet fra spuntbunn til spuntbunn, som visuelt sees godt i Figur 80 og Figur 81.



Figur 79 Deformert mesh Plaxis 2D udrenert konstant su



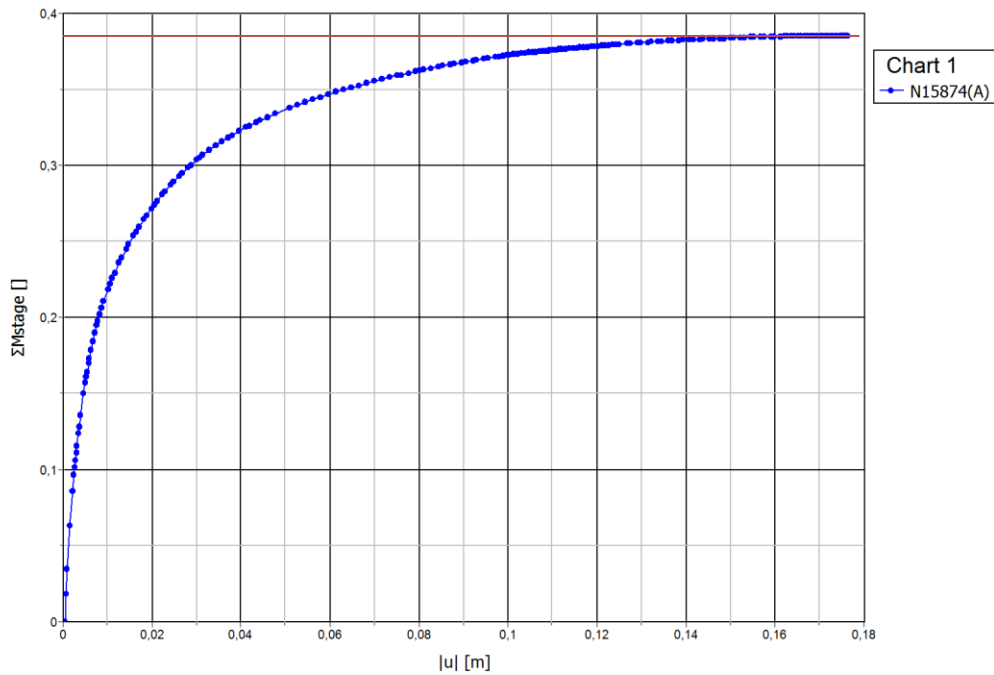
Figur 80 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 2D udrenert konstant s_u



Figur 81 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 2D udrenert konstant s_u

5.2.3.2 Påført pressekraft/last-forskyvningskurve

En maksimal pressekraft på 771 kPa kan leses av Figur 82.



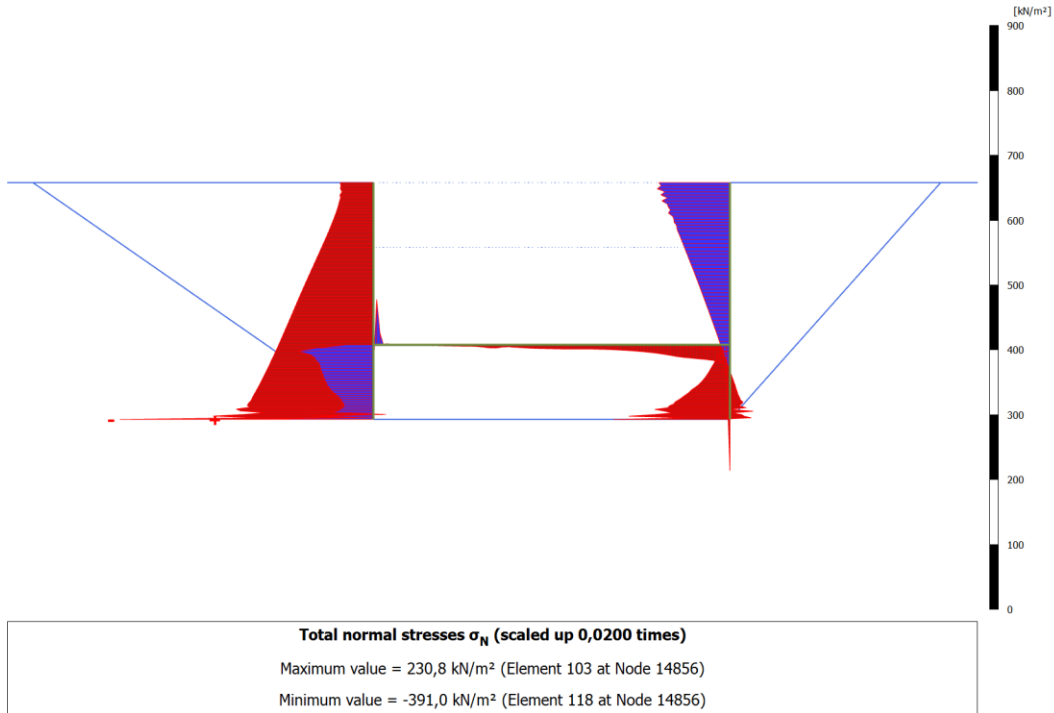
Figur 82 Påført last mot forskyvning Plaxis 2D udrenert konstant su

5.2.3.3 Jordtrykk

Jordtrykkene har som vist i Figur 83 veldig lik form som de funnet ved håndberegning. Det er forventet at størrelsen på jordtrykkene vil variere sammenlignet med håndberegning da det i Plaxis er benyttet ADP-faktorer, mens håndberegningene er basert på aktiv styrke. Resultantene funnet virker fornuftige da summen medregnet sug er nær pålastningen på 771 kPa.

Kraftresultant fra passivt jordtrykk bakvegg	863 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk bakvegg	(161) kN/m
Sum bakvegg	863 (1024) kN/m
Bidrag fra bakvegg til maksimal pressekraft	431,5 (512) kPa
Kraftresultant fra passivt jordtrykk fremvegg	131 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk fremvegg	-18 (292) kN/m
Sum fremvegg	113 (423) kN/m
Bidrag fra fremvegg til maksimal pressekraft	56,5 (211,5) kPa
Totalt bidrag fra frem og bakvegg til pressekraft	488 (723,5) kPa
Kraftresultant fra skjær under betongplate	100 kN/m
Bidrag fra skjær til maksimal pressekraft	50 kPa
Totalt bidrag fra jordtrykk og skjær til pressekraft	538 (773,5) kPa
Kraftresultant fra jordtrykk under betongplate	88 kN/m

Tabell 30 Kraftresultanter fra jordtrykk Plaxis 2D udrenert konstant su



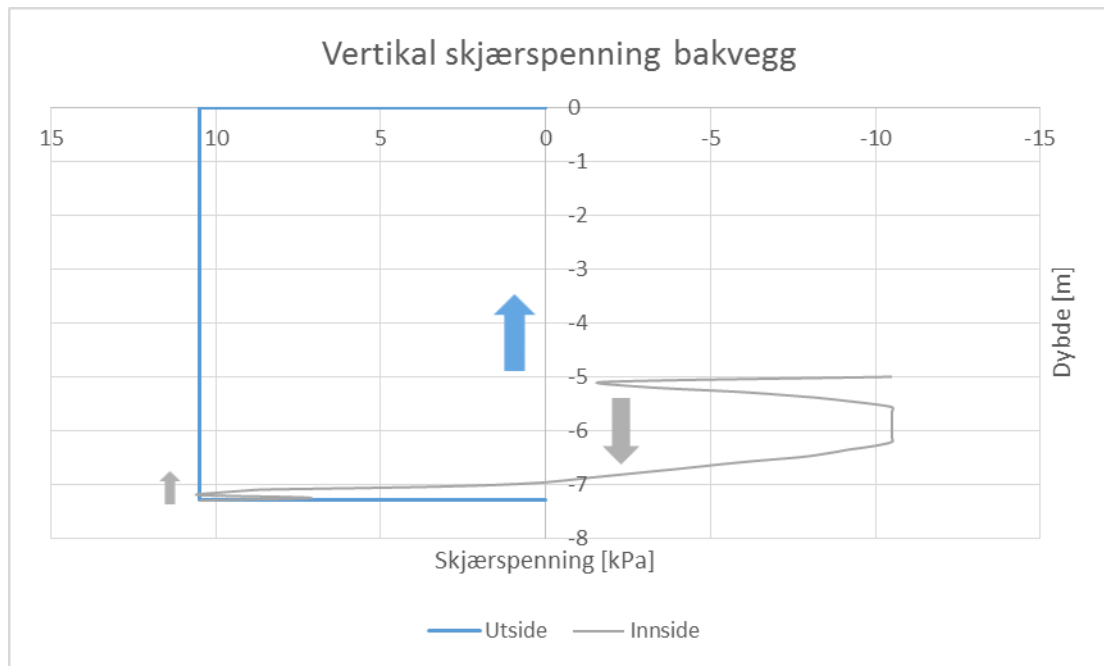
Figur 83 Jordtrykk ved pressing Plaxis 2D udrenert konstant su

5.2.3.4 Skjærspenning

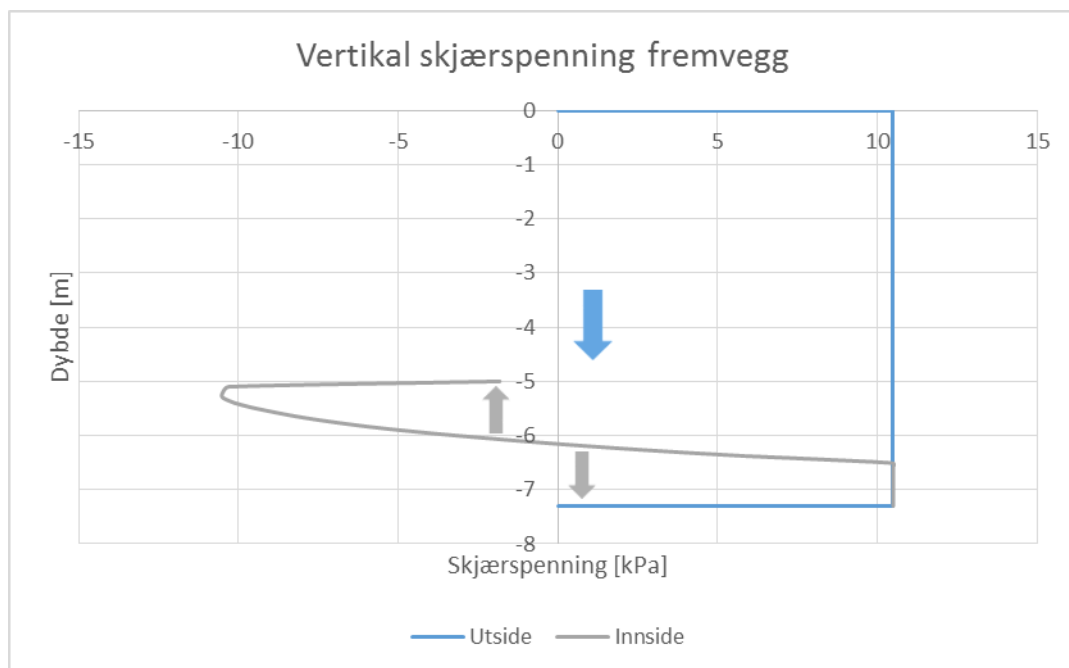
Skjærspenningene er med størrelse og retning som vist i Figur 84 og Figur 85. Kraftresultantene vist i Tabell 31 virker fornuftige da vi er nær vertikal likevekt med å legge til tyngde av pressegrøpa på ca. -71 kN/m og jordtrykket under betongplata på 88 kN/m.

Kraftresultant fra skjær utside bakvegg	76,5 kN/m
Kraftresultant fra skjær innside bakvegg	-12,5 kN/m
Sum bakvegg	64 kN/m
Kraftresultant fra skjær utside fremvegg	-76,5 kN/m
Kraftresultant fra skjær innside fremvegg	-1,5 kN/m
Sum fremvegg	-78 kN/m
Totalt fra frem og bakvegg	-14 kN/m
Kraftresultant fra skjær under betongplate	100 kN/m

Tabell 31 Kraftresultanter fra skjær Plaxis 2D udrenert konstant su



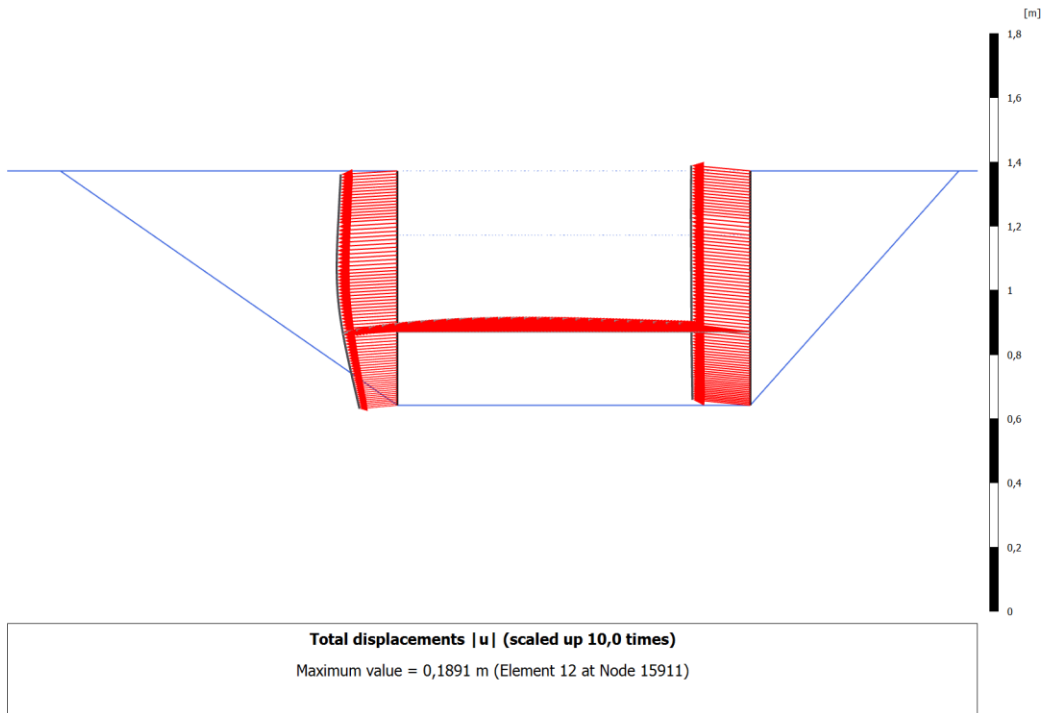
Figur 84 Vertikal skjærspenning på bakvegg ved pressing Plaxis 2D udrenert konstant su



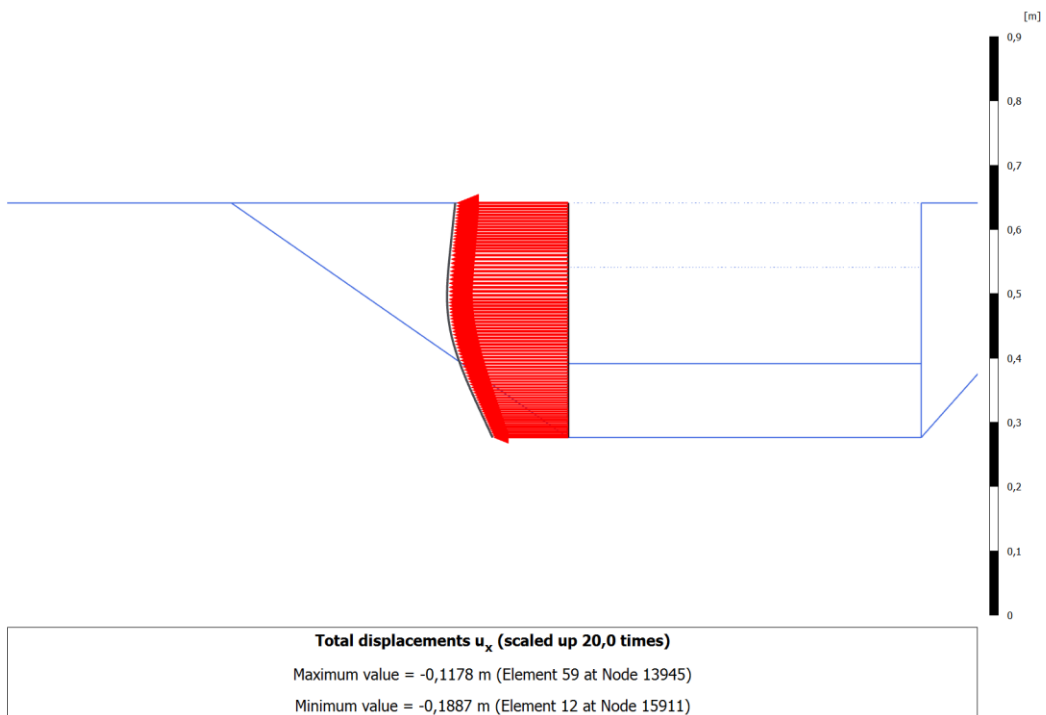
Figur 85 Vertikal skjærspenning på fremvegg ved pressing Plaxis 2D udrenert konstant su

5.2.3.5 Forskyvning av pressegrøp

Av Figur 86 ser man at pressegrøpa beveger seg svært lite opp i fremkant og enda mindre ned i bakkant. Forskyvningene er tilnærmet konsatnte horisontalt mot dybden, bortsett fra under utgravingsnivå på bakveggen. Her avtar forskyvningen mot dybden som vist i Figur 87.



Figur 86 Forskyvning av pressegrøp i Plaxis 2D udrenert konstant su



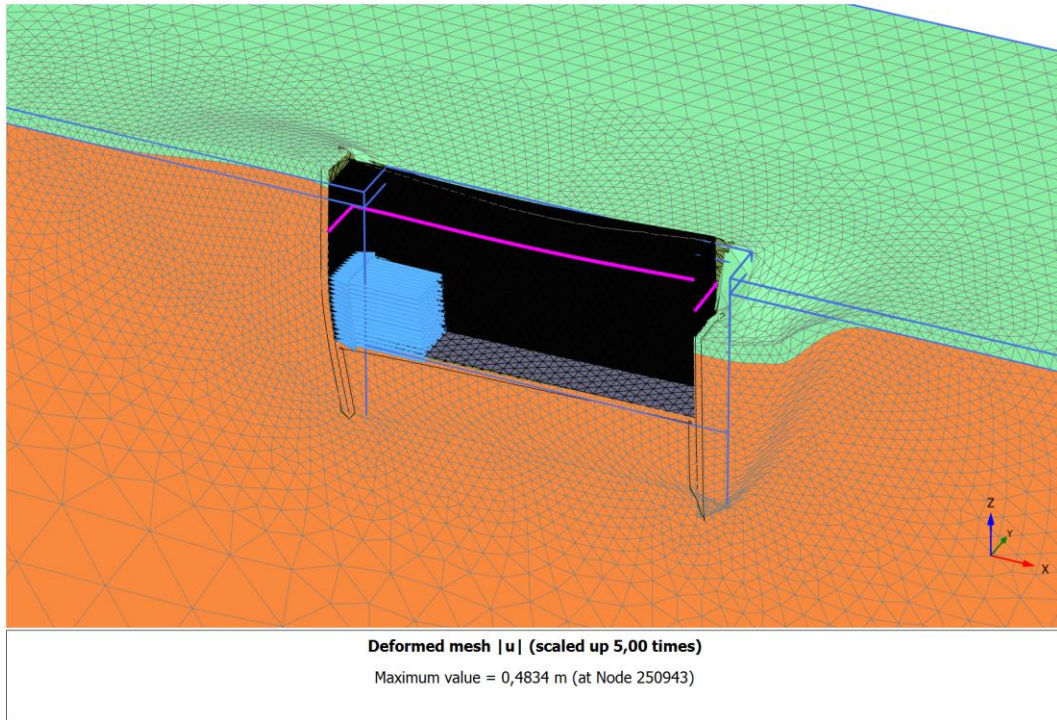
Figur 87 Horizontal forskyvning av bakvegg i Plaxis 2D udrenert konstant su

5.3 Plaxis 3D

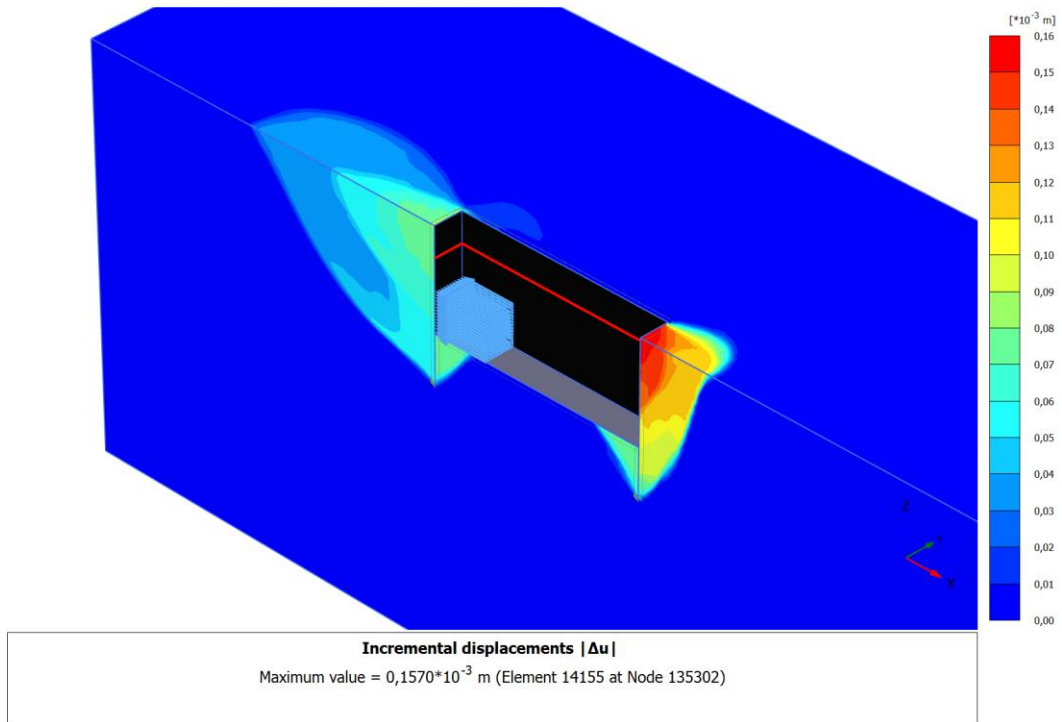
5.3.1 Drenert tilfelle i sand

5.3.1.1 Bruddflater

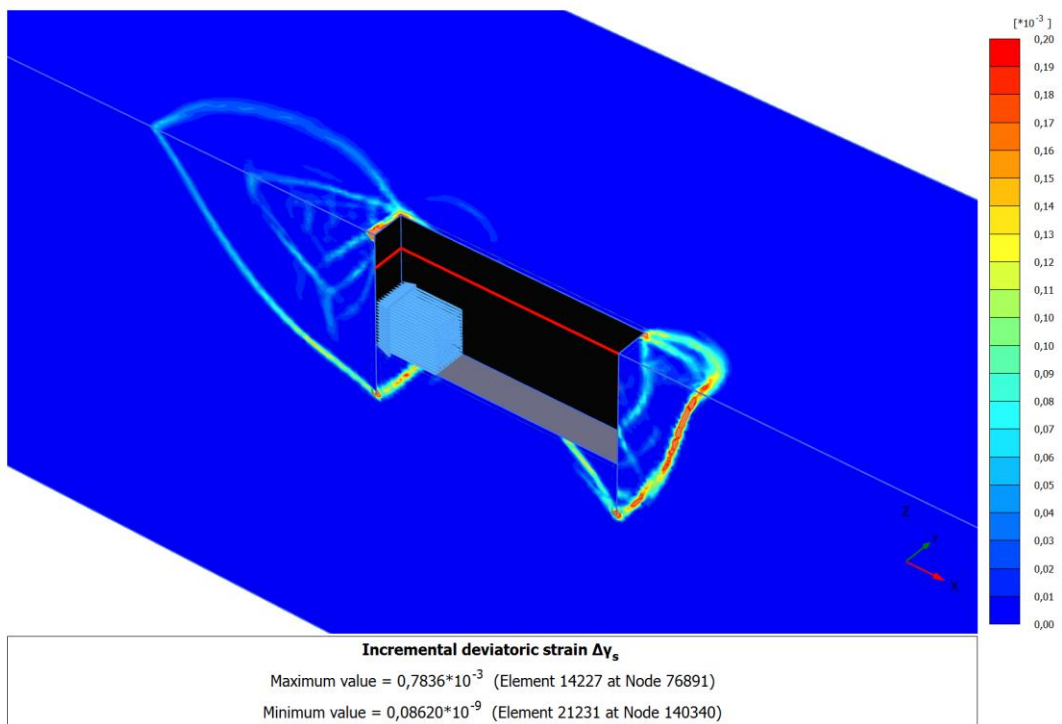
Det observeres en forsenkning foran fremveggen og en forhøyning bak bakveggen etter pressing som vist i Figur 88. Fra Figur 89 og Figur 90 kan en se at bruddflaten mot dybden i midtsnitt ligner veldig på de samme bruddflatene sett i Plaxis 2D. I Figur 91 og Figur 92 ser man tydelig at bruddsonen sprer seg utenfor bredden på spungropa.



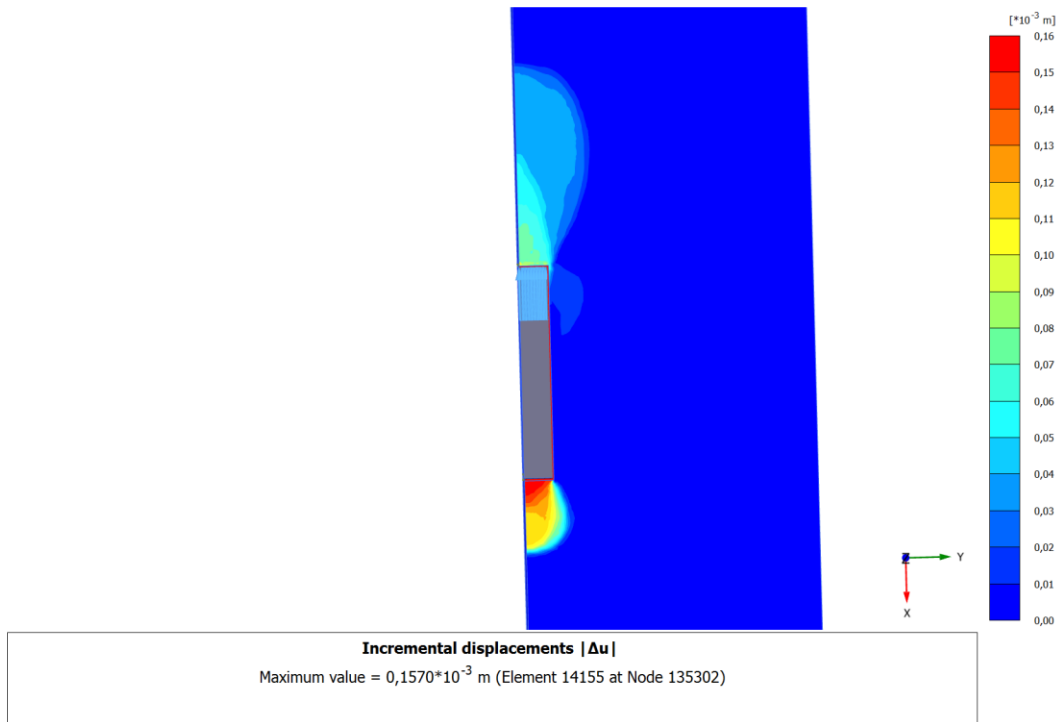
Figur 88 Deformert mesh Plaxis 3D drenert



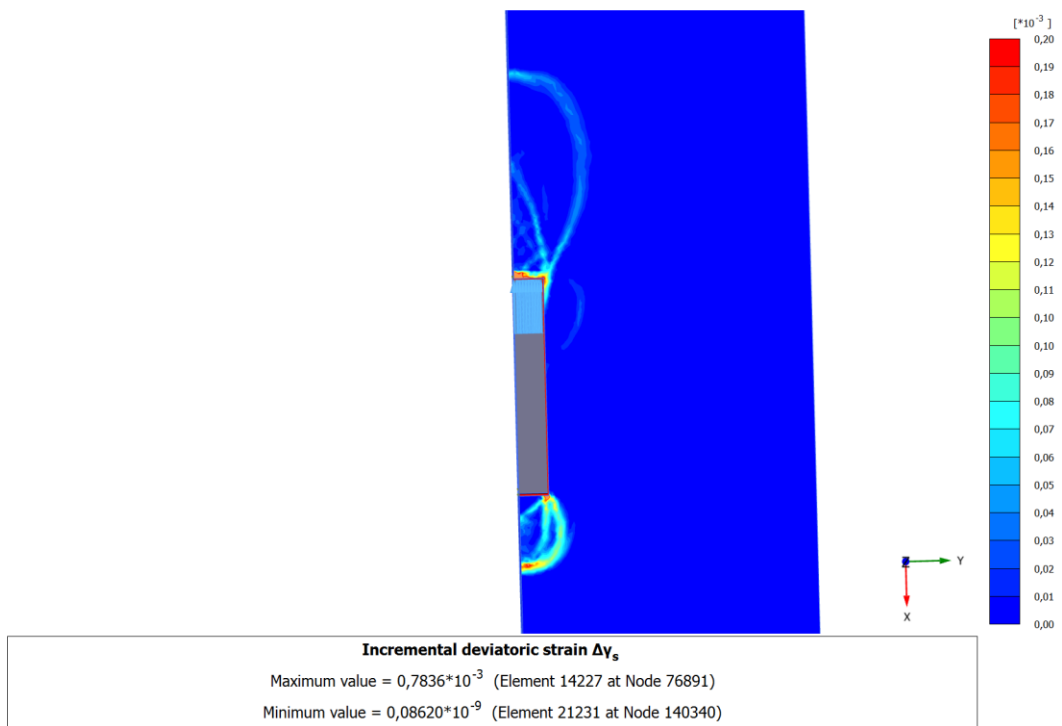
Figur 89 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 3D drenert



Figur 90 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 3D drenert



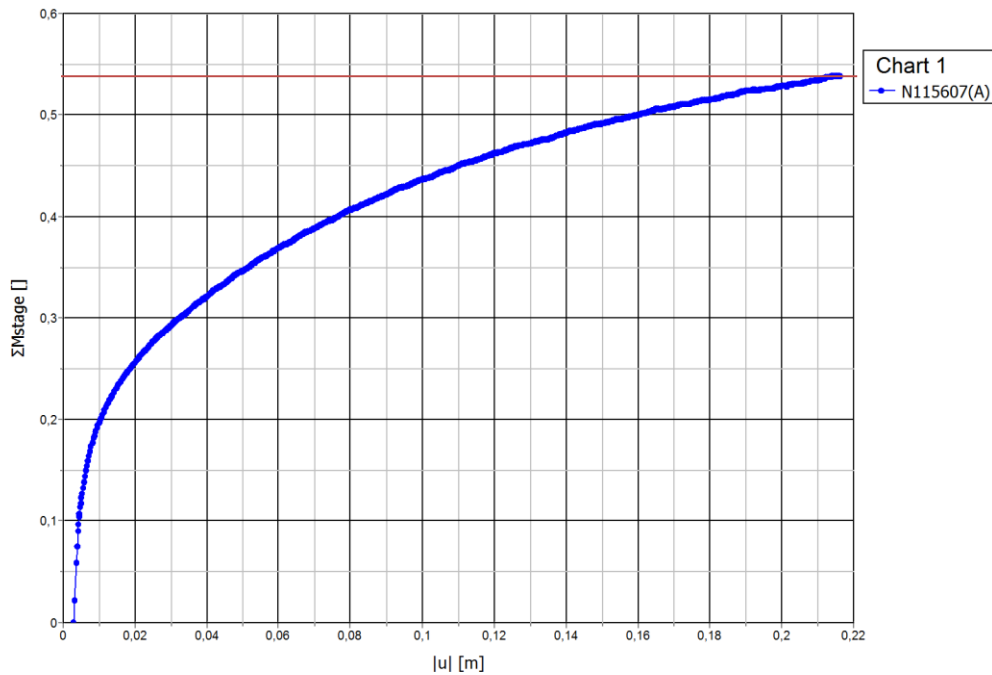
Figur 91 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 3D drenert sett ovenfra



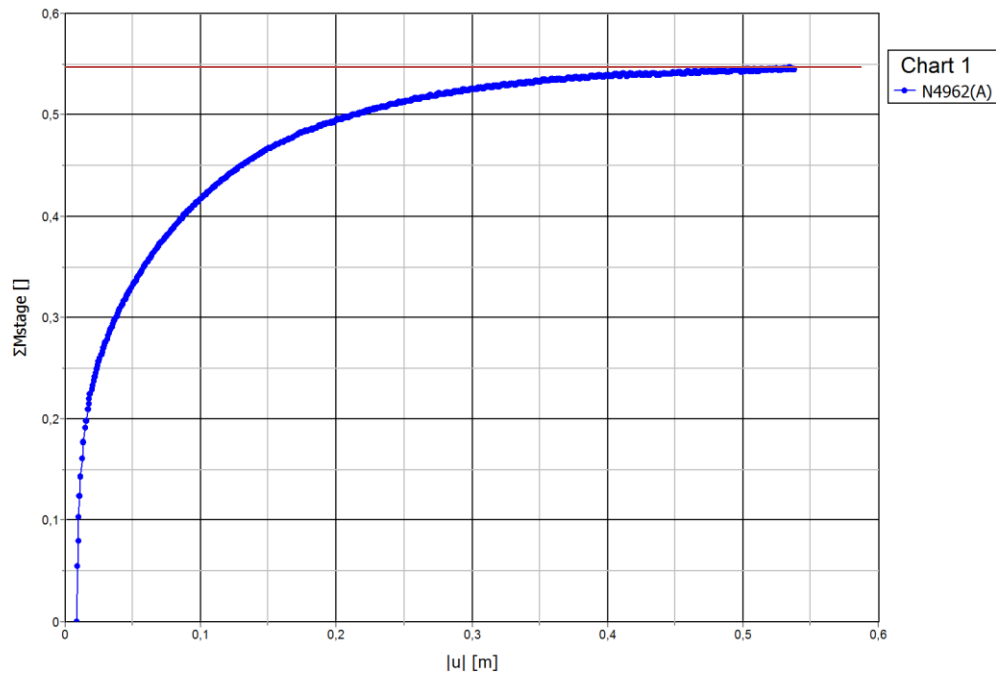
Figur 92 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 3D sett ovenfra

5.3.1.2 Påført pressekraft/last-forskyvningskurve

I Figur 93 er last-forskyvningskurven til analysen med finest elementinndeling vist. Her leses det av en bruddlast på 2144 kPa. Det er fra denne analysen at de følgende resultatene er hentet. Av kurven kan man helt klart diskutere om man virkelig har oppnådd bruddlasten, da man ikke ser noen klar utflating av grafen. På grunn av forstyrrelser i resultatene ved stor forskyvning er det likevel valgt å ikke kjøre analysen lenger. En analyse med et grovere mesh, som er kjørt til større forskyvning, viser i Figur 94 at man sannsynligvis ikke er så langt unna bruddlasten.



Figur 93 Påført last mot forskyvning Plaxis 3D drenert



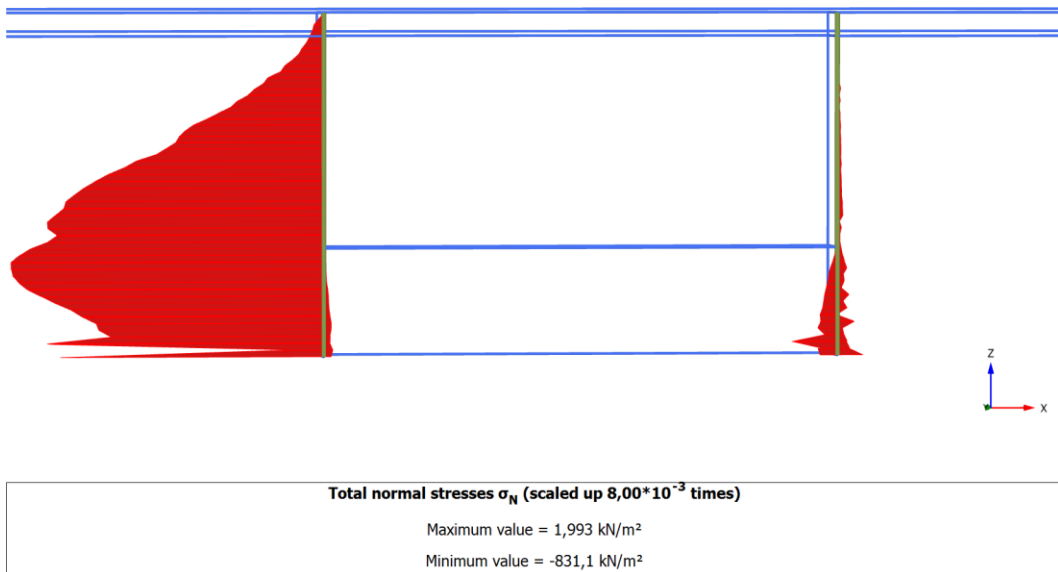
Figur 94 Påført last mot forskyvning Plaxis 3D drenert grovere mesh til større forskyvning

5.3.2.3 Jordtrykk

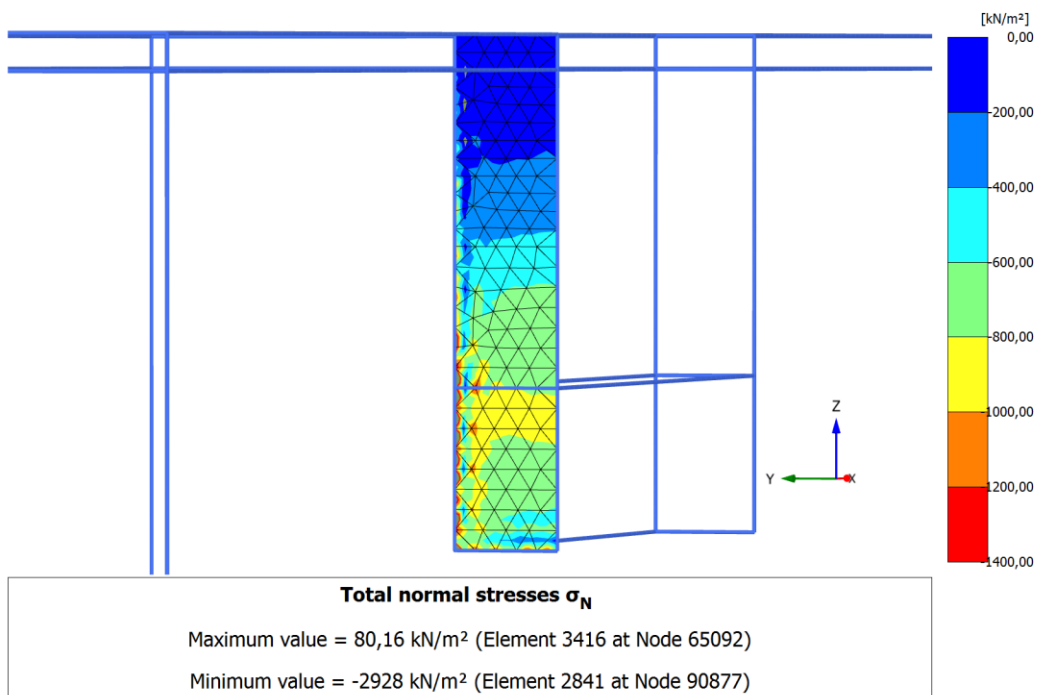
Figur 96 til Figur 99 viser jordtrykkene på pressegruppa. På utsiden av bakveggen, vist i Figur 96, kan man se at jordtrykket under utgravingsnivå ser ut til å være større mot hjørnet av pressegruppa. På utsiden av fremveggen, vist i Figur 98, ser jordtrykket ut til å bli mindre ut mot hjørnet. Figur 95 viser jordtrykkene i midtsnitt av pressegruppa og disse er lagt til grunn for å estimere resultanter fra de forskjellige sonene. Dette er en grov forenkling siden jordtrykket ser ut til å variere over bredden. Legger man til estimert bidrag til pressekraft fra skjær, vist i Tabell 33, havner man likevel på 2133,5 kPa. Dette er ikke langt unna bruddlasten på 2144 kPa funnet fra Figur 93.

Kraftresultant fra passivt jordtrykk bakvegg	3501,5 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk bakvegg	-28,5 kN/m
Sum bakvegg	3473 kN/m
Bidrag fra bakvegg til maksimal pressekraft	1736,5 kPa
Kraftresultant fra passivt jordtrykk fremvegg	85 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk fremvegg	-90 kN/m
Sum fremvegg	-5 kN/m
Bidrag fra fremvegg til maksimal pressekraft	-2,5 kPa
Totalt bidrag fra frem og bakvegg til pressekraft	1734 kPa

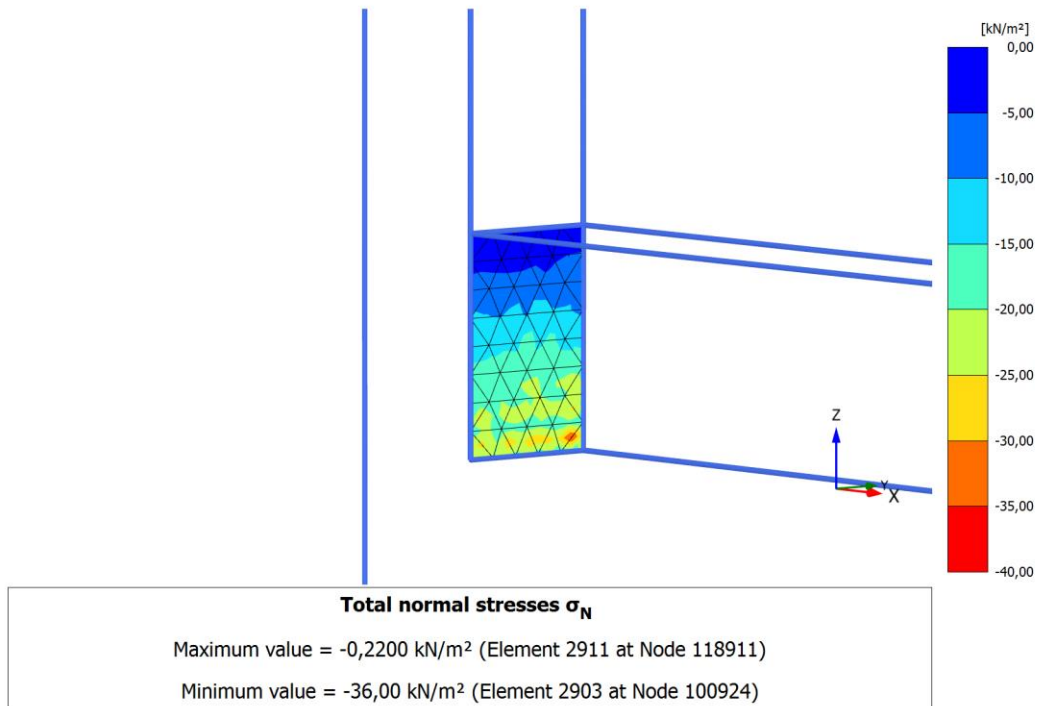
Tabell 32 Kraftresultanter fra jordtrykk Plaxis 3D drenert



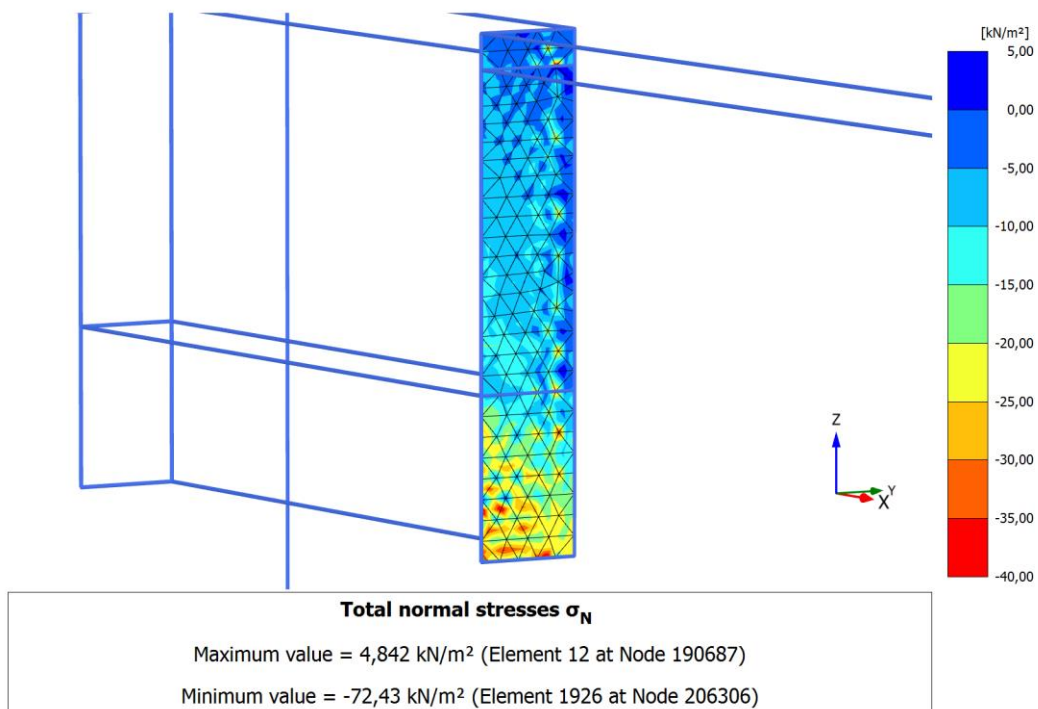
Figur 95 Jordtrykk i midtsnitt under pressing Plaxis 3D drenert



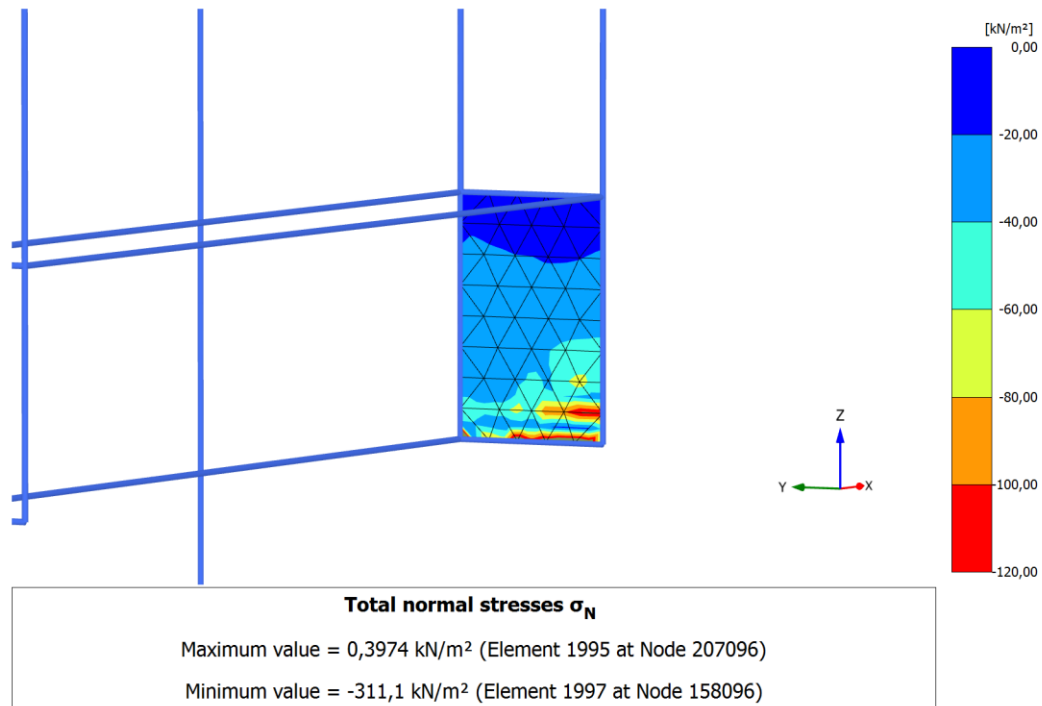
Figur 96 Jordtrykk på utsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D drenert



Figur 97 Jordtrykk på innsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D drenert



Figur 98 Jordtrykk på utsiden av fremvegg under pressing Plaxis 3D drenert



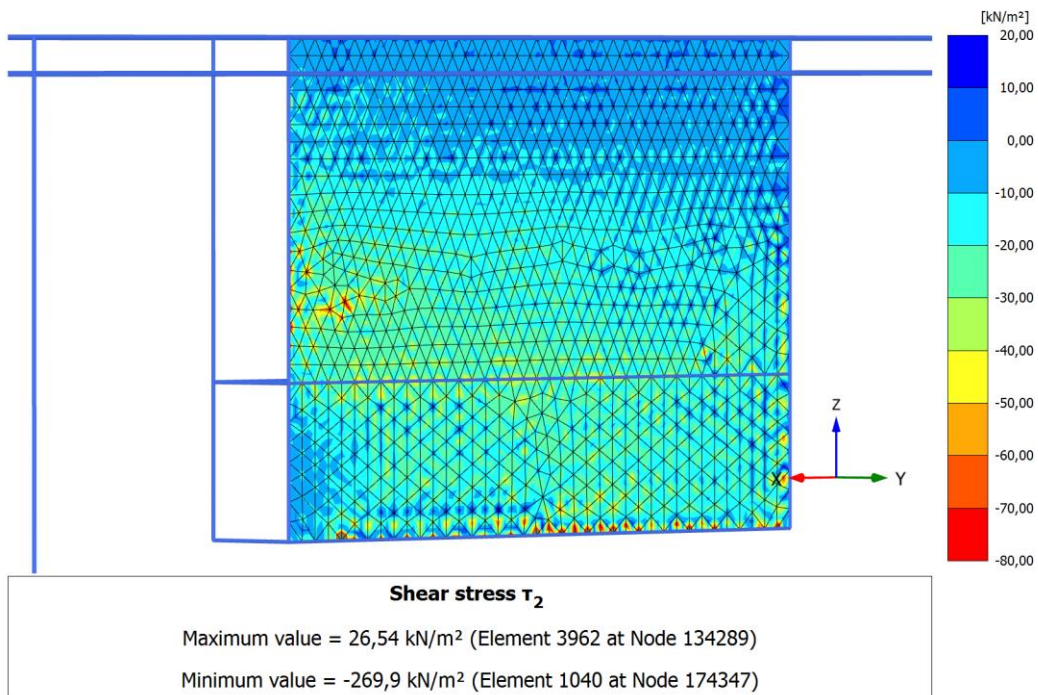
Figur 99 Jordtrykk på innsiden av fremvegg under pressing Plaxis 3D drenert

5.3.2.4 Horisontal skjærspenning på sidevegger

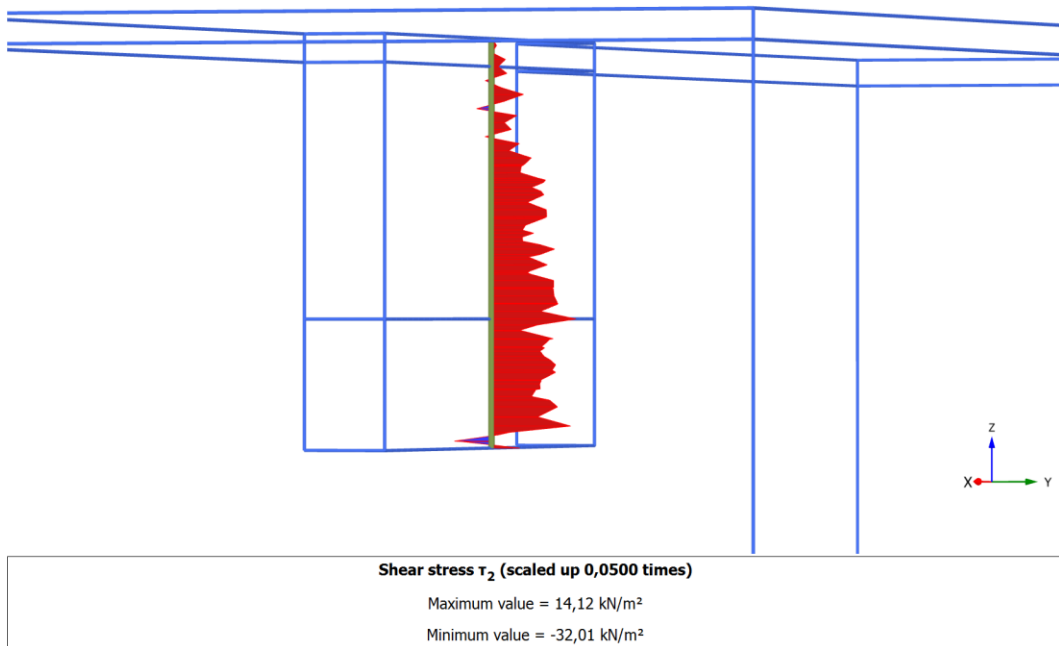
Den horisontale skjærspenningen som virker på sideveggene er vist i Figur 100 og Figur 102. Midtsnittene, vist i Figur 101 og Figur 103, er forenklet antatt representative for hele lengden og er benyttet for å estimere resultanter og bidrag til maksimal pressekraft vist i Tabell 33. Det legges merke til den mindre sonen i Figur 102 der skjærspenningen er motsatt rettet. Dette skyldes den passive jordtrykkssonen på innsiden av fremveggen. Skjærspenningen under betongplata er neglisjerbar.

Kraftresultant fra utsiden	102 kN/m
Kraftresultant fra innsiden	7 kN/m
Sum	109 kN/m
Bidrag til maksimal pressekraft	399,5 kPa

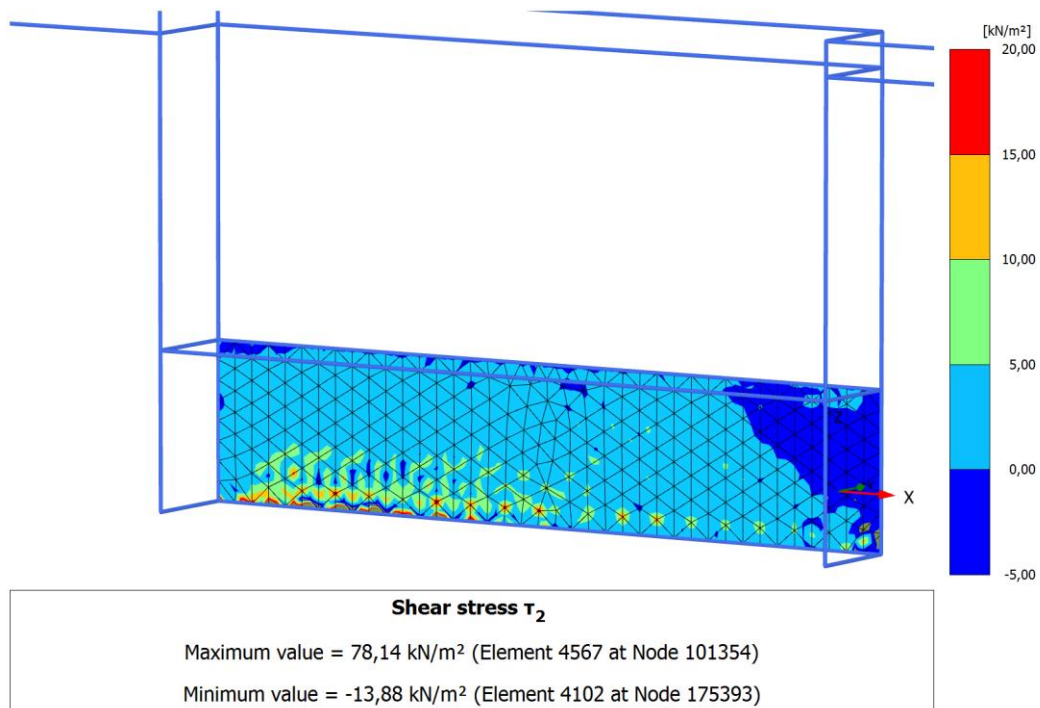
Tabell 33 Kraftresultanter fra horisontal skjær Plaxis 3D drenert



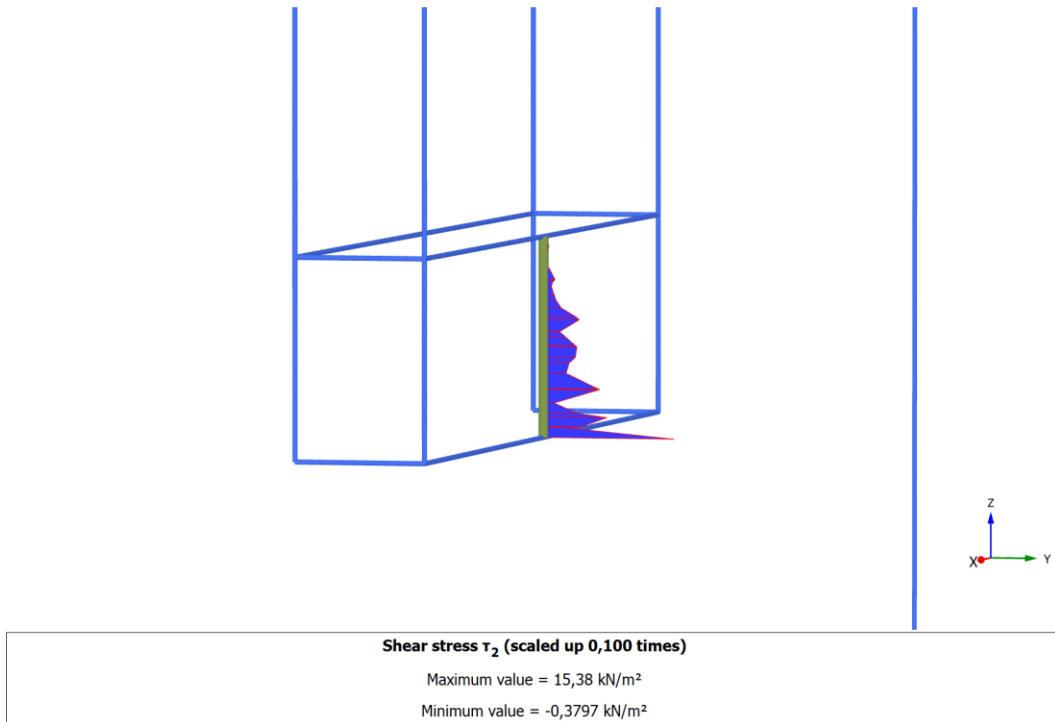
Figur 100 Horisontal skjærspenning på utside av langside under pressing Plaxis 3D drenert



Figur 101 Horizontal skjærspenning midtsnitt på utside av langside under pressing Plaxis 3D drenert



Figur 102 Horizontal skjærspenning på innside av langside under pressing Plaxis 3D drenert



Figur 103 Horizontal skjærspenning midtsnitt på innside av langside under pressing Plaxis 3D drenert

5.3.2.5 Vertikal skjærspenning

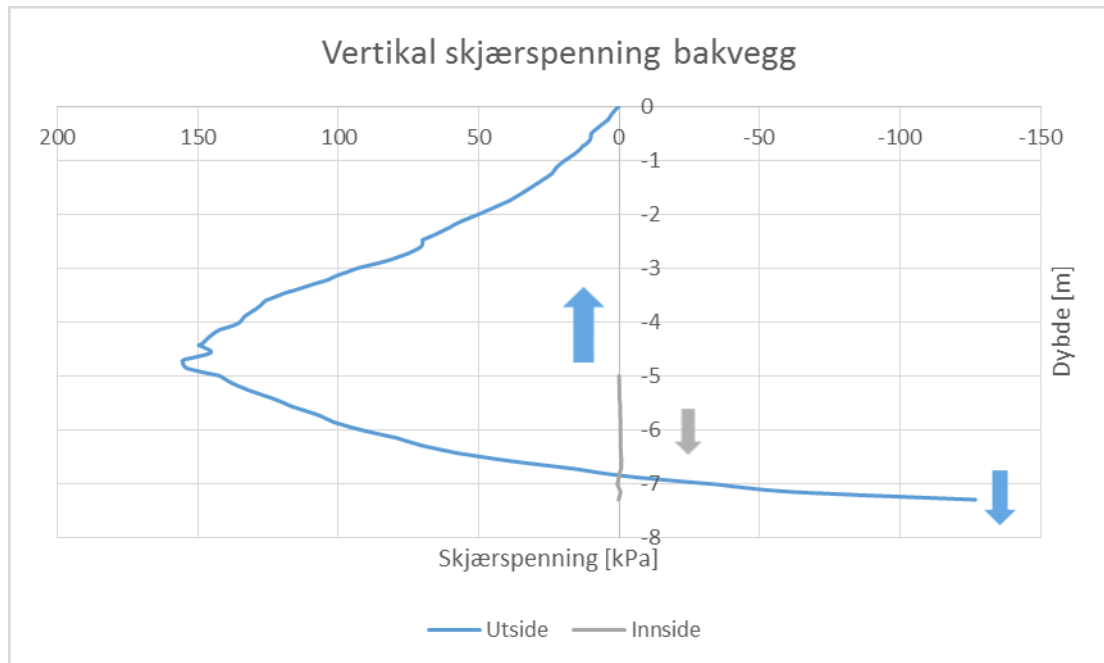
Figur 107 til Figur 112 viser den vertikale skjærspenningen på pressegroppa. I Figur 104 til Figur 106 er de vertikale skjærspenningene vist for antatt representative snitt. På utsiden av bakveggen er et snitt 0,75 m fra midtsnitt antatt representativt fordi midtsnittet ville gitt for stor kraftresultant. På utsiden av sideveggen er et snitt 2 m i positiv x-retning fra midtsnitt antatt å være representativt. Resten av kraftresultantene er hentet fra midtsnitt. De grovt estimerte kraftresultantene er vist i Tabell 34 og viser at man er i nærheten av vertikal likevekt da vekten av pressegroppa er ca. -205 kN.

Kraftresultant fra skjær utside bakvegg	774 kN
Kraftresultant fra skjær innside bakvegg	-1 kN
Sum bakvegg	773 kN
Kraftresultant fra skjær utside fremvegg	-20,5 kN
Kraftresultant fra skjær innside fremvegg	-7 kN
Sum fremvegg	-27,5 kN
Kraftresultant fra skjær utside sidevegg	-501 kN
Kraftresultant fra skjær utside sidevegg	-50,5 kN
Sum sidevegg	-551,5 kN
Totalt fra fremvegg, bakvegg og sidevegg	194 kN

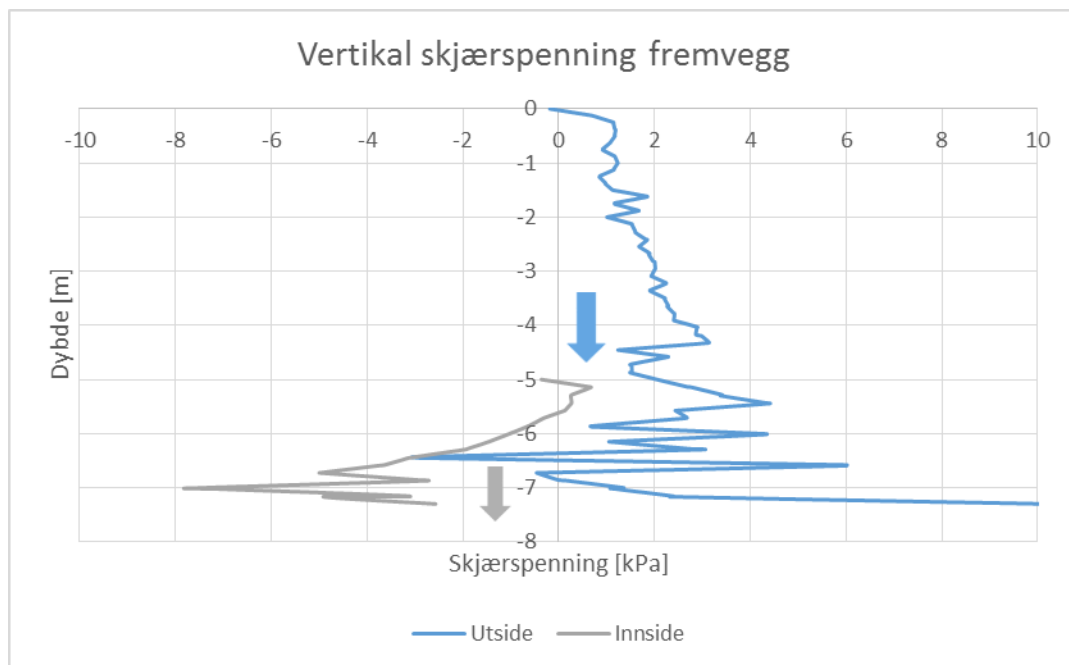
Tabell 34 Kraftresultanter fra vertikal skjær Plaxis 3D drenert

Totalt fra frem, bakvegg og sidevegg	194 kN
Kraftresultant fra jordtrykk under betongplate	0 kN
Vekt av pressegrøp	-205 kN
Sum vertikalkrefter	-11 kN

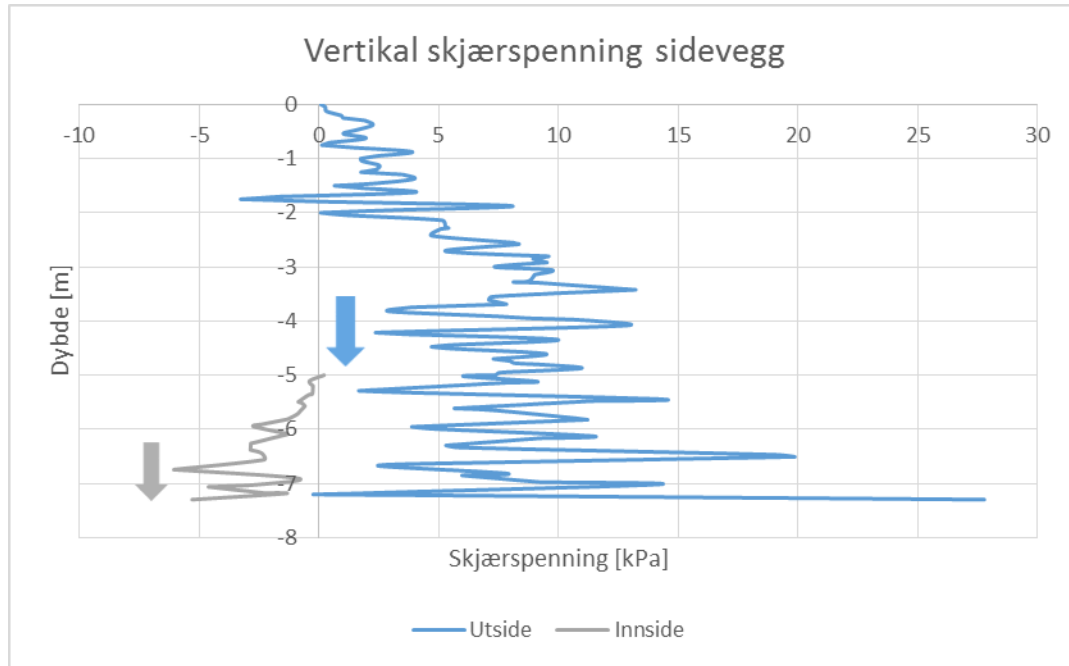
Tabell 35 Kontroll av vertikallikevekt Plaxis 3D drenert



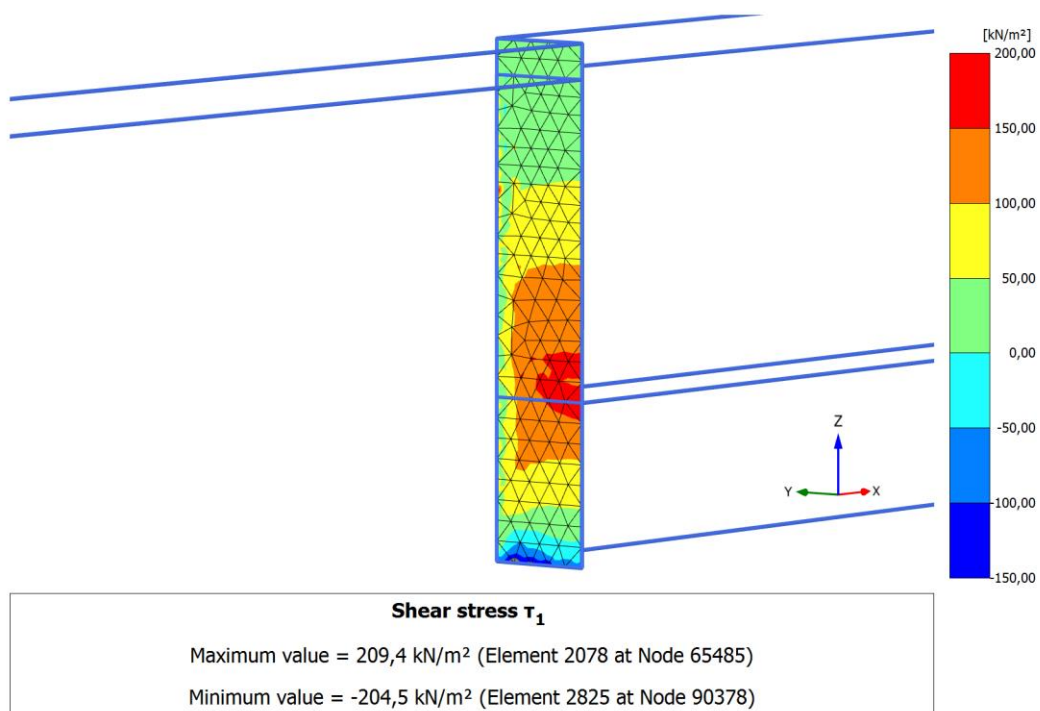
Figur 104 Vertikal skjærspenning valgt snitt på bakvegg under pressing Plaxis 3D drenert



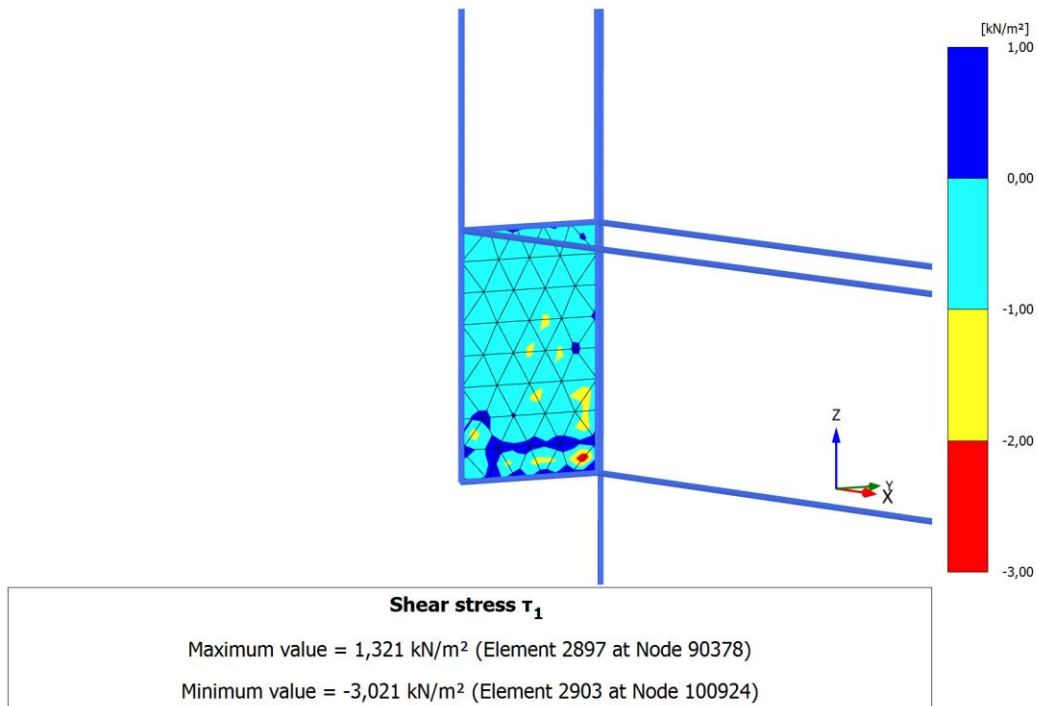
Figur 105 Vertikal skjærspenning midtsnitt på fremvegg under pressing Plaxis 3D drenert



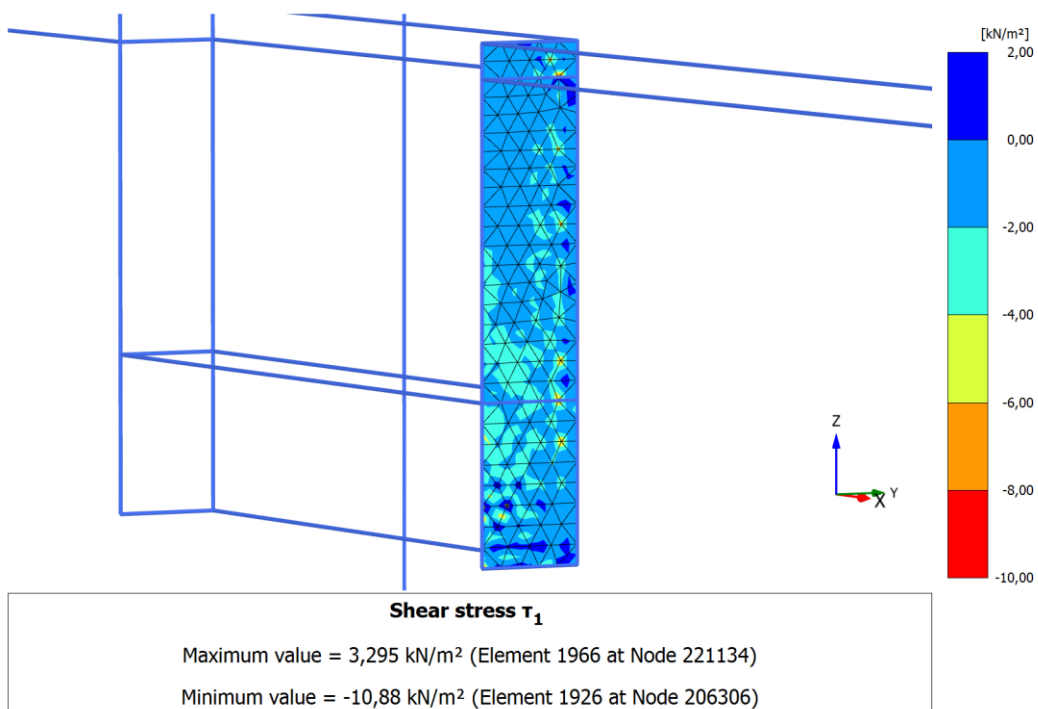
Figur 106 Vertikal skjærspenning valgt snitt på sidevegg under pressing Plaxis 3D drenert



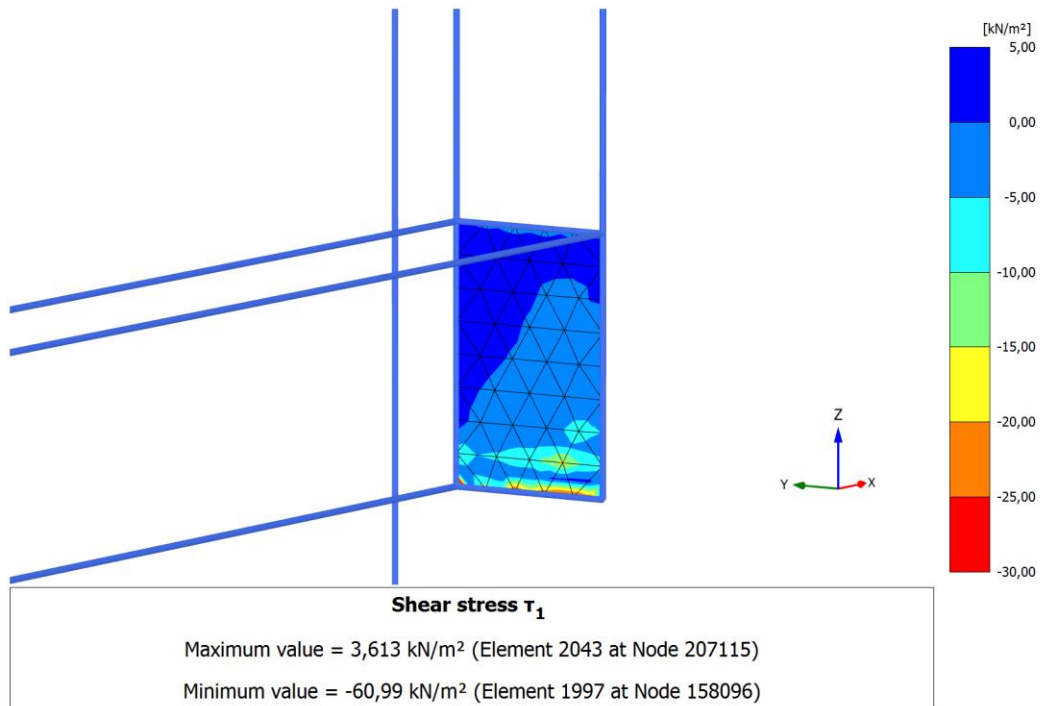
Figur 107 Vertikal skjærspenning på utside av bakvegg under pressing Plaxis 3D drenert



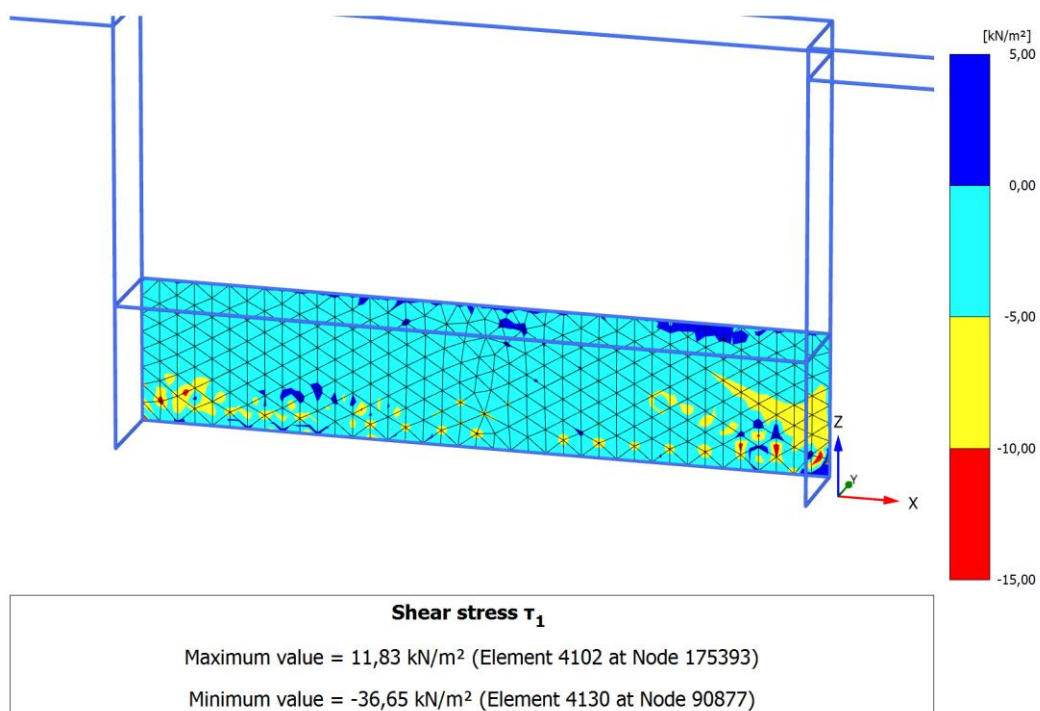
Figur 108 Vertikal skjærspenning på innside av bakvegg under pressing Plaxis 3D drenert



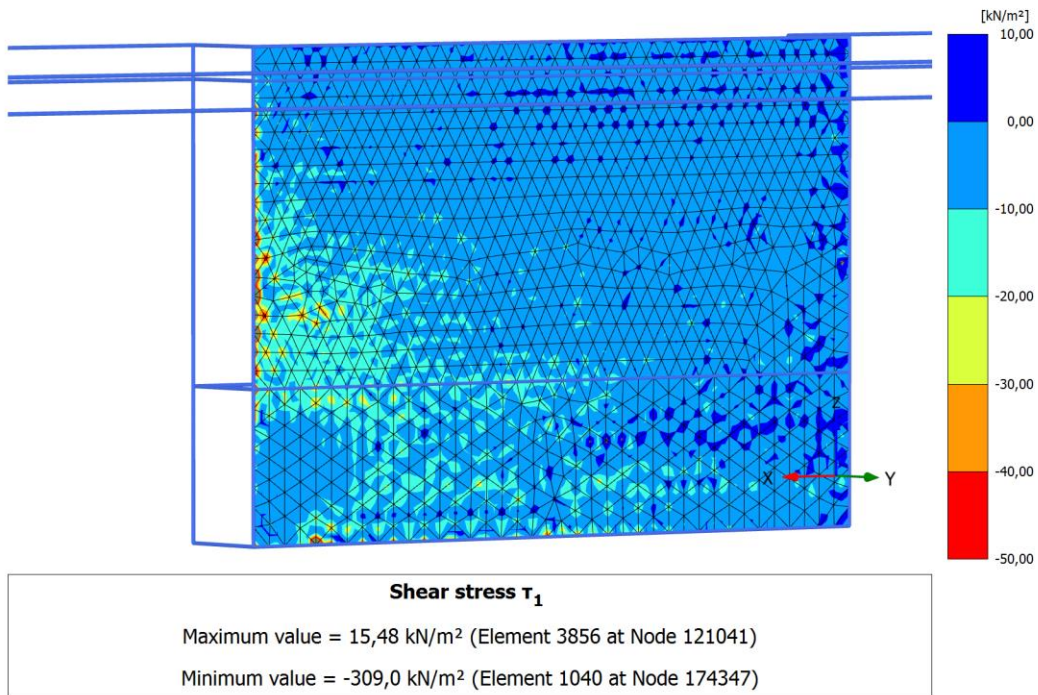
Figur 109 Vertikal skjærspenning på utside av fremvegg under pressing Plaxis 3D drenert



Figur 110 Vertikal skjærspenning på innside av fremvegg under pressing Plaxis 3D drenert



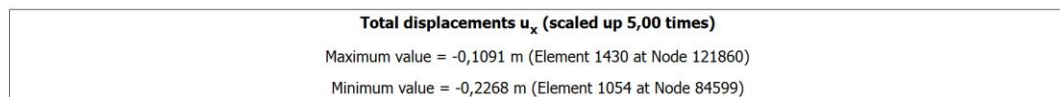
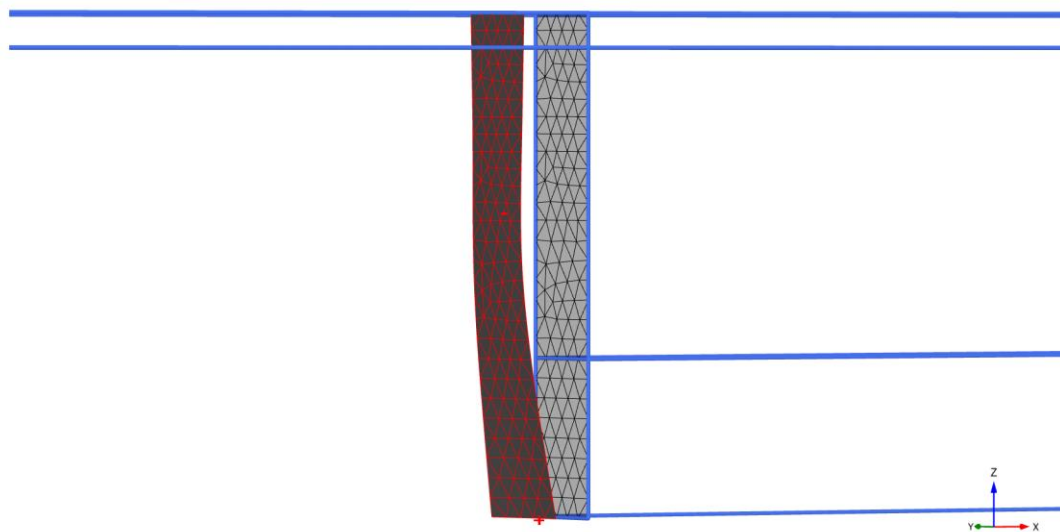
Figur 111 Vertikal skjærspenning på innside av sidevegg under pressing Plaxis 3D drenert



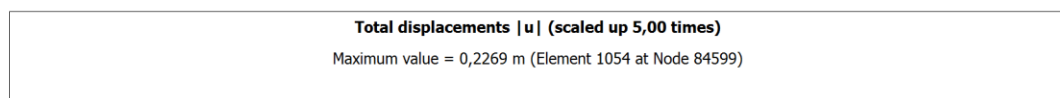
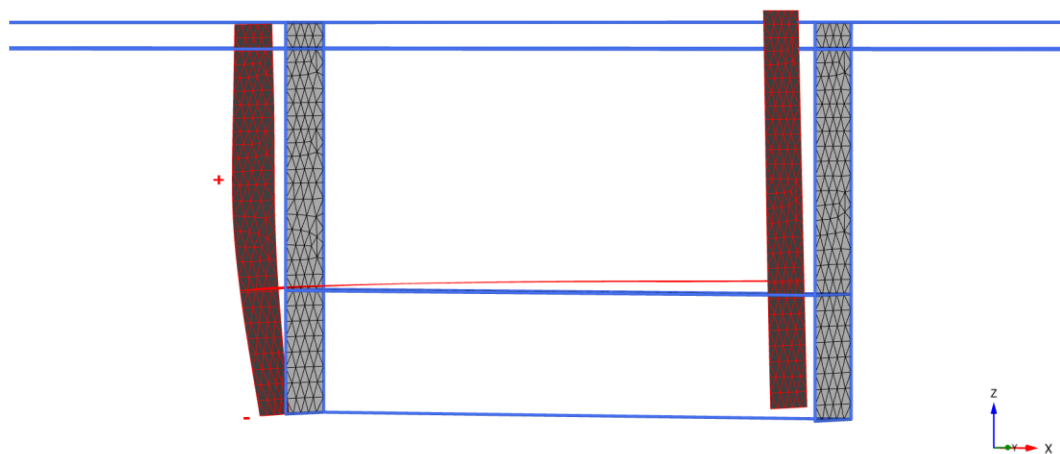
Figur 112 Vertikal skjærspenning på utside av sidevegg under pressing Plaxis 3D drenert

5.3.2.6 Forskyvning av pressegrøp

I Figur 114 vises det at pressegrøpa blir presset opp i fremkant og at hele grøpa viser en tendens til rotasjon mot klokka. Ellers viser figuren at den horisontale forflytningen av spuntveggene avtar noe med dybden. Figur 113 viser at under utgravingsnivå får bakveggen en betydelig forskjell i horisontal forskyvning over bredden (y-retning).



Figur 113 Horizontal forskyvning av bakvegg i Plaxis 2D drenert

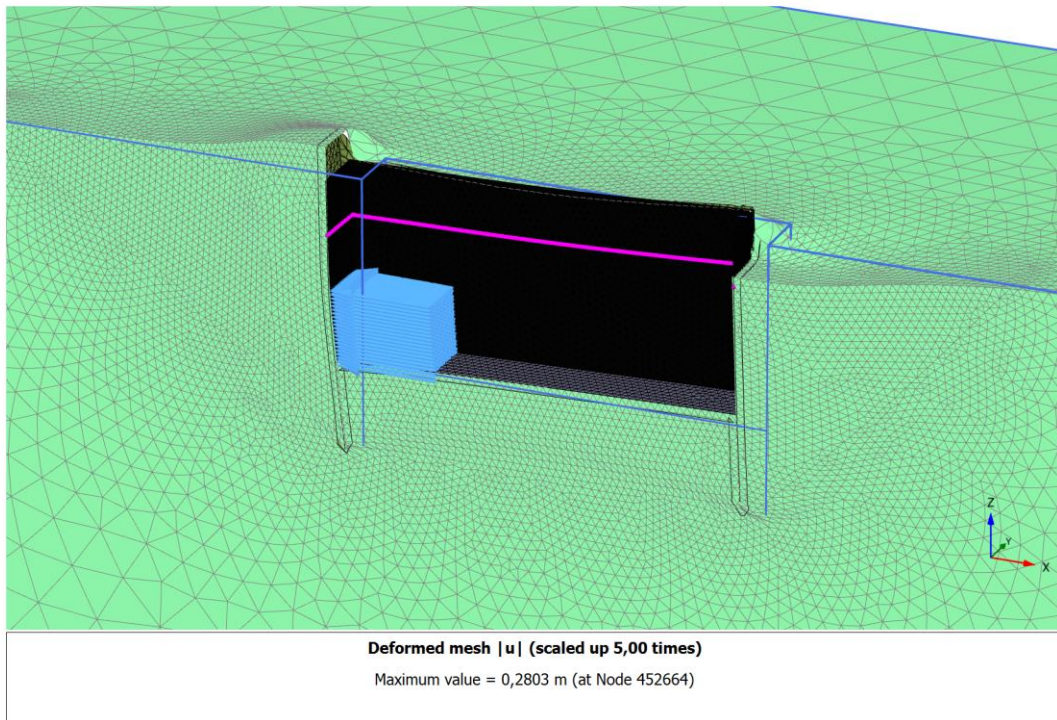


Figur 114 Forskyvning av pressegrøp i Plaxis 3D drenert

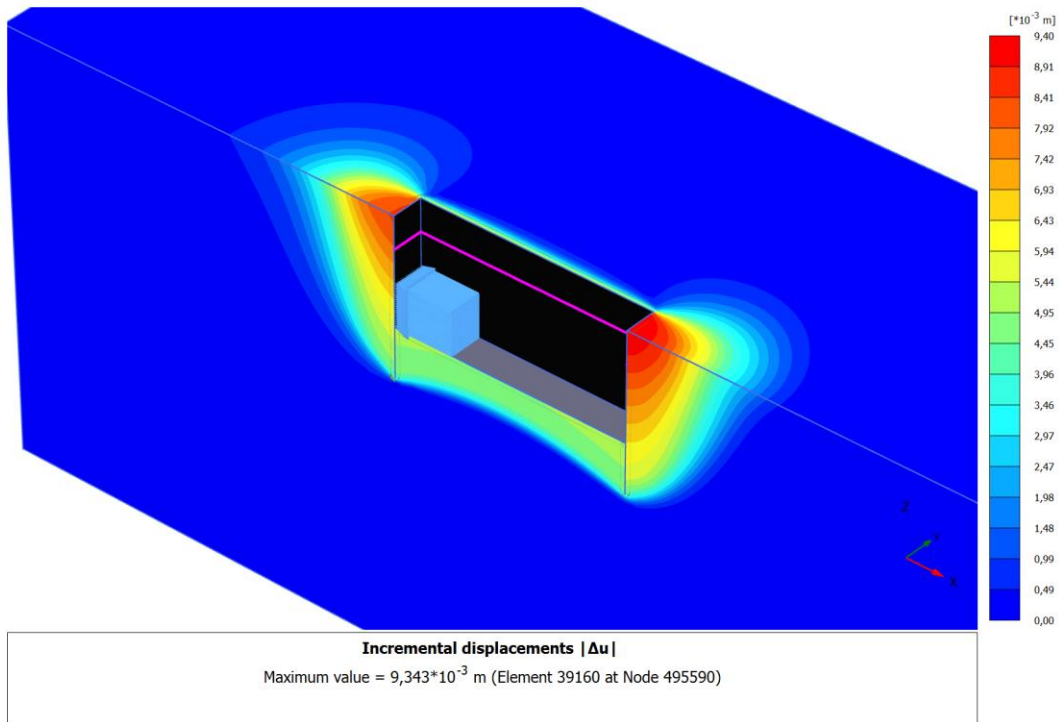
5.3.2 Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden

5.3.2.1 Bruddflater

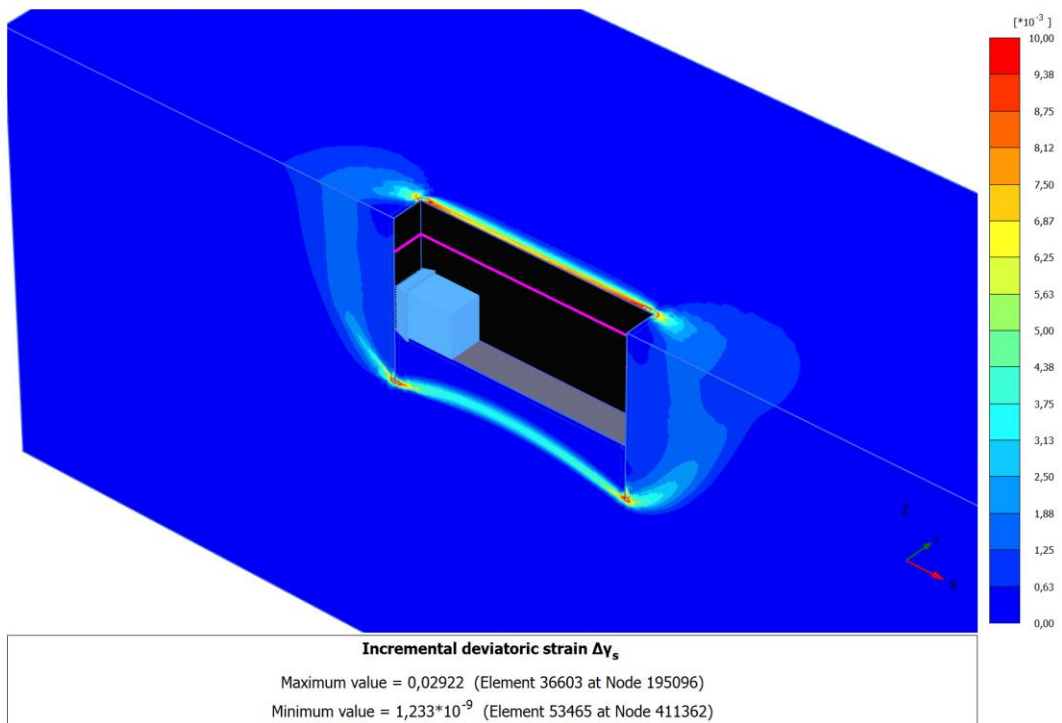
Det observeres en forsenkning foran fremveggen og en forhøyning bak bakveggen etter pressing som vist i Figur 115. Fra Figur 116 og Figur 117 kan en se en tydelig bruddflate under pressegruppa, mens en bruddflate ved fremvegg og bakvegg er lite tydelig. På grunn av utydelige bruddflater er det av Figur 118 og Figur 119 også vanskelig å si om bruddflatene sprer seg utenfor pressegruppa i bredden.



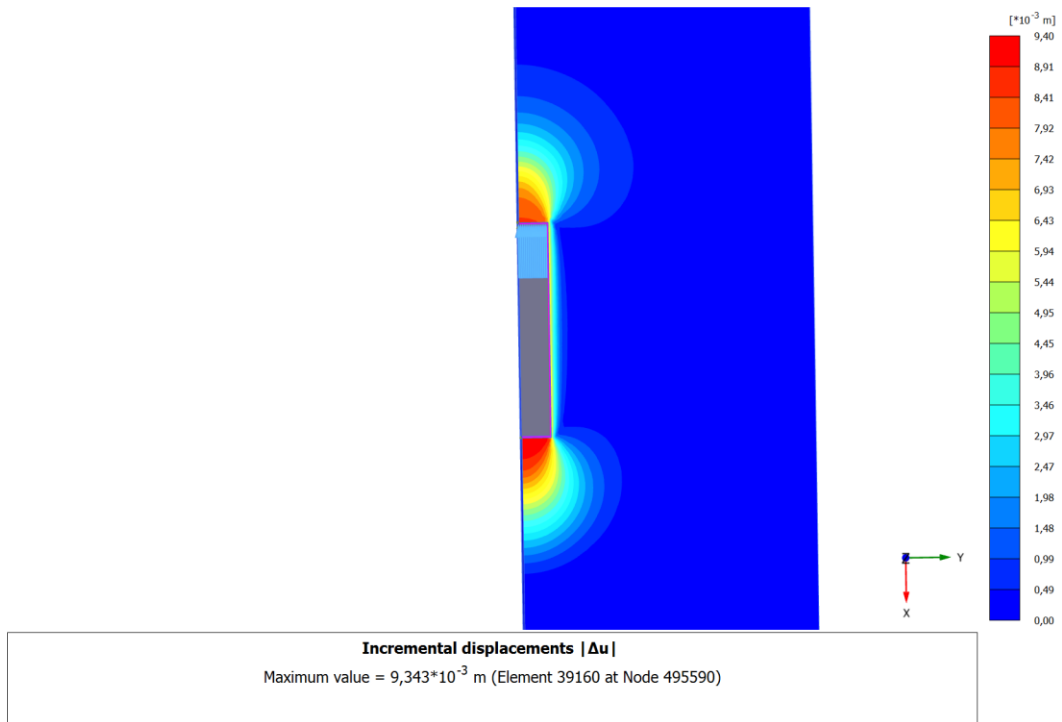
Figur 115 Deformert mesh Plaxis 3D udrenert økende su



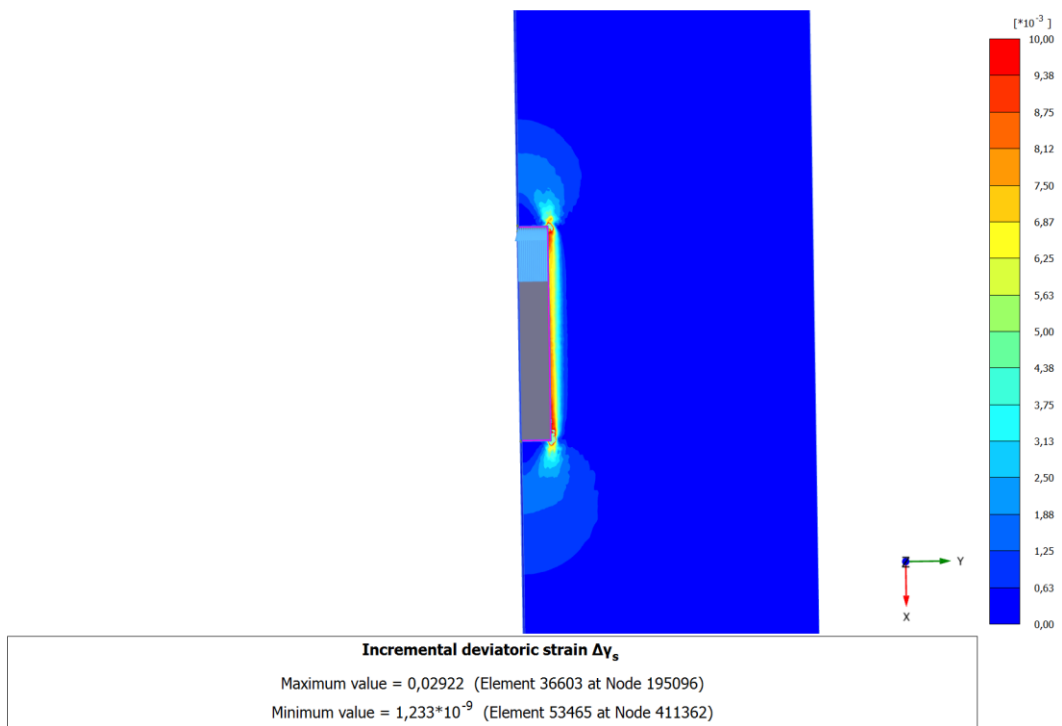
Figur 116 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 3D udrenert økende su



Figur 117 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 3D udrenert økende su



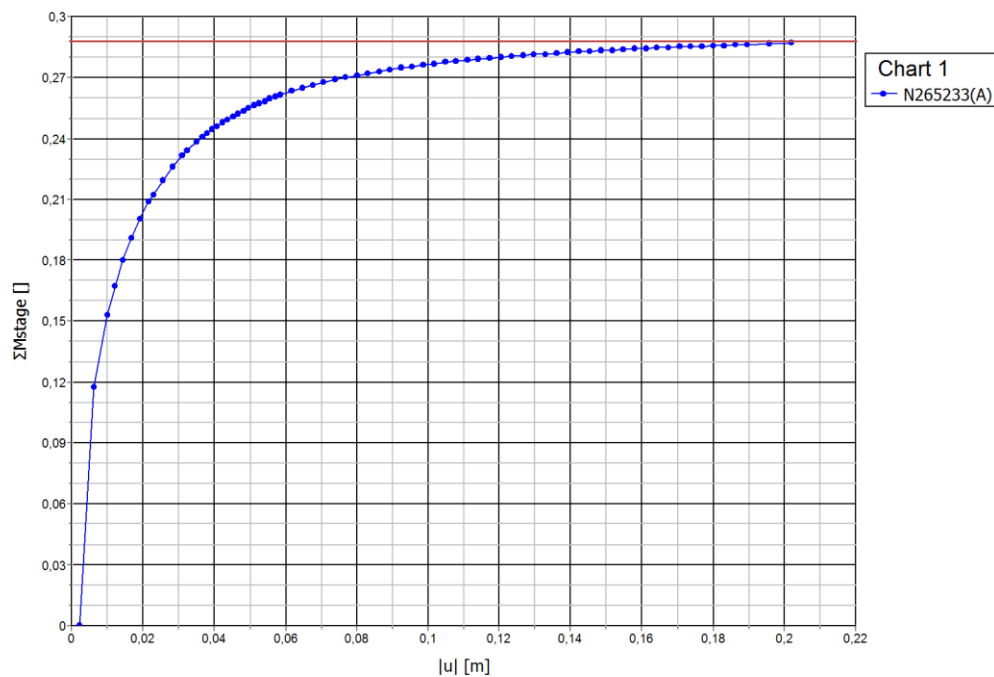
Figur 118 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 3D udrenert økende su sett ovenfra



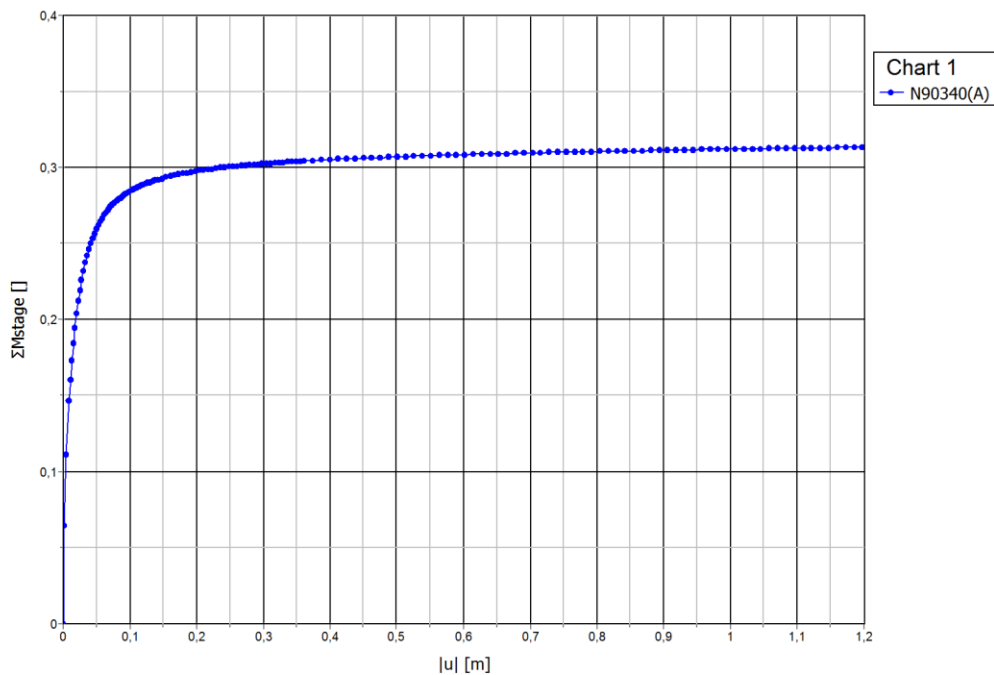
Figur 119 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 3D udrenert økende su sett ovenfra

5.3.2.2 Påført pressekraft/last-forskyvningskurve

I Figur 120 er last-forskyvningskurven til analysen med finest elementinndeling vist. Her leses det av en bruddlast på 1152 kPa. Av kurven ser man en klar tendens til utflating, men det kan likevel se ut som påført last fortsatt kan økes. En analyse med et grovere mesh som er kjørt til større forskyvning viser i Figur 121 at kurven ikke flater helt ut selv for svært store forskyvninger. På grunn av forstyrrelser i resultatene ved stor forskyvning og det faktum at en i praksis ikke vil fortsette å presse med så store forskyvninger er analysen kjørt til en forskyvning som vist i Figur 120.



Figur 120 Påført last mot forskyvning Plaxis 3D udrenert økende σ_u



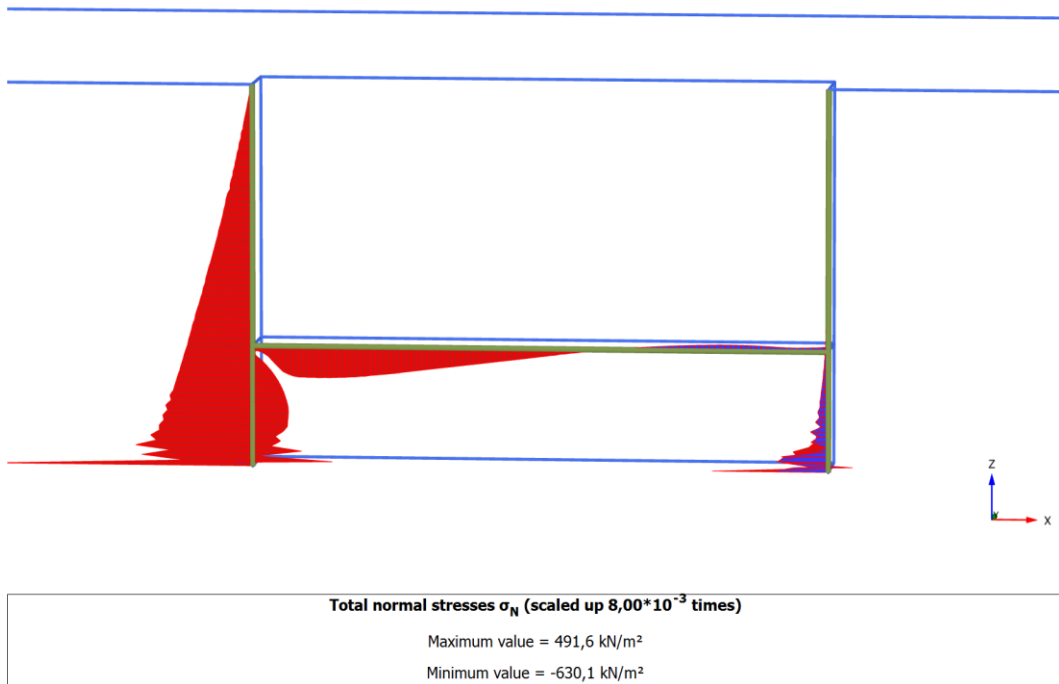
Figur 121 Påført last mot forskyvning Plaxis 3D udrenert økende su grovere mesh til større forskyvning

5.3.2.3 Jordtrykk

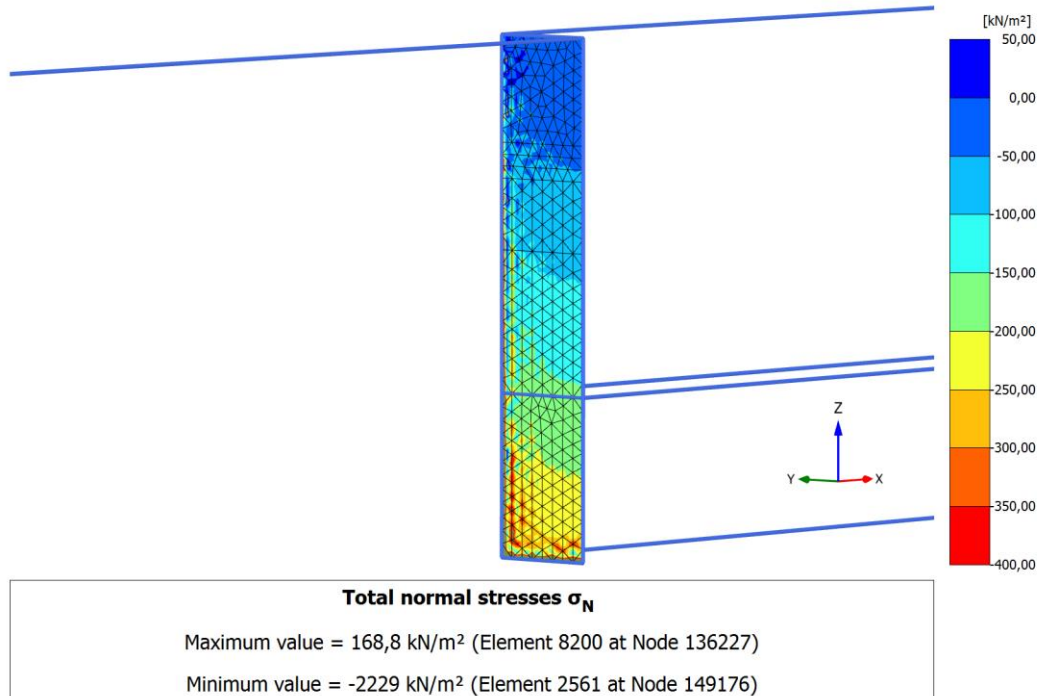
Figur 123 til Figur 127 viser jordtrykkene på pressegropa. På utsiden av bakveggen, vist i Figur 123, kan en se at jordtrykket ser ut til å være større mot hjørnet av pressegropa. På utsiden av fremveggen, vist i Figur 125, er jordtrykket i hovedsak sug. Figur 122 viser jordtrykkene i midtsnitt av pressegropa og disse er lagt til grunn for å estimere resultanter, vist i Tabell 36. Igjen er resultatene medtatt sug angitt i parentes. Legger man til estimert bidrag fra skjær på 742,5 kPa, vist i Tabell 37, fås 1151,5 kPa. Dette er svært nær bruddlasten på 1152 kPa funnet fra Figur 120.

Kraftresultant fra passivt jordtrykk bakvegg	835,5 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk bakvegg	-147,5 kN/m
Sum bakvegg	688 kN/m
Bidrag fra bakvegg til maksimal pressekraft	344 kPa
Kraftresultant fra passivt jordtrykk fremvegg	56,5 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk fremvegg	-5 (73) kN/m
Sum fremvegg	51,5 (129,5) kN/m
Bidrag fra fremvegg til maksimal pressekraft	26 (65) kPa
Totalt bidrag fra frem og bakvegg til pressekraft	370 (409) kPa
Kraftresultant fra jordtrykk under betongplate	375 kN

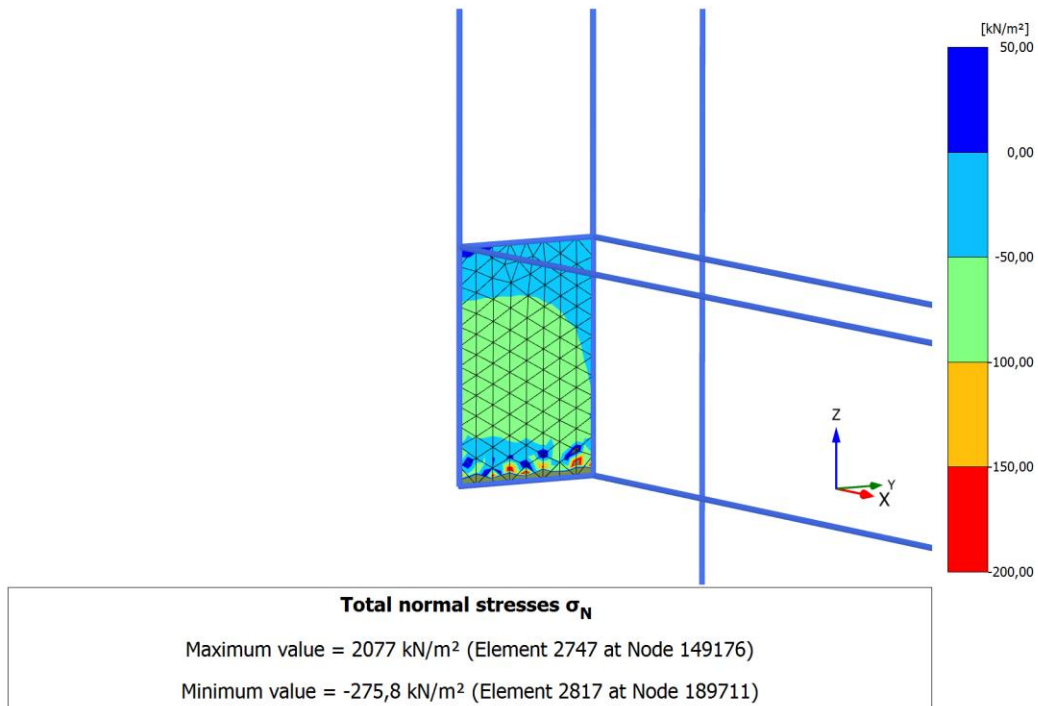
Tabell 36 Kraftresultanter fra jordtrykk Plaxis 3D udrenert økende su



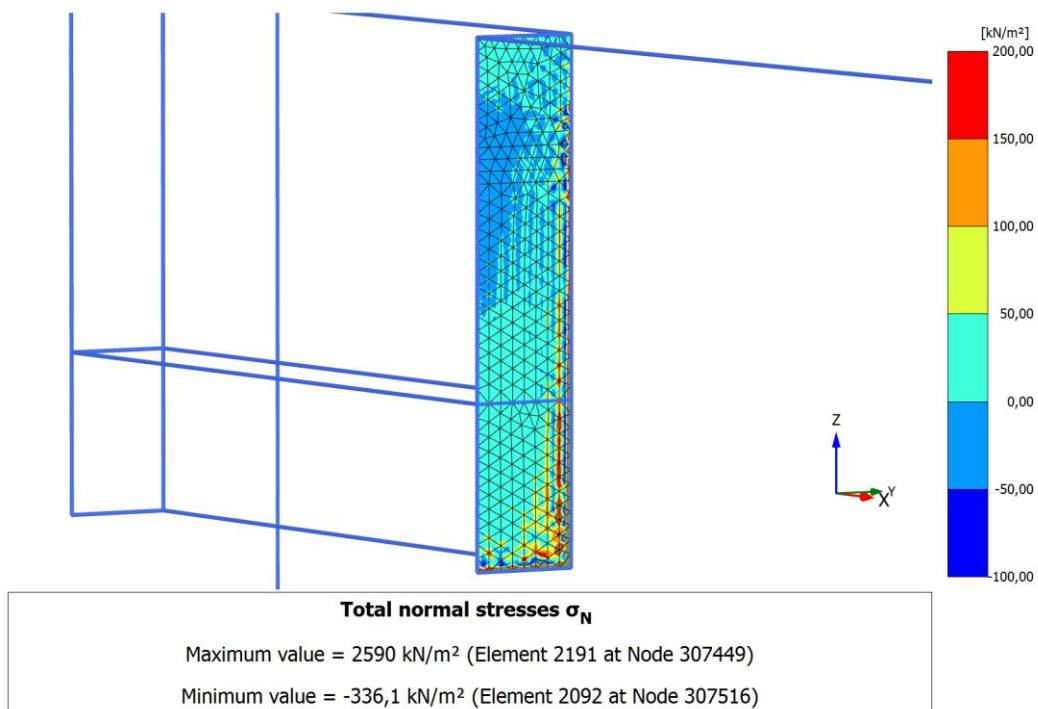
Figur 122 Jordtrykk i midtsnitt under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



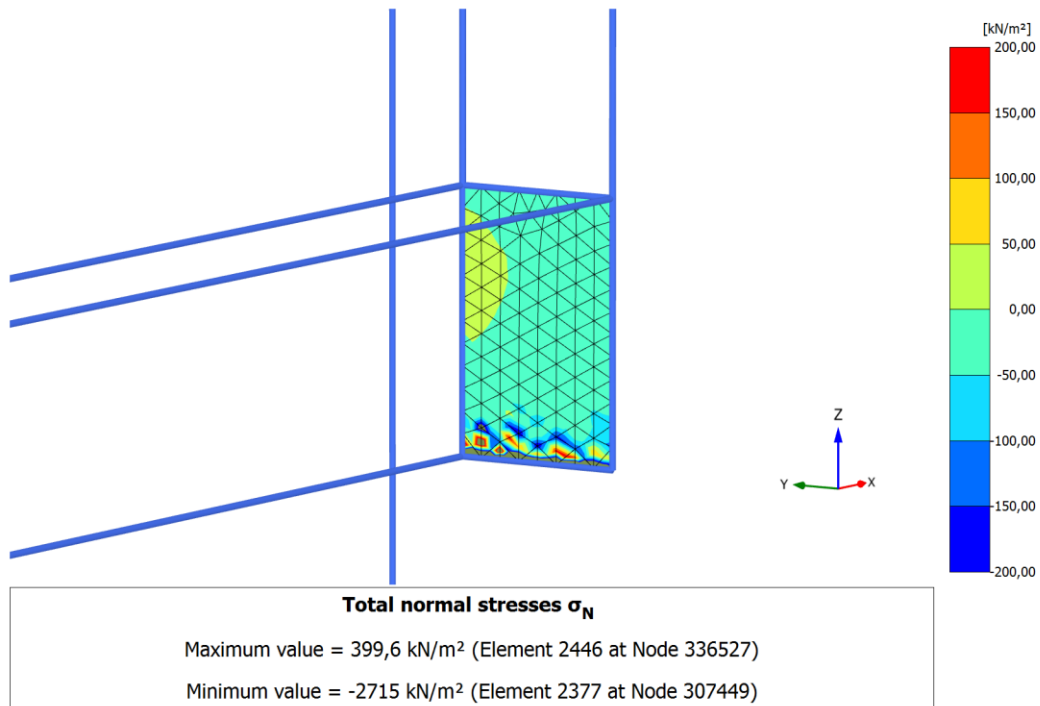
Figur 123 Jordtrykk på utsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



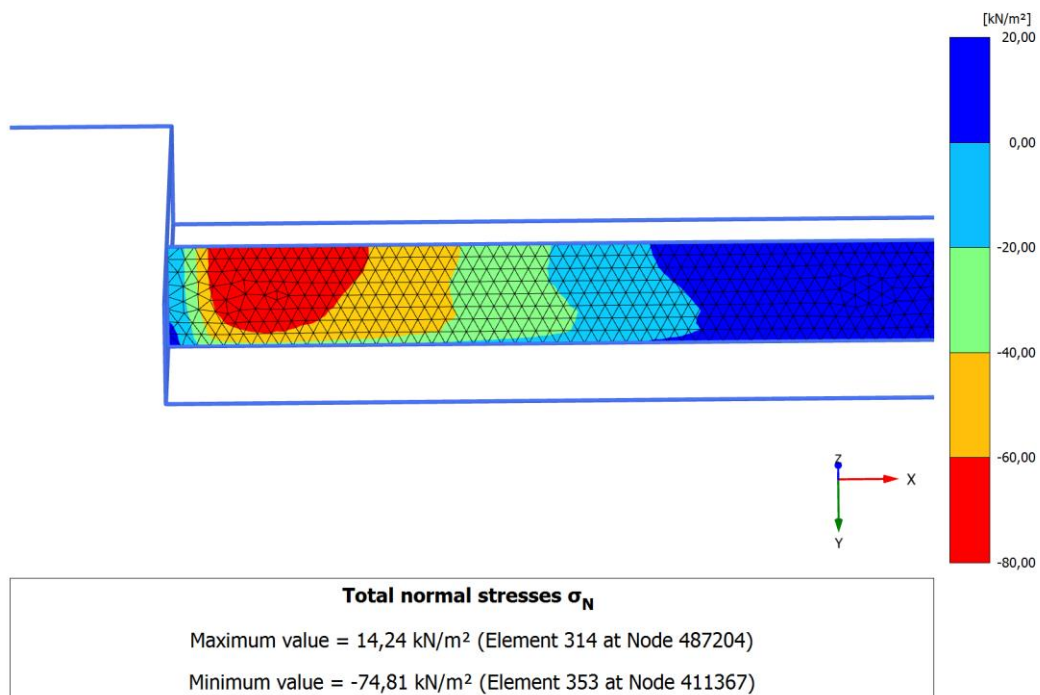
Figur 124 Jordtrykk på innsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



Figur 125 Jordtrykk på utsiden av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



Figur 126 Jordtrykk på innsiden av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



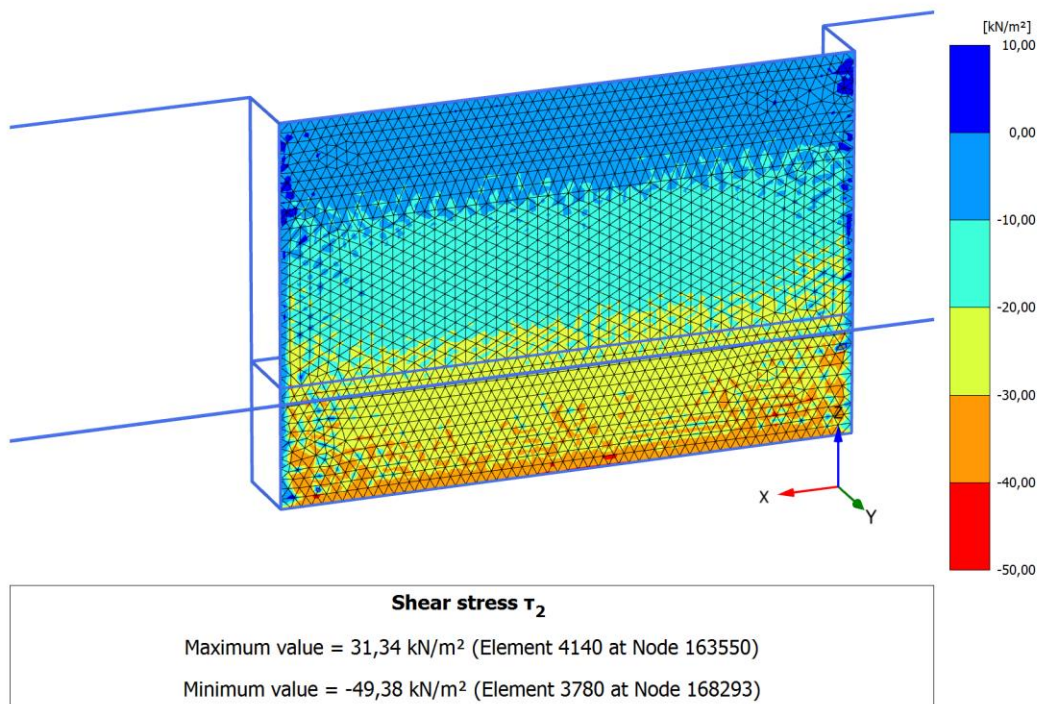
Figur 127 Jordtrykk på undersiden av betongplate under pressing Plaxis 3D udrenert økende su

5.3.2.4 Horisontal skjærspenning

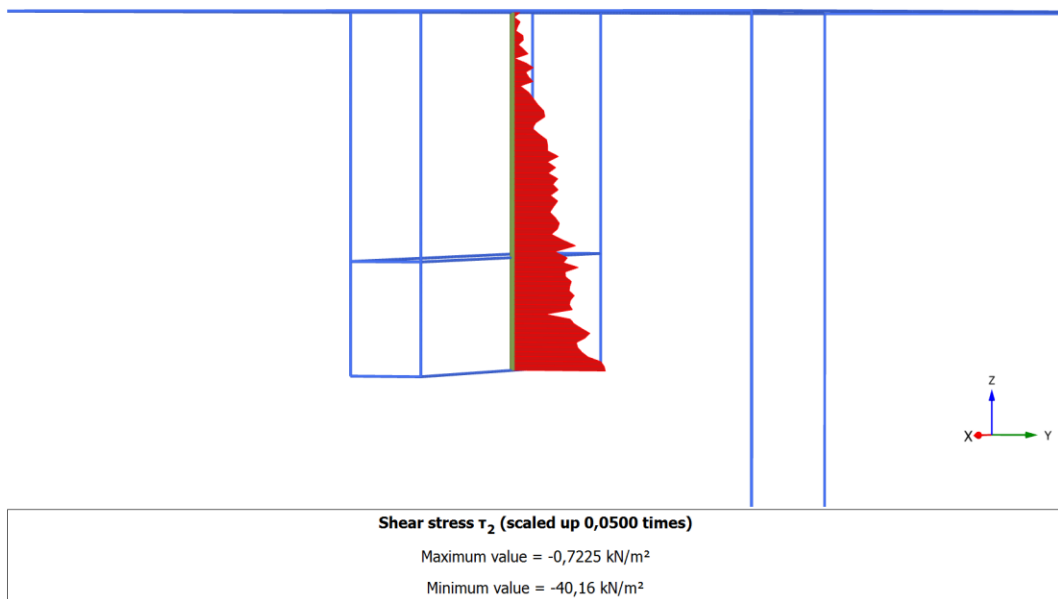
Den horisontale skjærspenningen som virker på sideveggene er vist i Figur 128 og Figur 130. Midtsnittene, vist i Figur 129 og Figur 131, er forenklet antatt representative for hele lengden og er benyttet for å estimere resultanter og bidrag til maksimal pressekraft vist i Tabell 37. Det legges merke til den mindre sonen i Figur 130 der skjærspenningen er motsatt rettet. Dette skyldes igjen den passive jordtrykkssonen på innsiden av fremveggen. Skjærspenningen under betongplata er ikke neglisjerbar som vist i Figur 132 og midtsnittet, vist i Figur 133, er vurdert for å estimere resultatant og bidrag til pressekraft.

Kraftresultant fra utsiden	126,5 kN/m eller 1391,5 kN
Kraftresultant fra innsiden	64 kN/m eller 704 kN
Kraftresultant fra underside betongplate	88 kN/m eller 132 kN
Sum	2227,5 kN
Bidrag til maksimal pressekraft	742,5 kPa

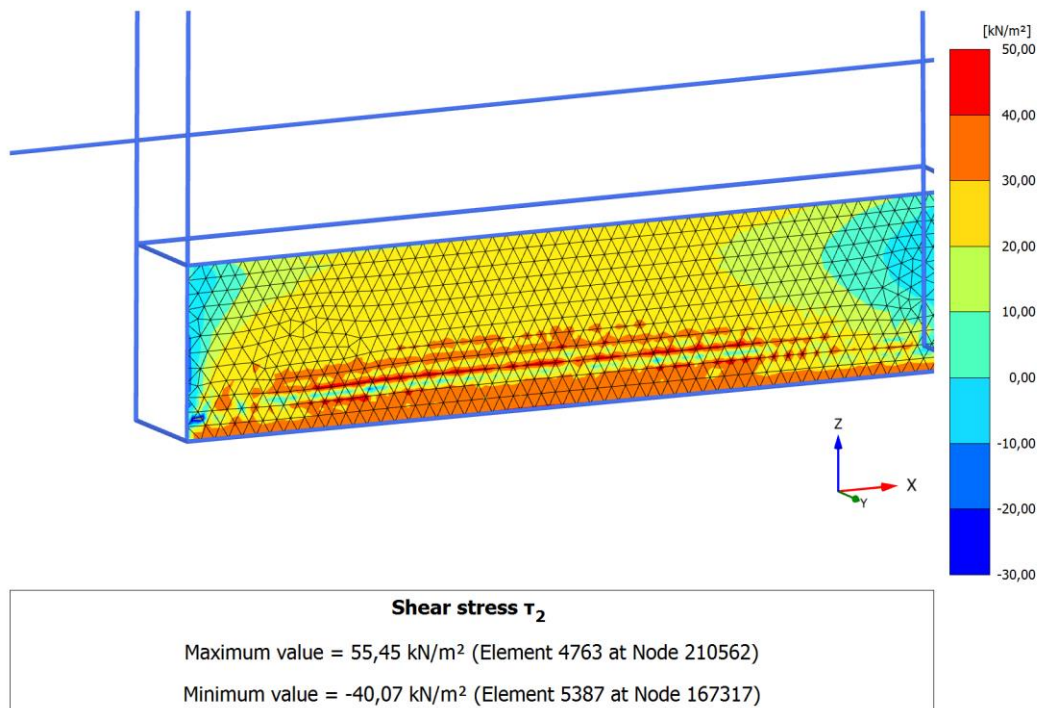
Tabell 37 Kraftresultanter fra horisontal skjær Plaxis 3D udrenert økende su



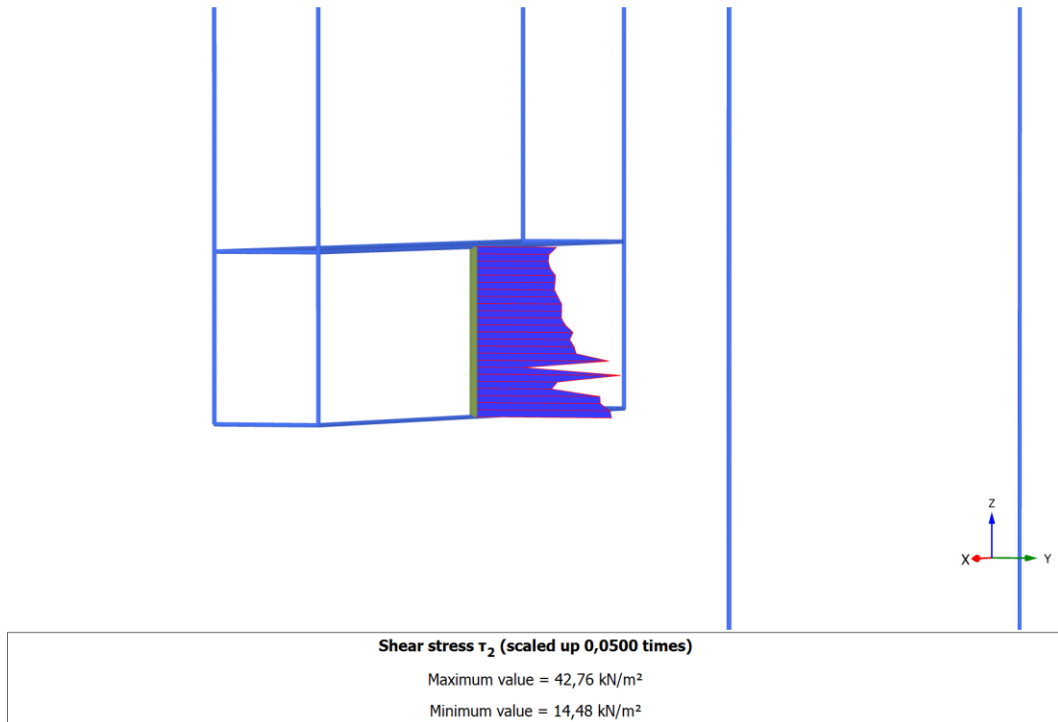
Figur 128 Horisontal skjærspenning på utside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



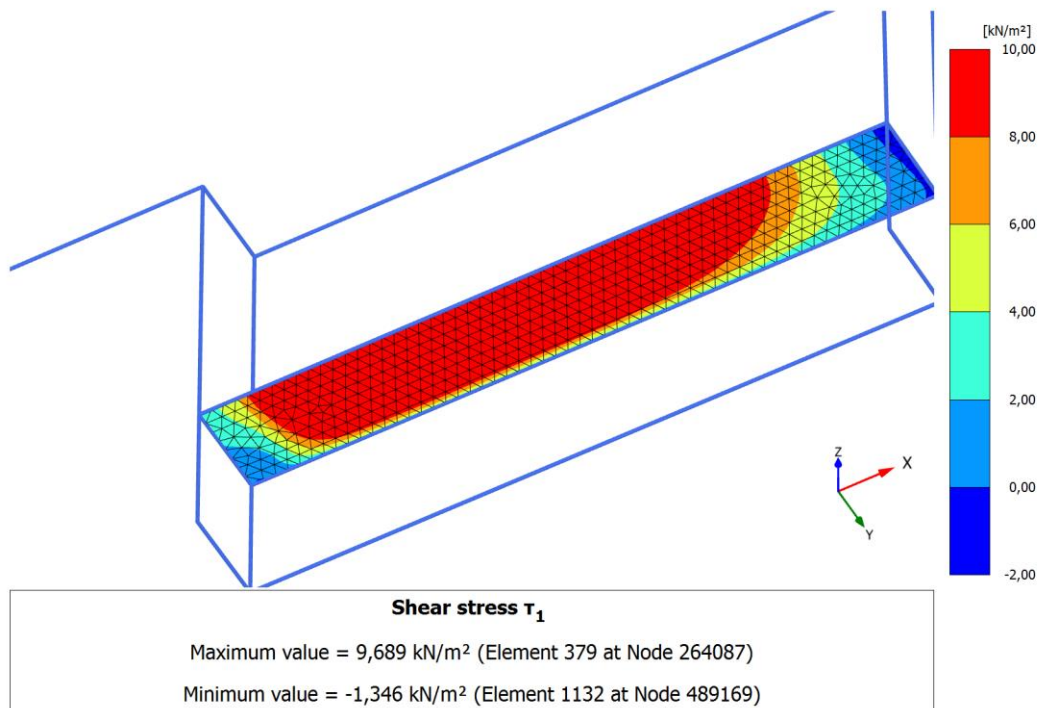
Figur 129 Horizontal skjærspenning midtsnitt på utside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



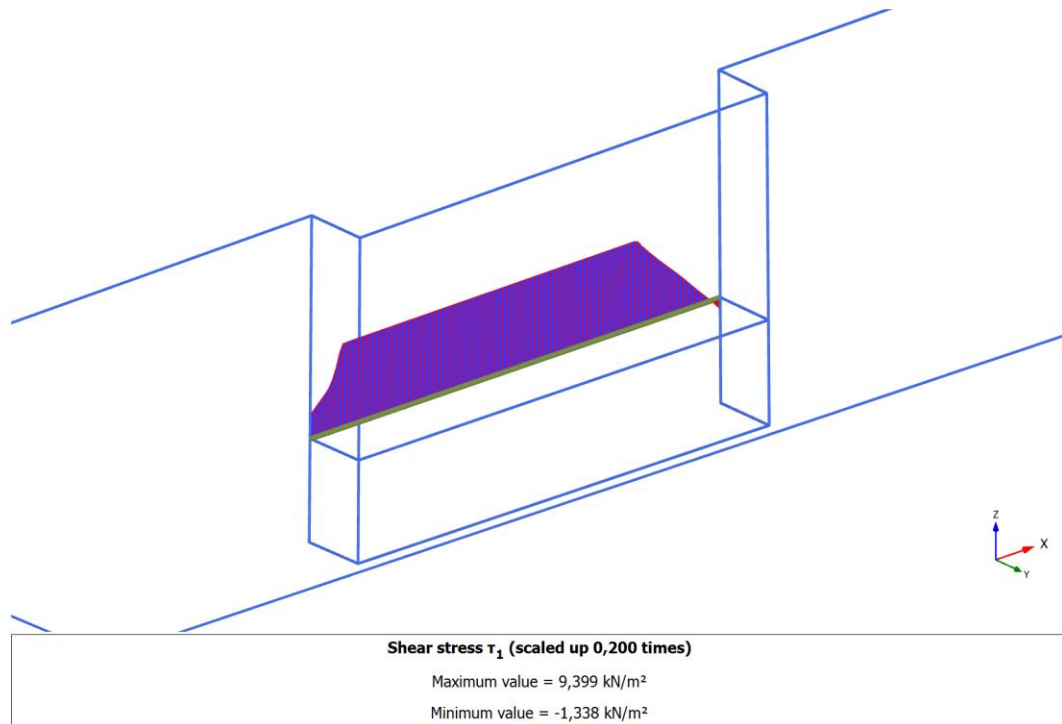
Figur 130 Horizontal skjærspenning på innside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



Figur 131 Horizontal skjærspenning midtsnitt på innside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



Figur 132 Horizontal skjærspenning på underside av betongplate under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



Figur 133 Horizontal skjærspenning midtsnitt på underside av betongplate under pressing Plaxis 3D udrenert økende su

5.3.2.5 Vertikal skjærspenning

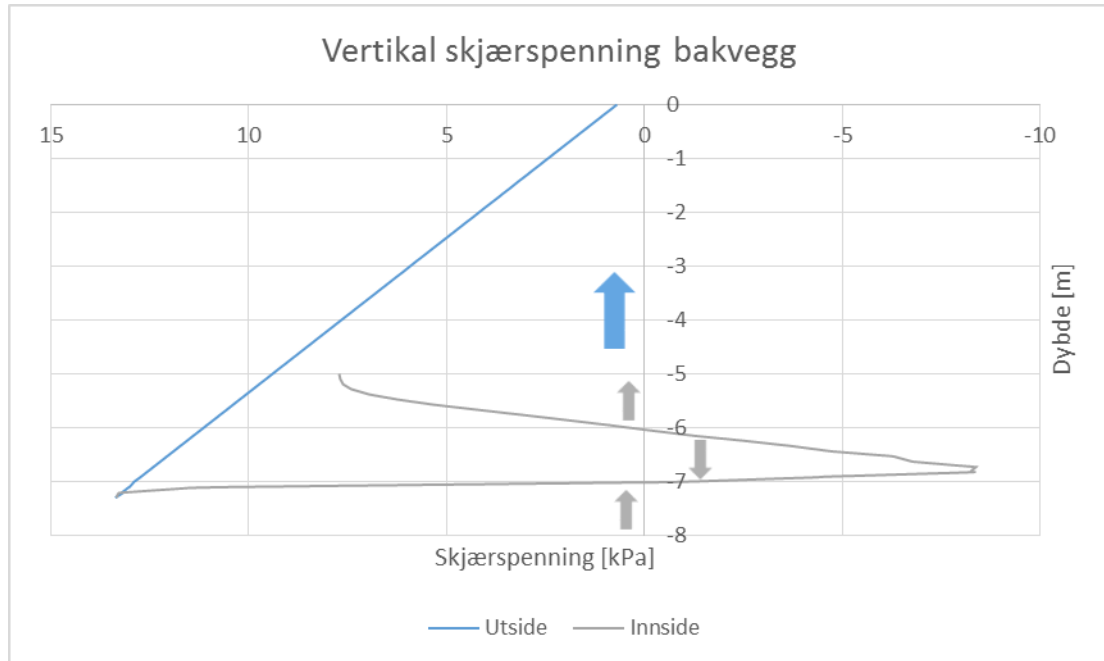
Figur 137 til Figur 142 viser den vertikale skjærspenningen på pressegrova. I Figur 134 til Figur 136 er de vertikale skjærspenningene vist for midtsnitt som er antatt representative for hele bredden/lengden for å estimere kraftresultanter. I Figur 138 og Figur 140 kan en se at skjærspenningen på innsiden av bakveggen og fremveggen varierer en del over bredden og at midtsnittet kanskje ikke er så representativt. Midtsnittet er likevel forenklet valgt fordi kraftresultantene er såpass små og en mindre feil her har liten betydning. Av Figur 141 og Figur 142 vises det at skjærspenningen varierer relativt mye på sideveggen og skifter retning. En ser likevel en slags symmetri omkring et midtsnitt der forskjellene utjevner hverandre noe. De estimerte kraftresultanter fra skjær på sideveggen må anees som relativt usikre. De estimerte kraftresultantene er vist i Tabell 38 og en kontroll av vertikallikevekt er vist i Tabell 39.

Kraftresultant fra skjær utside bakvegg	77 kN
Kraftresultant fra skjær innside bakvegg	5,5 kN
Sum bakvegg	82,5 kN
Kraftresultant fra skjær utside fremvegg	-77 kN
Kraftresultant fra skjær innside fremvegg	-2 kN
Sum fremvegg	-79 kN
Kraftresultant fra skjær utside sidevegg	-119 kN
Kraftresultant fra skjær utside sidevegg	-61,5 kN
Sum sidevegg	-180,5 kN
Totalt fra fremvegg, bakvegg og sidevegg	-177 kN

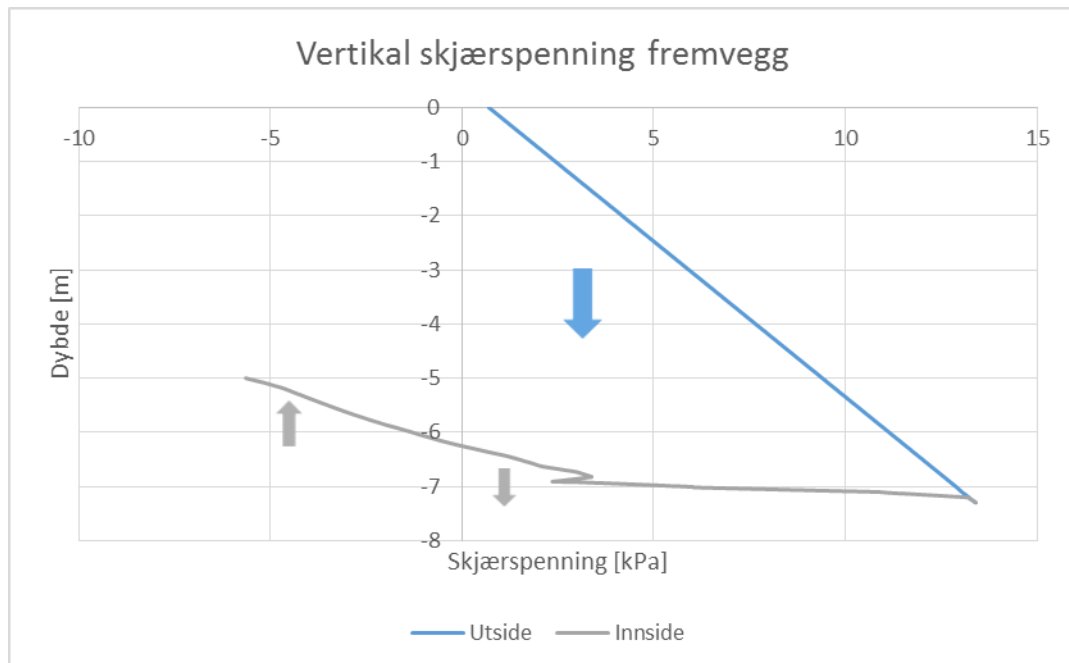
Tabell 38 Kraftresultanter fra vertikal skjær Plaxis 3D udrenert økende su

Totalt fra frem, bakvegg og sidevegg	-177 kN
Kraftresultant fra jordtrykk under betongplate	375 kN
Vekt av pressegrøp	-205 kN
Sum vertikalkrefter	-7 kN

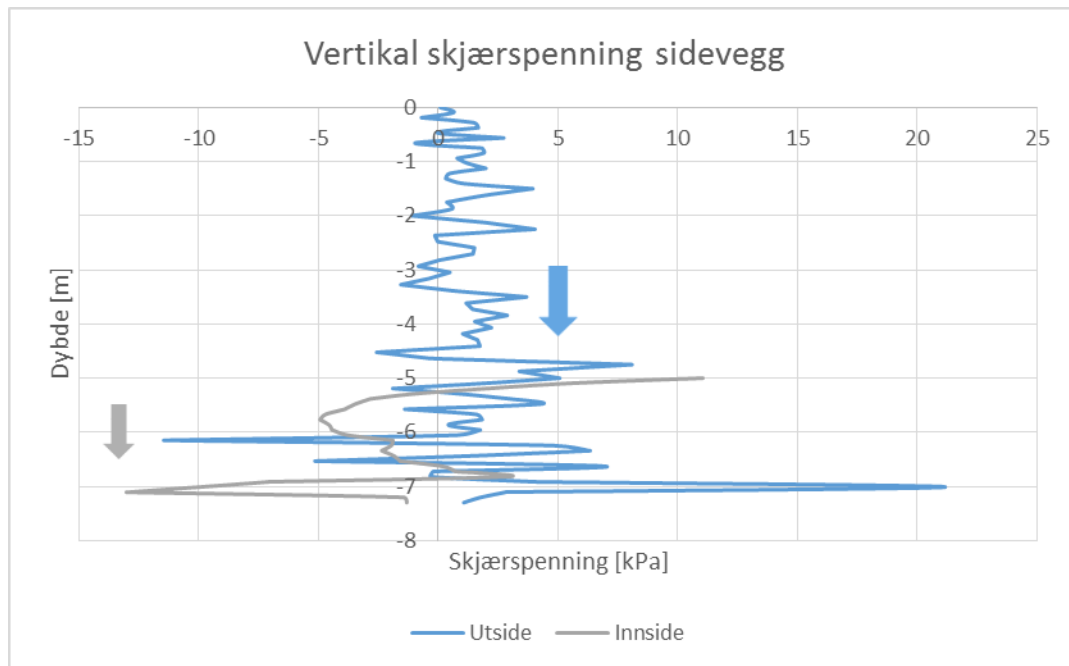
Tabell 39 Kontroll av vertikallikevekt Plaxis 3D udrenert økende su



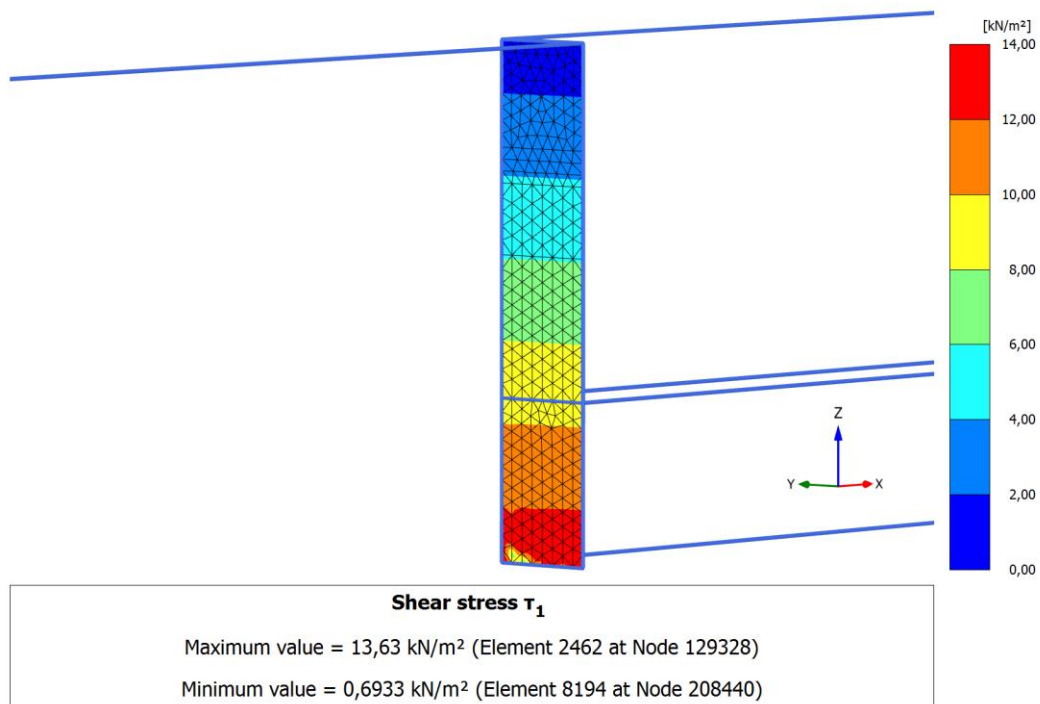
Figur 134 Vertikal skjærspenning midtsnitt på bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



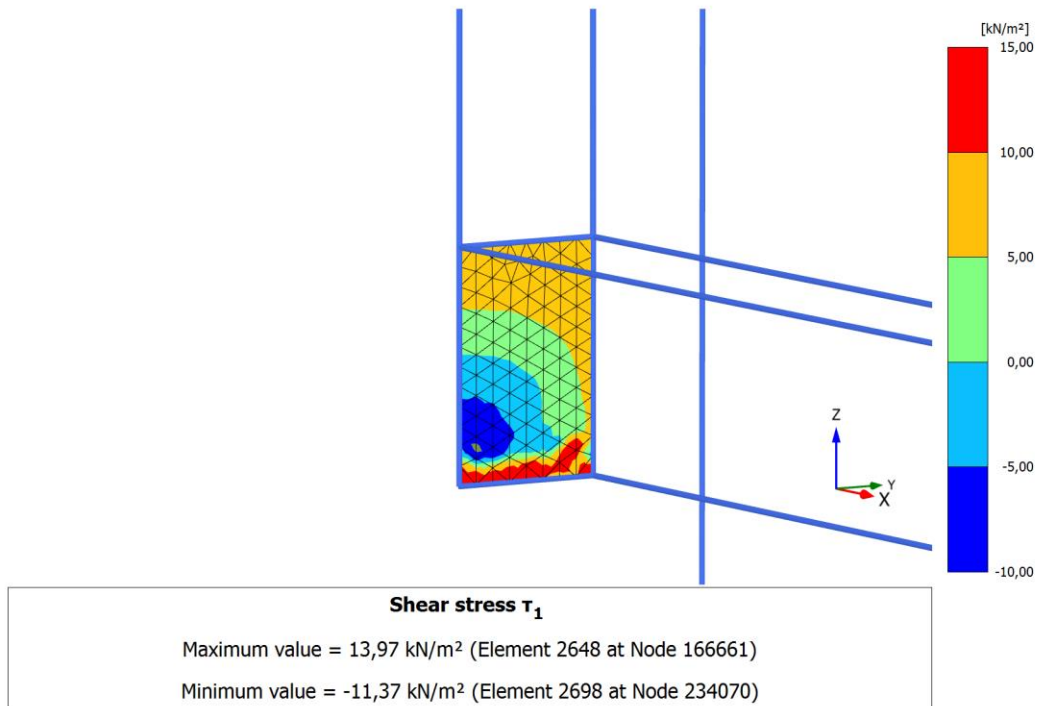
Figur 135 Vertikal skjærspenning midtsnitt på fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



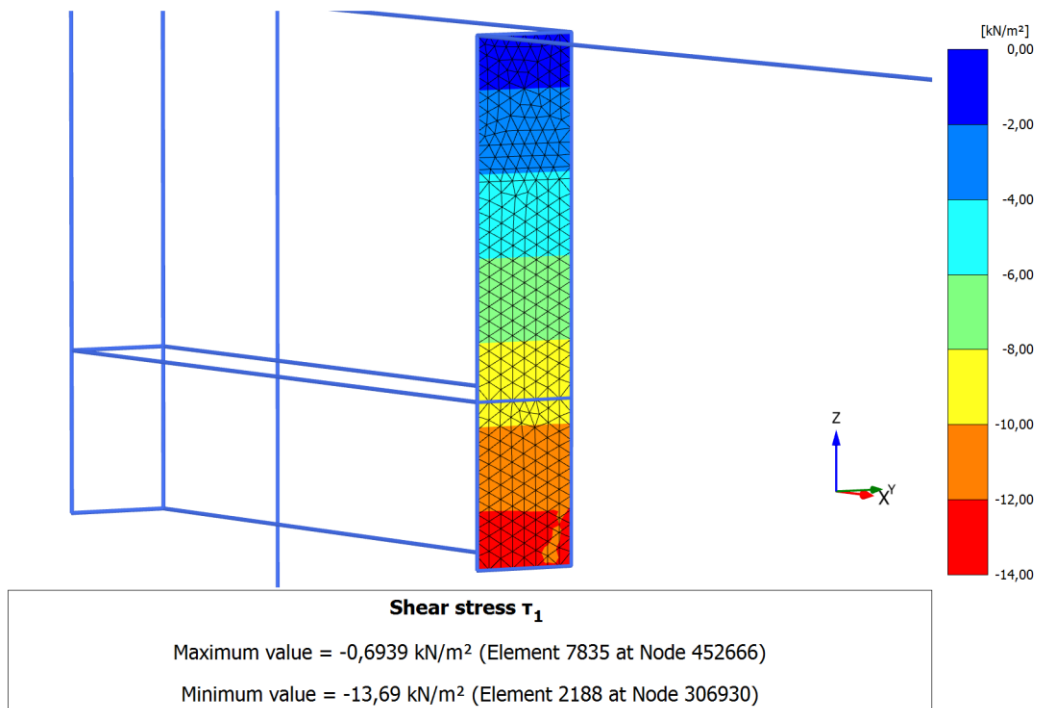
Figur 136 Vertikal skjærspenning midtsnitt på sidevegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende s_u



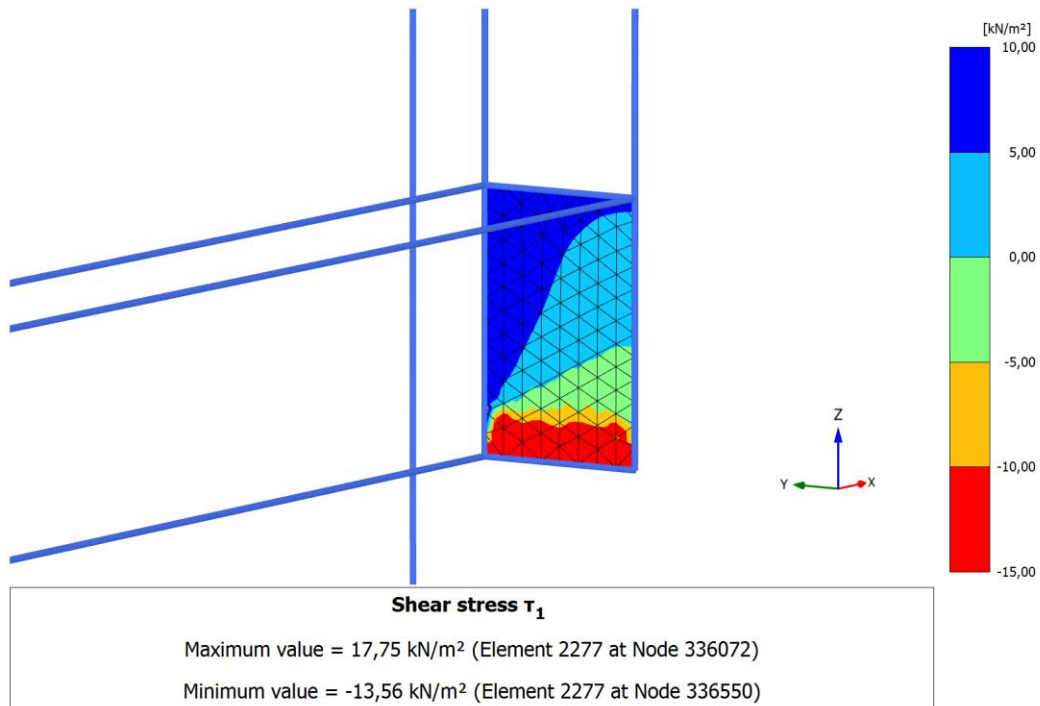
Figur 137 Vertikal skjærspenning på utside av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende s_u



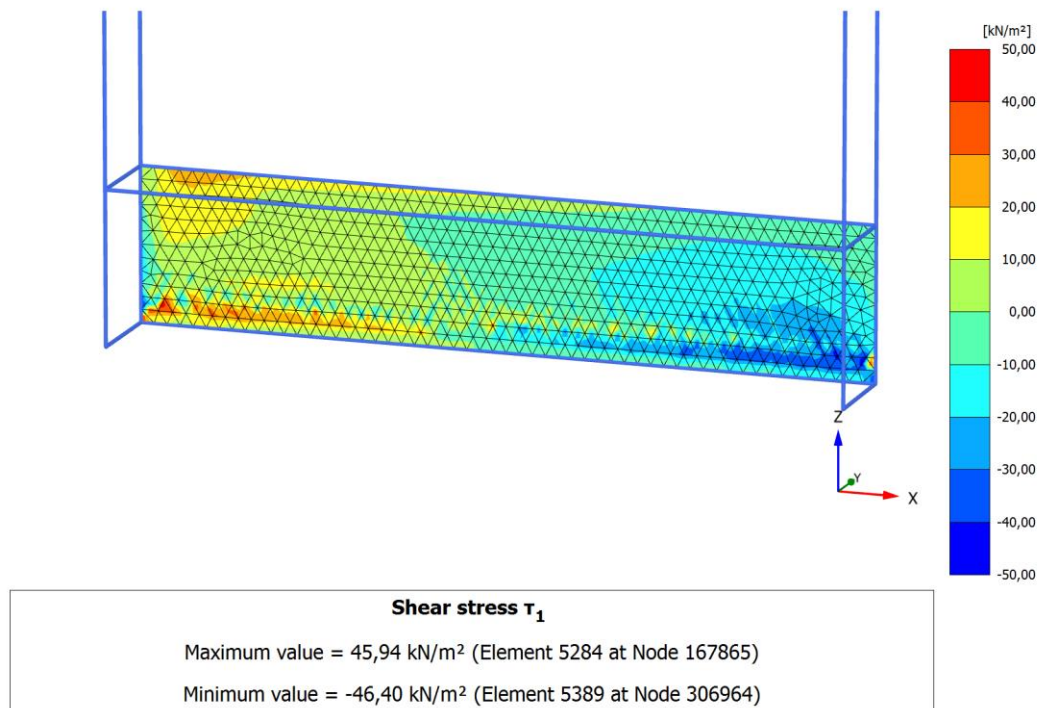
Figur 138 Vertikal skjærspenning på innsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende s_u



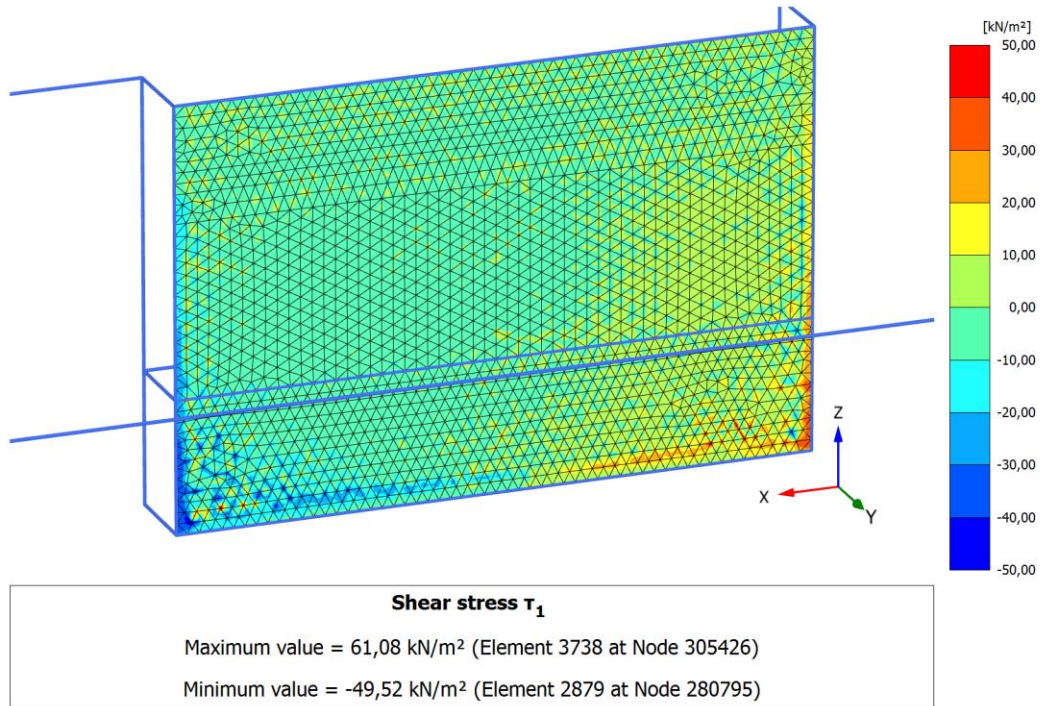
Figur 139 Vertikal skjærspenning på utsiden av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende s_u



Figur 140 Vertikal skjærspenning på innside av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



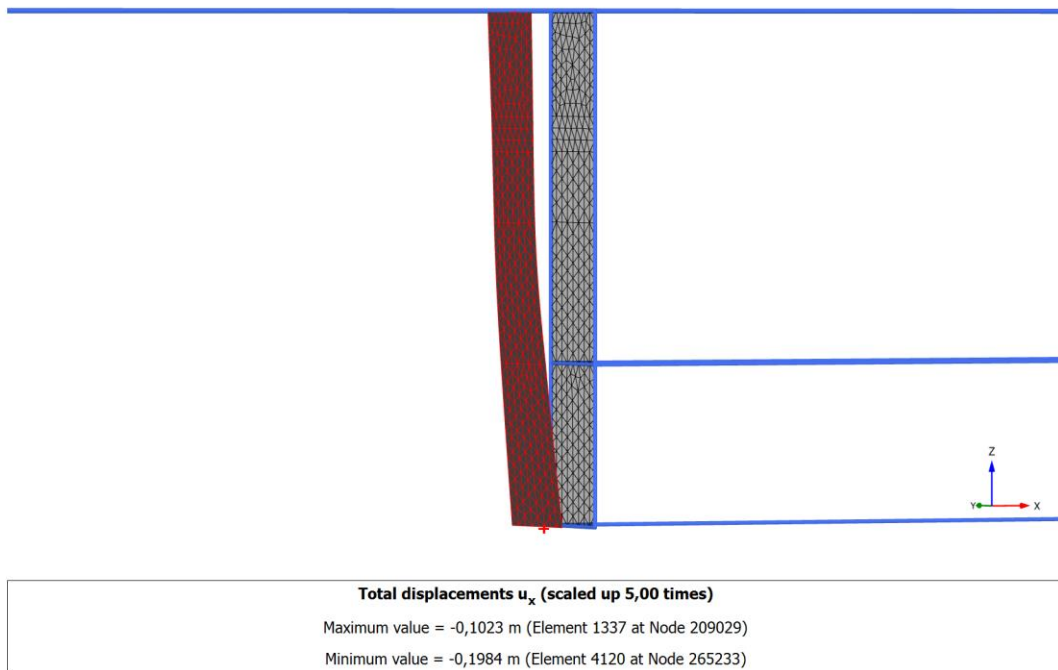
Figur 141 Vertikal skjærspenning på innside av sidevegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende su



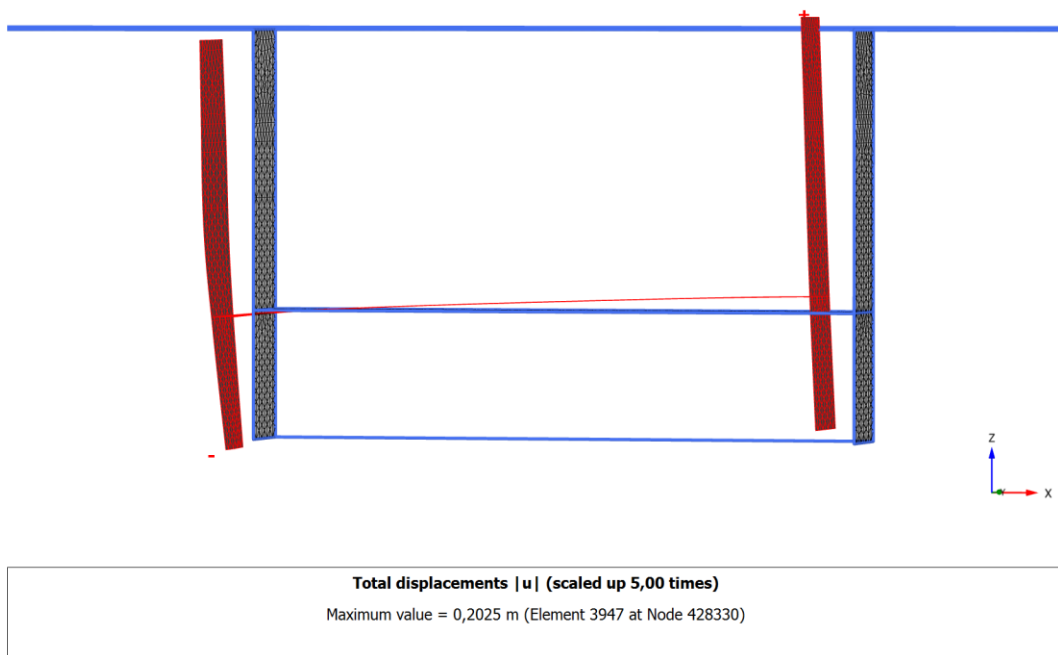
Figur 142 Vertikal skjærspenning på utside av sidevegg under pressing Plaxis 3D udrenert økende s_u

5.3.2.6 Forskyvning av pressegrøp

Figur 143 viser at pressegrøpa blir presset opp i fremkant og ned i bakkant. Dette fører til at hele grøpa viser en tendens til rotasjon mot klokka. Figur 144 viser at under utgravingsnivå får bakveggen en betydelig forskjell i horisontal forskyvning over bredden (y-retning).



Figur 143 Horizontal forskyvning av bakvegg i Plaxis 3D udrenert økende s_u

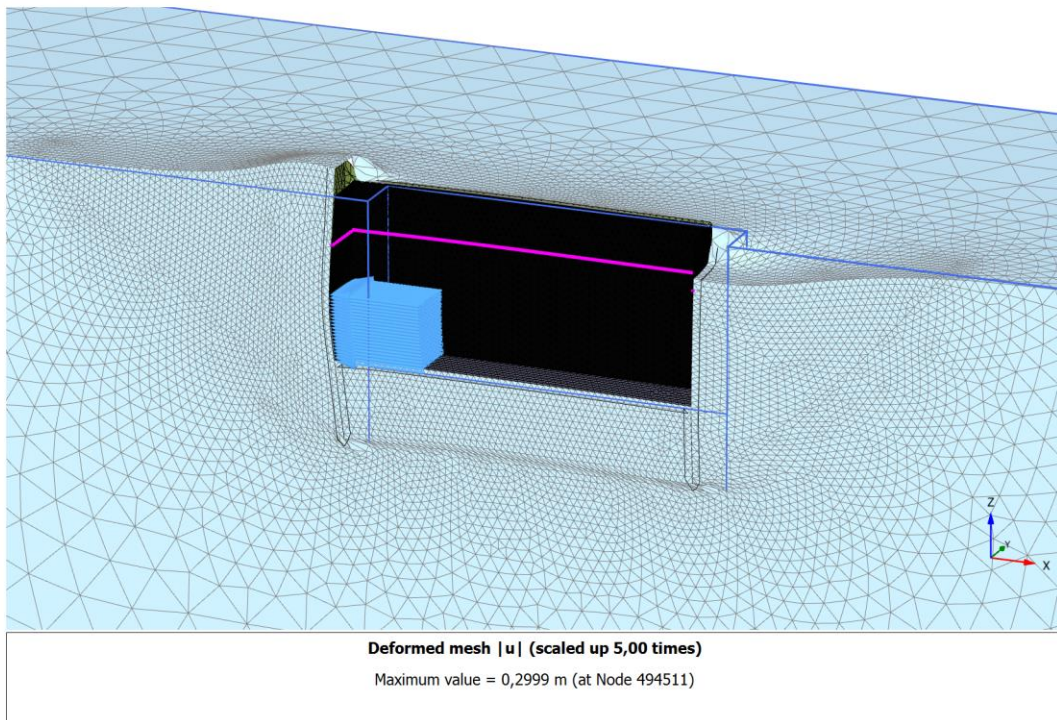


Figur 144 Forskyvning av pressegrup i Plaxis 3D udrenert økende s_u

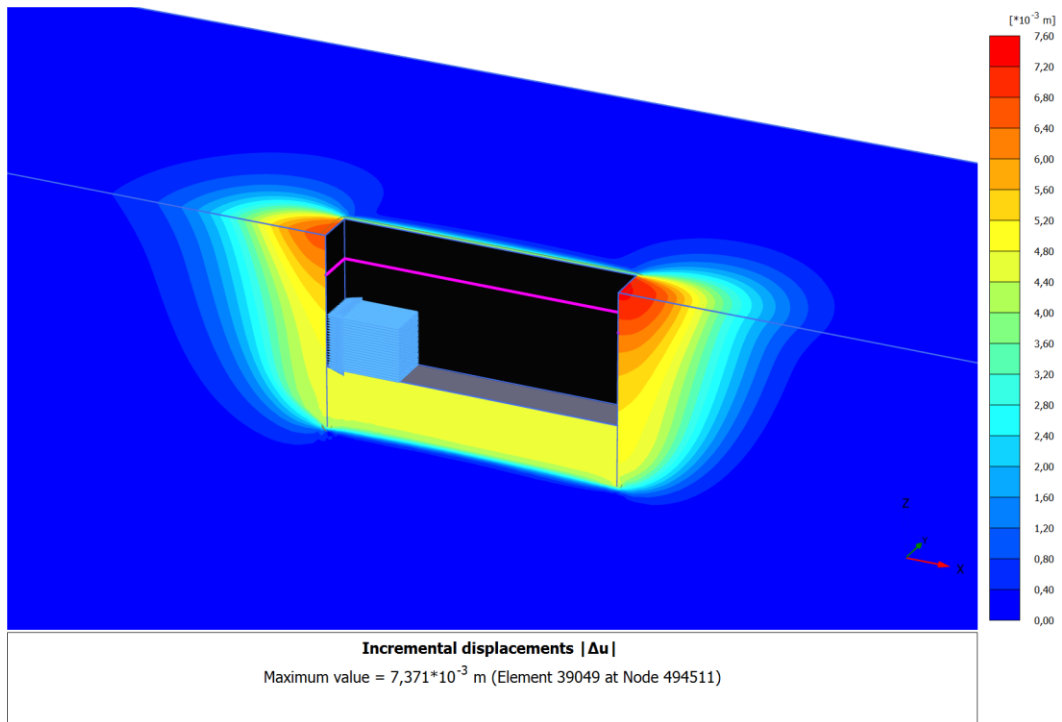
5.3.3 Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke (50 kPa)

5.3.1.1 Bruddflater

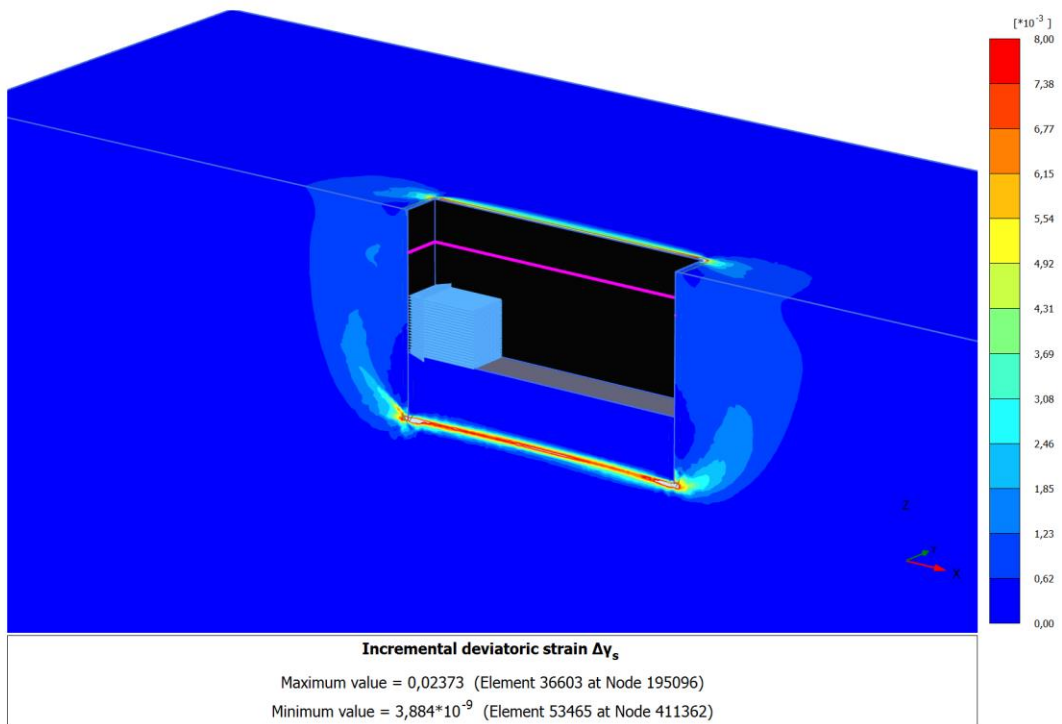
Det deformerte meshet ser i Figur 145 svært likt ut som for det udrenerte tilfellet med økende styrke og kommenteres ikke ytterligere. Fra Figur 146 til Figur 149 er det også her vanskelig å identifisere bruddsoner bortsett fra under pressegroppa. Her er bruddflaten helt rett i motsetning til det andre udrenerte tilfellet som viste en buet bruddflate opp mot groppa (Figur 117).



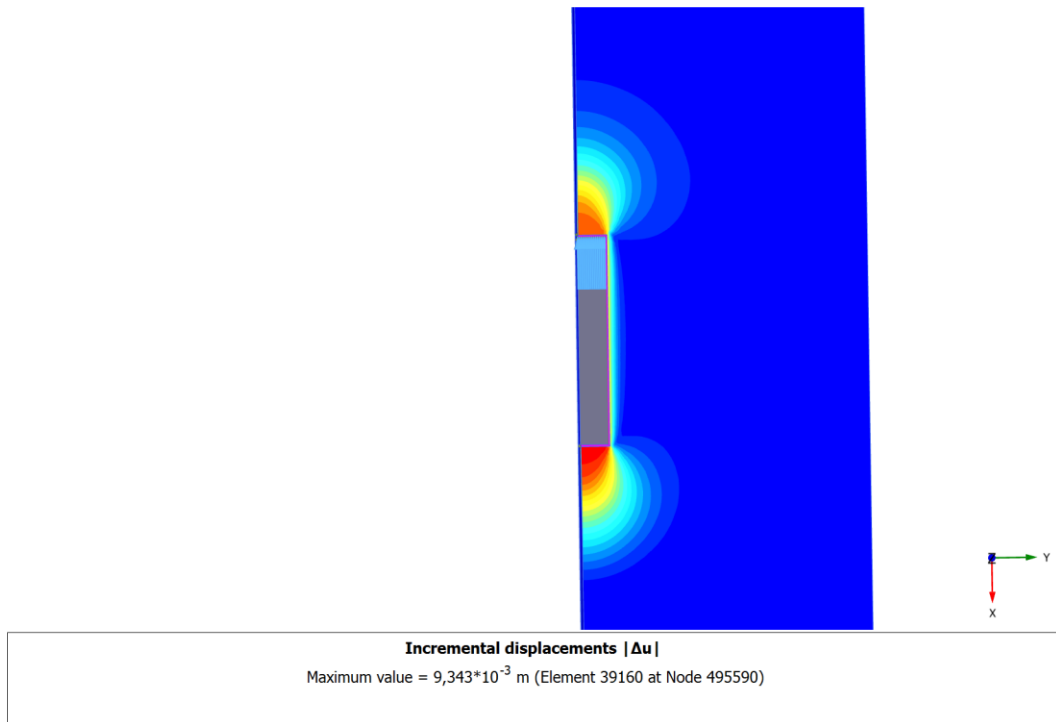
Figur 145 Deformert mesh Plaxis 3D udrenert konstant s_u



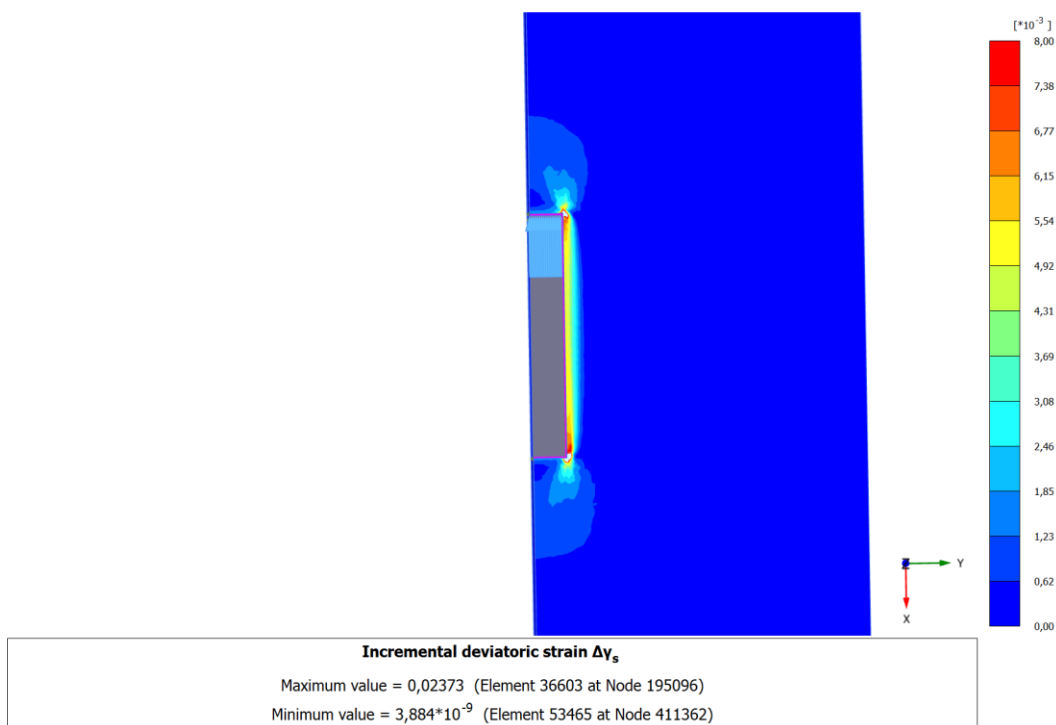
Figur 146 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 3D udrenert konstant su



Figur 147 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 3D udrenert konstant su



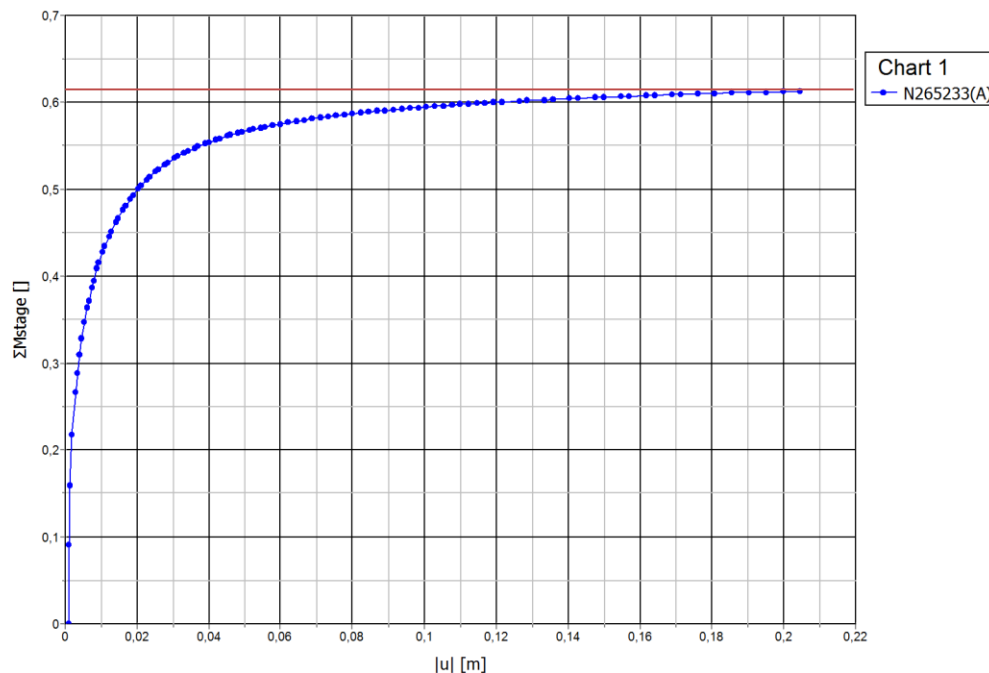
Figur 148 Inkrementelle forskyvninger Plaxis 3D udrenert konstant su sett ovenfra



Figur 149 Inkrementelle deviatoriske tøyninger Plaxis 3D udrenert konstant su sett ovenfra

5.3.2.2 Påført pressekraft/last-forskyvningskurve

Av Figur 150 kan man finne at lasten er 2452 kPa i det analysen vurderes å gå til brudd.



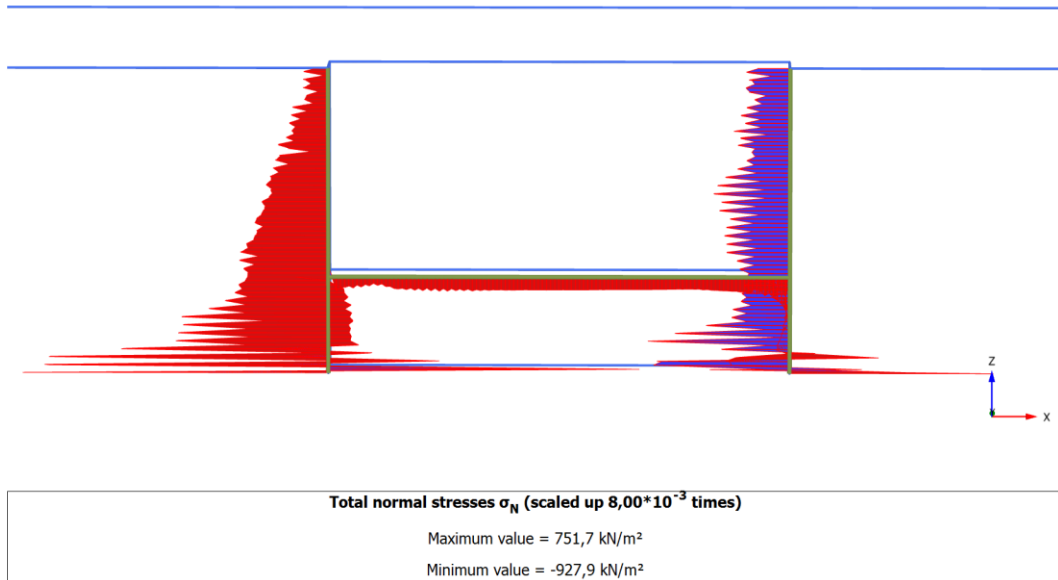
Figur 150 Påført last mot forskyvning Plaxis 3D udrenert konstant su

5.3.2.3 Jordtrykk

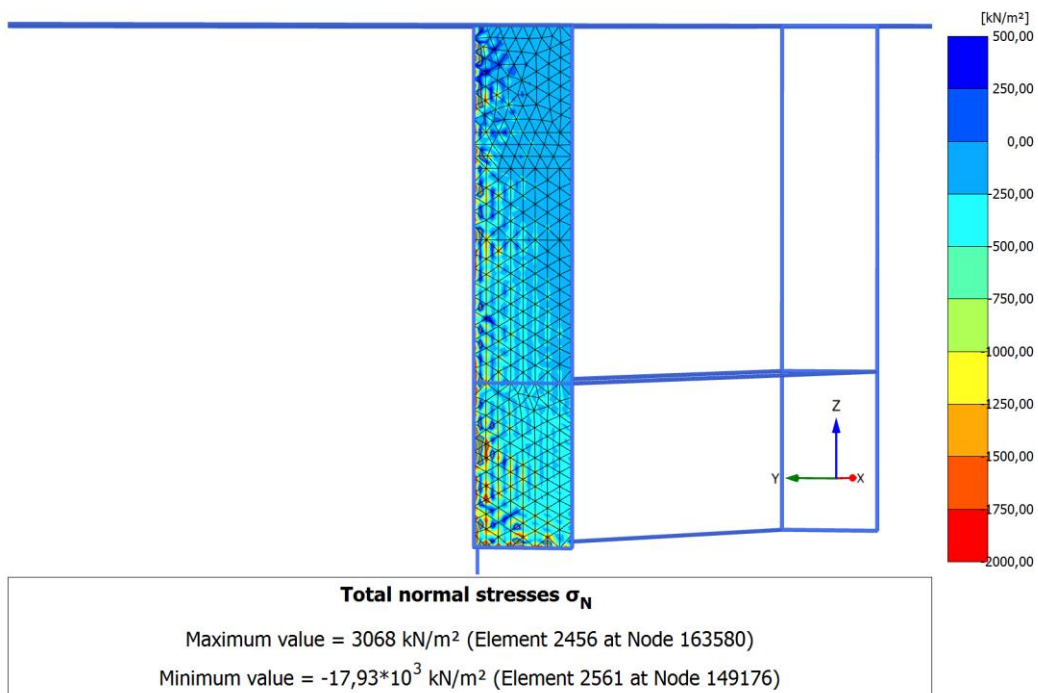
Jordtrykkene på pressegrova vises i Figur 152 til Figur 156. På utsiden av bakveggen, vist i Figur 152, kan man se at jordtrykket ser ut til å være større mot hjørnet av pressegrova. På utsiden av fremveggen, vist i Figur 154, er jordtrykket i hovedsak sug og suget ser ut til å være større ut mot hjørnet. Figur 151 viser jordtrykkene i midtsnitt av pressegrova og disse er lagt til grunn for å estimere resultanter, vist i Tabell 40. Igjen er resultatene medtatt sug angitt i parentes. Legger man til estimert bidrag fra skjær på 1307,5 kPa, vist i Tabell 41, fås 2474 kPa. Bruddlasten, funnet fra Figur 150, var på 2452 kPa. Et såpass avvik kan man forvente da man ser at jordtrykket kan variere mye fra midsnittet. Dette ses tydeligst i Figur 152 og Figur 154.

Kraftresultant fra passivt jordtrykk bakvegg	1449,5 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk bakvegg	-130,5 kN/m
Sum bakvegg	1319 kN/m
Bidrag fra bakvegg til maksimal pressekraft	659,5 kPa
Kraftresultant fra passivt jordtrykk fremvegg	62,5 kN/m
Kraftresultant fra aktivt jordtrykk fremvegg	0 (951,5) kN/m
Sum fremvegg	62,5 (1014) kN/m
Bidrag fra fremvegg til maksimal pressekraft	31,5 (507) kPa
Totalt bidrag fra frem og bakvegg til pressekraft	691 (1166,5) kPa
Kraftresultant fra jordtrykk under betongplate	629 kN

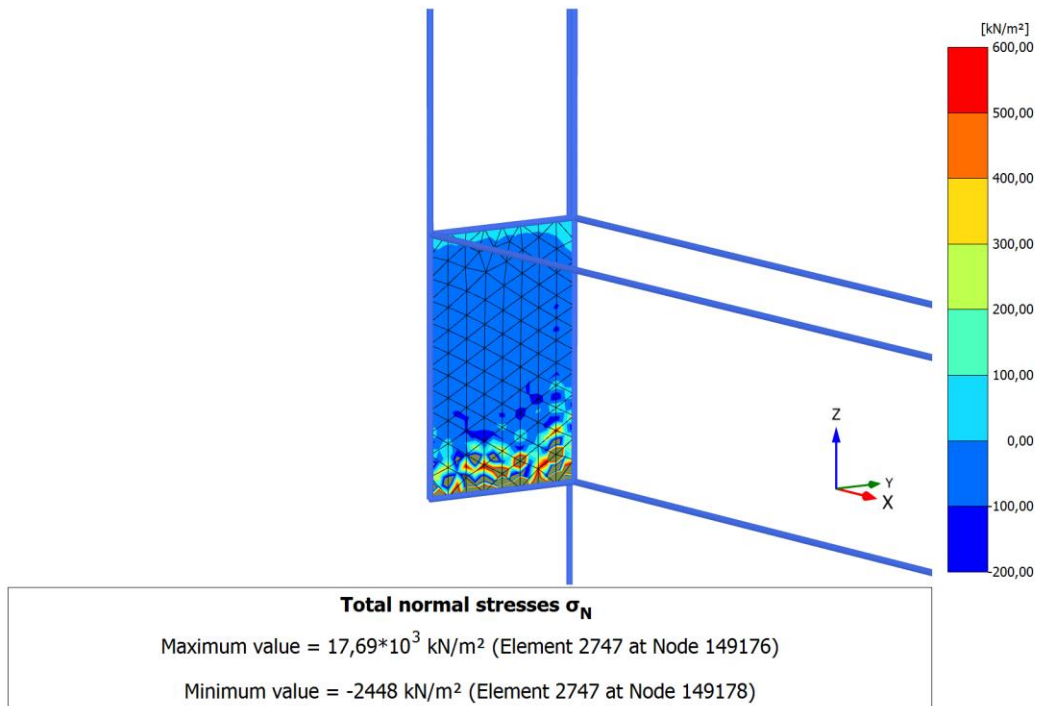
Tabell 40 Kraftresultanter fra jordtrykk Plaxis 3D udrenert konstant su



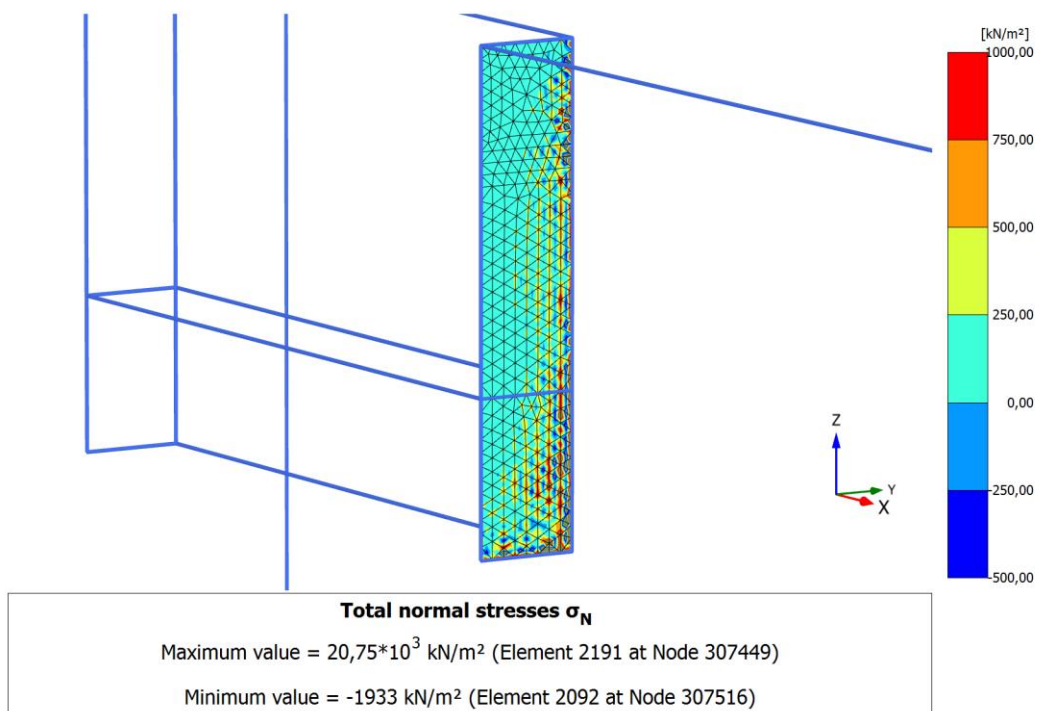
Figur 151 Jordtrykk i midtsnitt under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su



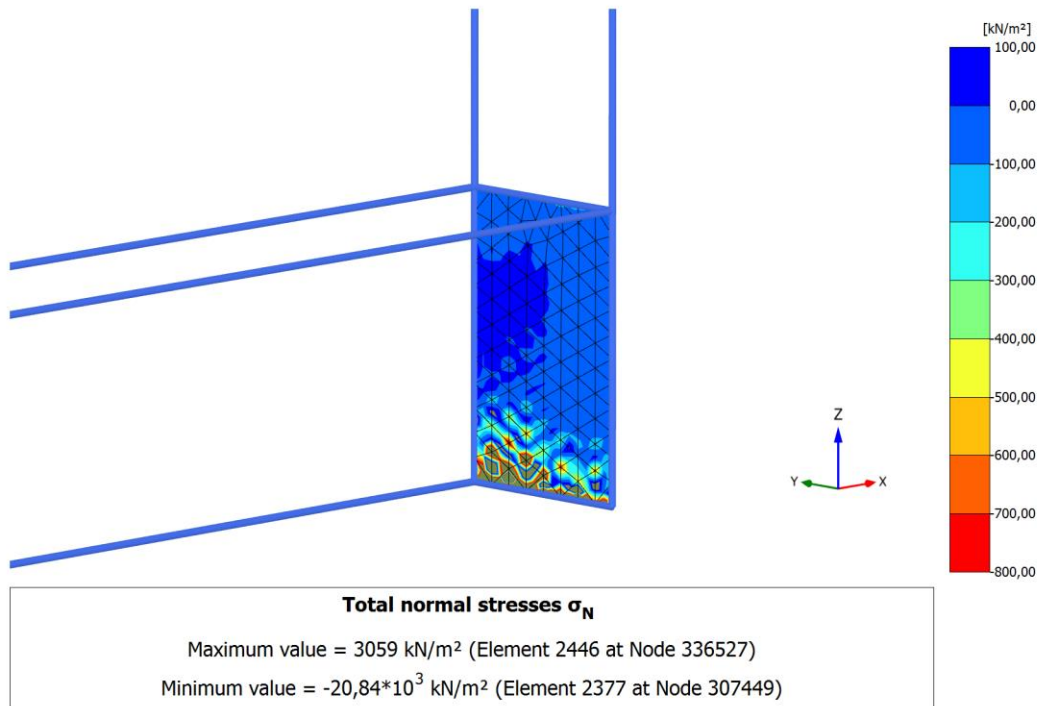
Figur 152 Jordtrykk på utsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su



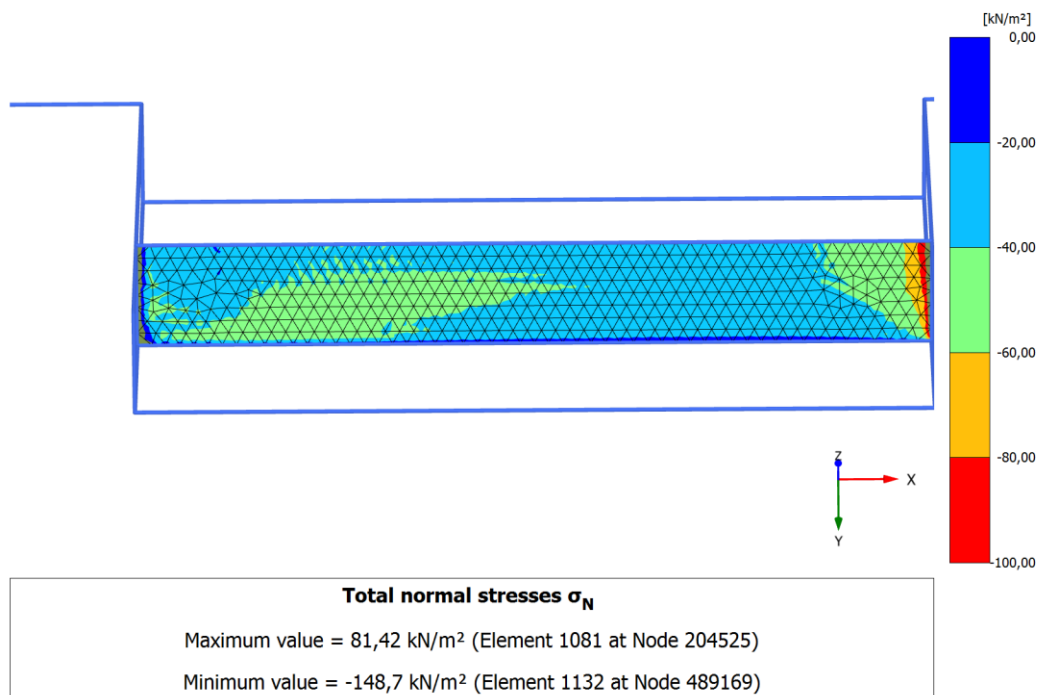
Figur 153 Jordtrykk på innsiden av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su



Figur 154 Jordtrykk på utsiden av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su



Figur 155 Jordtrykk på innsiden av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant s_u



Figur 156 Jordtrykk på undersiden av betongplate under pressing Plaxis 3D udrenert konstant s_u

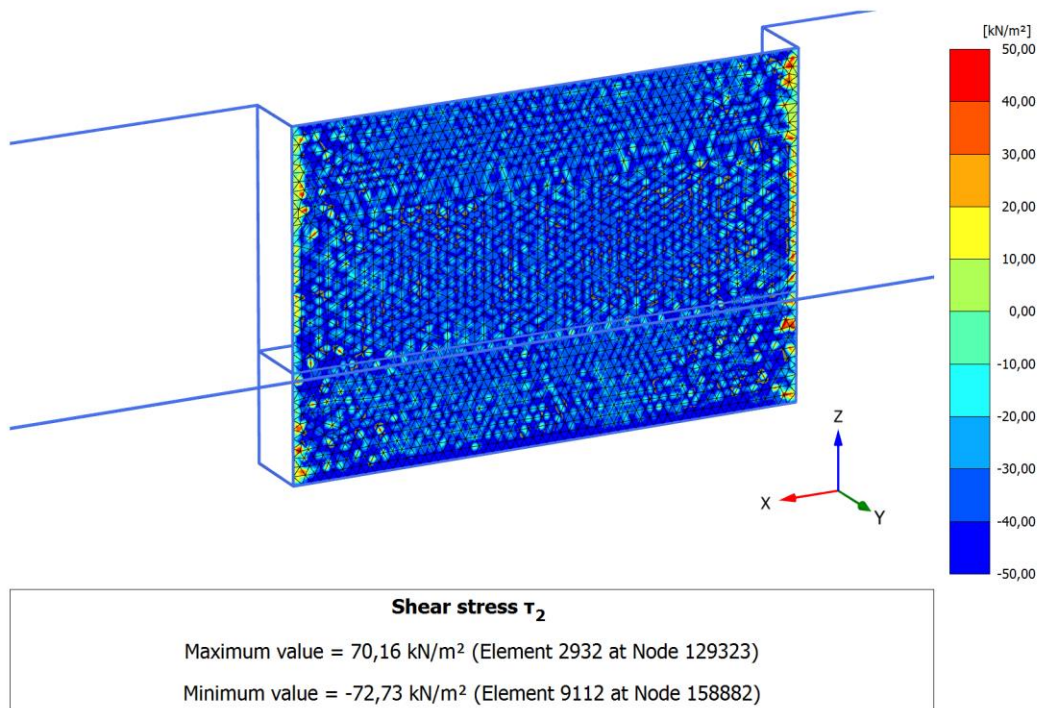
5.3.2.4 Horisontal skjærspenning

Den horisontale skjærspenningen som virker på sideveggene er vist i Figur 157 og Figur 159. Midtsnittene, vist i Figur 158 og Figur 160, er forenklet antatt representative for hele lengden. De er benyttet for å estimere resultanter og bidrag til maksimal pressekraft, vist i Tabell 41. Det legges igjen merke til den mindre sonen i Figur 159 der skjærspenningen er motsatt rettet.

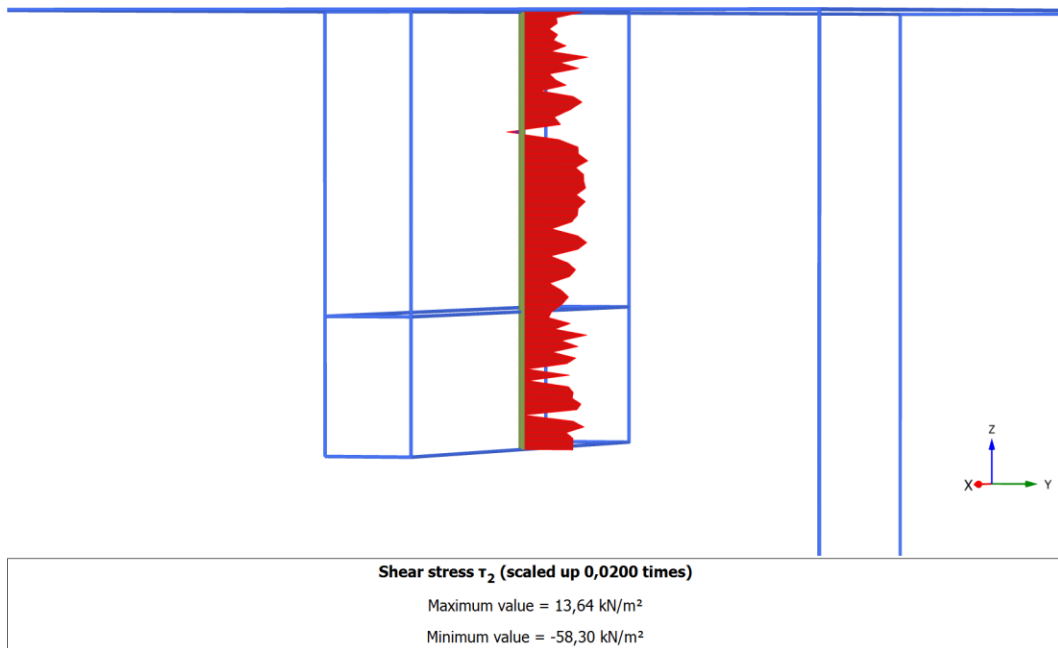
Skjærspenningen under betongplata er ikke neglisjerbar, som vist i Figur 161. Midtsnittet, vist i Figur 162, er derfor vurdert for å estimere resultat og bidrag til pressekraft.

Kraftresultant fra utsiden	284 kN/m eller 3124 kN
Kraftresultant fra innsiden	50,5 kN/m eller 557 kN
Kraftresultant fra underside betongplate	161 kN/m eller 241,5 kN
Sum	3922,5 kN
Bidrag til maksimal pressekraft	1307,5 kPa

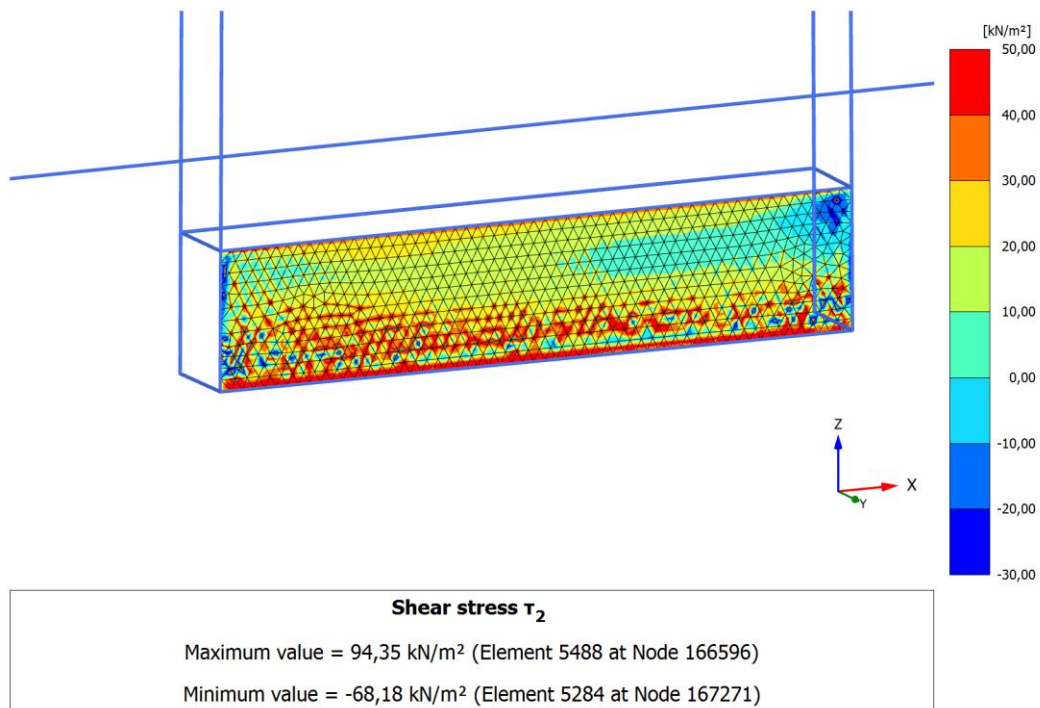
Tabell 41 Kraftresultanter fra horisontal skjær Plaxis 3D udrenert konstant su



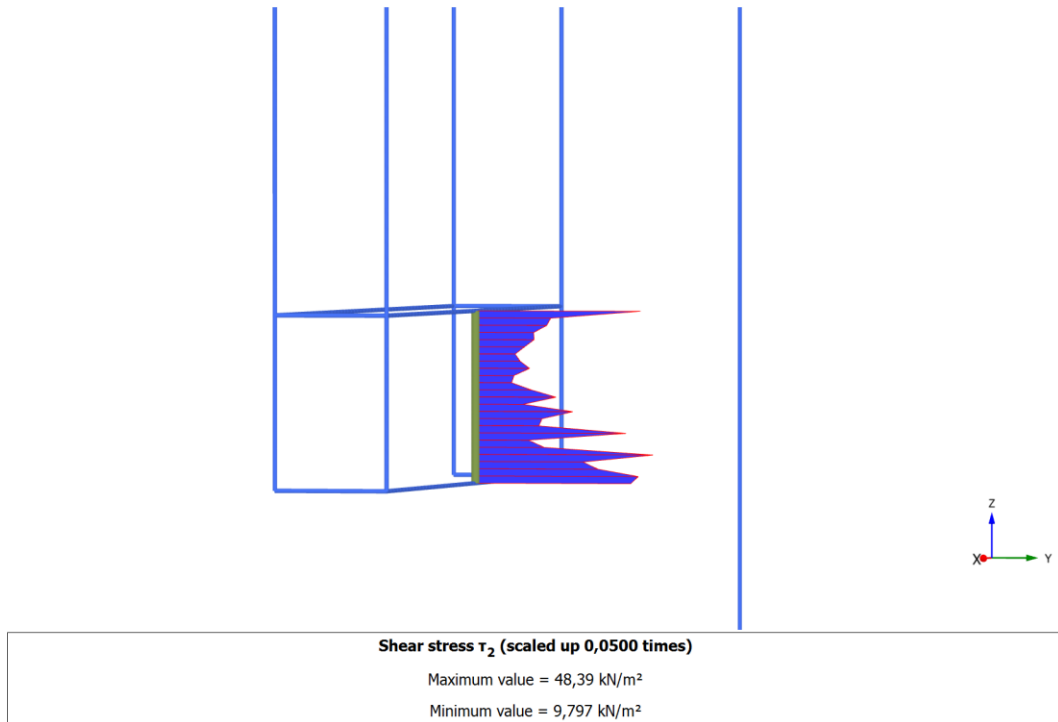
Figur 157 Horisontal skjærspenning på utside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su



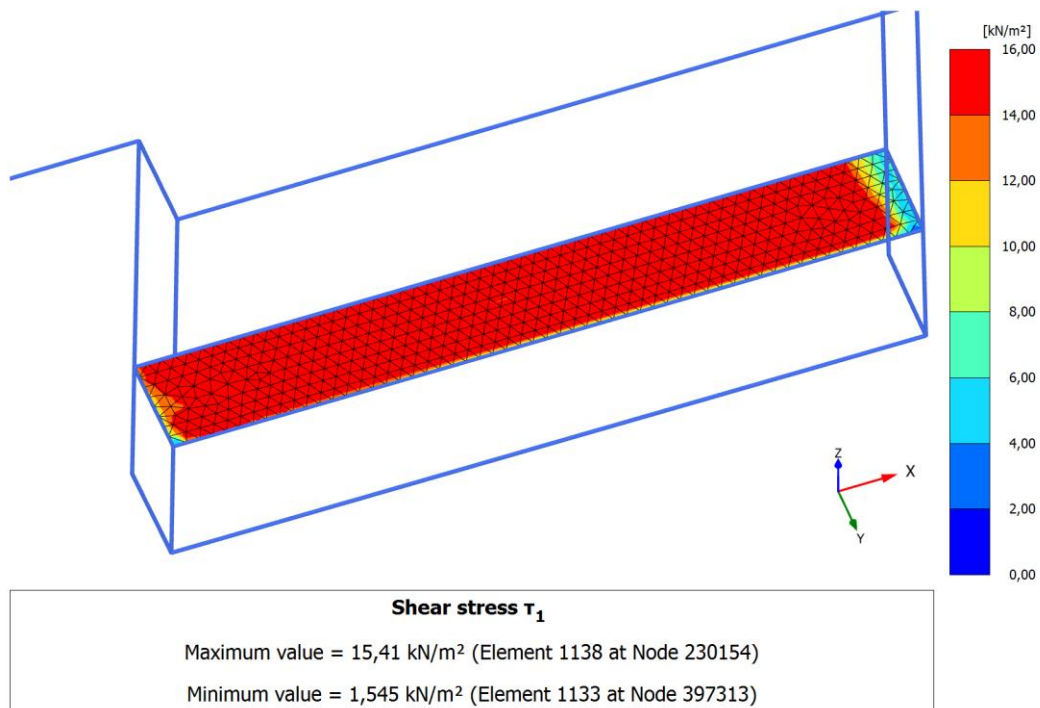
Figur 158 Horizontal skjærspenning midtsnitt på utside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su



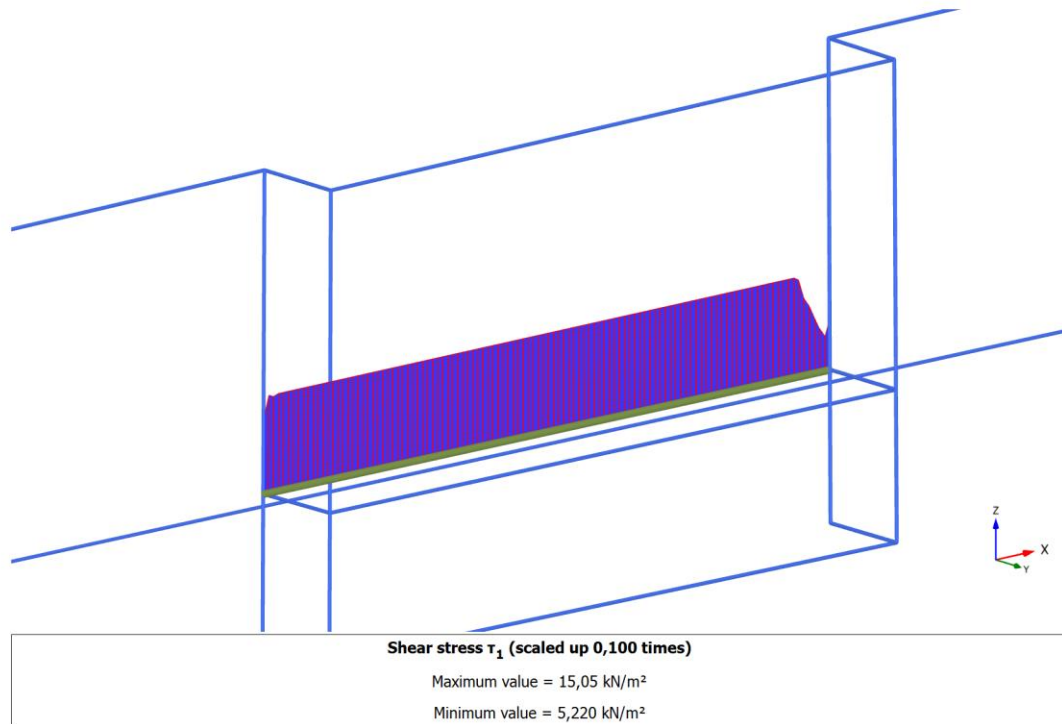
Figur 159 Horizontal skjærspenning på innside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su



Figur 160 Horizontal skjærspenning midtsnitt på innside av langside under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su



Figur 161 Horizontal skjærspenning på underside av betongplate under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su



Figur 162 Horizontal skjærspenning midstnitt på underside av betongplate under pressing Plaxis 3D udrenert konstant s_u

5.3.2.5 Vertikal skjærspenning

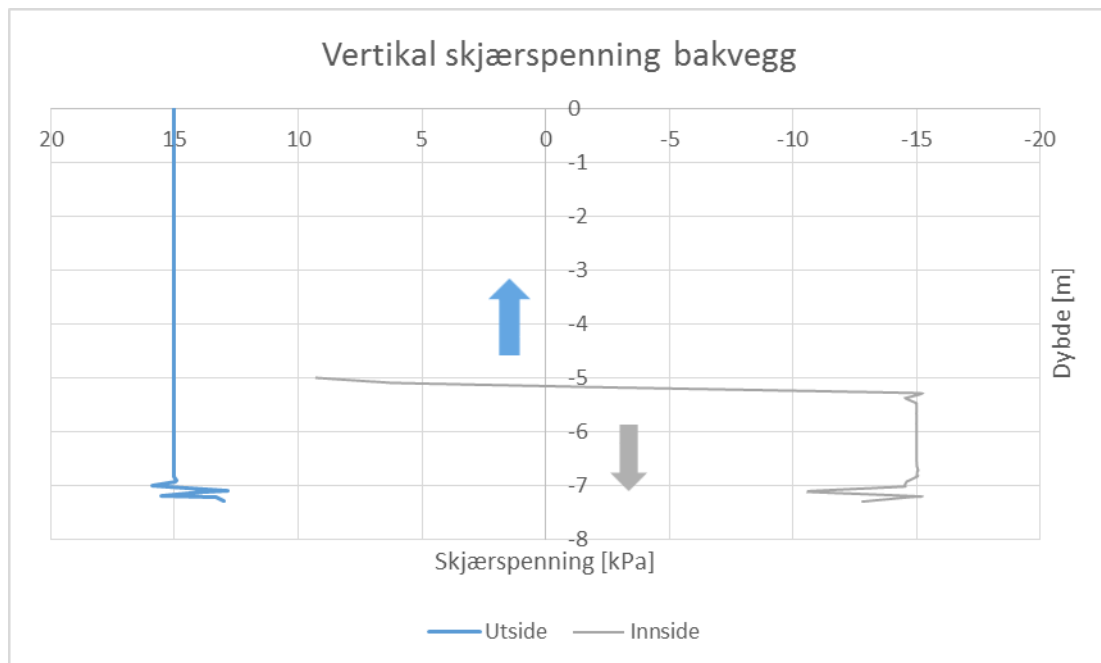
Figur 166 til Figur 171 viser den vertikale skjærspenningen på pressegruppa. I Figur 163 til Figur 165 er de vertikale skjærspenningene vist for midtsnitt. Disse er antatt representative for hele bredden/lengden for å estimere kraftresultanter. De estimerte kraftresultantene er vist i Tabell 42 og en kontroll av vertikallikevekt, vist i Tabell 43 viser at man ikke er så langt unna.

Kraftresultant fra skjær utside bakvegg	164 kN
Kraftresultant fra skjær innside bakvegg	-44,5 kN
Sum bakvegg	119,5 kN
Kraftresultant fra skjær utside fremvegg	-164 kN
Kraftresultant fra skjær innside fremvegg	47 kN
Sum fremvegg	-117 kN
Kraftresultant fra skjær utside sidevegg	-230,5 kN
Kraftresultant fra skjær utside sidevegg	-199,5 kN
Sum sidevegg	-430 kN
Totalt fra fremvegg, bakvegg og sidevegg	-427,5 kN

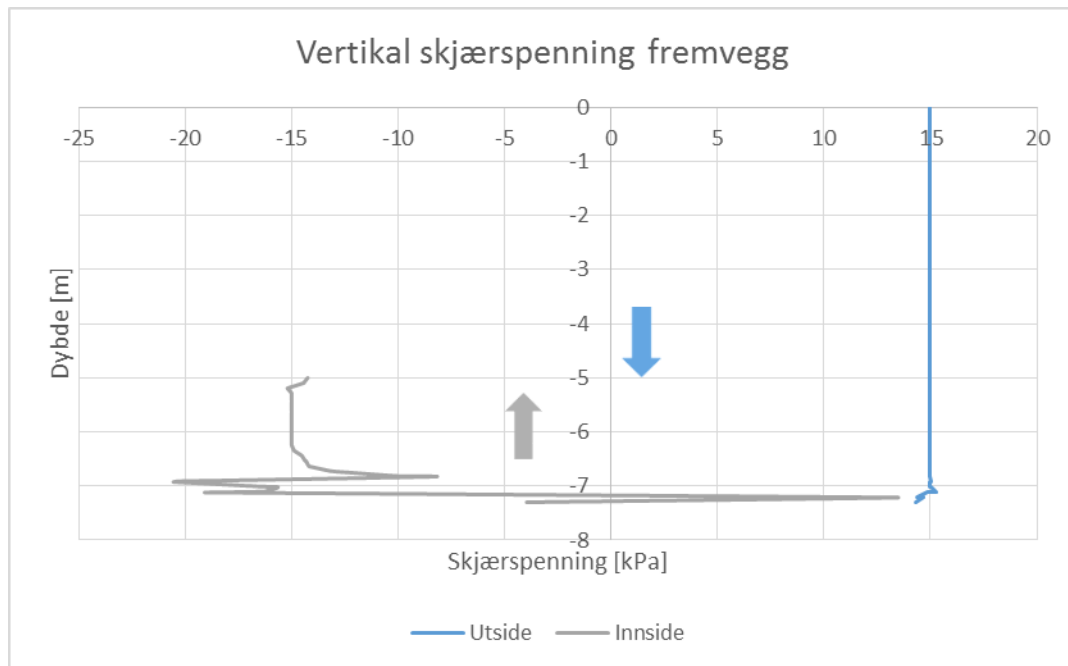
Tabell 42 Kraftresultanter fra vertikal skjær Plaxis 3D udrenert konstant su

Totalt fra frem, bakvegg og sidevegg	-427,5 kN
Kraftresultant fra jordtrykk under betongplate	629 kN
Vekt av pressegrup	-205 kN
Sum vertikalkrefter	-3,5 kN

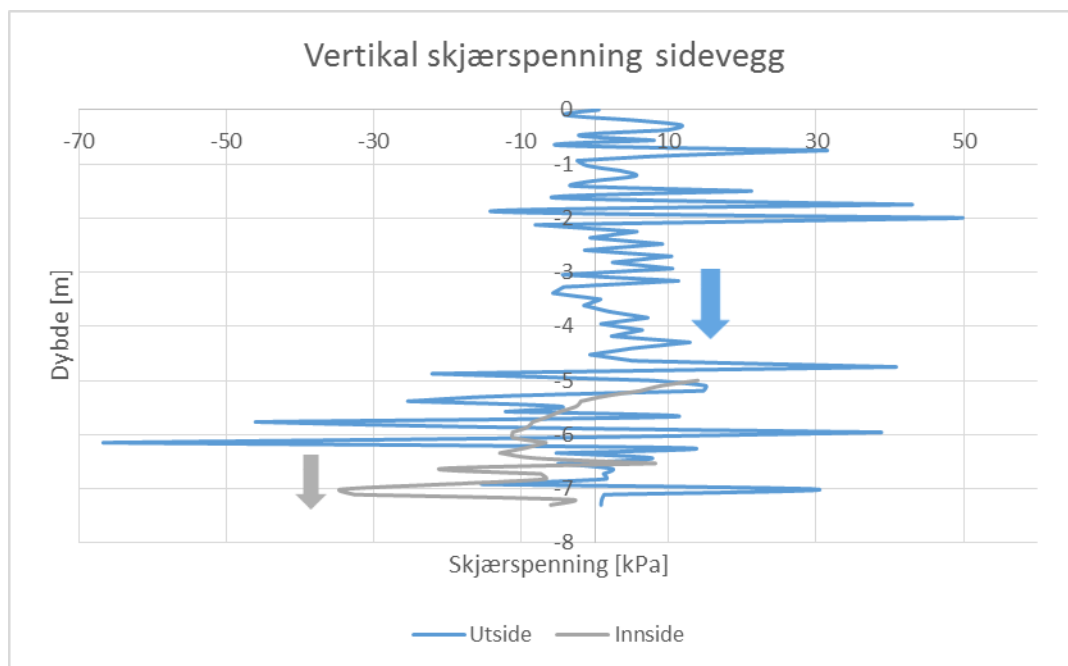
Tabell 43 Kontroll av vertikallikevekt Plaxis 3D udrenert konstant su



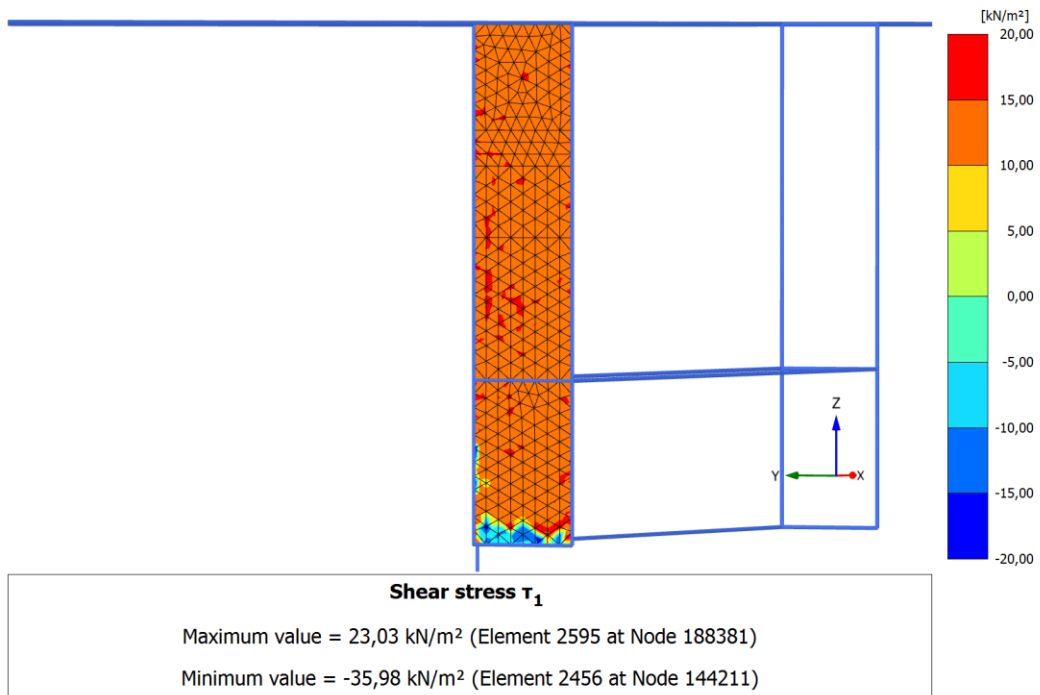
Figur 163 Vertikal skjærspenning midtsnitt på bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su



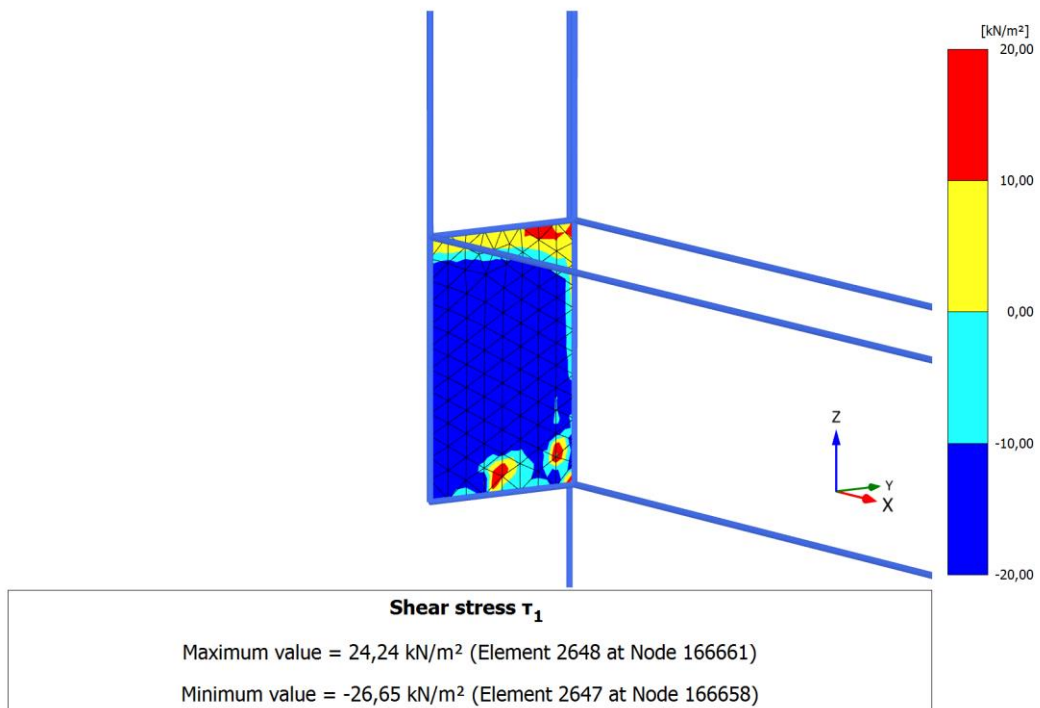
Figur 164 Vertikal skjærspenning midtsnitt på fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant s_u



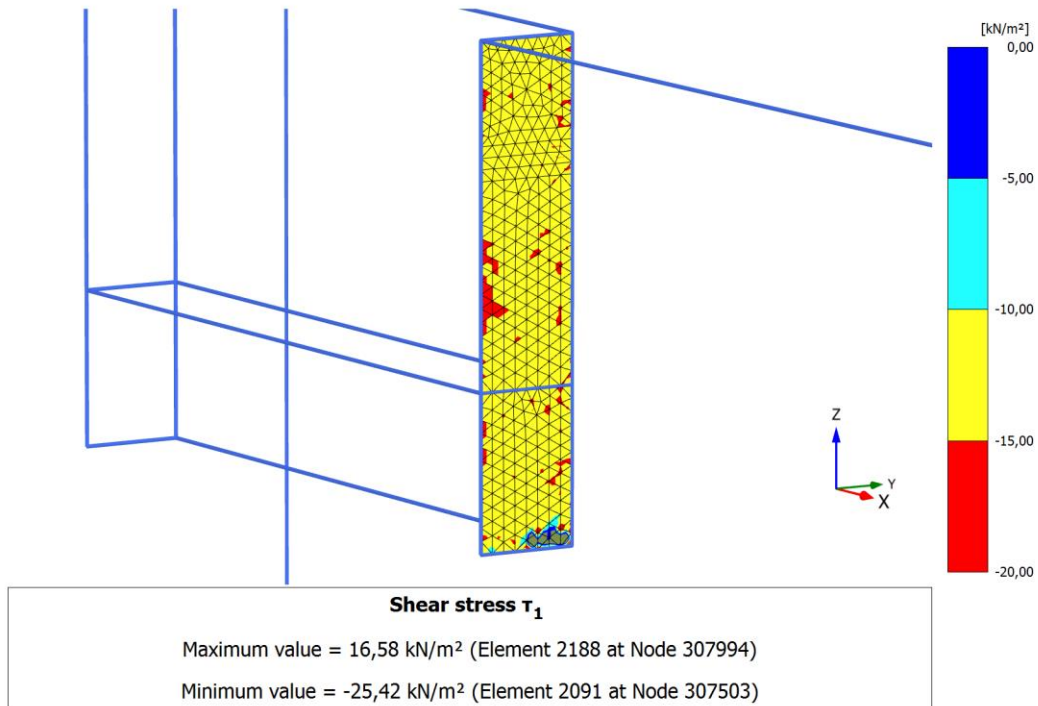
Figur 165 Vertikal skjærspenning midtsnitt på sidevegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant s_u



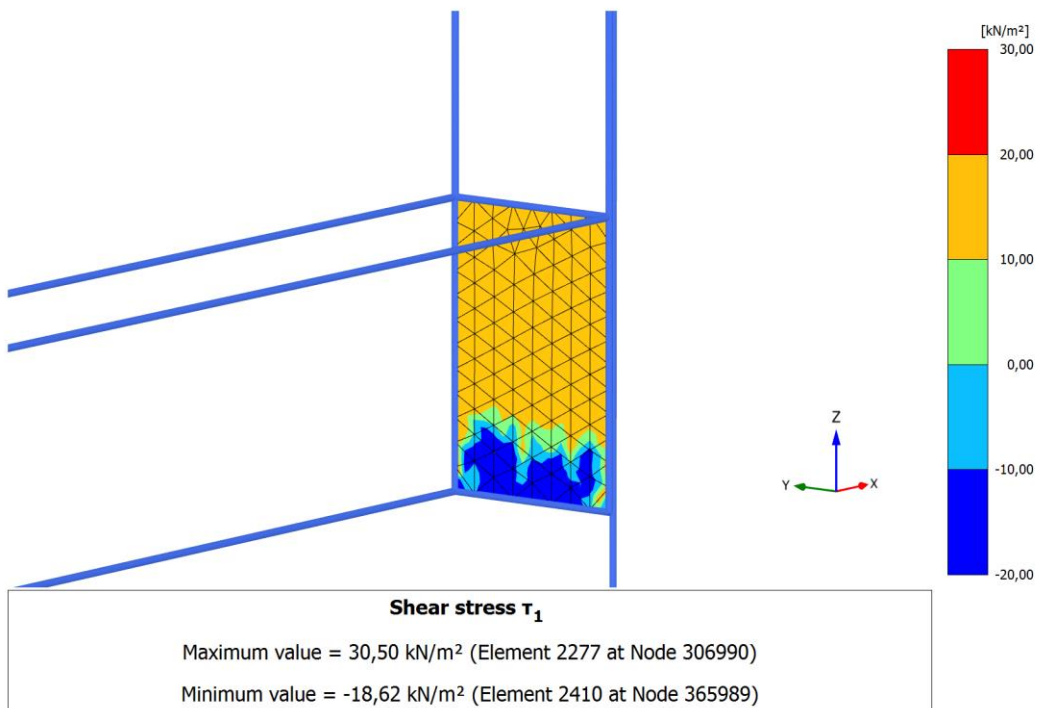
Figur 166 Vertikal skjærspenning på utside av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant s_u



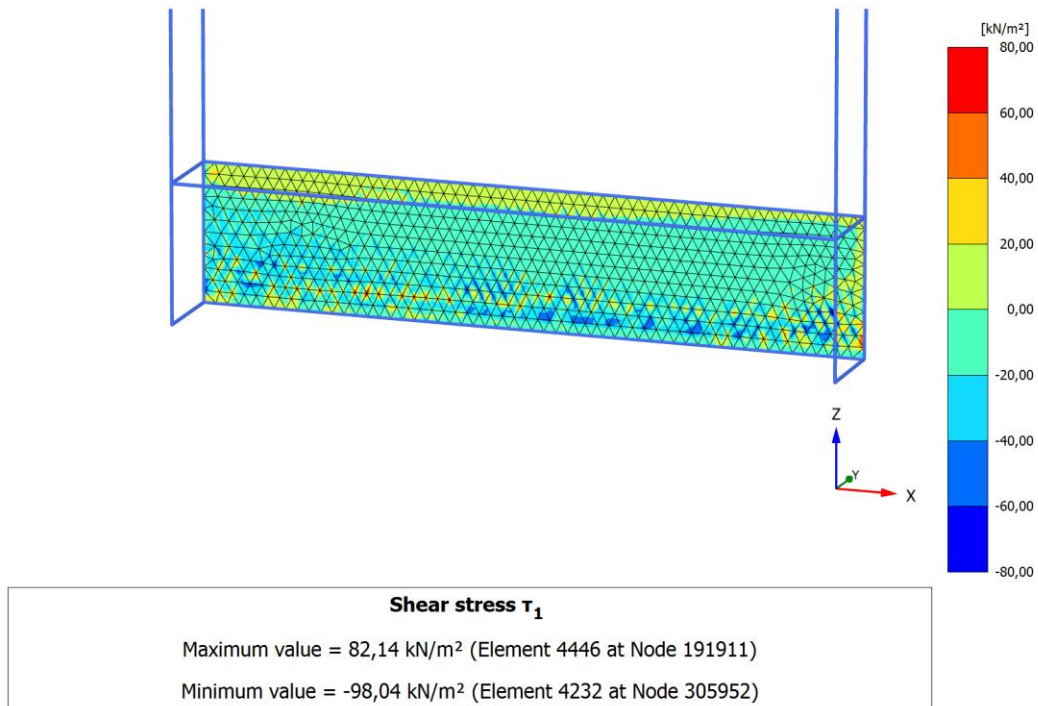
Figur 167 Vertikal skjærspenning på innside av bakvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant s_u



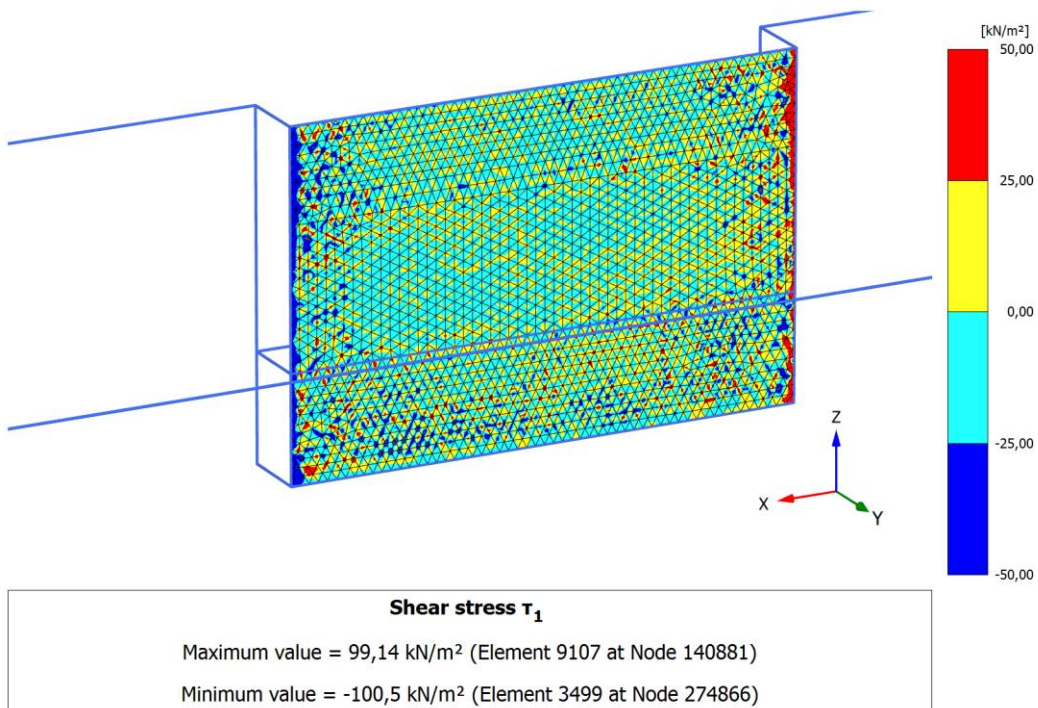
Figur 168 Vertikal skjærspenning på utside av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant s_u



Figur 169 Vertikal skjærspenning på innside av fremvegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant s_u



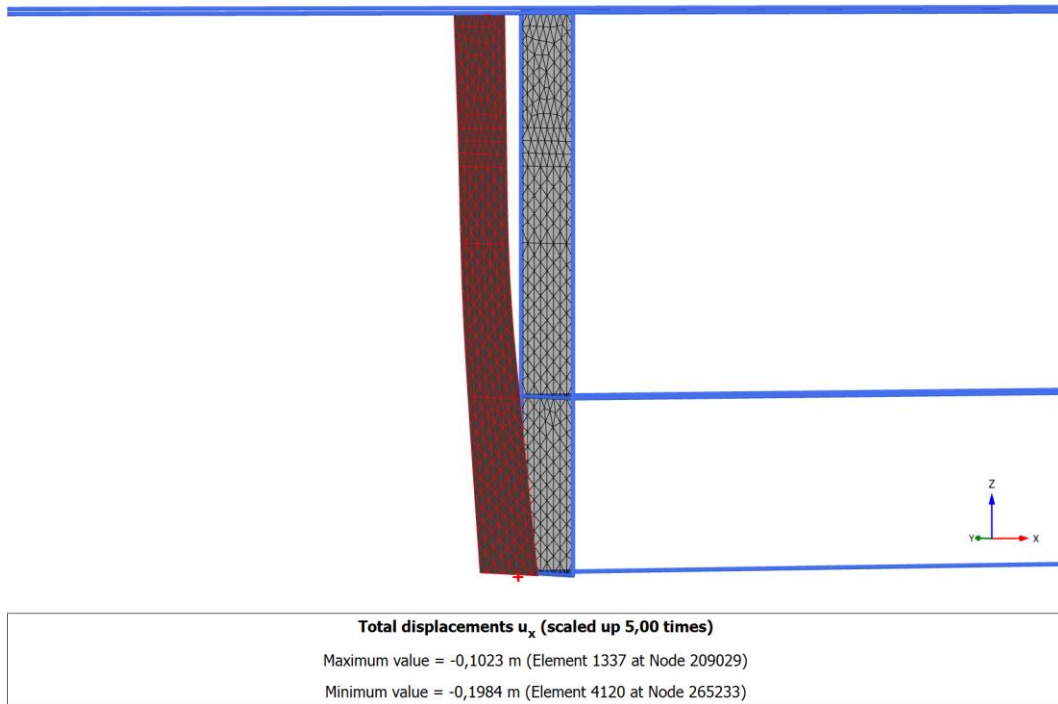
Figur 170 Vertikal skjærspenning på innside av sidevegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su



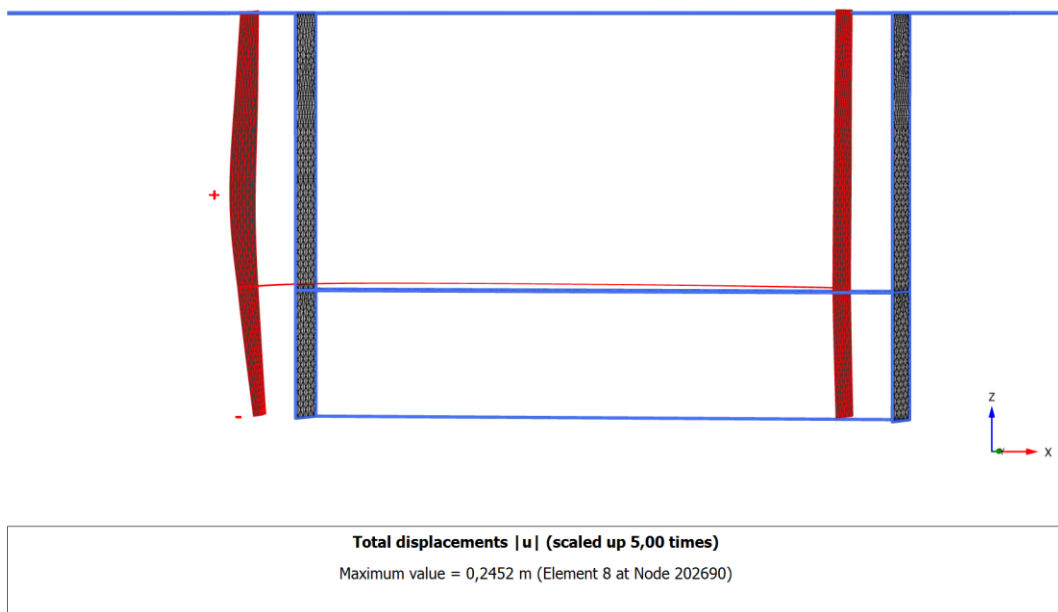
Figur 171 Vertikal skjærspenning på utside av sidevegg under pressing Plaxis 3D udrenert konstant su

5.3.2.6 Forskyvning av pressegrøp

Figur 173 viser at pressegrøpa ikke får noen vesentlig vertikal forskyvning. Fremveggen løftes minimalt. Figur 172 viser at under utgravingsnivå får bakveggen en betydelig forskjell i horisontal forskyvning over bredden (y-retning).



Figur 172 Forskyvning av bakvegg i Plaxis 3D udrenert konstant s_u



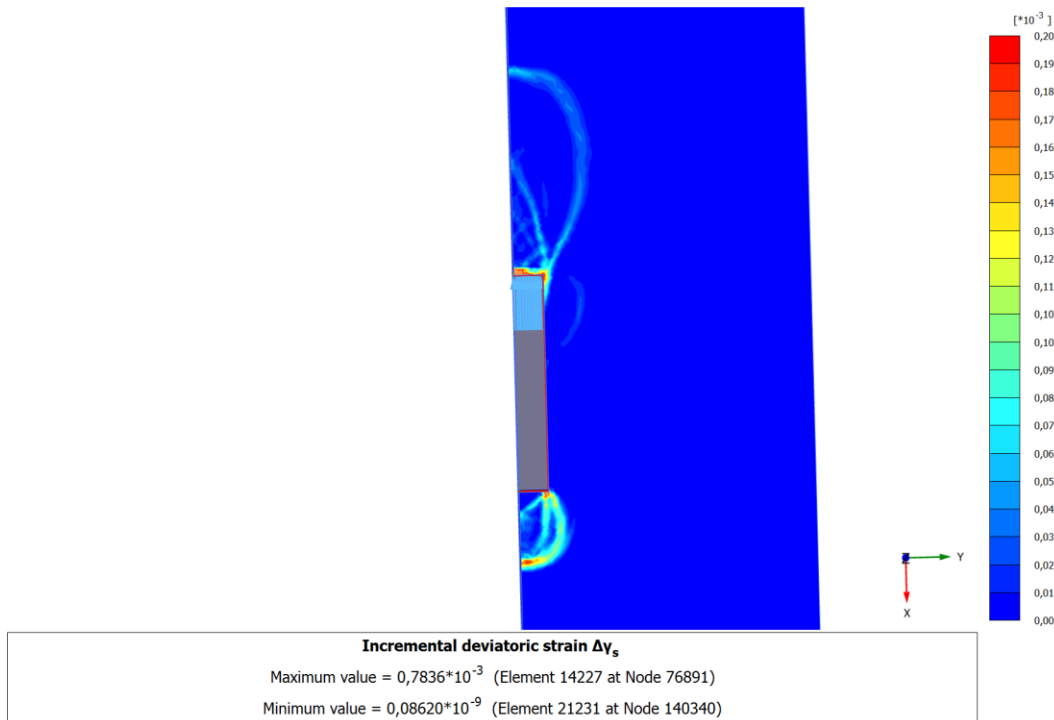
Figur 173 Forskyvning av pressegrøp i Plaxis 3D udrenert konstant s_u

6 Diskusjon

6.1 Bruddflater

Bruddflatene i Plaxis 3D kan visuelt indikere om det er en tredimensjonal effekt på jordtrykkene. Figur 174, som er en gjengivelse av Figur 92, er et tydelig eksempel på dette. I det drenerte tilfellet har bruddflaten i den passive sonen på utsiden av bakveggen tatt en slags lyspære-form. Sonen er på det bredeste utvidet 1,5 m fra sidevegg. Den aktive sonen på utsiden av fremveggen virker også å være noe utvidet. Observasjonene bør tilsi at man kan få et større jordtrykk på utsiden av bakveggen og fremveggen. Lengden av sonene er derimot redusert med ca. 2 m fra Plaxis 2D til Plaxis 3D. Den reduserte lengden kan tenkes å bety mest for den aktive sonen og kanskje føre til at jordtrykket fra den aktive sonen i sum blir redusert.

Fra de udrenerte analysene ble det ikke observert noen klare bruddflater, kanskje bortsett fra under pressegroppa, og det er dermed vanskelig å gjøre noen visuelle vurderinger. Forskjellen i bruddflatene under pressegroppa kan derimot kommenteres. Det er helt naturlig at med konstant styrke går bruddflaten korteste vei fra spuntbunn til spuntbunn, som vist i Figur 147, da dette er minste motstands vei. Med økende styrke er det derimot lavere styrke høyere i jordprofilet og det vil dermed være mindre motstand å gå i en liten bue litt høyere opp som vist i Figur 117.



Figur 174 Bruddflate i drenert tilfelle indikerer tredimensjonal effekt

6.2 Påført pressekraft

I Tabell 44 ser man en stor forskjell i estimert mulig pressekraft før brudd i det drenerte tilfellet. Når en slik grop skal dimensjoneres er det tidligere nevnt at det er vanlig å oppgi den maksimale kraften presseutstyret kan presse med. Det er antatt at kraften fra presseutstyret overføres til pressegrova ved hjelp av en forankringskloss på 2 m høyde og bredde lik bredden på pressegrova. En må da finne nødvendig bredde på pressegrova for å stå imot pressekraften. Resultatene fra Plaxis 2D ville krevd en bredde på over 9 m for å oppnå samme mulige pressekraft som resultatene fra Plaxis 3D (som har bredde 3 m). Håndberegningen ville krevd i underkant av 6 m bredde.

Drenert tilfelle i sand			
Metode	Total pressekraft i kPa	Pressekraft fra skjær i kPa	Pressekraft fra jordtrykk i kPa
Håndberegning	1100,5	0	1100,5
Plaxis 2D	700	0	703
Plaxis 3D	2144	399,5	1734

Tabell 44 Sammenligning av bidrag til pressekraft og total pressekraft drenert

Fra Tabell 45 kan en regne at resultatene fra Plaxis 2D ville krevd en bredde på litt over 9 m (litt under 9 m om en regner med sug) for å oppnå samme mulige pressekraft som resultatene fra Plaxis 3D. Dette er altså i det udrenerte tilfellet i leire med økende styrke i dybden. Parentes i Tabell 45 og Tabell 46 betyr at sug er inkludert. Det viser seg at bidraget fra skjær nå er større enn bidraget fra jordtrykk.

Udrenert tilfelle i leire med økende styrke			
Metode	Total pressekraft i kPa	Pressekraft fra skjær i kPa	Pressekraft fra jordtrykk i kPa
Håndberegning	494 (563) *	0	494 (563) *
Plaxis 2D	357 (392)	35	322 (354)
Plaxis 3D	1112,5 (1152)	742,5	370 (409)

Tabell 45 Sammenligning av bidrag til pressekraft og total pressekraft udrenert økende su

* Utregnet uten bruk av ADP-faktorer og kan dermed ikke sammenlignes direkte med Plaxis

I det udrenerte tilfellet med konstant styrke i dybden ville det kreves en bredde på over 11 m (ca. 9,5 m om en regner med sug) for å kunne oppnå samme mulige pressekraft i Plaxis 2D som Plaxis 3D. Bidraget fra skjær er igjen større enn bidraget fra jordtrykk.

Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke			
Metode	Total pressekraft i kPa	Pressekraft fra skjær i kPa	Pressekraft fra jordtrykk i kPa
Håndberegning	790 (1046) *	0	790 (1046) *
Plaxis 2D	538 (771)	50	488 (723,5)
Plaxis 3D	1998,5 (2452)	1307,5	691 (1166,5)

Tabell 46 Sammenligning av bidrag til pressekraft og total pressekraft udrenert konstant su

* Utregnet uten bruk av ADP-faktorer og kan dermed ikke sammenlignes direkte med Plaxis

Ovenfor er det dermed vist at på grunn av skjærkraft og lastspredning av pressekraften bør det være mulig å kunne redusere størrelsen (bredden) på pressegruppa ganske dramatisk med tanke på grunnbrudd, om en regner i 3D. Sug eller strekk er som tidligere diskutert angitt i parentes fordi det i de fleste tilfeller er lite realistisk over noe særlig tid.

6.3 Jordtrykk

Jordtrykkene er i alle tilfellene forsøkt estimert som kraftresultanter for å kunne bedømme hvor stor effekt de forskjellige jordtrykkssonen har og for kunne vurderer forskjeller mellom beregningsmåtene. For å til en viss grad kunne vurdere om estimeringen er grei er horisontal kraftlikevekt kontrollert. I Plaxis 2D er forskjellen i horisontal likevekt under 1 % (som er under kravet angitt i Plaxis), noe som kan tyde på at de estimerte kraftresultantene er rimelig nøyaktige. I Plaxis 3D er forskjellen i horisontal likevekt ut fra estimerte resultanter opp mot 5 %. Dette er kanskje ikke overraskende gitt forskjellene i jordtrykk sett over bredden på pressegruppa. Her kommer i tillegg horisontalt virkende skjærkraft inn i likevekten. De estimerte resultatene fra Plaxis 3D må derfor ansees som noe mer usikre, men fortsatt akseptable.

Jordtrykkene er i de følgende figurene angitt med positiv verdi for trykk og negativ for sug.

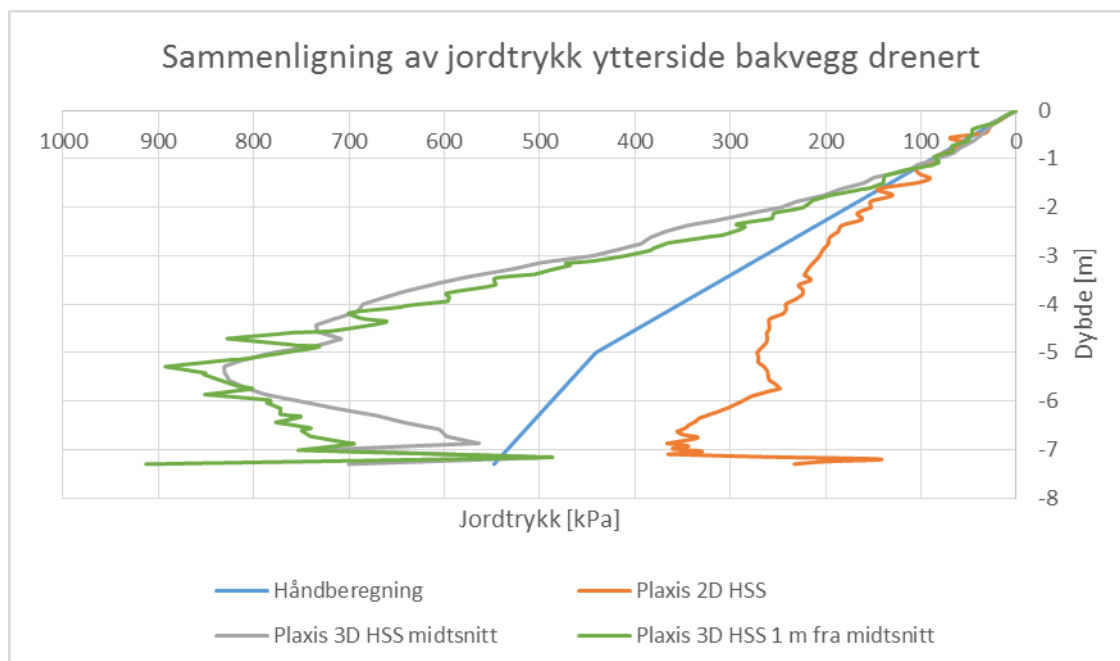
6.3.1 Drenert tilfelle i sand

Det ble tidligere nevnt at forsøk hadde vist at 0,1 % av støttekonstruksjonens høyde vil medføre aktivt jordtrykk i sand. For utvikling av passivt jordtrykk vil det være snakk om deformasjon på 2-3 % av konstruksjonshøyden. Med spuntlengden på 7,3 m vil det si at for aktivt jordtrykk kreves det en horisontal forskyvning på ca. 0,7 cm, mens for passivt ca. 15 -22 cm. Sammenhengen for utvikling av jordtrykk vises i Figur 11.

Fra forskyvningene i Figur 86 og Figur 114 kan man se at aktivt jordtrykk bør være utviklet i Plaxis-simuleringene. Passivt jordtrykk bør også være utviklet ved fremveggen. Man ser derimot at bakveggen har mindre forskyvning i nedkant. I Plaxis 3D ser man fra Figur 113 at forskyvningen er mindre i midtsnitt, mens stivheten til sideveggene bidrar til at nærmere disse følger forskyvningen den generelle bevegelsen. Fra Figur 175 virker det som man ser nettopp disse utslagene på jordtrykkene. I Plaxis 3D er ikke det passive

jordtrykket utviklet under utgravingsnivå (-5 m), men en kan se økning i jordtrykket 1 m fra midtsnitt (0,5 m fra hjørnet) i denne dybden. Det nevnes at håndberegningene baserer seg på at passivt/aktivt jordtrykk er fullt utviklet i hele dybden.

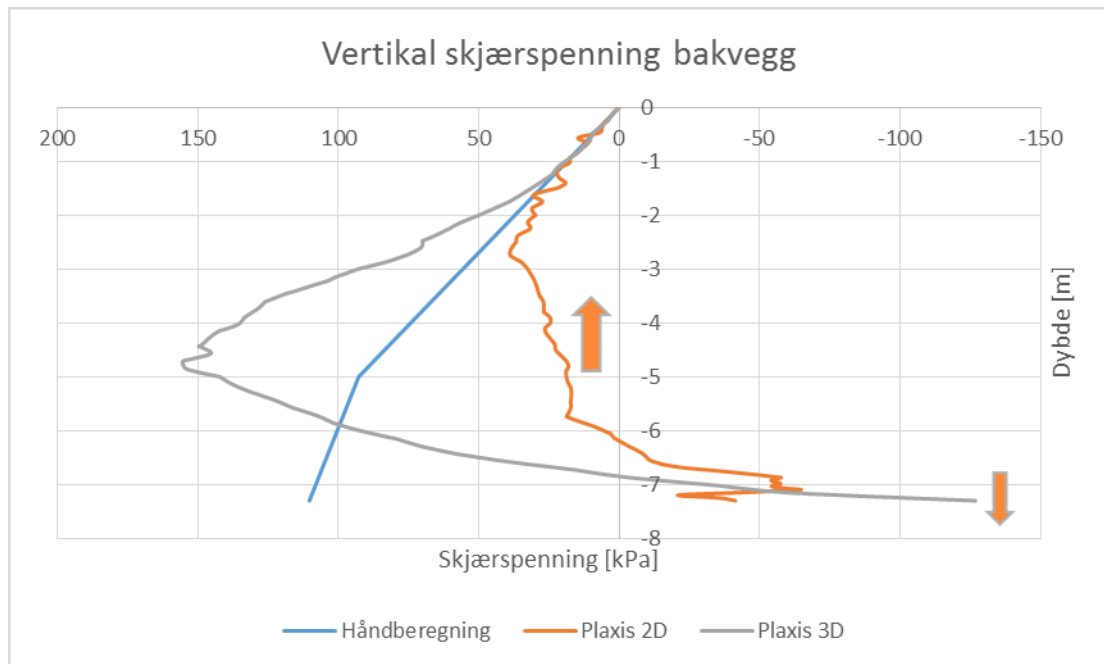
Figur 175 viser at jordtrykket på utsiden av bakveggen er svært stort i Plaxis 3D. Det er faktisk ca. 56% større enn ved håndberegning. Dette skyldes trolig tredimensjonale effekter. At forskjellen er så stor sammenlignet med håndberegning kan tenkes å være fordi den passive jordtrykksonen (avgrenset av bruddflaten) er svært stor for effektivspenningsanalyser. Vi vet at vinkelen som i hovedsak styrer størrelsen på den passive bruddsonen er gitt av $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$, som vist i Figur 12. En utbredelse av denne sonen utover pressegrupas bredde får dermed intuitivt en stor effekt.



Figur 175 Sammenligning av jordtrykk utside bakvegg drenert

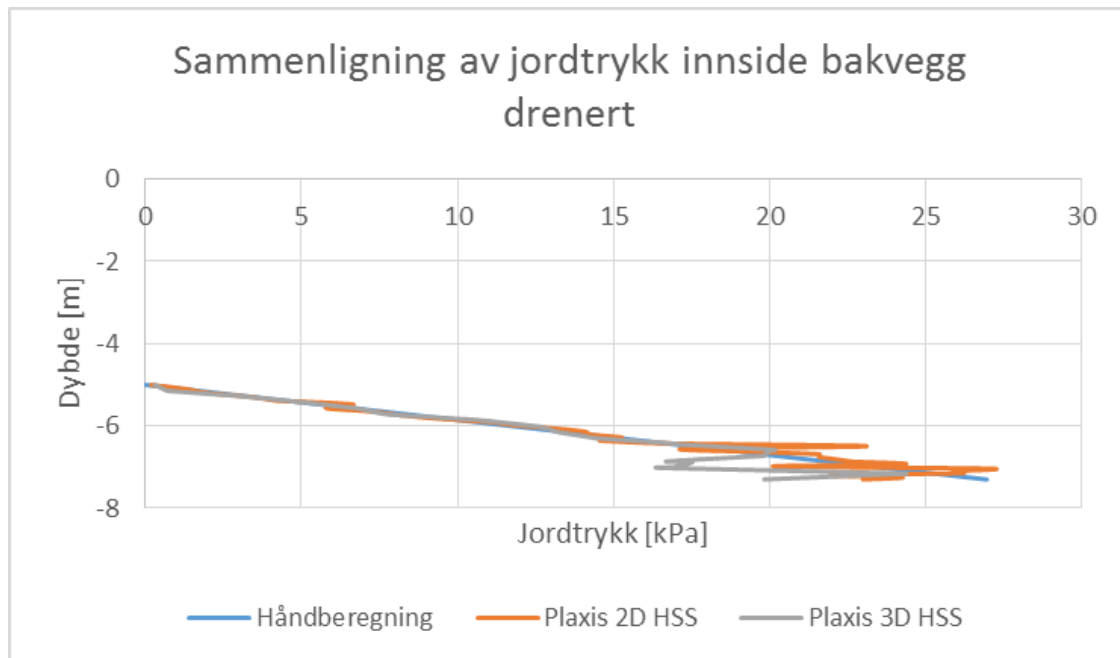
Like interessant som at Plaxis 3D gir et svært stort jordtrykk på bakveggen er det at Plaxis 2D gir svært lite. Dette jordtrykket er ca. 33 % mindre enn ved håndberegning. Årsaken vurderes å kunne identifiseres fra Tabell 21. Der observeres det at med ruhetene benyttet er pressegruppa langt fra å tilfredsstille vertikal likevekt ved håndberegning. Det finnes ikke nok nedad rettet skjær for å balansere den store mengden oppad rettet skjær på utsiden av bakveggen. For å få likevekt må dermed skjærspenningen på utsiden av bakveggen være mindre. Ruheten r definerer jo forholdet mellom skjærspenningen τ som er mobilisert langs støtteveggen og den mobiliserte skjærfastheten i jorda. Dermed må ruheten være mindre på utsiden av bakveggen. Det er valgt en ruhet på 0,3. Plaxis benytter dette derimot som en maksimal ruhet. I Figur 176 vises det at skjærspenningen og dermed ruheten er mindre i Plaxis 2D for å tilfredsstille vertikal likevekt. Denne reduserte ruheten fører igjen til et mindre jordtrykk. I

Plaxis 3D bidrar også sideveggene med nedad rettet skjær og dette er nok til å balansere den store mengden oppad rettet skjær på utsiden av bakveggen.

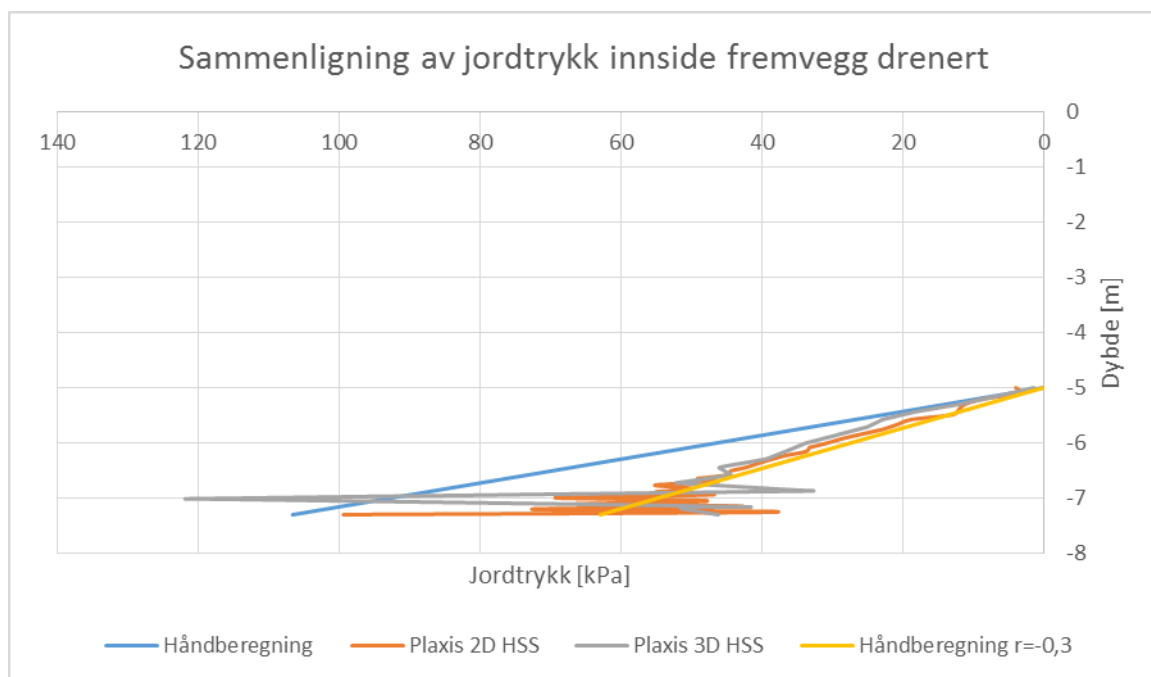


Figur 176 Sammenligning av vertikal skjærspenning bakvegg drenert

Fra Figur 177 ser man at det aktive jordtrykket som oppstår på innsiden av bakveggen er beregnet tilnærmet helt likt, for hånd, Plaxis 2D og 3D. På innsiden av fremveggen, vist i Figur 178, avviker håndberegningen fra Plaxis. Dette kommer av at ruheten for hånd er antatt positiv. Dette betyr at det er antatt at jorden beveger seg mer opp enn fremveggen og jorden prøver dermed å løfte denne opp. På grunn av at fremveggen i Plaxis presses opp som vist i Figur 67 og Figur 114 viser det seg at veggen presses mer opp enn jorda. Dette betyr at en får negativ ruhet for dette jordtrykket. Jorda henger seg på fremveggen. Dette vises av den vertikale skjærspenningen på fremveggen i Figur 65 og Figur 105. I Figur 178 kan en se at en håndberegning med negativ ruhet stemmer svært godt med resultatene fra Plaxis. Jordtrykkene under pressegruppa fungerer dermed som en god kontroll mellom beregningsmåtene. Dette fordi man her er innenfor sideveggene. Disse hindrer noen betydelige tredimensjonale effekter. Sideveggene gjør at en får minimale tøyninger i dybden (y-retning i Plaxis 3D). Under betongplata og ned til spuntbunn får en dermed noe som ligner svært mye på en plan-tøyningstilstand som er forutsetningen for håndberegning og Plaxis 2D.

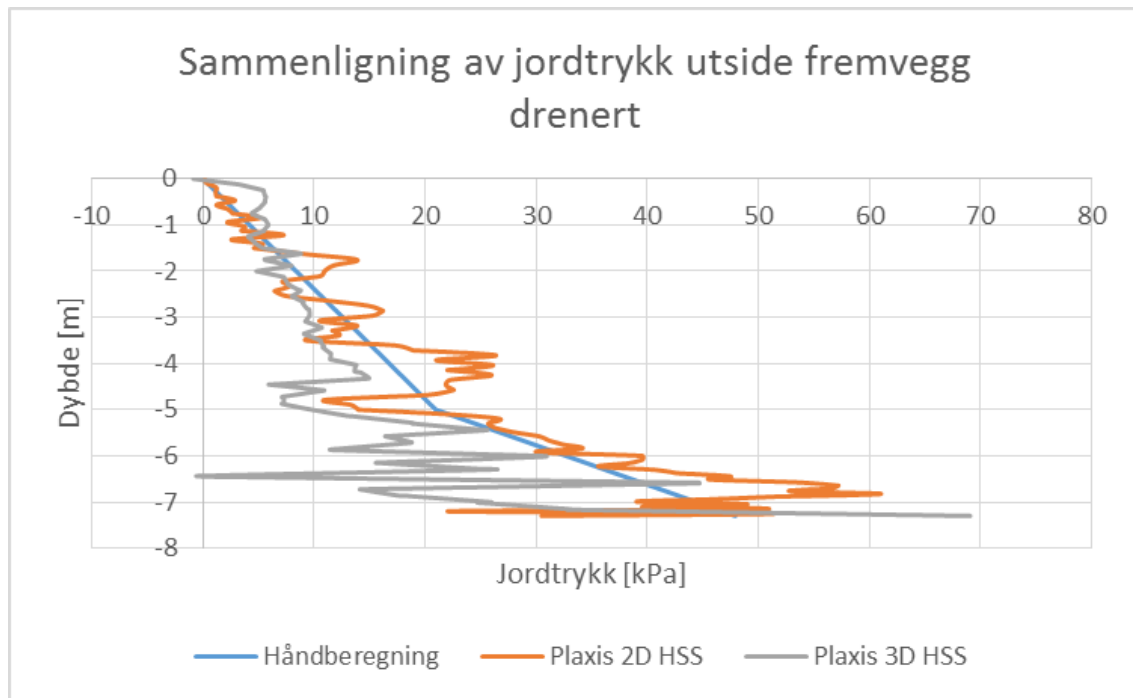


Figur 177 Sammenligning av jordtrykk innside bakvegg drenert



Figur 178 Sammenligning av jordtrykk innside fremvegg drenert

Det aktive jordtrykket som oppstår på utsiden av fremveggen fremstår veldig variabelt i Plaxis 2D. Det følger generelt sett likevel jordtrykket beregnet for hånd, som vist i Figur 179. Kraftresultanten er også omtrent lik. I Plaxis 3D ser man derimot at jordtrykket generelt er mindre. Den estimerte kraftresultanten er ca. 30 % mindre. Dette samsvarer med observasjonene fra bruddflatene og kan tenkes forklart ved at den omkringliggende jorden rundt bruddflaten hjelper til med å holde noe av jorden tilbake.



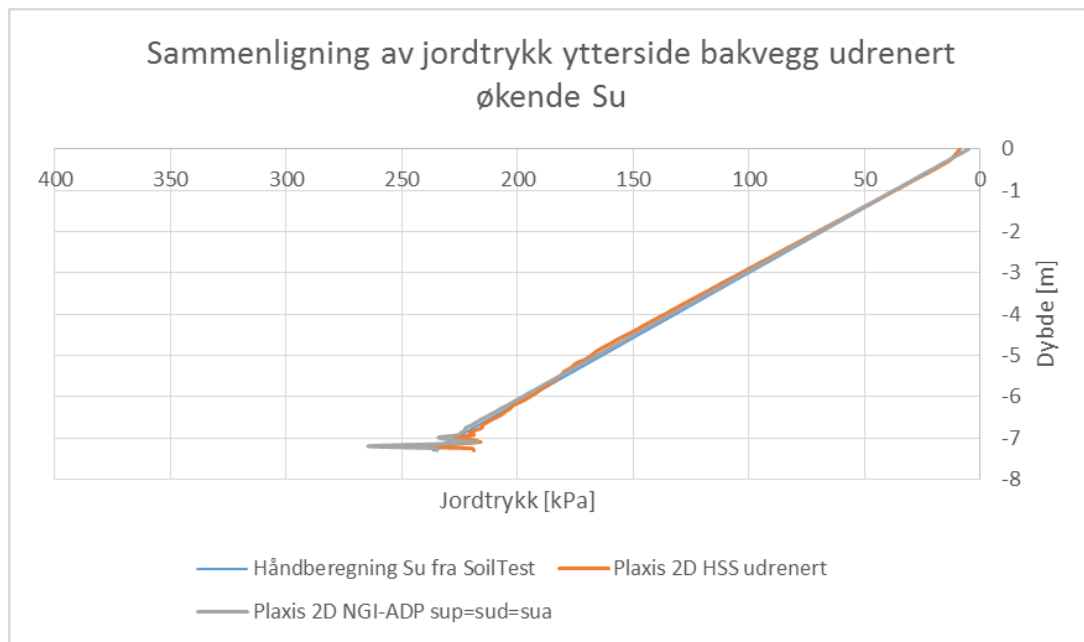
Figur 179 Sammenligning av jordtrykk utside fremvegg drenert

6.3.2 Udrenert tilfelle i leire med økende styrke

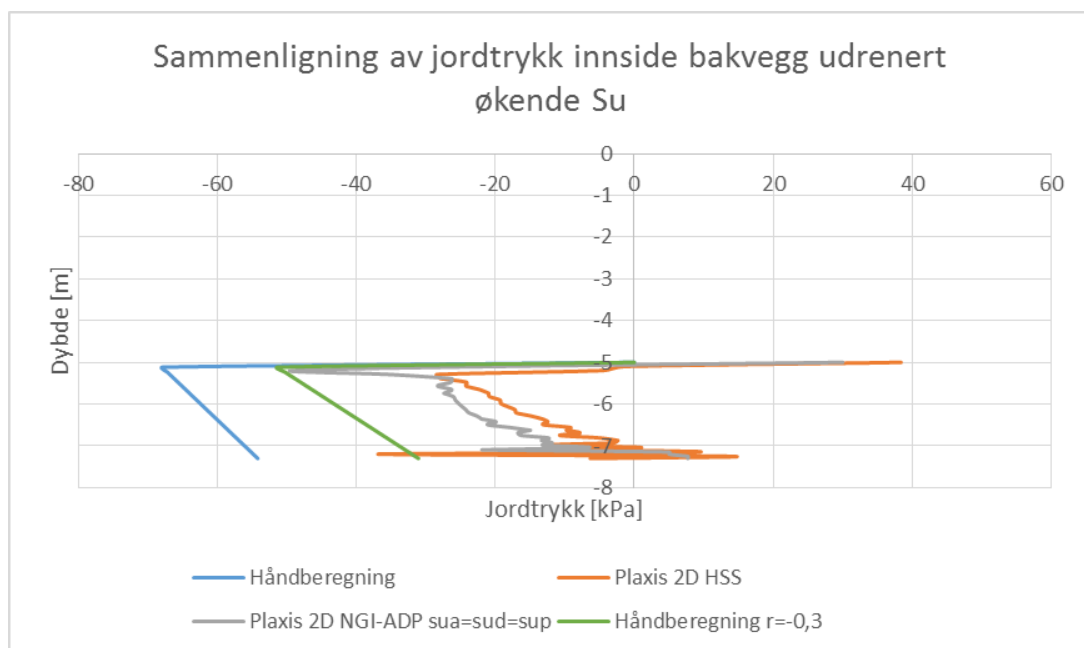
Det er tidligere nevnt at forsøk har vist at en deformasjon i størrelsesorden 0,5 % av støttekonstruksjonens høyde vil medføre aktivt jordtrykk i leire. For utvikling av passivt jordtrykk vil det være snakk om deformasjon på 2-3 % av konstruksjonshøyden. Med spuntlengden på 7,3 m vil det si at for aktivt jordtrykk kreves det en horisontal forskyvning på ca. 3,7 cm, mens for passivt ca. 15 -22 cm. Figur 77 og Figur 78 antyder at de horisontale forskyvningene oppnådd i Plaxis 2D ved spuntbunn egentlig er for små til å oppnå fullt passivt jordtrykk. Det samme kan Figur 143 og Figur 144 antyde for forskyvningene oppnådd i Plaxis 3D. Ser man derimot på de oppnådde jordtrykkene er passivt jordtrykk fullt utviklet i Plaxis.

Siden det er valgt å benytte materialmodellen *NGI-ADP* med ADP faktorer kan en ikke sammenligne direkte med håndberegninger. I håndberegningene er det nemlig kun den aktive styrken som er benyttet. For å sammenligne er det derfor valgt å gjøre en analyse med ADP faktorene lik 1 som vist i Tabell 11. Samtidig er det valgt å inkludere en analyse med *Hardening Soil Small* med materialparametere som vist i Tabell 12. Figur 180 til Figur 183 viser at det er små forskjeller i jordtrykk mellom *NGI-ADP* med ADP faktorer lik 1 og *Hardening Soil Small*. Håndberegningen viser tilnærmet samme jordtrykk for utside bak- og fremvegg som analysene med de to forskjellige materialmodellene. På innsiden av fremveggen skyldes avviket man ser at skjærspenningen også her virker motsatt vei i Plaxis enn antatt ved håndberegning. Dette vises i Figur 75. Den grønne linja i Figur 182 viser at om en antar negativ ruhet ved håndberegning stemmer resultatene bra. På innsiden av bakveggen virker skjærspenningen motsatt vei igjen, vist i Figur 74, men dette kan ikke være hele årsaken til avviket som vist med den grønne linja i Figur 181. I dette tilfellet presses derimot

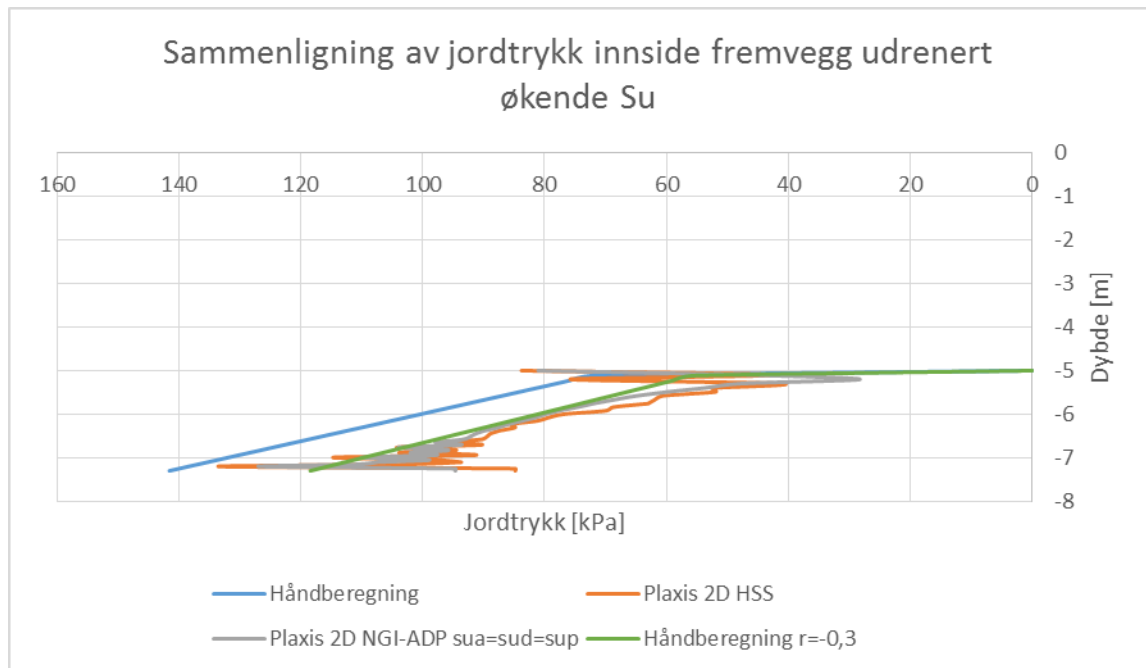
spuntgropa ned i bakkant, som vist i Figur 69 og Figur 77. Dette betyr at jorden i området på innsiden av bakveggen presses ned av betongplata. Dette, i tillegg til vekten av pressegropa, fører til økte vertikalspenninger sammenlignet med håndberegning. Av ligning 9 ser man at dette vil føre til økt jordtrykk. Dette fører nok til avviket sett fra håndberegning med negativ ruhet i Figur 181. At en ikke ser et avvik ved håndberegning med negativ ruhet i Figur 182 på grunn av vekt av pressegropa kommer av at her løftes betongplata opp. Det er da vist at håndberegning og Plaxis 2D i hovedsak viser samme jordtrykk. Man får ingen reduksjon på utsiden av bakveggen som sett for det drenerte tilfellet. Dette fordi det ikke er noe problem å oppnå vertikal likevekt som vist i Tabell 23.



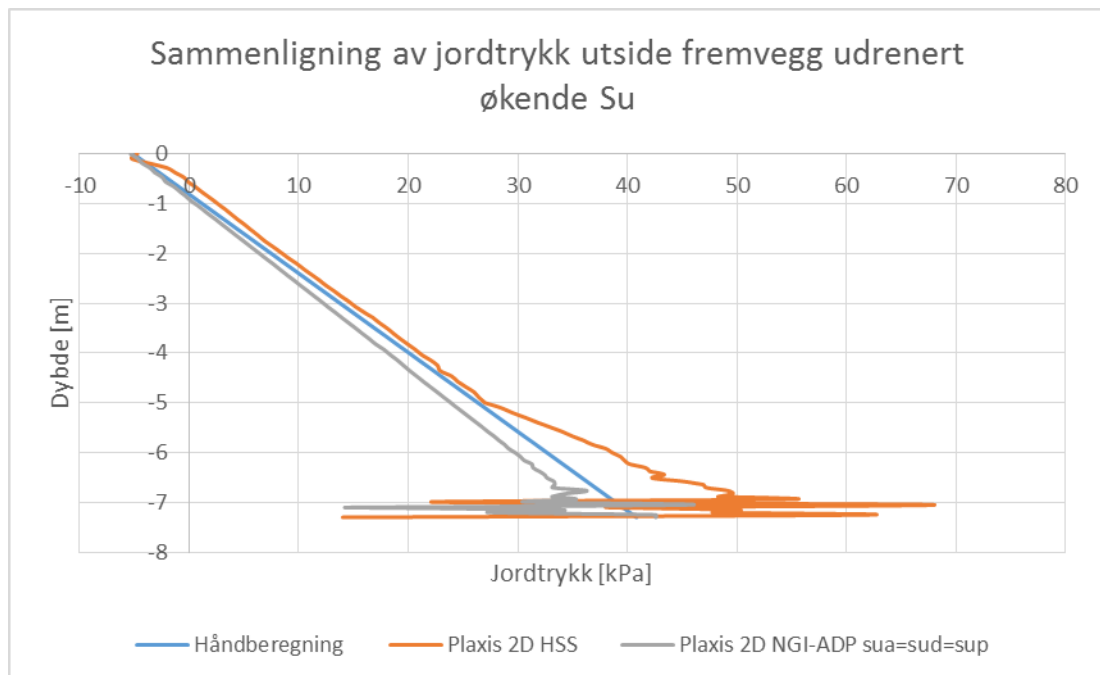
Figur 180 Sammenligning av jordtrykk utside bakvegg økende su for kontroll



Figur 181 Sammenligning av jordtrykk innside bakvegg økende su for kontroll



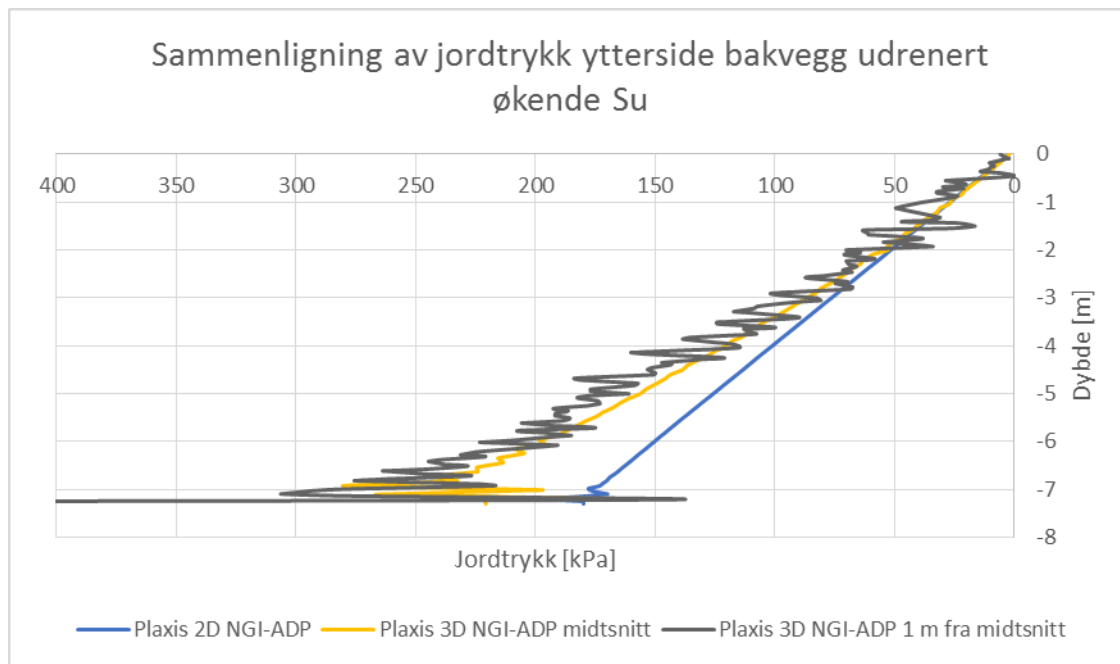
Figur 182 Sammenligning av jordtrykk innside fremvegg økende su for kontroll



Figur 183 Sammenligning av jordtrykk utside fremvegg økende su for kontroll

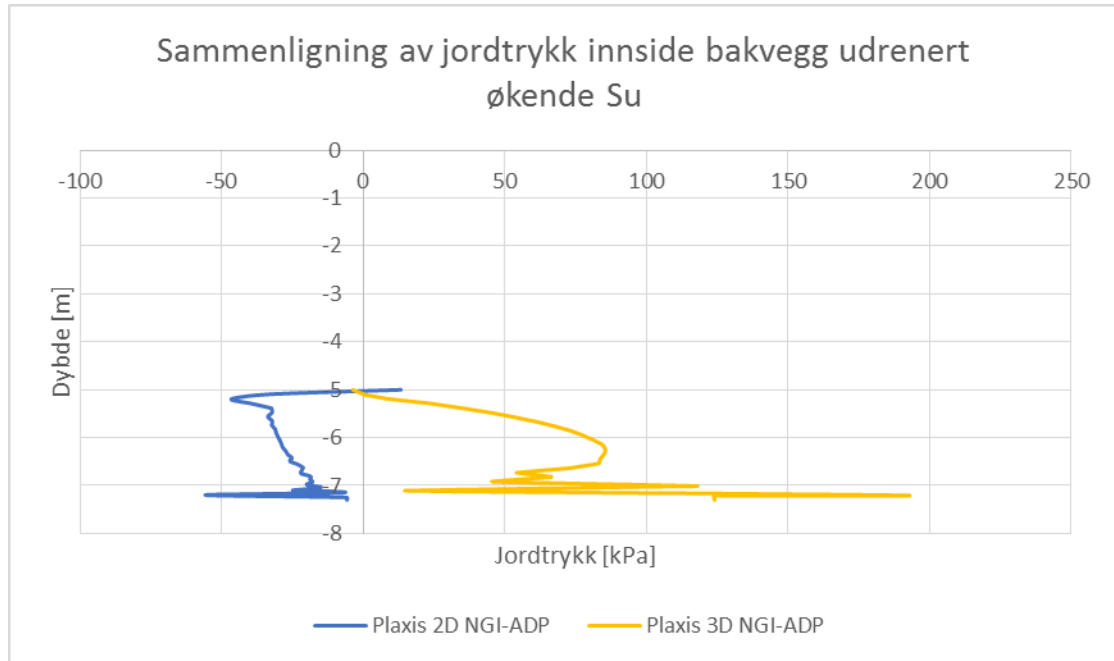
Siden den utførte kontrollen viser at Plaxis 2D og håndberegningene samsvarer godt er resultatene fra Plaxis 2D sammenlignet mot Plaxis 3D i det følgende. Det er da resultater fra analyser med materialparametere som vist i Tabell 10 som sammenlignes.

Figur 184 viser at den tredimensjonale effekten på jordtrykket på utsiden av bakveggen kan virke mindre når man ser på et udrenert tilfelle i leire enn drenert i sand. Kraftresultanten fra Plaxis 3D er dermed kun ca. 24 % større enn ved håndberegning og Plaxis 2D. Udrenert er bruddsonene i hovedsak bestemt av at vinkelen, vist i Figur 12, er på 45° . Dette gir en mindre bruddsone enn den passive i det drenerte tilfellet og det er kanskje derfor naturlig at den tredimensjonale effekten er mindre. Figur 184 viser at i dette tilfellet er det liten forskjell i jordtrykk nærmere hjørnet av pressegruppa, bortsett fra at det er mer varierende.



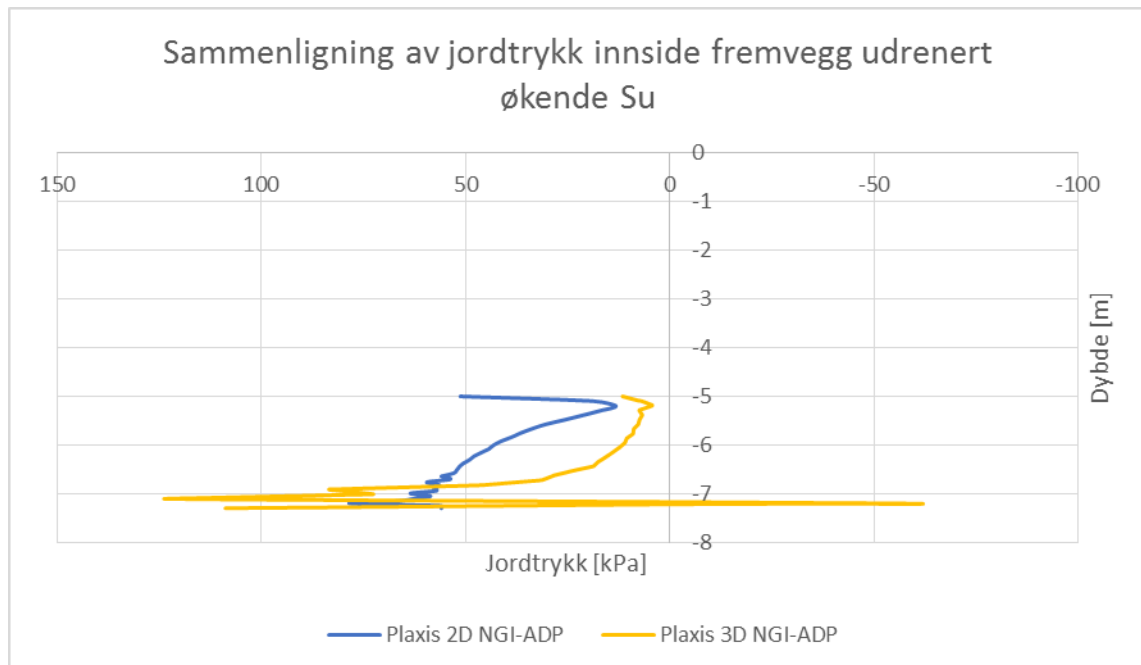
Figur 184 Sammenligning av jordtrykk utside bakvegg udrenert økende s_u

På innsiden av bakveggen viser Figur 185 at jordtrykket går fra å være sug til å bli et betydelig jordtrykk i Plaxis 3D. Dette vurderes å være på grunn av økte vertikalspenninger på grunn av forskyvningen til pressegruppa og av den økte vekten sideveggene gir. Av Figur 122 ses et betydelig jordtrykk under betongplata ved innsiden av bakveggen. Det vil i dette området øke vertikalspenningene i jorden på samme måte som en overflatelast og dermed også øke jordtrykket. Figur 73 viser at i Plaxis 2D er jordtrykket på betongplata i dette området betydelig mindre. Det bemerkes at forskjellen sett i Figur 185 har en negativ effekt på å mulig pressekraft for Plaxis 3D.



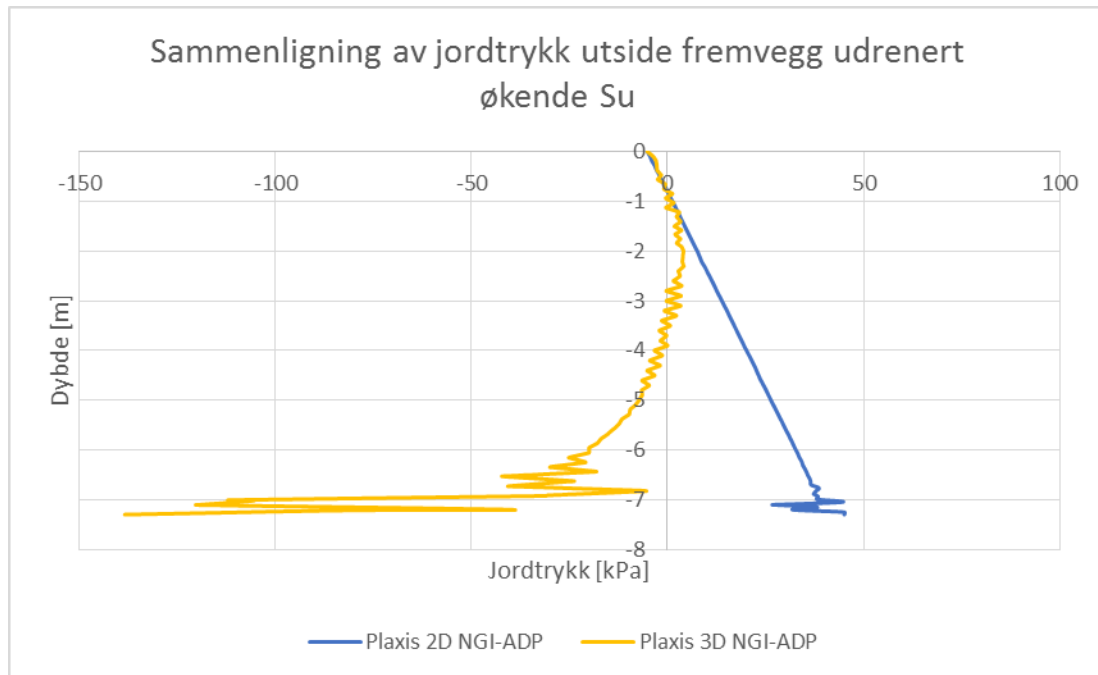
Figur 185 Sammenligning av jordtrykk innside bakvegg udrenert økende su

På innsiden av fremveggen viser Figur 186 at det fås omtrent samme jordtrykk fra både Plaxis 2D og Plaxis 3D. Dette sammenfaller med den tidligere observasjonen om at man er i nærheten av en plan-tøyningsstilstand under betongplata og ned til spuntbunn på grunn av sideveggene. Den mindre forskjellen sett i Figur 186 kan forklares ved mindre forskjeller i jordtrykk under betongplata i dette området fra Plaxis 2D til 3D. Dette kan en se ved å sammenligne Figur 73 med Figur 122.



Figur 186 Sammenligning av jordtrykk innside fremvegg udrenert økende su

På utsiden av fremveggen viser Figur 187 at en tilsynelatende tredimensjonal effekter fører til at jordtrykket i Plaxis 3D avviker tydelig fra Plaxis 2D. Mot spuntbunn går det faktisk fra trykk til sug.



Figur 187 Sammenligning av jordtrykk utside fremvegg udrenert økende su

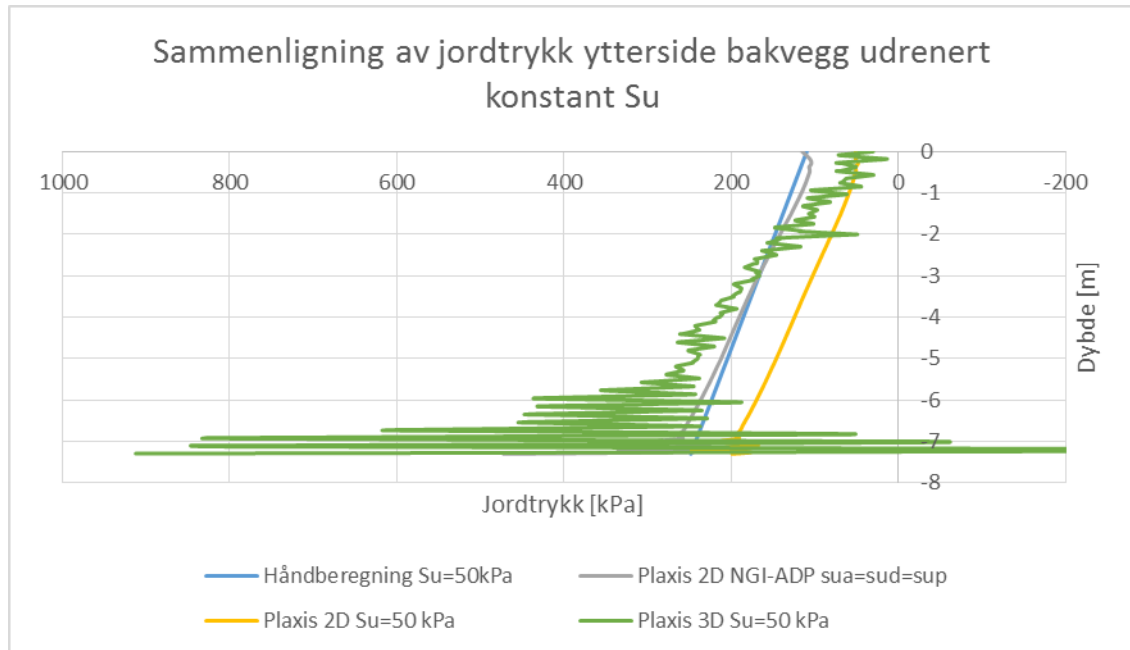
6.3.3 Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke

Forskyvningene observert fra både Plaxis 2D og 3D tyder på at både aktivt og passivt jordtrykk bør være i nærheten av fullt utviklet i tilfellet med konstant udrenert styrke. Det er på bakveggen under utgravingsnivå at forskyvningene er noe mindre som vist i Figur 87 og Figur 172.

I dette tilfellet viser det seg at en sammenligning mellom håndberegning og Plaxis 2D, med ADP faktorer lik 1, gir svært like jordtrykk også under pressegrøpa som vist i Figur 188 til Figur 191. Pressegrøpa får nå forskyvninger som fører til at skjærspenningene her får samme retning (varierer dog på innsiden fremvegg) i Plaxis 2D som antatt ved håndberegning. Dette vises i Figur 84 og Figur 85. Det vises også i Figur 83 at det under betongplata i Plaxis 2D opptrer relativt lite jordtrykk som igjen vil påvirke jordtrykket på innsiden av veggene. Det er dermed også her vist at håndberegning og Plaxis 2D gir svært like resultater. Derfor er resultater fra Plaxis 2D og Plaxis 3D med materialparametere som vist i Tabell 13 sammenlignet. Det kan også kommenteres at jordtrykket på utsiden av fremveggen er svært likt ved håndberegning, Plaxis 2D med ADP faktorer lik 1 og Plaxis 2D med ADP faktorer som angitt i Tabell 13. Dette fordi jorden på utsiden av fremveggen i all hovedsak belastes aktivt.

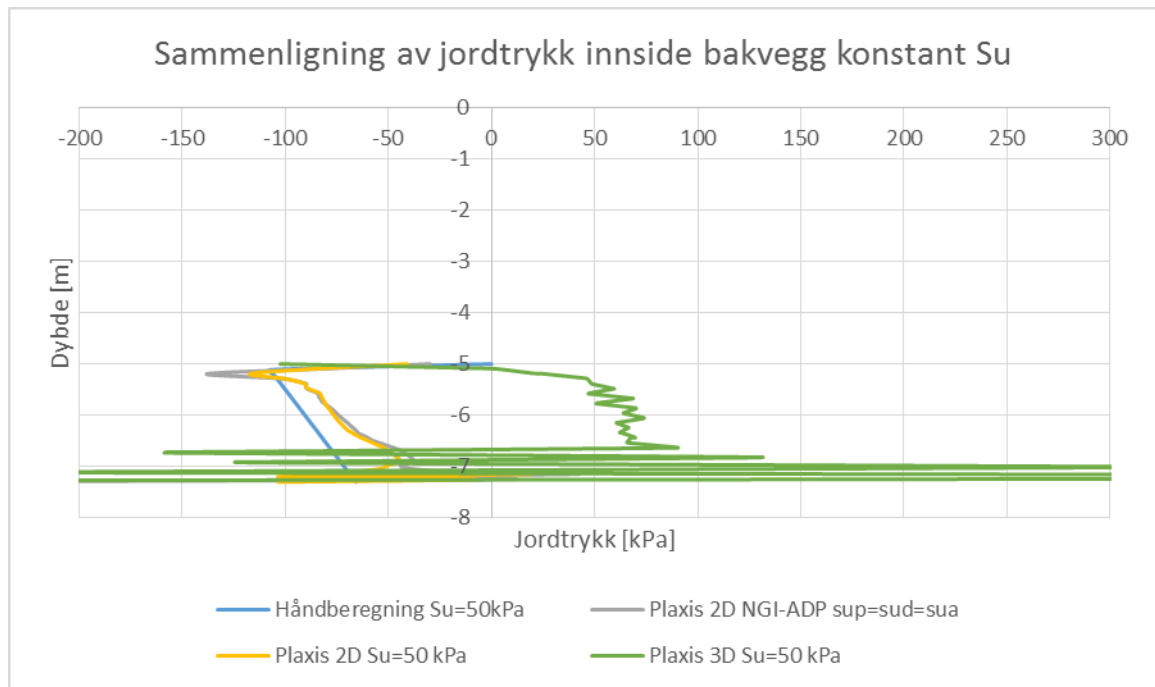
Figur 188 indikerer at den tredimensjonale effekten på utsiden av bakveggen er betydelig. Faktisk økes jordtrykket med ca. 68% sammenlignet med Plaxis 2D og

håndberegning (som antas svært lik Plaxis 2D hvis en tar hensyn til ADP faktorer). Altså en stor forskjell i økning sammenlignet med det udrenerte tilfellet med økende styrke i dybden. Dette har trolig å gjøre med at styrken i tilfellet med økende styrke i snitt er mye mindre enn tilfellet med konstant. I tilfellet med økende styrke varierer den aktive skjærstyrken fra 2,33 kPa til 44,67 kPa ved dybde -7,3 m. Dette gir et snitt på 23,5 kPa, altså under halvparten.

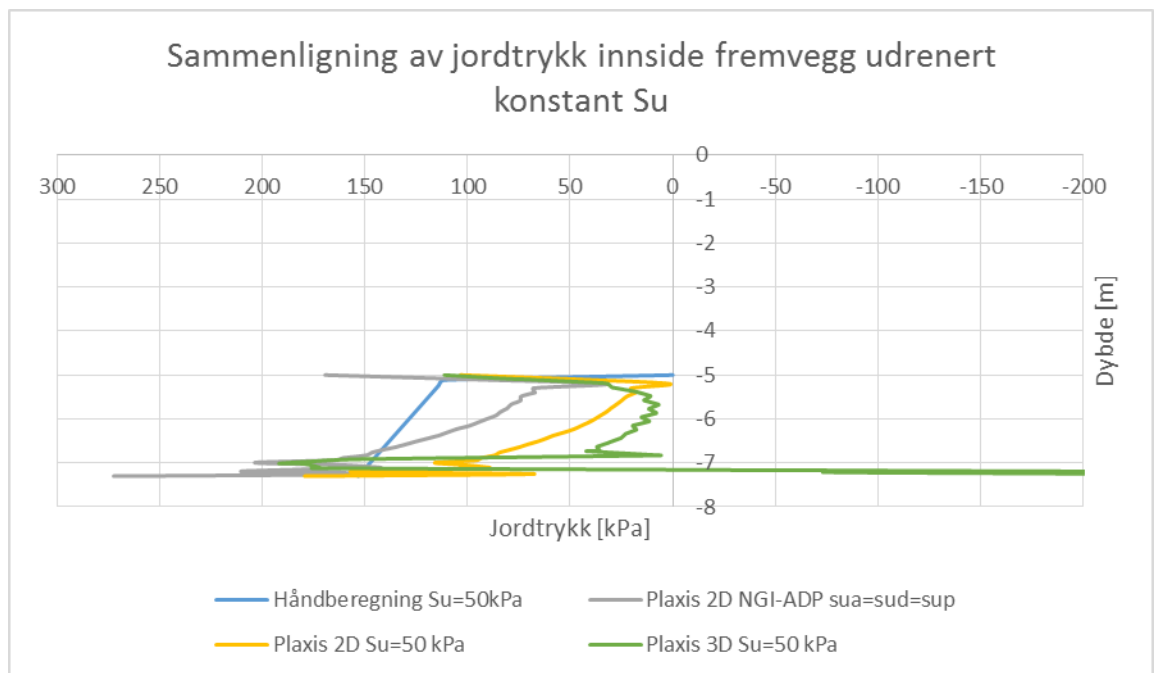


Figur 188 Sammenligning av jordtrykk utside bakvegg udrenert konstant su

På innsiden av både fremveggen og bakveggen observeres de samme forskjellene mellom Plaxis 2D og 3D som i det udrenerte tilfellet med økende styrke i dybden. Figur 189 og Figur 190 kommenteres derfor ikke ytterligere.

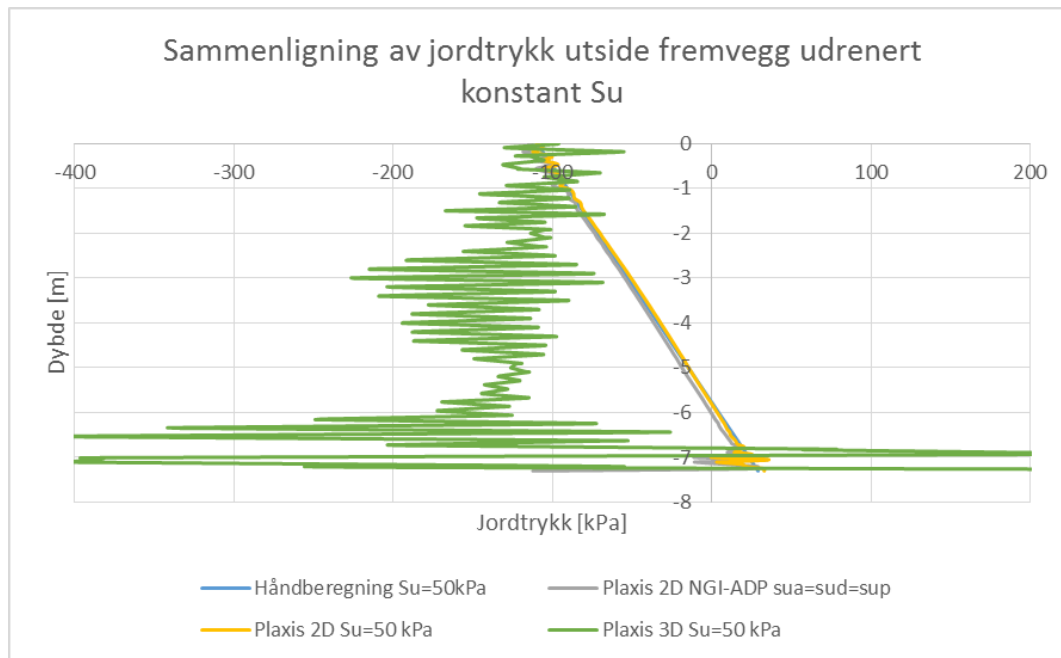


Figur 189 Sammenligning av jordtrykk innside bakvegg udrenert konstant s_u



Figur 190 Sammenligning av jordtrykk innside fremvegg udrenert konstant s_u

På utsiden av fremveggen viser Figur 191 at en tilsynelatende tredimensjonal effekter fører til at jordtrykket i Plaxis 3D avviker tydelig fra Plaxis 2D. Det virker et sug over hele spuntlengden.



Figur 191 Sammenligning av jordtrykk utside fremvegg udrenert konstant su

6.4 Horisontal skjærspenning

Den horisontale skjærspenningen (eller friksjon) langs sideveggene (og betongplata i bunnen) viser seg å være avgjørende for hvor mye pressekraft som kan påføres dersom en regner full tredimensjonal situasjon som i Plaxis 3D. For de antatte dimensjonene av pressegrøpa og materialparametere vises det at horisontalt virkende skjær står for ca. 19 % av mulig pressekraft i det drenerte tilfellet i sand. For det udrenerte tilfellet med økende styrke i dybden står skjær for hele 64 % av mulig pressekraft. Tilfellet med konstant udrenert styrke indikerer at 53 % av mulig pressekraft kommer fra skjær.

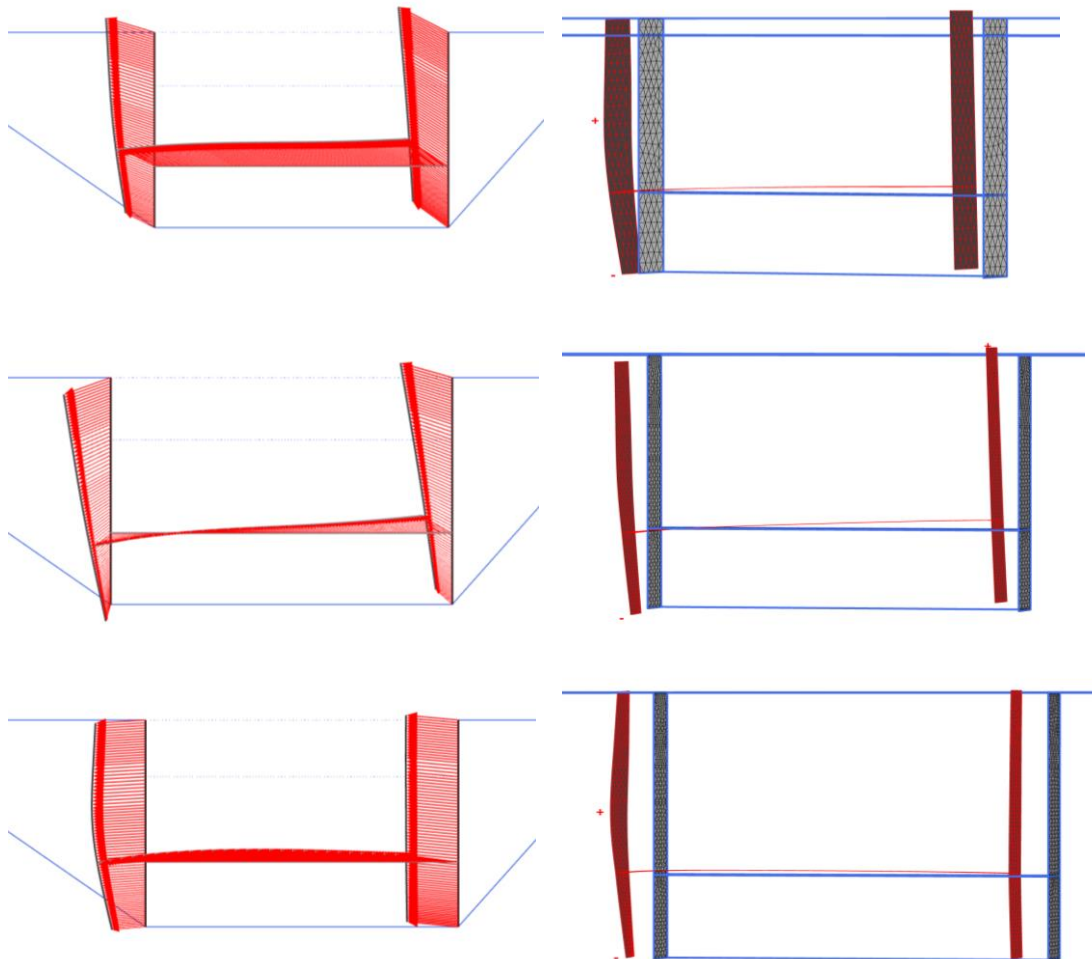
6.5 Vertikal skjærspenning

Det er vist for det drenerte tilfellet at å regne full tredimensjonal situasjon i Plaxis 3D er nødvendig for å kunne balansere den store vertikale skjærspenningen som oppstår på utsiden av bakveggen. I Plaxis 2D kan ikke denne balanseres og dermed må det benyttes en lavere ruhet i dette området for å kunne oppnå vertikal likevekt. Dette betyr lavere jordtrykk og igjen lavere mulig pressekraft. I 3D bidrar derimot sideveggene til å balansere denne store oppad rettede skjærspenningen som vist i Figur 106. Det vurderes at dette er årsaken til det veldig lave jordtrykket observert på utsiden av bakveggen i Plaxis 2D for det drenerte tilfellet. Udrenert oppstår det ingen slike problemer fordi skjærspenningen på utsiden av bakveggen er relativt liten og balanseres lett. Plaxis 2D og håndberegning gir derfor tilnærmet like resultater.

Vertikal likevekt er også sjekket for kraftresultantene fra vertikal skjær. I Plaxis 2D er avviket fra vertikal likevekt under 1%, mens det i Plaxis 3D er opptil 6 %. Dermed er nok kraftresultantene fra Plaxis 3D mer usikre, men fortsatt vurdert akseptable.

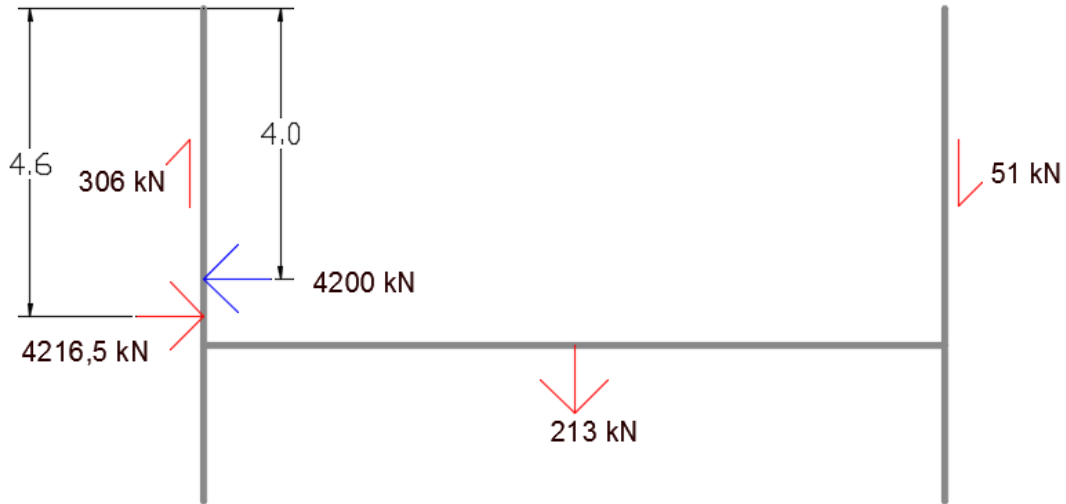
6.6 Forskyvning av pressegrep

Figur 192 viser, i samtlige tilfeller, og i både 2D og 3D, at pressegropa viser en tendens til å rotere mot klokka. For å identifisere grunnen til dette kan det være nyttig å se på kreftene som virker på pressegropene. Samtlige krefter på pressegropene er vist i Vedlegg A.3. I Figur 193 til Figur 198 er de fleste kreftene sammenslått med størrelse og angrepspunkt tilsvarende de respektive. Dette for å enklere visuelt kunne se den totale virkningen. Blå pil angir pressekraften fra selve pressingen, mens røde piler angir responsen fra jorda i Figur 193 til Figur 198. I Plaxis 2D har det vært mulig å finne angrepspunktet til kraftresultantene ganske nøyaktig. I Plaxis 3D var dette mye vanskeligere og kreftene er derfor påsatt der de er vurdert å virke uten noen nøyaktig posisjon på angrepspunktene. I figurene fra Plaxis 3D kan det virke som det er påsatt krefter i løse løfta. Dette er derimot skjær fra sideveggene. Bredden på pressegropa er satt til 3 m, og resultatene som er antatt per meter er derfor ganget med 3. Kraftresultanter fra skjær i Plaxis 3D er tidligere angitt i kN, men dette gjelder for halve gropa siden det er dette som er modellert. Så disse resultatene er ganget med 2 for å få hele bidraget.

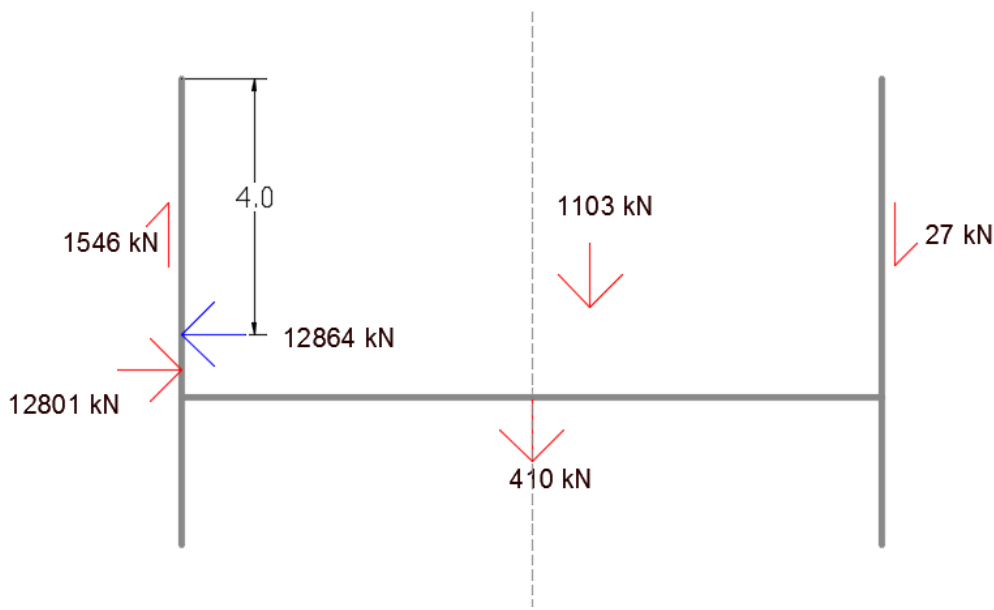


Figur 192 Forskyvninger av pressegrep. Venstre sider viser forskyvninger fra Plaxis 2D, høyre Plaxis 3D. Øverst vises det drenerte tilfellet, midten viser udrenert med økende styrke og nederst vises tilfellet med konstant udrenerte styrke.

I det drenerte tilfellet vises det i Figur 193 og Figur 194 at den totale horisontale responsen fra jorda virker dypere enn pressekraften. Dermed er det naturlig å forvente en rotasjon mot klokka.

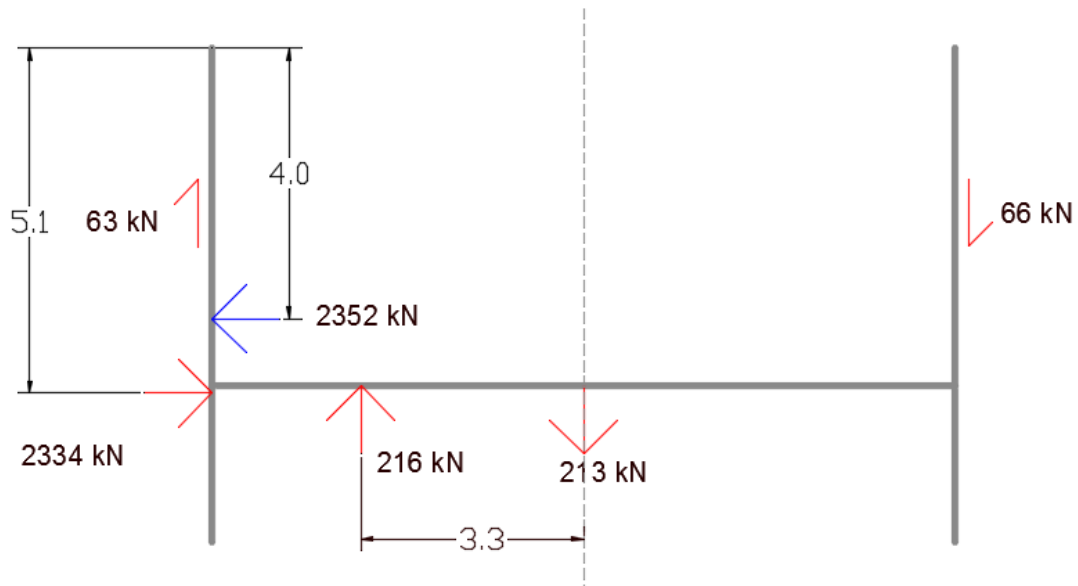


Figur 193 Sammenslåtte krefter på pressegrup Plaxis 2D drenert

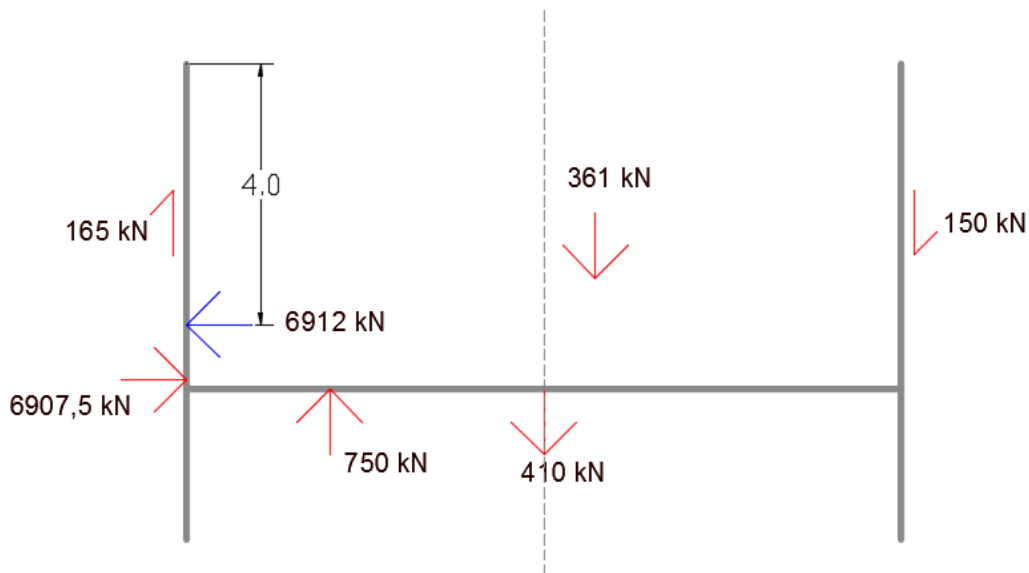


Figur 194 Sammenslåtte krefter på pressegrup Plaxis 3D drenert

I det udrenerte tilfellet med økende styrke i dybden er den totale horisontale responsen fra jorda igjen dypere enn pressekraften som vist i Figur 195 og Figur 196. Det er da også her fornuftig med en rotasjon mot klokka.

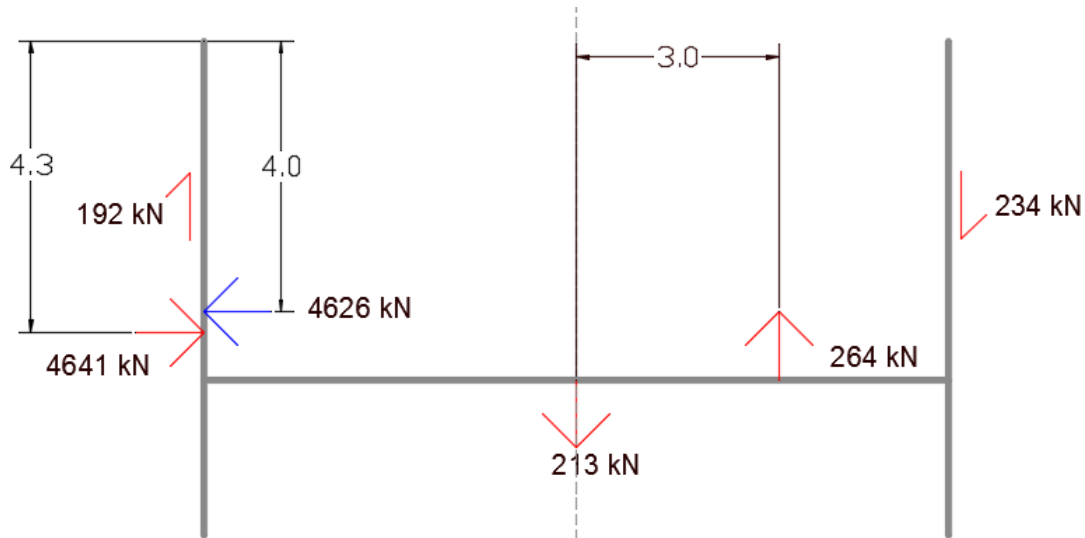


Figur 195 Sammenslåtte krefter på pressegrup Plaxis 2D udrenert økende su

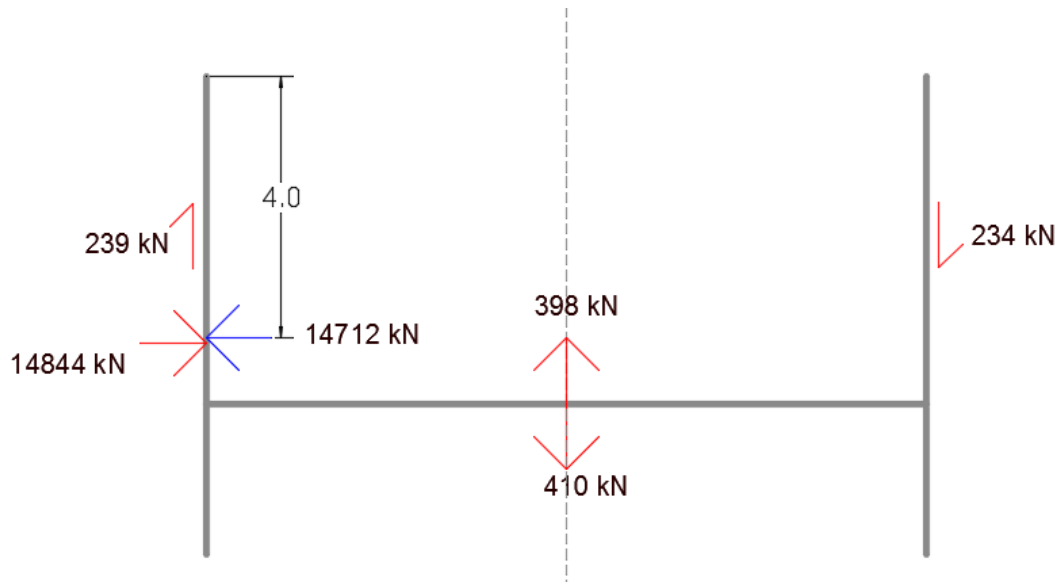


Figur 196 Sammenslåtte krefter på pressegrup Plaxis 3D udrenert økende su

I det udrenerte tilfellet med konstant styrke i dybden viser Figur 197 og Figur 198 at den totale horisontale responsen fra jorda er i tilnærmet samme dybde som pressekraften. Det passive jordtrykket på utsiden av bakveggen er ikke lenger like dominerende som vist i Vedlegg A.3. Dette forklarer trolig at tendensen til rotasjon er mye mindre i dette tilfellet, og minimal i Plaxis 3D.



Figur 197 Sammenslåtte krefter på pressegrup Plaxis 2D udrenert konstant su

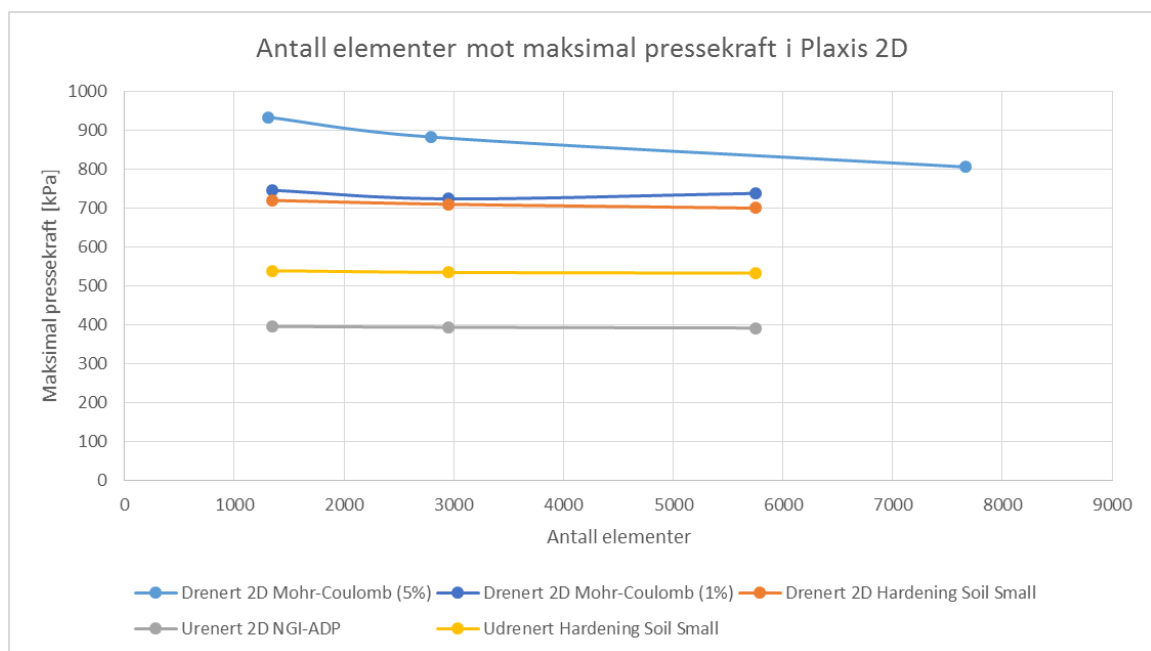


Figur 198 Sammenslåtte krefter på pressegrup Plaxis 3D udrenert konstant su

6.7 Vurdering av nøyaktighet av resultatene

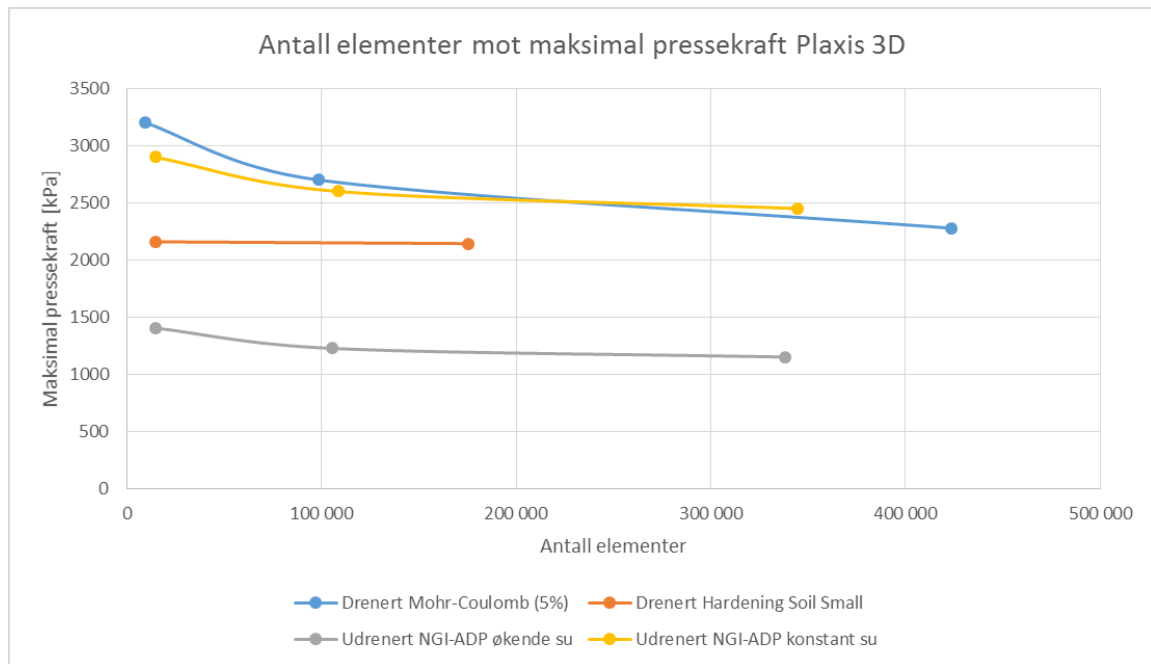
For å kunne gjøre en vurdering av resultatene er tilfellene analysert med forskjellig elementinndeling (mesh). Elementmetoden vil nemlig overestimere løsningen om elementinndelingen ikke er fin nok. I Figur 199 er antall elementer i modellen plottet mot maksimal påført pressekraft for analysene i Plaxis 2D. Den lyseblå linja viser resultatene fått i prosjektoppgaven der det ble sett på et drenert tilfelle i sand. Da var den tolererte feilen i likevekt, forklart i avsnitt 2.6.2, satt til 5 %. Ved å justere på andre iterasjonsparametere kunne denne feilen settes til 1 % for analysene gjort i denne oppgaven. Figur 199 viser at dette fører til at analyser selv med relativt få elementer er nære den konvergerende verdien i Plaxis 2D og dermed har god nøyaktighet. Det bemerkes at den lyseblå linja som viser resultatene fra prosjektoppgaven viser noe høyere mulig pressekraft enn

de drenerte fra denne oppgaven. Dette kommer av at det nå er brukt en lavere ruhet (0,3 i stedet for 0,7) som gir lavere passivt jordtrykk og tilhørende lavere pressekraft. I Plaxis 2D ble det i det drenerte tilfellet kjørt noen analyser med *Mohr-Coulomb* også. Det ble tidligere antatt at mer avanserte materialmodeller, som *Hardening Soil Small*, ville føre til liten endring i maksimal pressekraft da analysen kjøres til brudd og de to modellene baserer seg på samme bruddkriterium. Selv om Figur 199 viser en noe merkelig endring i maksimal pressekraft for *Mohr-Coulomb* ettersom det blir benyttet flere elementer ser man at forskjellen er svært liten mellom *Mohr-Coulomb* og *Hardening Soil Small*. Det må nevnes at stivheten til jordmaterialet med *Mohr-Coulomb* er justert ettersom det avlastes eller lastes i modellen. Det ble derimot observert at deformasjonene var svært forskjellig mellom de to materialmodellene. Dette var forventet, da *Hardening Soil Small* er overlegen *Mohr-Coulomb* på det området og kommenteres ikke ytterligere.



Figur 199 Antall elementer i mesh plottet mot mulig pressekraft i Plaxis 2D

I Plaxis 3D viser Figur 200 en tendens til at de udrenerte tilfellene konvergerer mot en endelig verdi. Resultatene fra de fineste elementinndelingene vurderes å ikke være langt fra denne endelige verdien. I Plaxis 3D med det drenerte tilfellet er man tilsynelatende i nærheten av den endelige verdien allerede ved svært grov elementinndeling. Det har derimot vist seg svært krevende i kjøre analysene drenert i Plaxis 3D med *Hardening Soil Small* og så lav ruhet. Det er derfor det ikke er kjørt analyse i dette tilfellet med enda finere elementinndeling. Med kun to datapunkter vurderes det at en ikke kan gjøre noen gode vurderinger om nøyaktigheten på denne måten. Man så likevel at under pressegruppa gav Plaxis 3D svært like jordtrykk som Plaxis 2D og dette gir en indikasjon på nøyaktigheten til resultatene også i det drenerte tilfellet.



Figur 200 Antall elementer i mesh plottet mot mulig pressekraft i Plaxis 3D

6.8 Krefter i konstruksjonselementer

For å gjøre en vurdering av om konstruksjonselementer, som spunt og pute, er valgt i reelle dimensjoner er det i det følgende gjort noen forenklede kapasitetsberegninger. Disse er sammenlignet med opptredende krefter i pressefase som vist i Vedlegg A. Det er også naturlig å anta at kreftene i konstruksjonselementene kan øke siden beregning i Plaxis 3D antyder større kapasitet med tanke på grunnbrudd enn Plaxis 2D. Selv om man kanskje kan utnytte en mindre bredde på pressegrøpa, må muligens konstruksjonselementene ha større dimensjoner.

Elastisk momentkapasitet om akse x til et konstruksjonselement kan bestemmes ved ligning 27.

$$M_{xRd} = \frac{W_x * f_{yk}}{\gamma_m} \quad (27)$$

hvor W_x er det elastisk motstandsmomentet om akse x og f_{yk} er karakteristisk stål kvalitet. Materialfaktoren γ_m settes ofte lik 1,05 for stål (Standard Norge, 2008).

Aksialkraftkapasiteten i retning x kan bestemmes som ved ligning 28.

$$N_{xRd} = \frac{A_x * f_{yk}}{\gamma_m} \quad (28)$$

der A_x er tverrsnittsarealet i retning x.

Skjærkapasiteten er bestemt av ligning 29.

$$V_{xRd} = \frac{A_{vx} * (f_{yk}/\sqrt{3})}{\gamma_m} \quad (29)$$

der A_{vx} er effektivt materialtversnitt for skjærkrefter i retning x.

6.8.1 Spunt

Momentkapasiteten om akse 1, angitt som M_{11} i Figur 201, for Larsen 605 spunt med stålqualität S355 blir da som utregnet i ligning 30.

$$M_{11Rd} = \frac{0,00202 * 355\ 000}{1,05} = 683\ kNm/m \quad (30)$$

Aksialkraftkapasiteten i retning 1 blir som vist i ligning 31.

$$N_{1Rd} = \frac{0,01773 * 355\ 000}{1,05} = 6009\ kN \quad (31)$$

Skjærkapasiteten blir som vist i ligning 32 og 33 for skjær Q_{13} og Q_{23} (Figur 201). Effektivt tverrsnitt for skjær over vertikal retning A_{13} er antatt lik 1/3 av det totale tverrsnittet, mens effektivt tverrsnitt for skjær over horisontal retning A_{23} er antatt 1/10 av det totale.

$$V_{13Rd} = \frac{\frac{0,01773}{3} * 355\ 000}{1,05 * \sqrt{3}} = 1154\ kN \quad (32)$$

$$V_{23Rd} = \frac{\frac{0,01773}{10} * 355\ 000}{1,05 * \sqrt{3}} = 346\ kN \quad (33)$$

Tabell 47 viser at det i Plaxis 2D kun er momentet som overskrides noe i to av tilfellene. Det betyr at man vil kunne forvente flytning i tverrsnittet om det ikke benyttes en spunt med større motstandsmoment. Siden konstruksjonselementene i Plaxis er modellert elastisk går de naturligvis ikke til brudd og det er kun stivheten som påvirker resultatene. Det vurderes at den økte stivheten som forårsakes av at man kanskje må benytte en spunt med større momentkapasitet har liten effekt på resultatene i Plaxis 2D. Dette fordi man er i nærheten av momentkapasiteten.

Plaxis 2D	N_1 [kN/m]	Q_{13} [kN/m]	M_{11} [kNm/m]
Sand	113	646	759
Leire	35	424	510
Leire (50 kPa)	59	803	871

Tabell 47 Utvalgte maksimalverdier av krefter på spunt under pressefase Plaxis 2D

Fra resultatene i Plaxis 3D, vist i Tabell 48, kan man se at maksimalverdiene av kreftene har økt ganske dramatisk. Både skjærkapasiteten og momentkapasiteten overskrides relativt mye i de fleste tilfeller. Dette betyr at man sannsynligvis måtte benytte spunt med ganske mye større momentkapasitet og stivhet for å kunne utnytte den maksimale pressekraften.

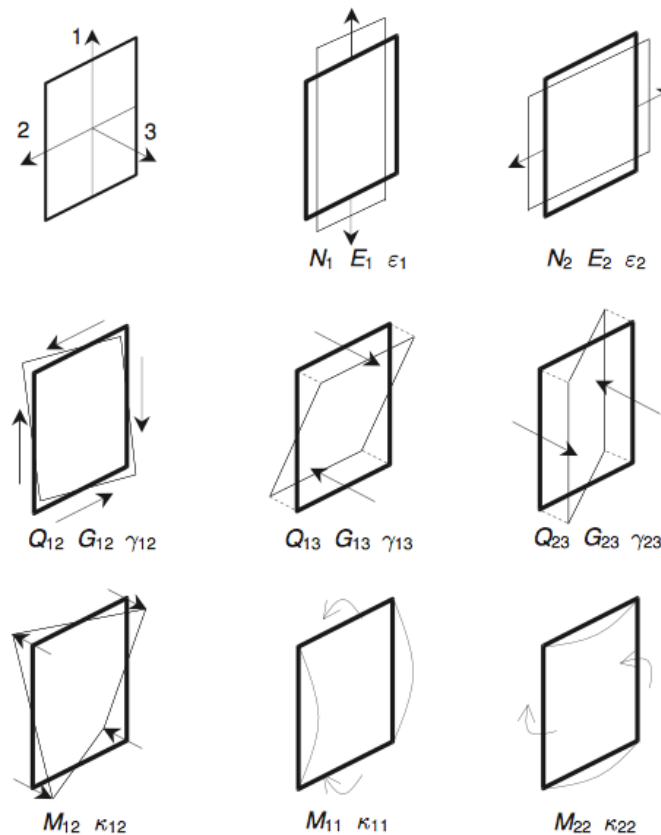
Plaxis 3D	N_1 [kN/m]	Q_{23} [kN/m]	Q_{13} [kN/m]	M_{11} [kNm/m]
Sand	4093	653	2140	1666
Leire	2248	205	1710	788
Leire (50 kPa)	1421	362	3729	1711

Tabell 48 Utvalgte maksimalverdier av krefter på spunt under pressefase Plaxis 3D

I Tabell 49 vises maksimalverdier av krefter i spunt for udrenert tilfelle med konstant styrke i dybden, der det er presset med en pressekraft på 771 kPa. Altså det samme som maksimal pressekraft er i det samme tilfellet beregnet i Plaxis 2D. Det er interessant å se at normalkraften N_1 og skjærkraften Q_{13} har økt sammenlignet med Plaxis 2D, mens momentet M_{11} er lavere.

Plaxis 3D	N_1 [kN/m]	Q_{23} [kN/m]	Q_{13} [kN/m]	M_{11} [kNm/m]
Leire (50 kPa) med pressekraft 771 kPa	956	70	1123	422

Tabell 49 Utvalgte maksimalverdier av krefter på spunt under pressefase Plaxis 3D for det udrenerte tilfellet i leire med konstant su med pressekraft på 771 kPa.



Figur 201 Gjengivelse av definisjon av lokalt aksesystem og parametere for plate Plaxis 3D (Plaxis, 2015c)

6.8.2 Pute/stiver

Momentkapasitet for pute/stiver HEB-300 med stålkvalitet S355 blir som vist i ligning 34 for sterk akse og som vist i ligning 35 for svak akse.

$$M_{3Rd} = \frac{0,001680 * 355\ 000}{1,05} = 542\ kNm/m \quad (34)$$

$$M_{2Rd} = \frac{0,000571 * 355\ 000}{1,05} = 184\ kNm/m \quad (35)$$

Aksialkraftkapasiteten i retning 1 blir som vist i ligning 36.

$$N_{1Rd} = \frac{0,0149 * 355\ 000}{1,05} = 5038\ kN \quad (36)$$

Skjærkraftkapasiteten i retning 2 og 3 blir som vist i henholdsvis ligning 37 og 38.

$$V_{12Rd} = \frac{0,004742 * 355\ 000}{1,05 * \sqrt{3}} = 926\ kN \quad (37)$$

$$V_{13Rd} = \frac{0,0114 * 355\ 000}{1,05 * \sqrt{3}} = 2225\ kN \quad (38)$$

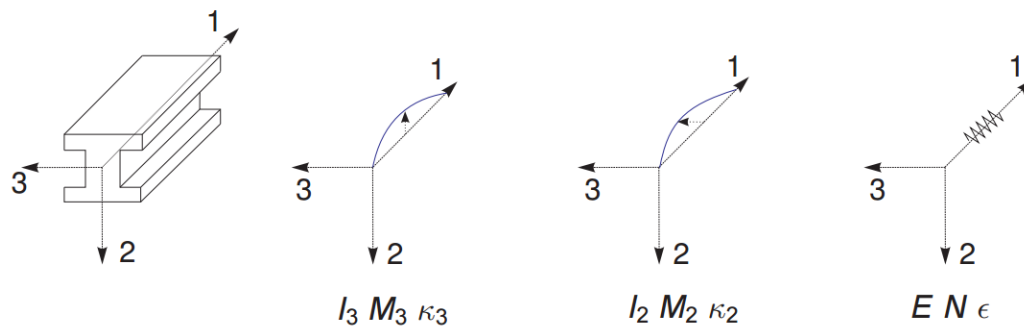
Maksimalverdier fra krefter, vist i Tabell 50 og Tabell 51, viser at valgt pute/stiver nok har ganske fornuftige stivheter. Momentkapasiteten om svak akse viser seg dog å være noe mindre enn de opptredende momentene.

Plaxis 2D	N ₁ [kN]
Sand	240
Leire	297
Leire (50 kPa)	831

Tabell 50 Maksimalverdier av krefter på pute/stiver under pressefase Plaxis 2D

Plaxis 3D	N ₁ [kN]	Q ₁₂ [kN]	Q ₁₃ [kN]	M ₂ [kNm]	M ₃ [kNm]
Sand	925	727	690	337	558
Leire	769	620	408	201	520
Leire (50 kPa)	1421	1216	934	472	538

Tabell 51 Utvalgte maksimalverdier av krefter på pute/stiver under pressefase Plaxis 3D



Figur 202 Definisjon av lokalt aksessystem og parametre for bjelke Plaxis 3D (Plaxis, 2015c)

7 Konklusjon

Resultatene gir klare indikasjoner på tredimensjonale effekter. Visuelt vises effekten av lastspredning på bruddflatene observert fra Plaxis 3D i det drenerte tilfellet. Der kan en se at bruddflatene tar en slags lyspære-form der de sprer seg utenfor bredden på pressegruppa. Det vises også at det kan virke en betydelig skjærkraft (eller friksjon) på sideveggene til pressegruppa. Både drenert og udrenert vises det at maksimal mulig pressekraft, før grunnbrudd, kan økes med ca. 300 % ved å regne i Plaxis 3D i stedet for Plaxis 2D. Dette indikerer at en kan lage en mindre pressegrup om en regner i 3D, med tanke på grunnbrudd. Oppgaven viser at en pressegrup med dimensjoner 11 m x 3 m x 7,3 m (Lengde x Bredde x Dybde) regnet i Plaxis 3D har omtrent samme kapasitet mot grunnbrudd som en med dimensjoner på ca. 11 m x 9 m x 7,3 m regnet i Plaxis 2D.

Det er samtidig vist at kreftene i konstruksjonselementene (blant annet spunt og pute/stiver) kan øke om man søker å utnytte disse tredimensjonale effektene ved å lage en smalere pressegrup. Praktisk betyr det at man kan spare kostnader om beregningene gjøres i 3D, men spuntene må kanskje samtidig ha større kapasitet.

I prosjektoppgaven, som denne masteroppgaven bygger videre på, ble det observert at i et drenert tilfelle gav Plaxis 2D svært lav mulig pressekraft sammenlignet med håndberegning og Plaxis 3D. Kort fortalt vises det at for utsiden av bakveggen virker det en lavere ruhet r i Plaxis 2D enn både i Plaxis 3D og beregnet for hånd. Dette er nødvendig for å tilfredsstille vertikal likevekt i plan- tøyning. Denne reduserte ruheten fører igjen til mindre passivt jordtrykk som bidrar til å motstå pressekraften. I Plaxis 3D bidrar også sideveggene med nedad rettet skjær og dette er nok til å balansere den store mengden oppad rettet skjær på utsiden av bakveggen. Ruheten må dermed ikke reduseres i Plaxis 3D for å oppnå vertikal likevekt.

Det vises at man i Plaxis 2D får svært små forskjeller i mulig pressekraft ved å modellere med finere elementinndeling enn ca. 1500 elementer. I Plaxis 3D vises det derimot at finere elementinndeling enn ca. 10 000 elementer i modellen gir betydelig forskjell. Dette indikerer at det i Plaxis 3D er nødvendig å bruke relativt fin elementinndeling for å få nøyaktige resultater.

Det er vist at *Hardening Soil Small*, som forventet, gir svært liten forskjell i mulig pressekraft før grunnbrudd, sammenlignet med *Mohr-Coulomb*. Det ble samtidig observert store forskjeller i forskyvninger. I en ren bruddgrensetilstand har det derfor liten effekt å benytte mer avanserte materialmodeller, men om en ser på en bruksgrensetilstand er det derimot helt avgjørende.

8 **Anbefalinger for videre arbeid**

Oppgaven gir som sagt klare indikasjoner på at man ved å regne 3D i stedet for 2D (plan-tøyning) kan redusere nødvendig størrelse (bredde) på pressegruppa. Ved å redusere bredden vil det, som vist, kanskje virke større krefter i konstruksjonselementene. Da må man kanskje benytte større dimensjoner. Det er også mer krevende å beregne i tredimensjonal programvare. I tillegg antyder oppgaven at det i Plaxis 3D må modelleres med relativt fin elementinndeling for å få nøyaktige resultater. Det bør derfor undersøkes om det kostnadmessig er lønnsomt å utnytte disse tredimensjonale effektene.

9 Referanser

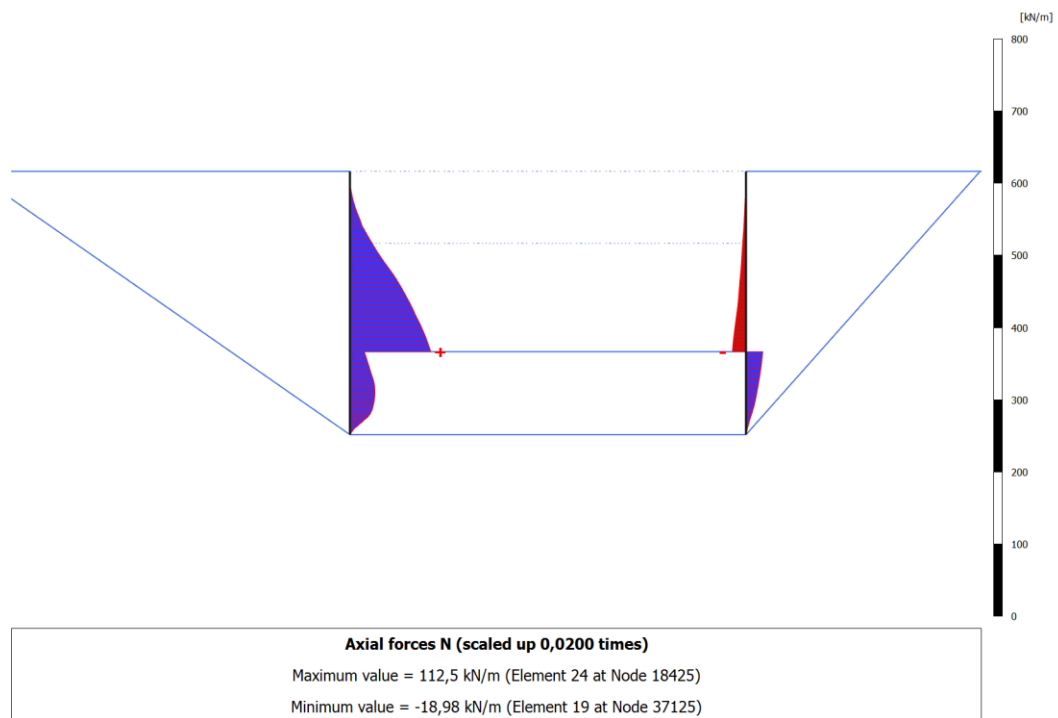
- Aarhaug, O. R. 1984. *Geoteknikk og fundamenteringslære :2*, Rud, NKI-forlaget.
- Bell, K. 2013. *An engineering approach to finite element analysis of linear structural mechanics problems*, Trondheim, Akademika Publ.
- Direct Industry. 2015. *Microtunneling boring machine* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://www.directindustry.com/prod/akkerman/product-59264-385241.html> [Lest 18/09 2015].
- Emdal, A., Grande, L. & Nordal, S. 2013. *Geoteknikk Beregningsmetoder*, Trondheim, Norwegian University of Science and Technology: Geotechnical Division.
- Føyn, T. & Lauritzen, R. A. 2014. Avløpsprosjektet Midgardsormen: Pressing av store rør over store avstander, til dels med bruk av overtrykk. *Fjellsprengningsdagen, Bergmekanikkdagen, Geoteknikkdagen*. C Forfatterne.
- Holland Boring As. 2014. *Styrt AT-boring* [Online]. Tilgjengelig fra: http://holland-nodig.no/styrt_at_boring/ [Lest 29/09 2015].
- Nordal, S. 2014. *TBA4116 Geotechnical engineering advanced course: Lecture notes and background material*, Trondheim, Norwegian University of Science and Technology: Geotechnical Division.
- Olimb As. 2013. *Produktdatablad: -Nytt rør i kombinasjonsmasser og fjell* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://olimb.no/files/2013/09/Olimb.pdf> [Lest 29/09 2015].
- Plaxis. 2015a. *Material Models Manual* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://www.plaxis.nl/files/files/2D-3-Material-Models.pdf> [Lest 28/10 2015].
- Plaxis. 2015b. *Plaxis 2D: Reference manual* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://www.plaxis.nl/files/files/2D-2-Reference.pdf> [Lest 28/10 2015].
- Plaxis. 2015c. *Plaxis 3D Anniversary Edition: Reference Manual* [Online]. Tilgjengelig fra: <http://www.plaxis.nl/files/files/3D-2-Reference.pdf> [Lest 28/10 2015].
- Saarem, R. 4/10 2015. *RE: Pressegrøper for rørpresse på Ensjø*. Type to KILDAL, K.
- Standard Norge 2008. Norsk Standard NS-EN 1993-1-1:2005+NA:2008. *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 1-1: Almene regler og regler for bygninger*. Standard Norge.
- Statens Vegvesen 2014. *Geoteknikk i vegbygging. I: VEGDIREKTORATET (red.) Håndbok V220*.
- Ukritchon, B. & Boonyatee, T. 2015. Soil Parameter Optimization of the NGI-ADP Constitutive Model for Bangkok Soft Clay.
- Valle, A. 2015. Samtale med prosjektleder/kalkulator hos Olimb Anlegg. I: KILDAL, K. (red.).

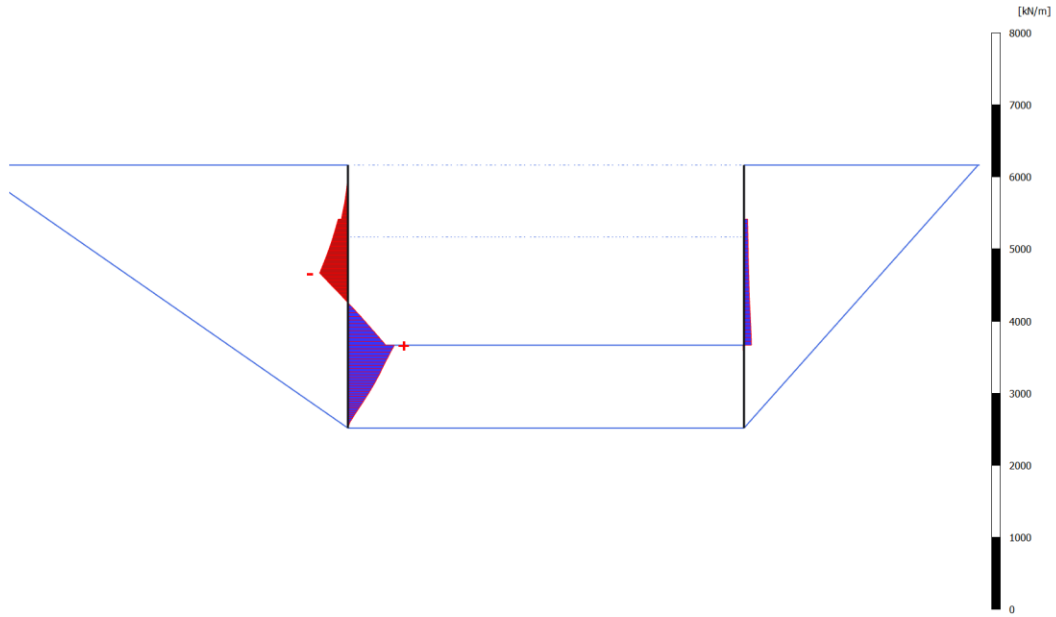
A Vedlegg – Resultater

A.1 Krefter på konstruksjonselementer

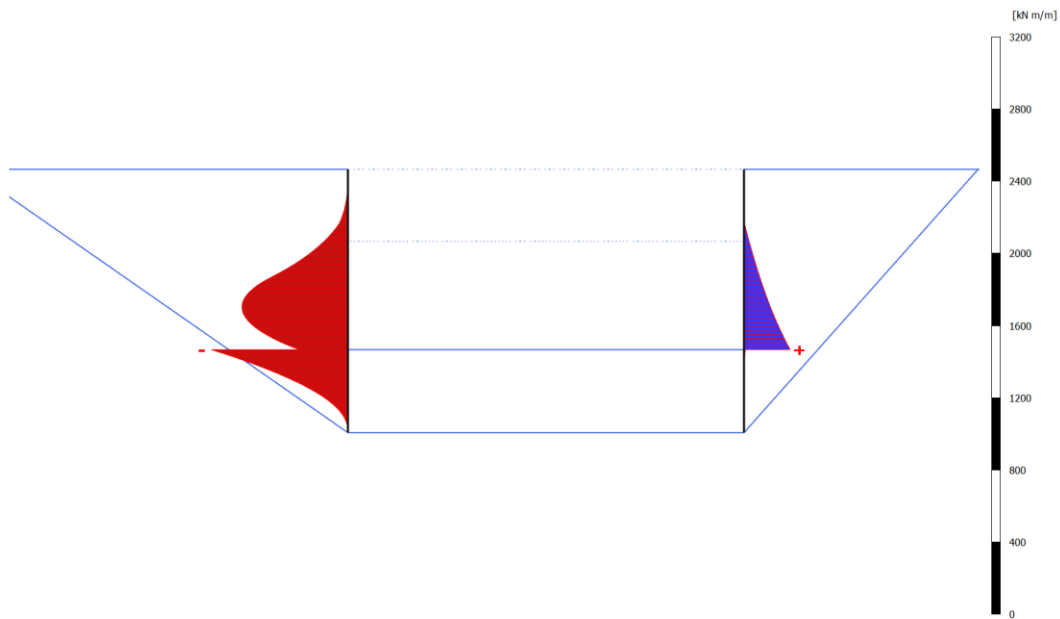
A.1.1 Plaxis 2D

A.1.1.1 Drenert tilfelle i sand





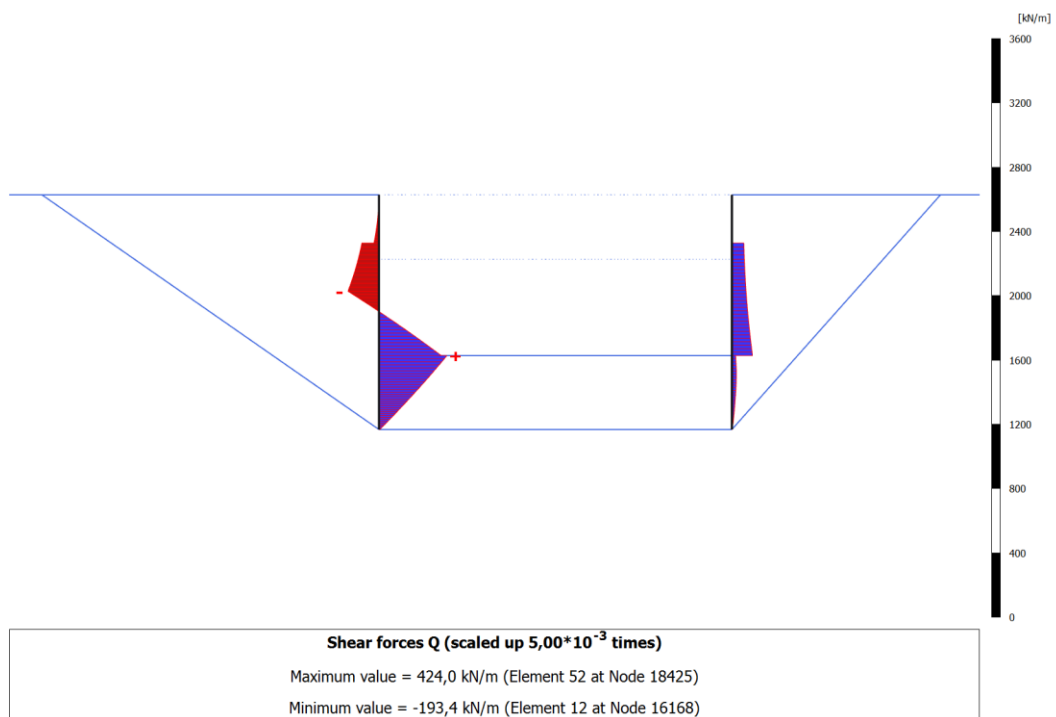
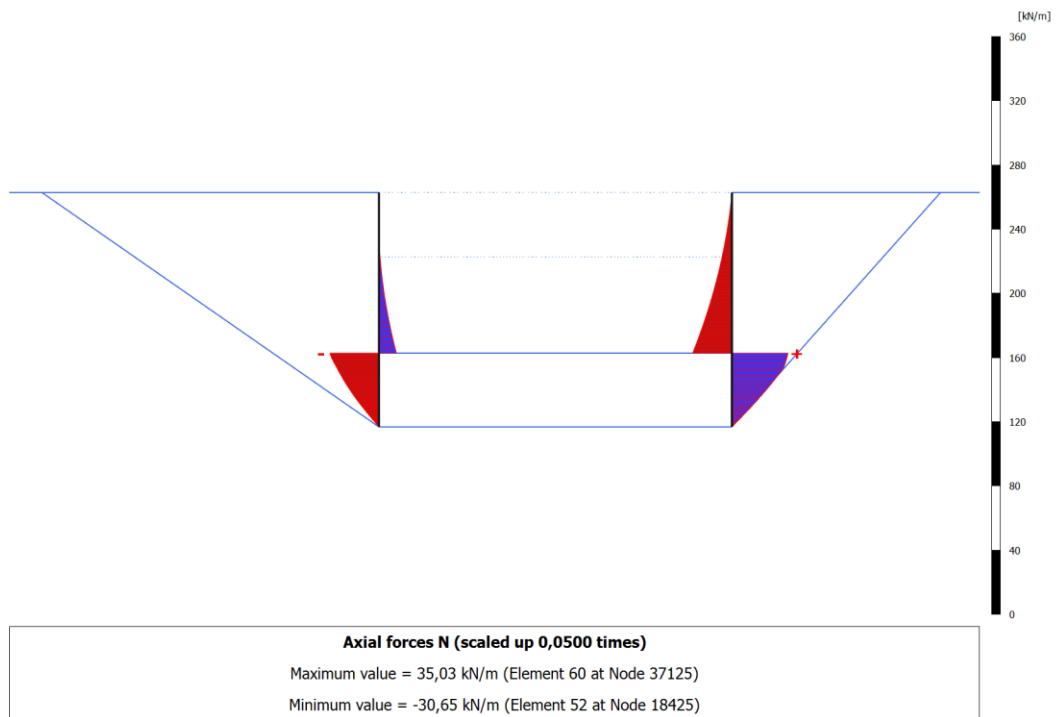
Shear forces Q (scaled up $2,00 \cdot 10^{-3}$ times)
 Maximum value = 646,1 kN/m (Element 52 at Node 18425)
 Minimum value = -393,2 kN/m (Element 12 at Node 16168)

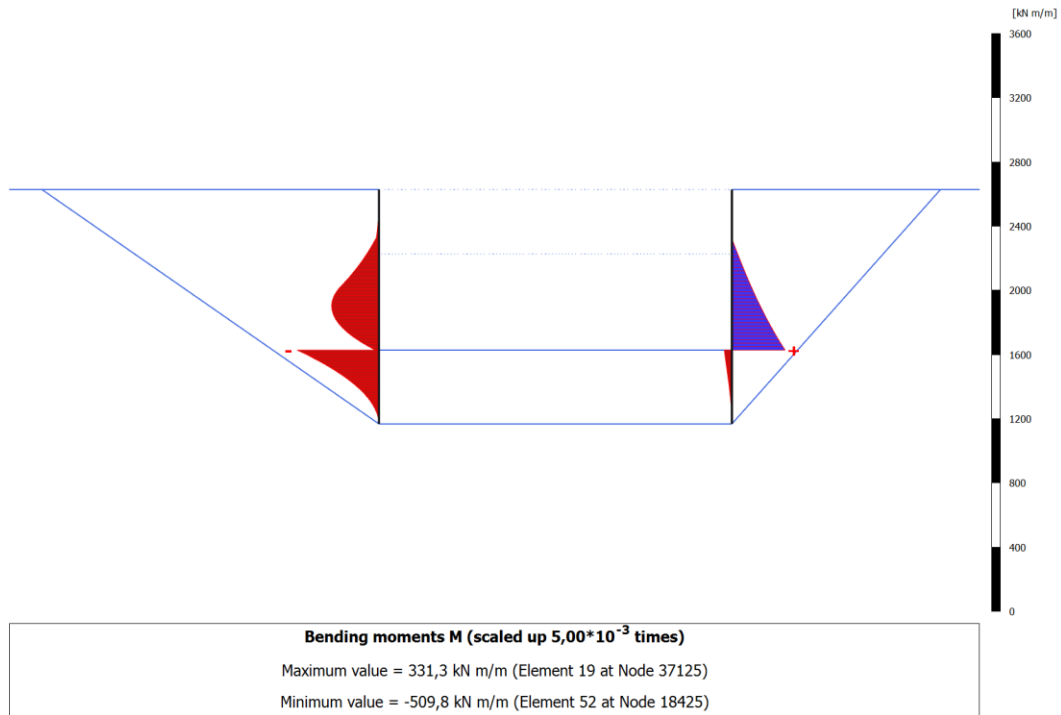


Bending moments M (scaled up $5,00 \cdot 10^{-3}$ times)
 Maximum value = 255,6 kN m/m (Element 19 at Node 37125)
 Minimum value = -759,3 kN m/m (Element 52 at Node 18425)

Structural element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	N [kN]	N_{min} [kN]	N_{max} [kN]
NodeToNodeAnchor_1_1	16131	1	-5,500	-1,500	45,247	-79,444	48,590
Element 1-1 (Node-to-node anchor)	41009	2	5,500	-1,500	45,247	-79,444	48,590

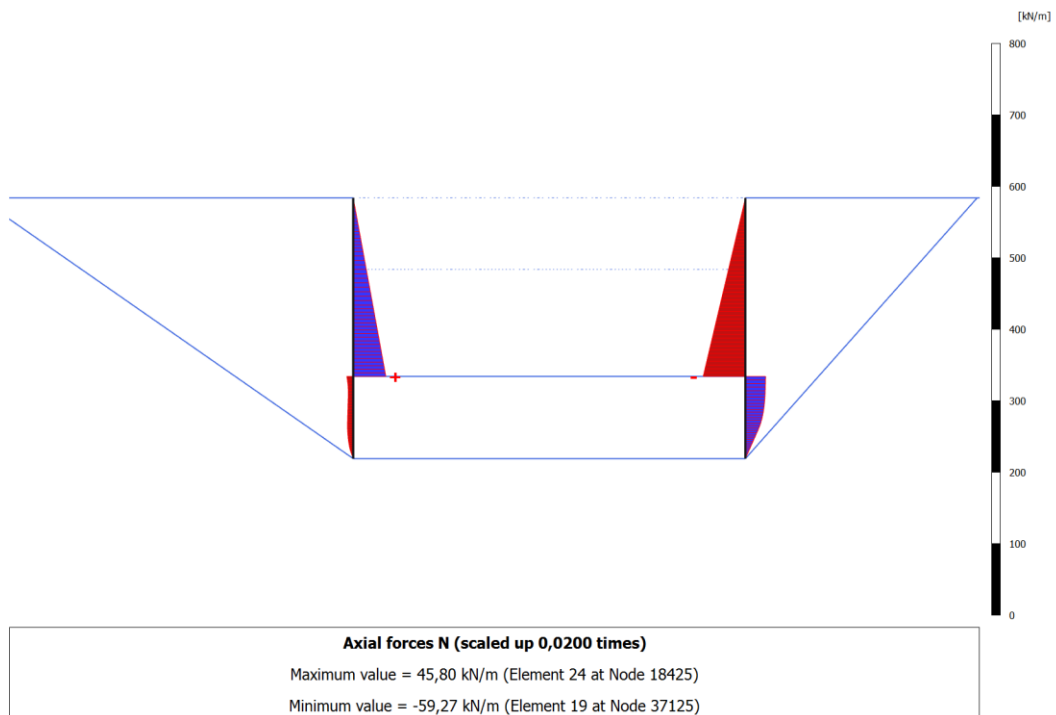
A.1.1.2 Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden

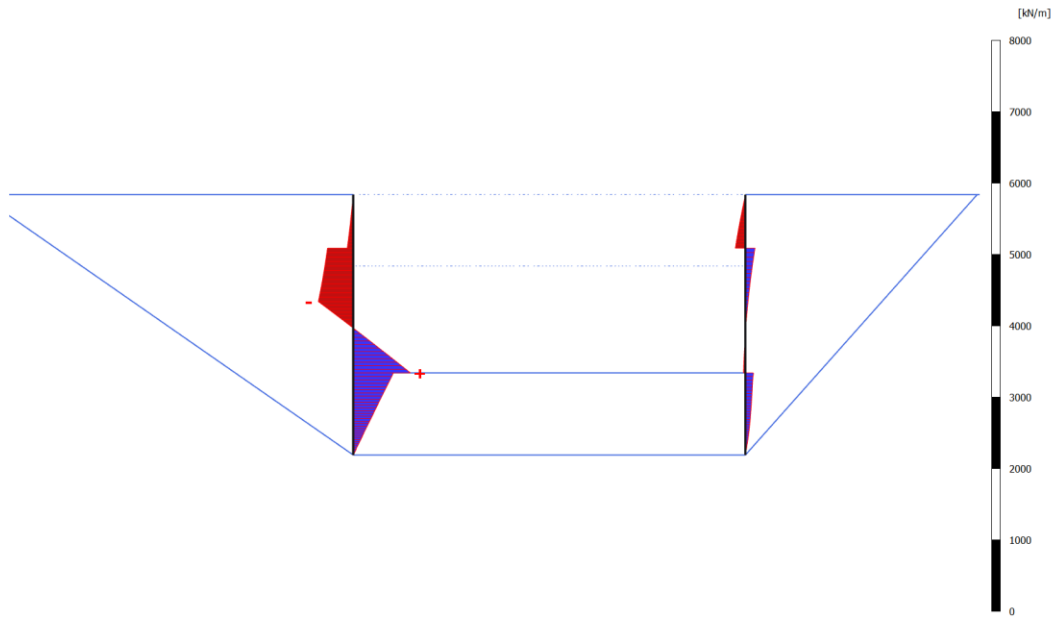




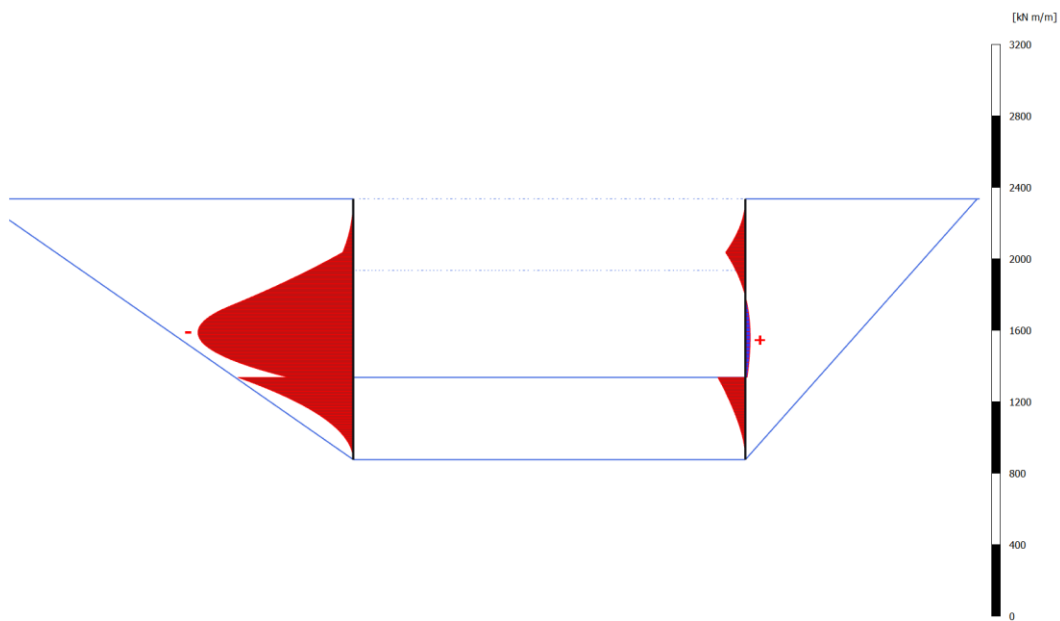
Structural element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	N [kN]	N _{min} [kN]	N _{max} [kN]
NodeToNodeAnchor_1_1	16131	1	-5,500	-1,500	75,258	-99,240	75,258
Element 1-1 (Node-to-node anchor)	41009	2	5,500	-1,500	75,258	-99,240	75,258

A.1.1.3 Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden





Shear forces Q (scaled up $2,00 \cdot 10^{-3}$ times)
 Maximum value = 803,4 kN/m (Element 24 at Node 18425)
 Minimum value = -489,4 kN/m (Element 12 at Node 16168)

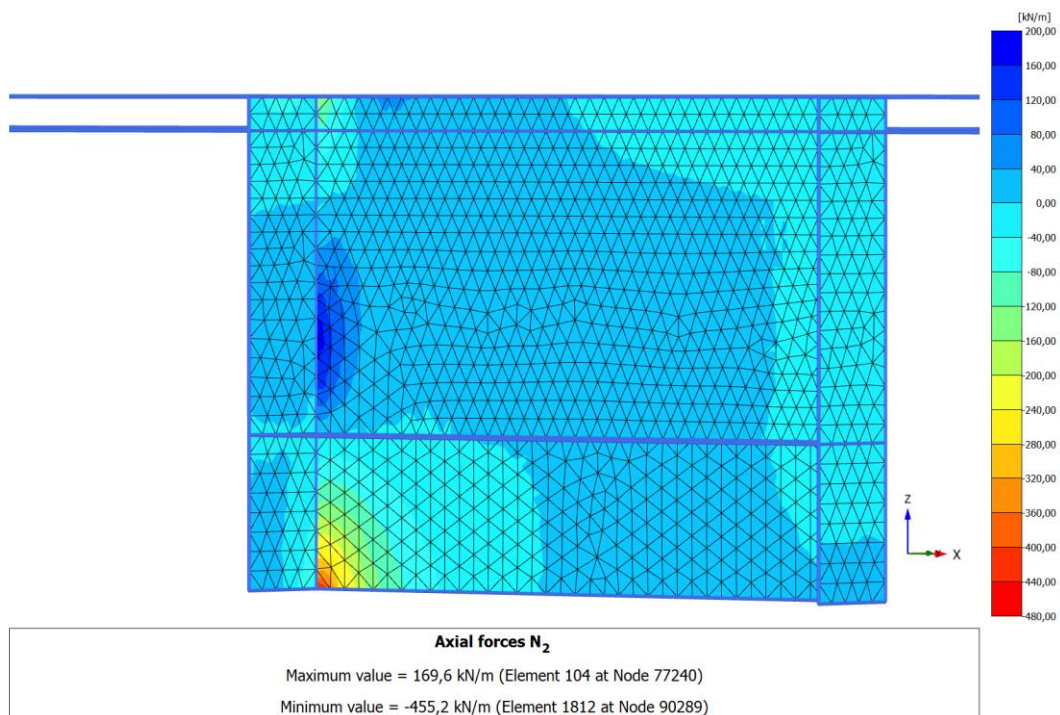
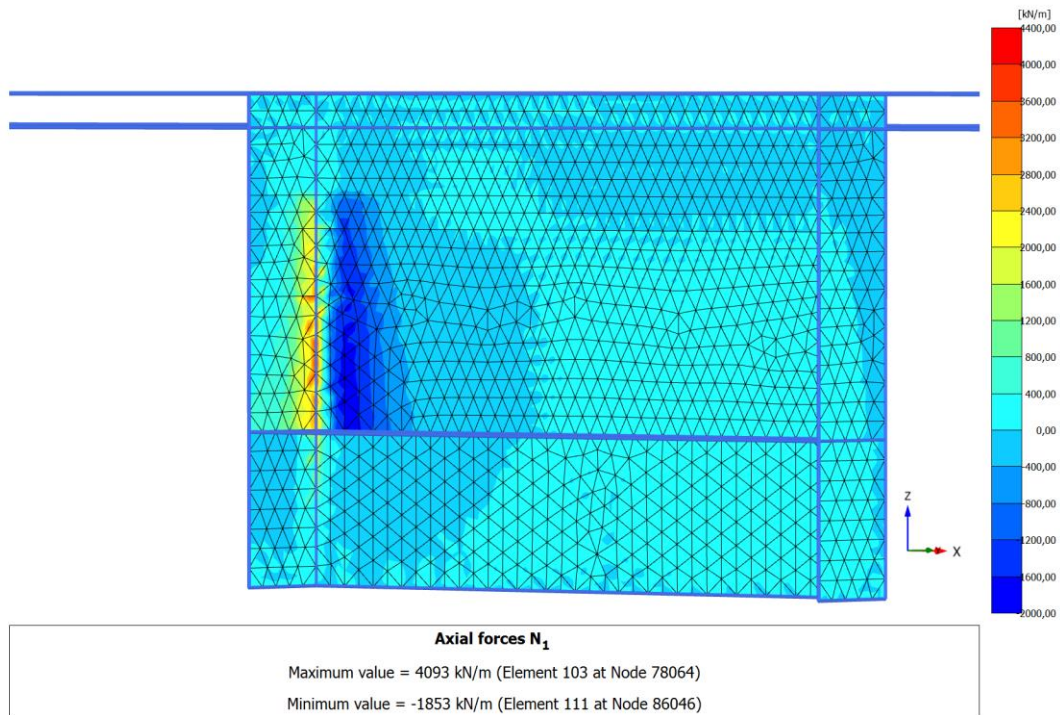


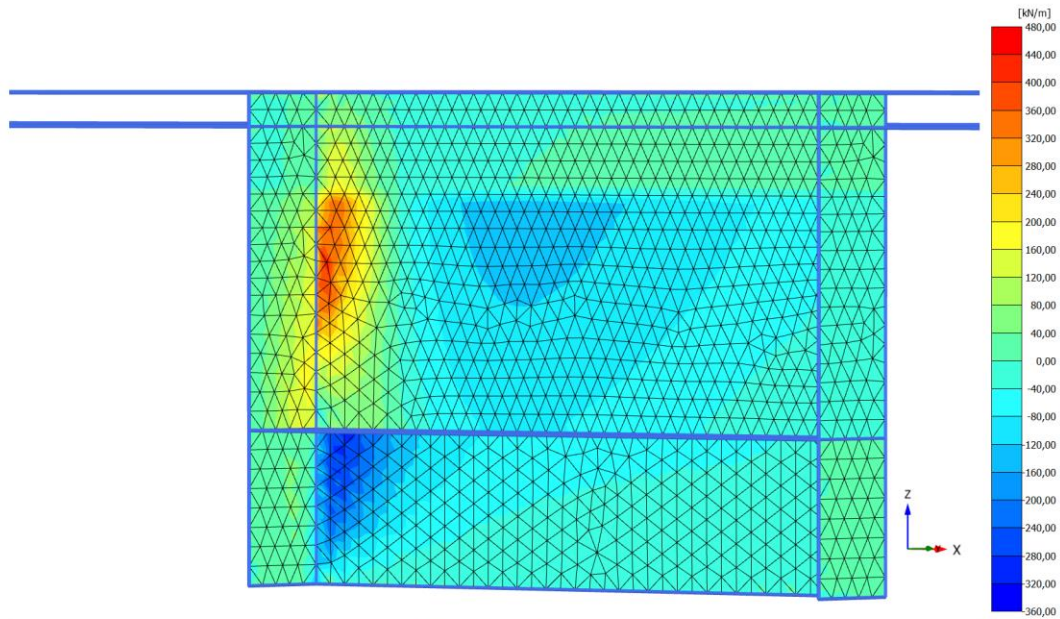
Bending moments M (scaled up $5,00 \cdot 10^{-3}$ times)
 Maximum value = 27,15 kN m/m (Element 17 at Node 38363)
 Minimum value = -871,0 kN m/m (Element 21 at Node 16441)

Structural element	Node	Local number	X [m]	Y [m]	N [kN]	N_{min} [kN]	N_{max} [kN]
NodeToNodeAnchor_1_1	16131	1	-5,500	-1,500	276,685	-56,786	277,301
Element 1-1 (Node-to-node anchor)	41009	2	5,500	-1,500	276,685	-56,786	277,301

A.1.2 Plaxis 3D

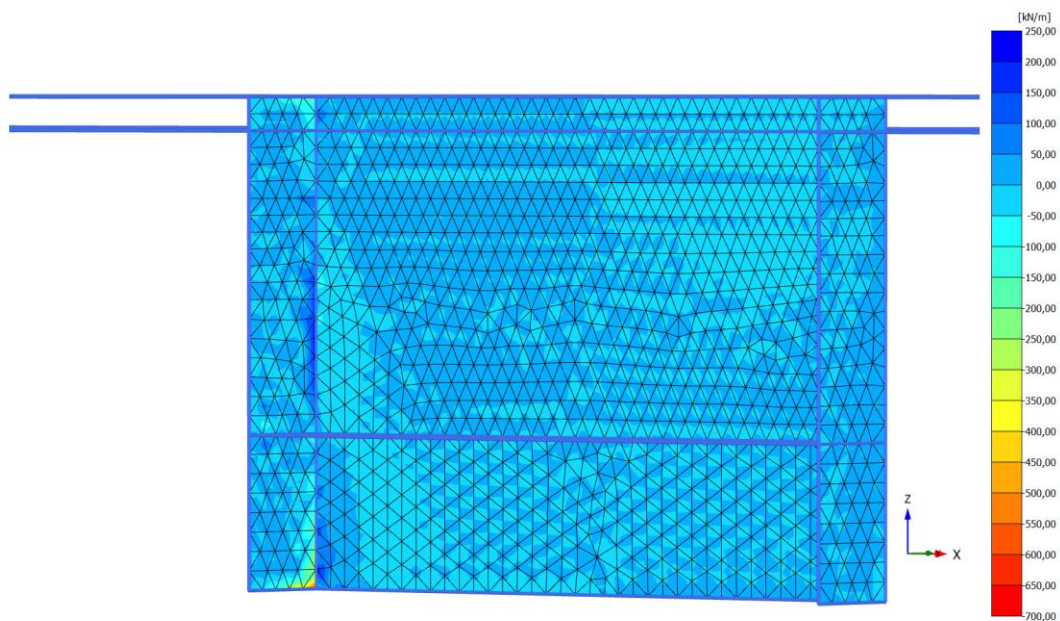
A.1.2.1 Drenert tilfelle i sand



**Shear forces Q_{12}**

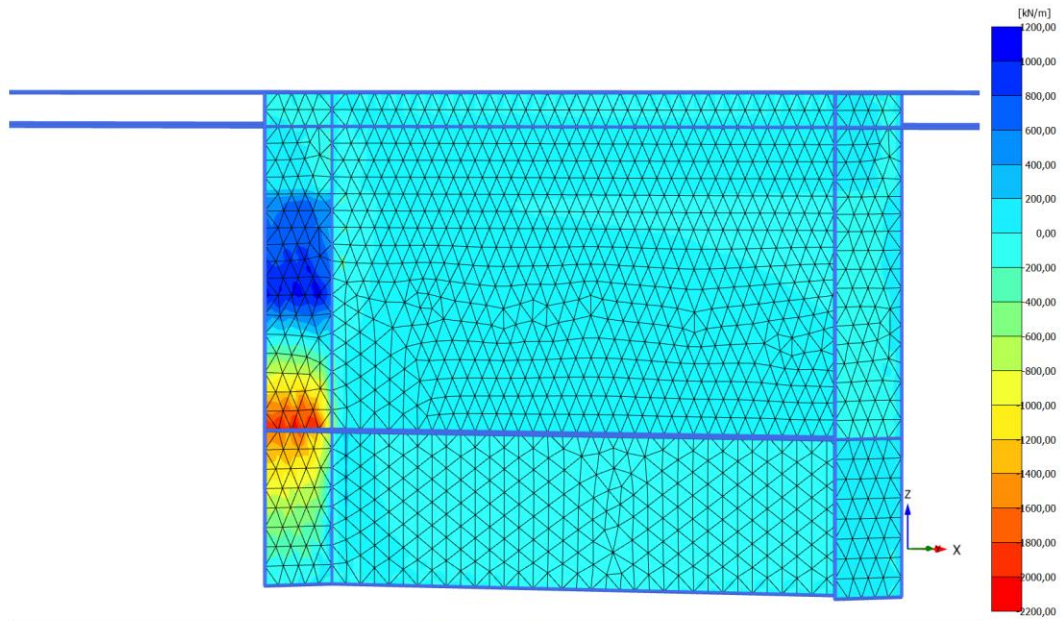
Maximum value = 442,8 kN/m (Element 932 at Node 75939)

Minimum value = -338,5 kN/m (Element 1925 at Node 78211)

**Shear forces Q_{23}**

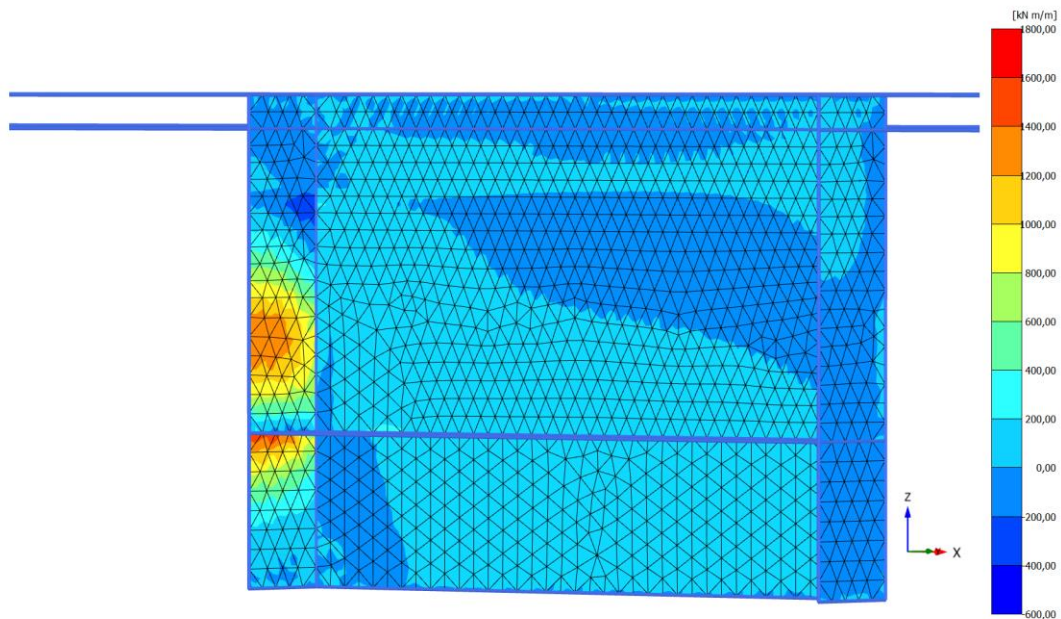
Maximum value = 212,2 kN/m (Element 1541 at Node 76319)

Minimum value = -653,4 kN/m (Element 1429 at Node 89752)

**Shear forces Q_{13}**

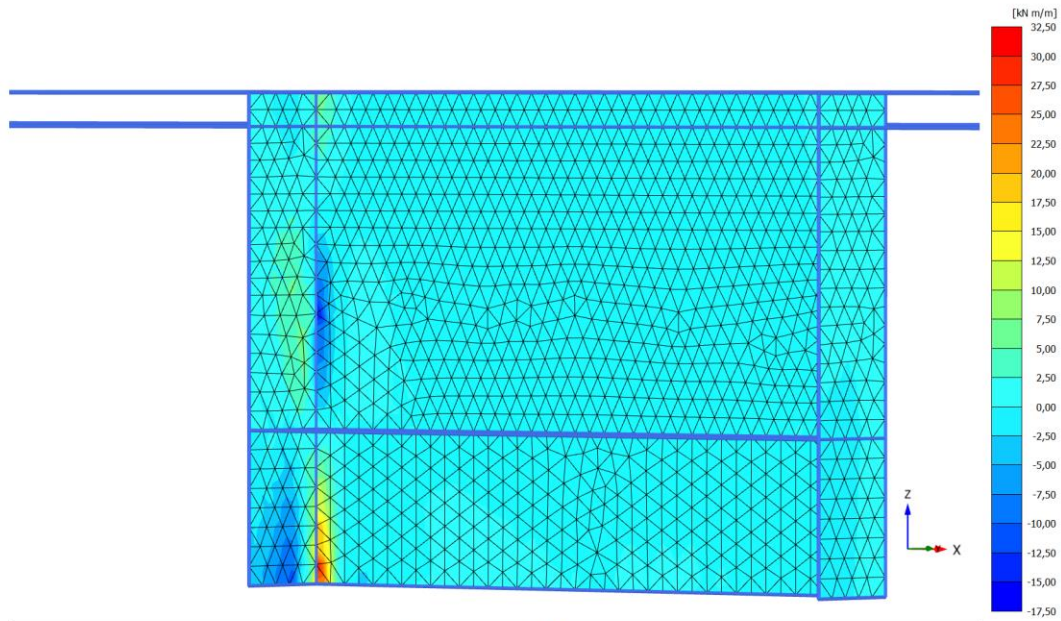
Maximum value = 1143 kN/m (Element 1054 at Node 84598)

Minimum value = -2140 kN/m (Element 1499 at Node 96916)

**Bending moments M_{11}**

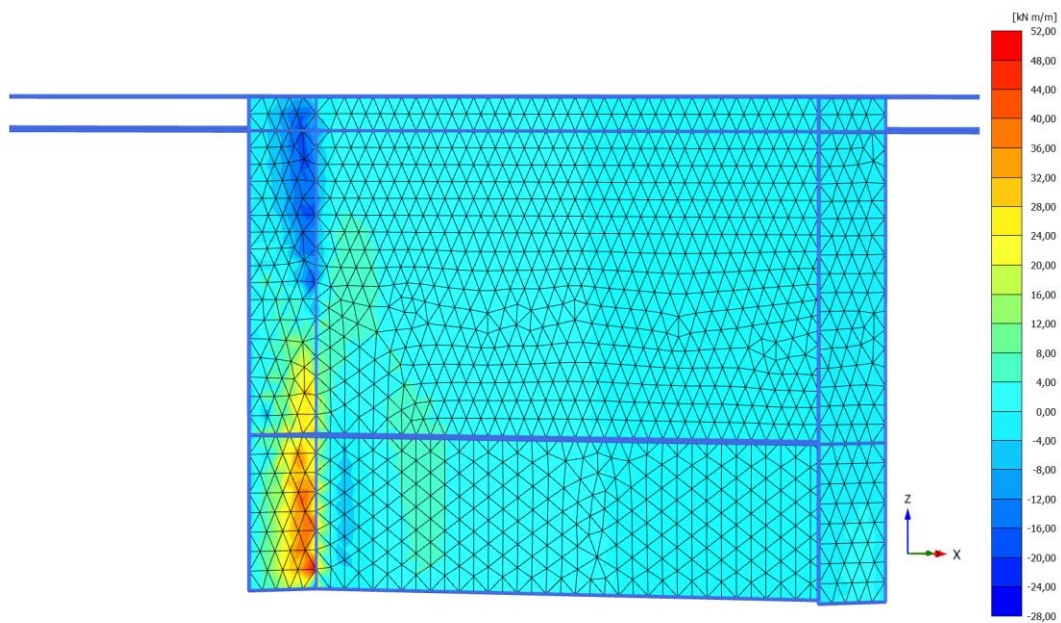
Maximum value = 1666 kN m/m (Element 1427 at Node 108206)

Minimum value = -404,6 kN m/m (Element 1716 at Node 75040)

**Bending moments M_{22}**

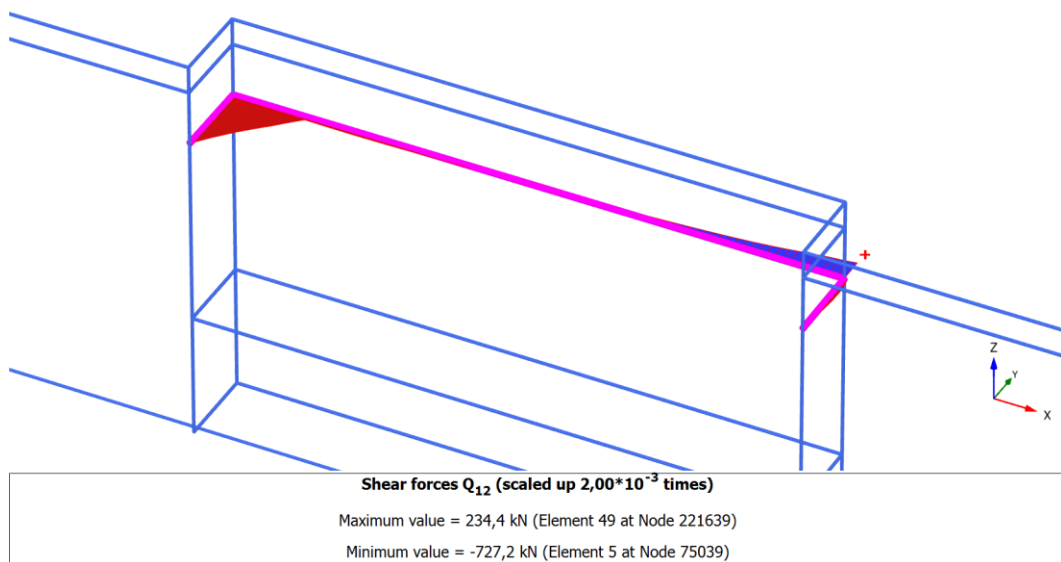
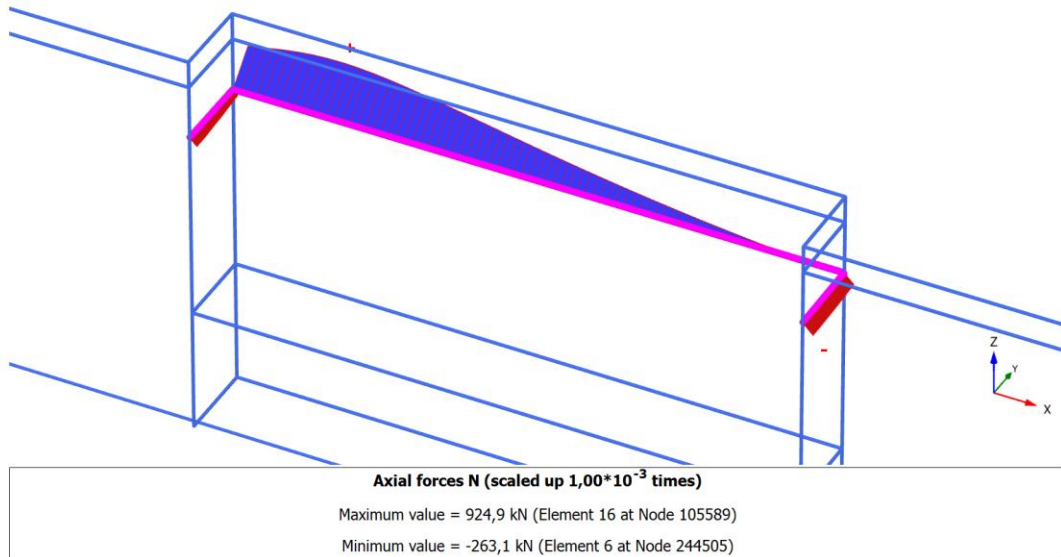
Maximum value = 31,42 kN m/m (Element 1773 at Node 89764)

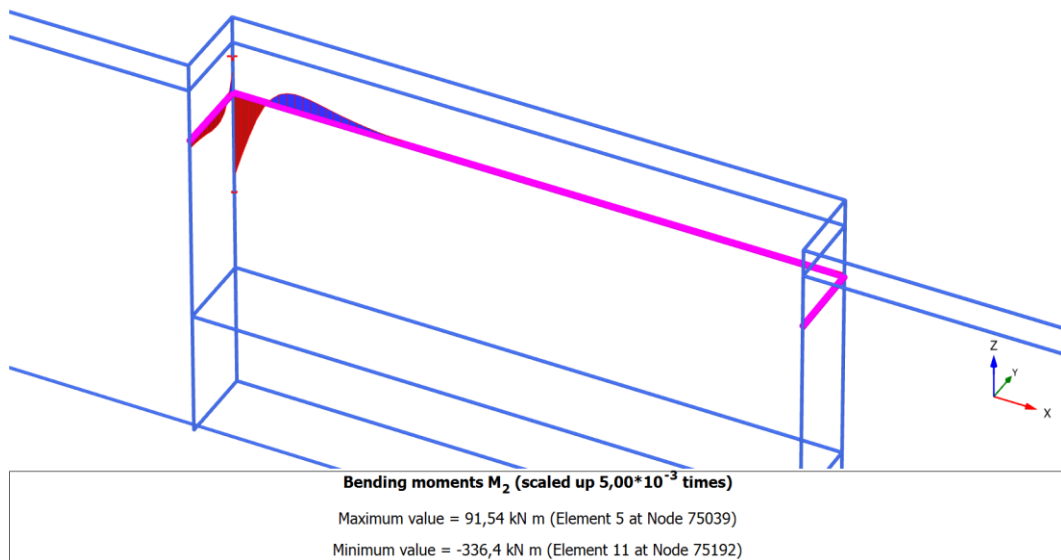
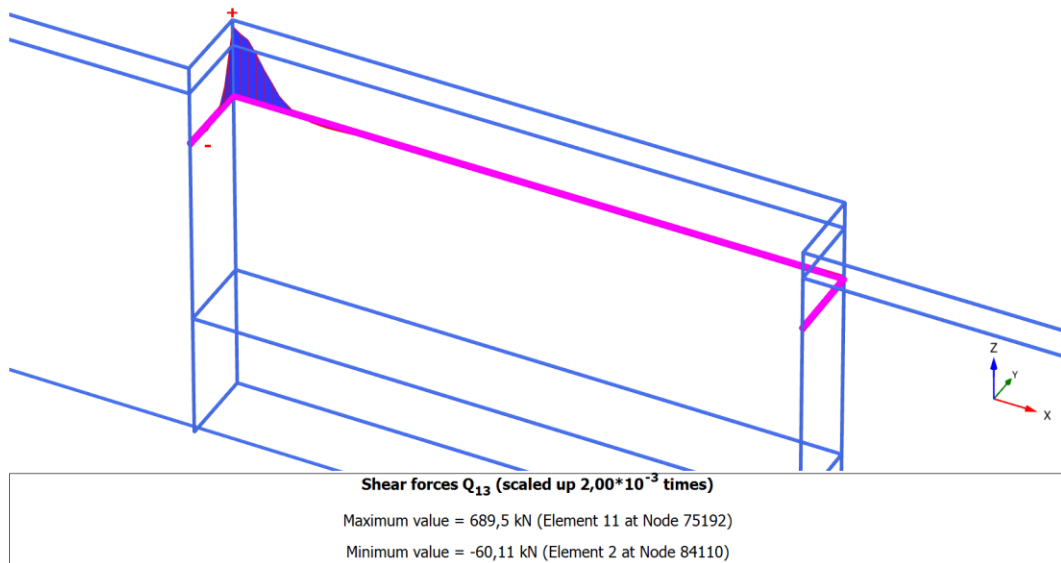
Minimum value = -16,92 kN m/m (Element 105 at Node 76892)

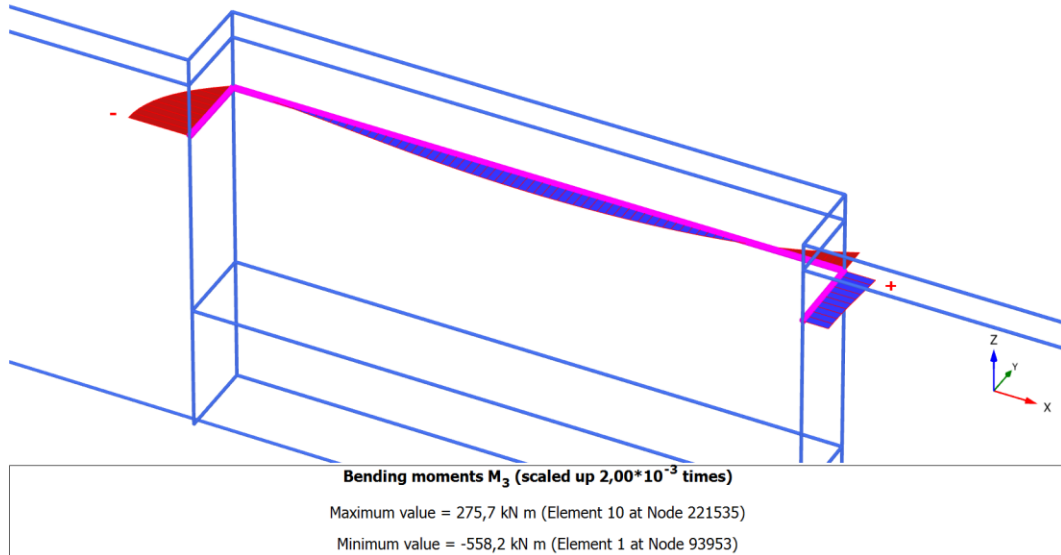
**Torsion moments M_{12}**

Maximum value = 49,81 kN m/m (Element 1419 at Node 89276)

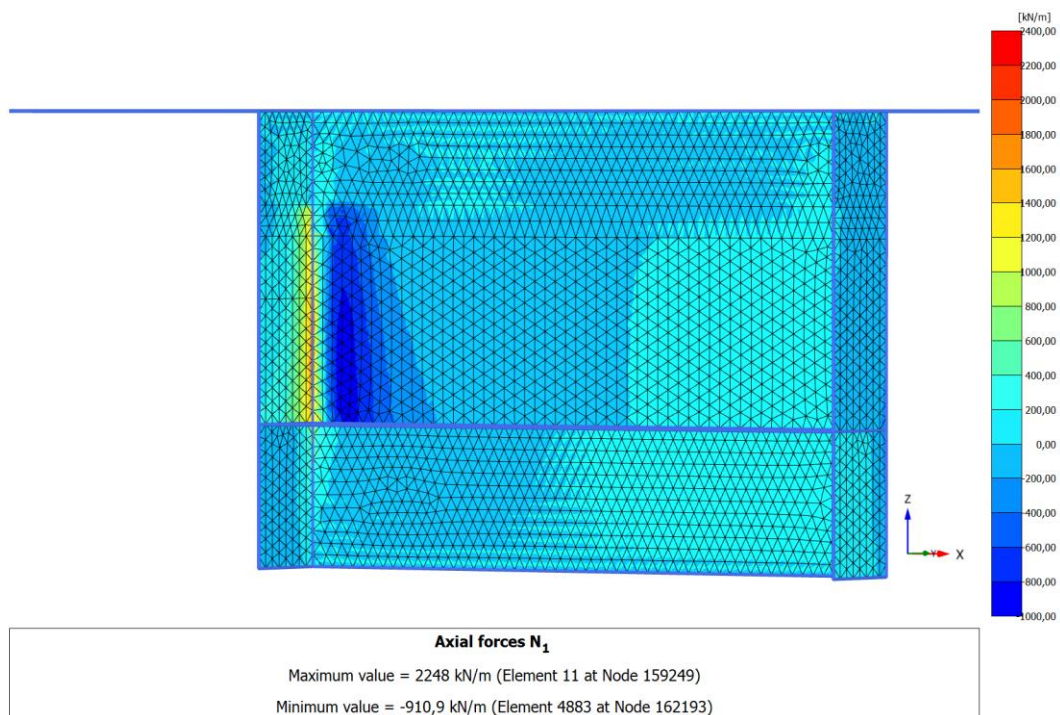
Minimum value = -27,23 kN m/m (Element 1429 at Node 89752)

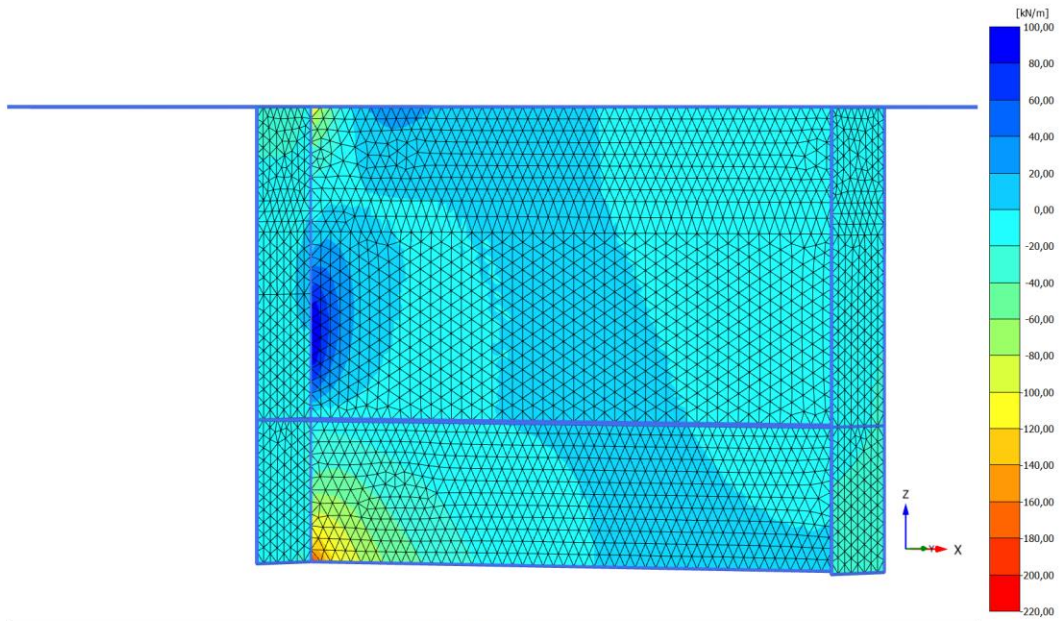






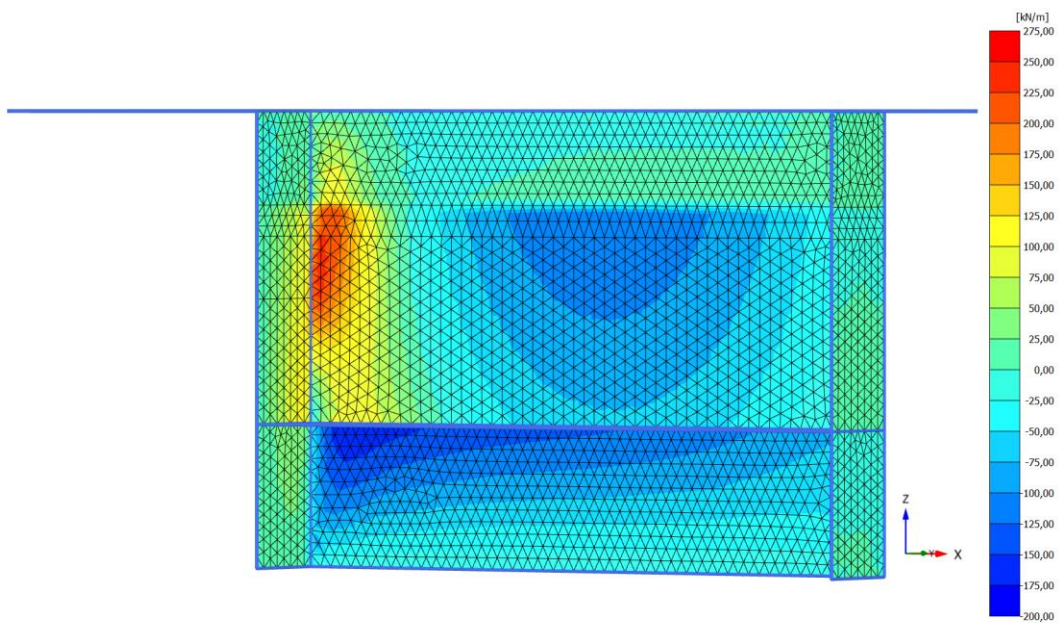
A.1.2.2 Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden



**Axial forces N_2**

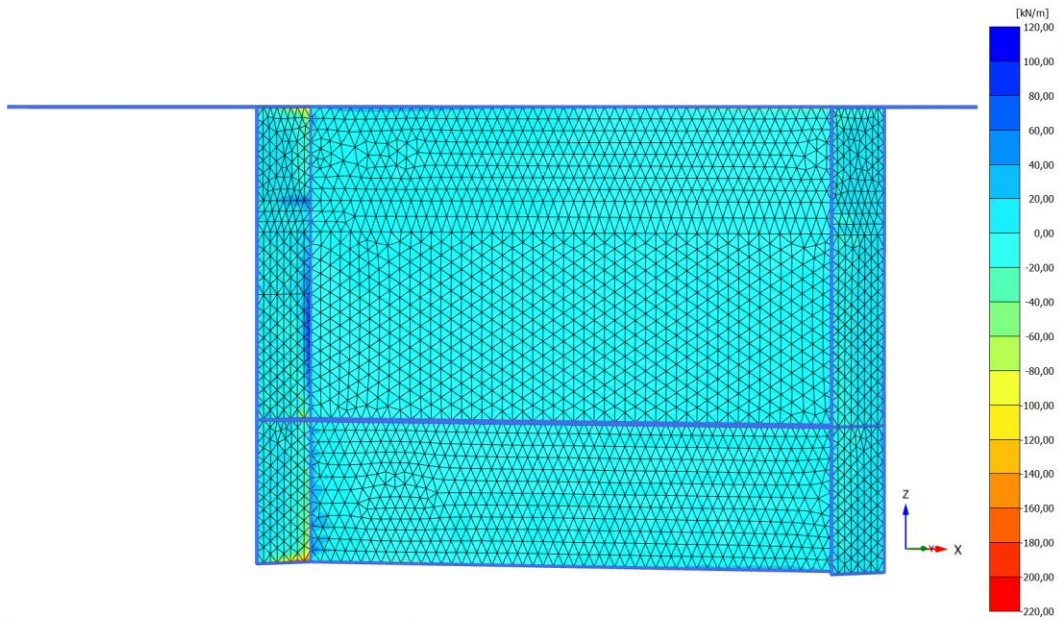
Maximum value = 97,44 kN/m (Element 4567 at Node 159253)

Minimum value = -202,6 kN/m (Element 2602 at Node 147614)

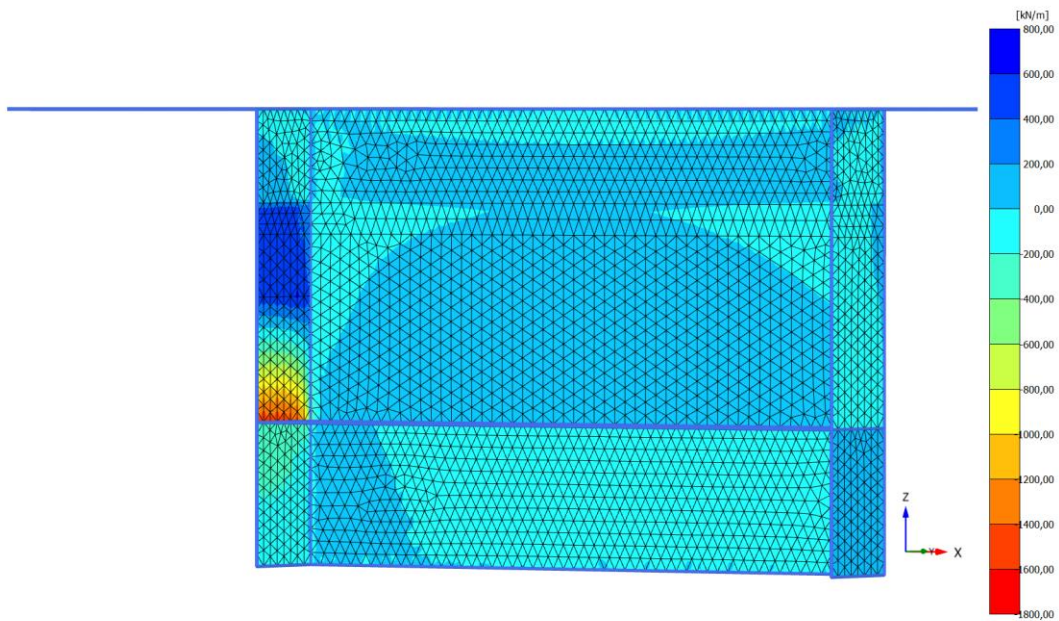
**Shear forces Q_{12}**

Maximum value = 251,8 kN/m (Element 4603 at Node 138257)

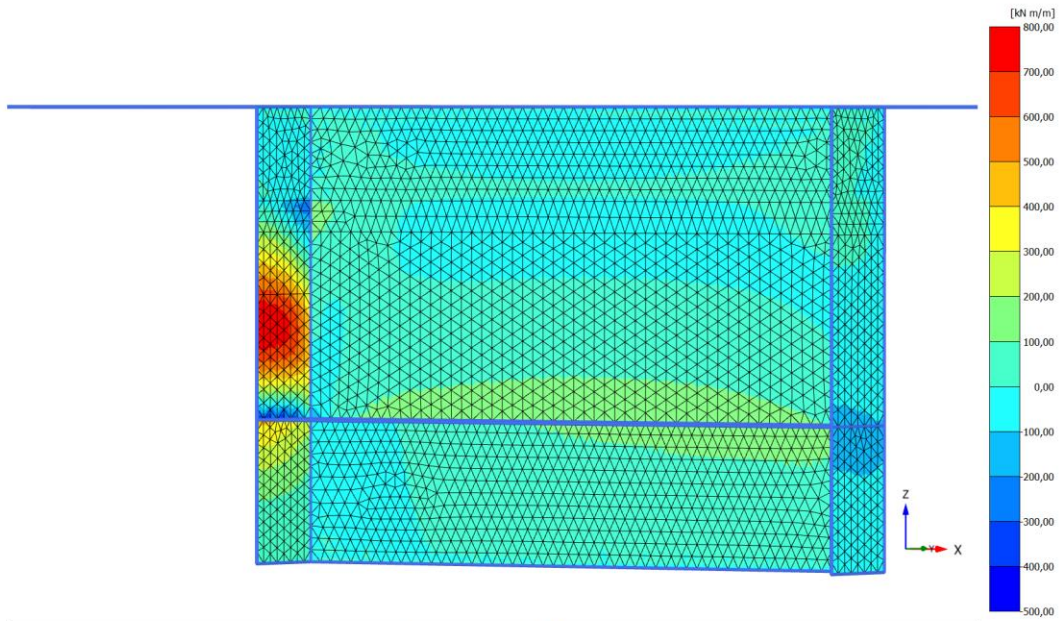
Minimum value = -179,4 kN/m (Element 1415 at Node 187037)

**Shear forces Q_{23}**

Maximum value = 113,6 kN/m (Element 10 at Node 158859)
Minimum value = -205,1 kN/m (Element 1407 at Node 167900)

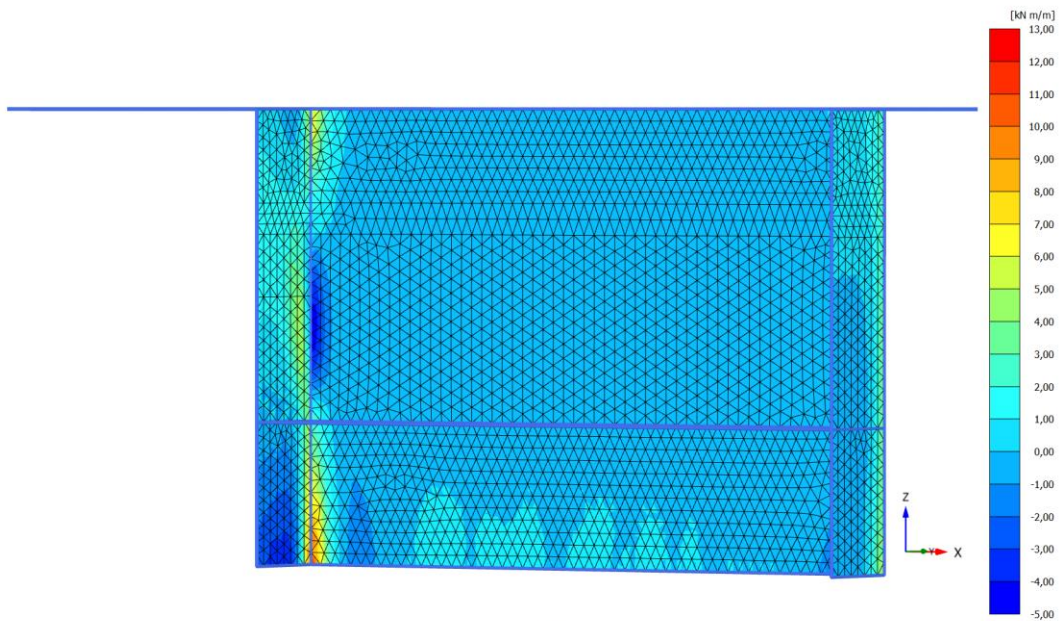
**Shear forces Q_{13}**

Maximum value = 648,8 kN/m (Element 4302 at Node 157843)
Minimum value = -1710 kN/m (Element 71 at Node 229503)

**Bending moments M_{11}**

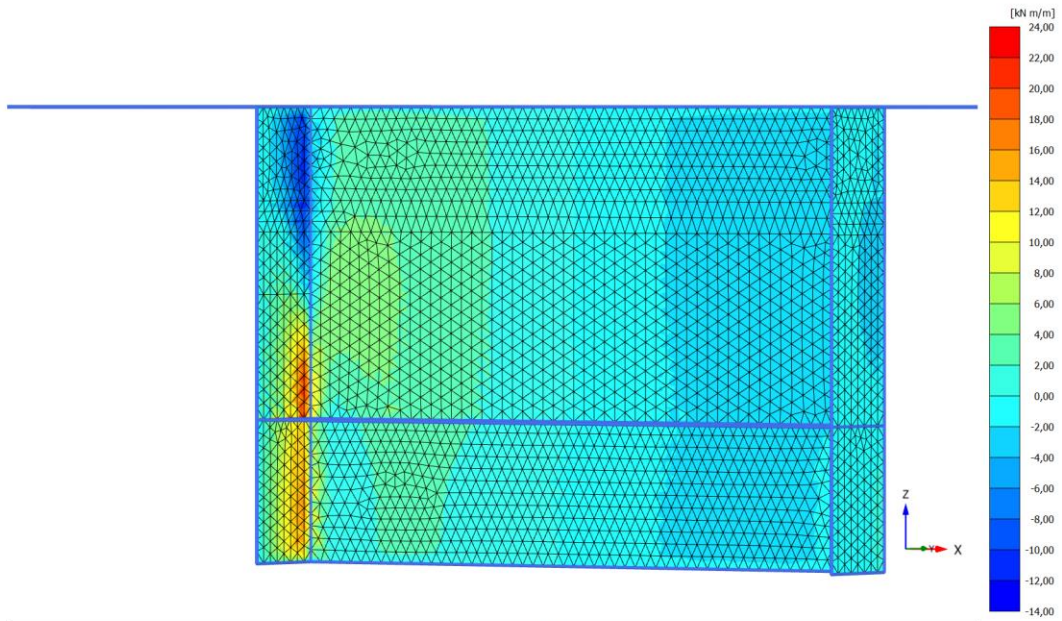
Maximum value = 787,9 kN m/m (Element 7 at Node 202696)

Minimum value = -431,1 kN m/m (Element 71 at Node 229505)

**Bending moments M_{22}**

Maximum value = 12,53 kN m/m (Element 2602 at Node 147614)

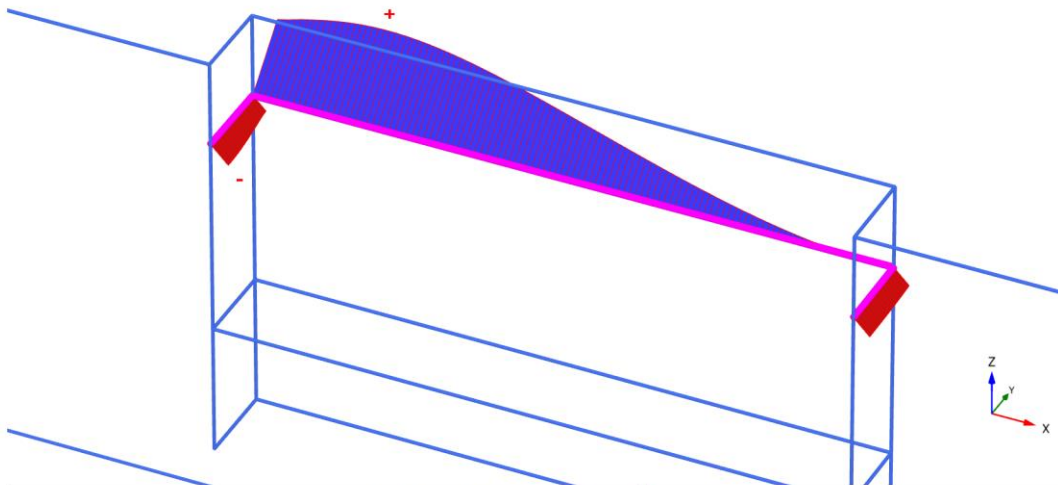
Minimum value = -4,772 kN m/m (Element 4568 at Node 158871)



Torsion moments M_{12}

Maximum value = 23,85 kN m/m (Element 152 at Node 183331)

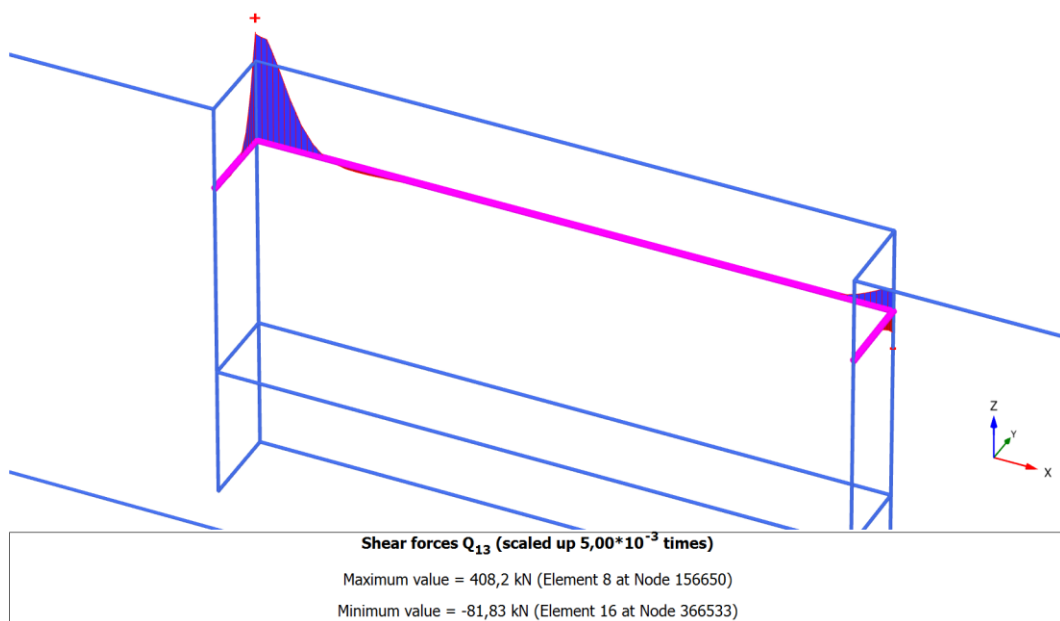
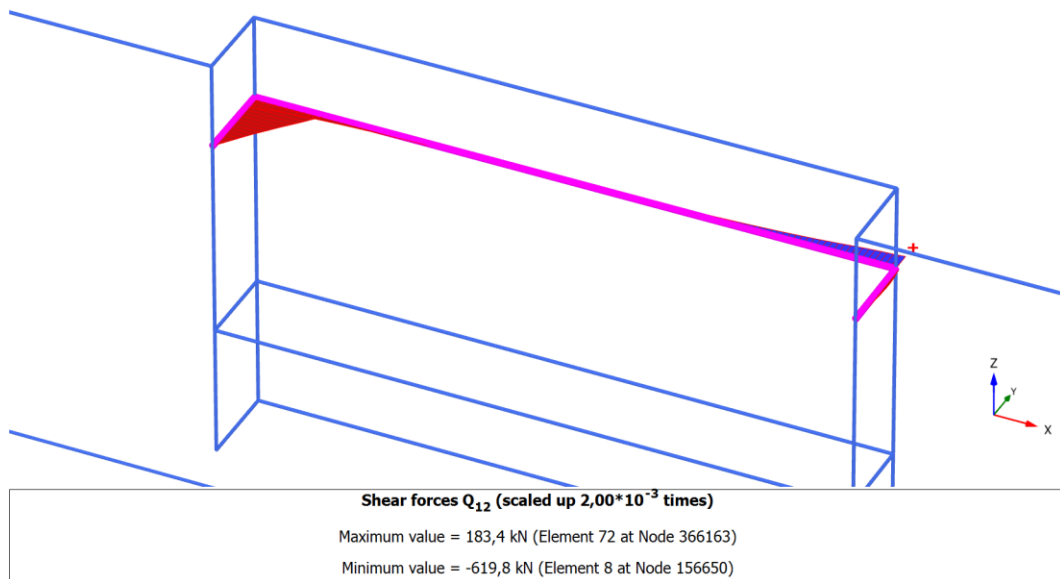
Minimum value = -12,17 kN m/m (Element 4080 at Node 156456)

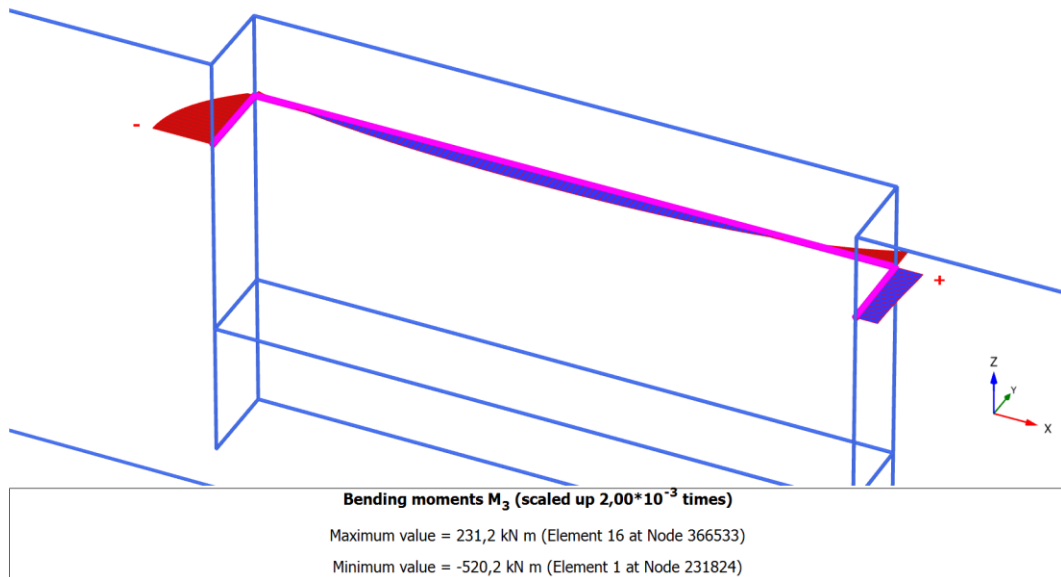
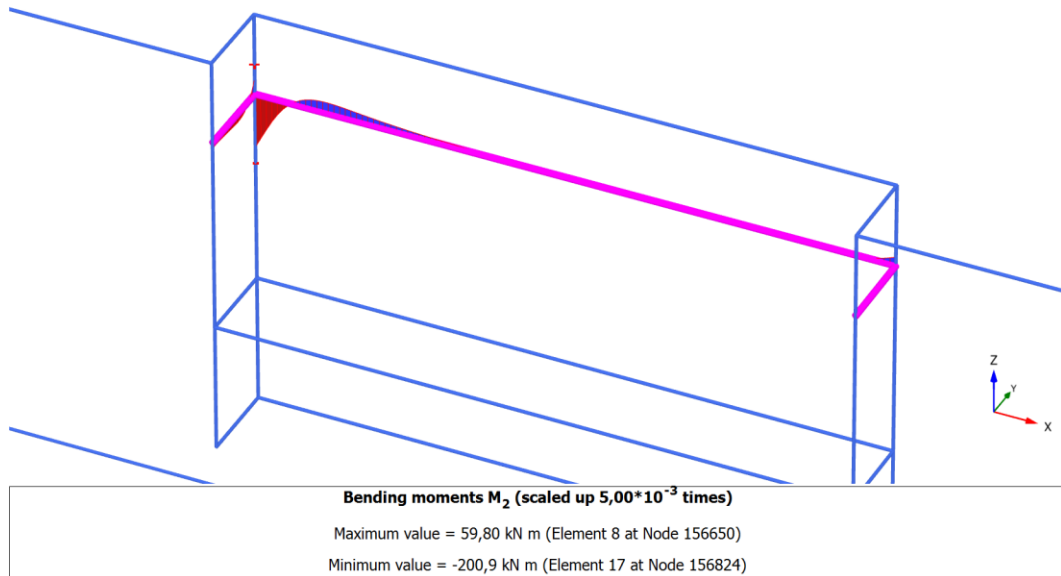


Axial forces N (scaled up $2,00 \cdot 10^{-3}$ times)

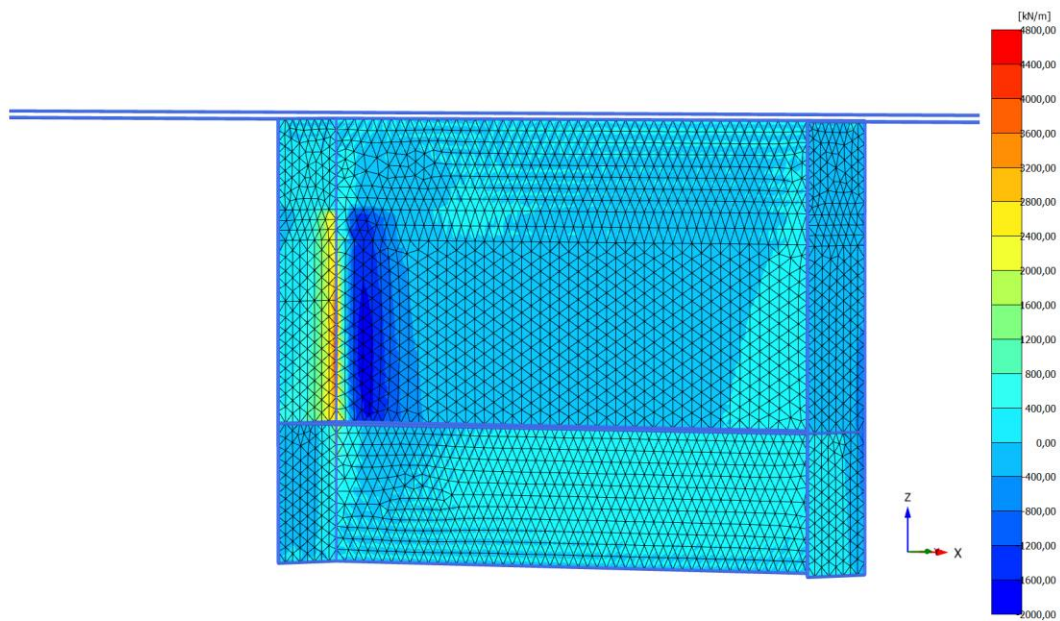
Maximum value = 766,9 kN (Element 25 at Node 180430)

Minimum value = -217,1 kN (Element 1 at Node 231824)





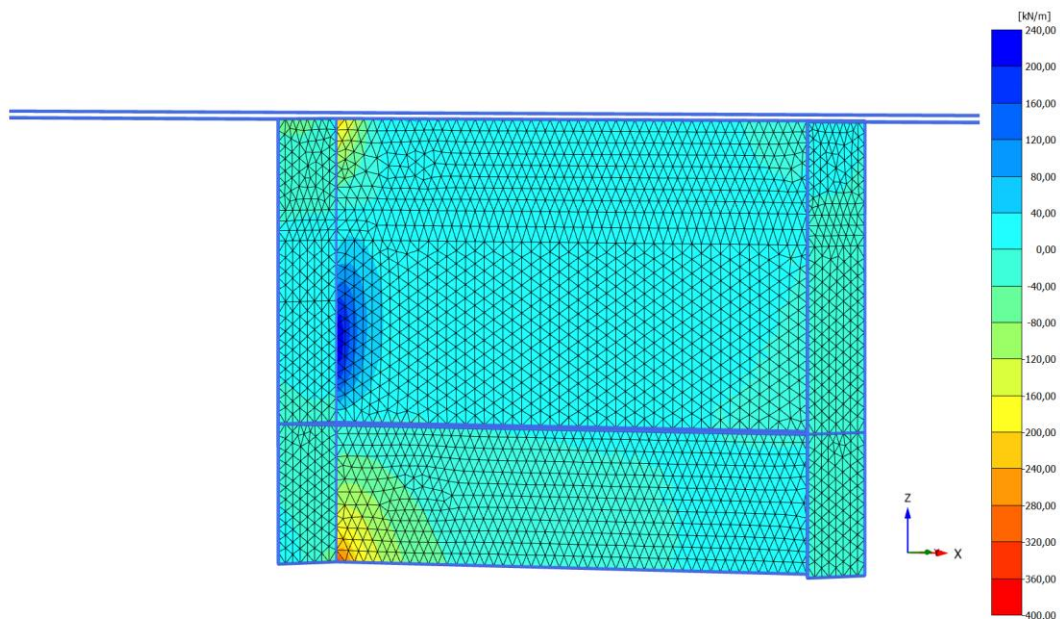
A.1.2.3 Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden



Axial forces N_1

Maximum value = 4750 kN/m (Element 11 at Node 159249)

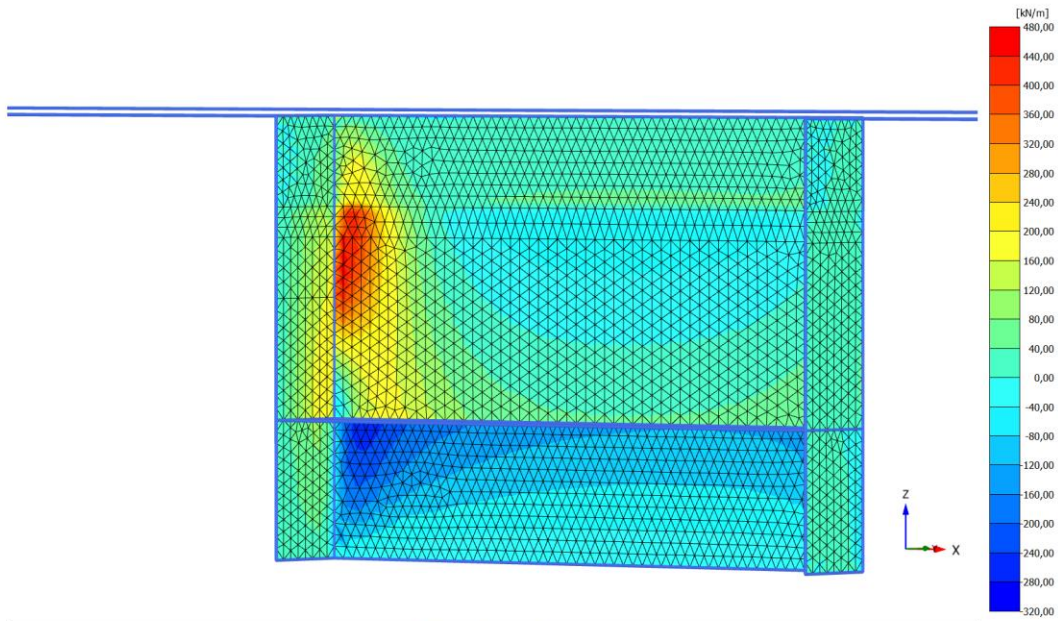
Minimum value = -1751 kN/m (Element 4632 at Node 180952)



Axial forces N_2

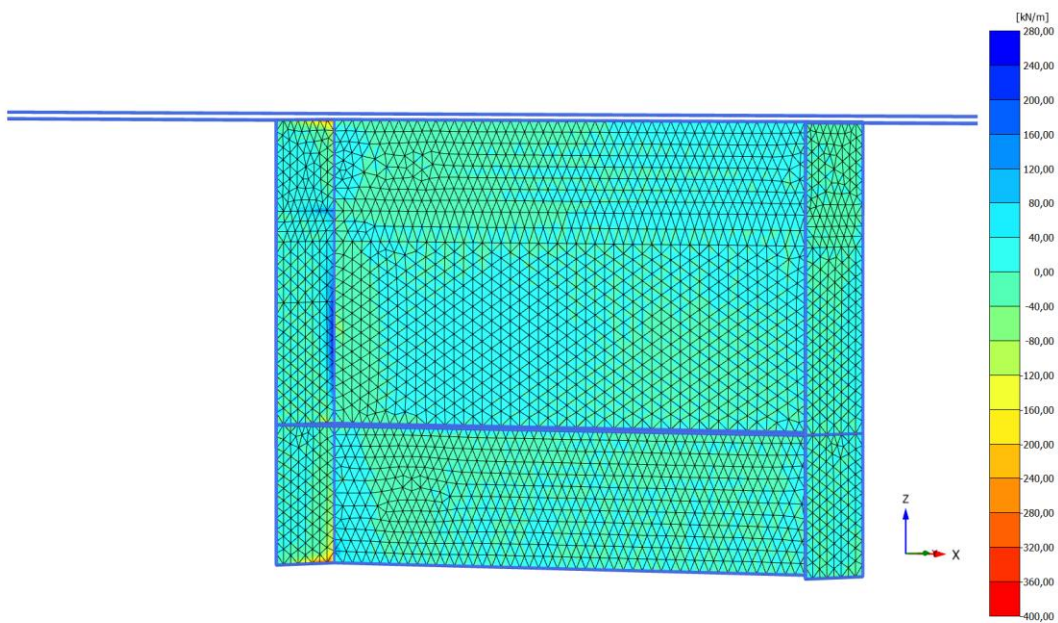
Maximum value = 221,5 kN/m (Element 4567 at Node 159253)

Minimum value = -360,3 kN/m (Element 2602 at Node 147614)

**Shear forces Q_{12}**

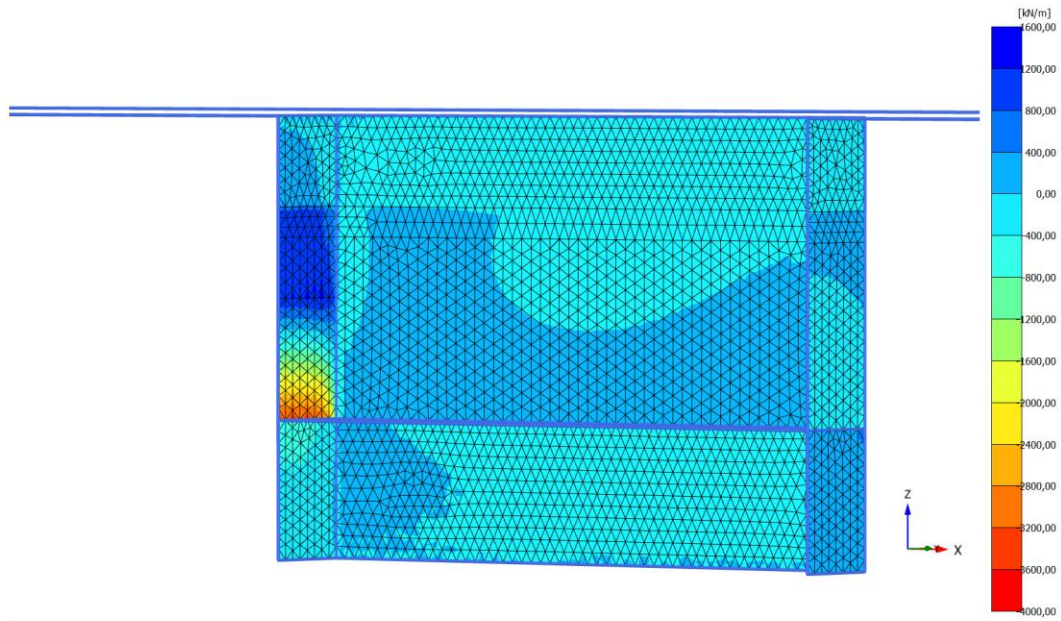
Maximum value = 471,2 kN/m (Element 4603 at Node 138257)

Minimum value = -284,2 kN/m (Element 1414 at Node 186368)

**Shear forces Q_{23}**

Maximum value = 275,9 kN/m (Element 9 at Node 158857)

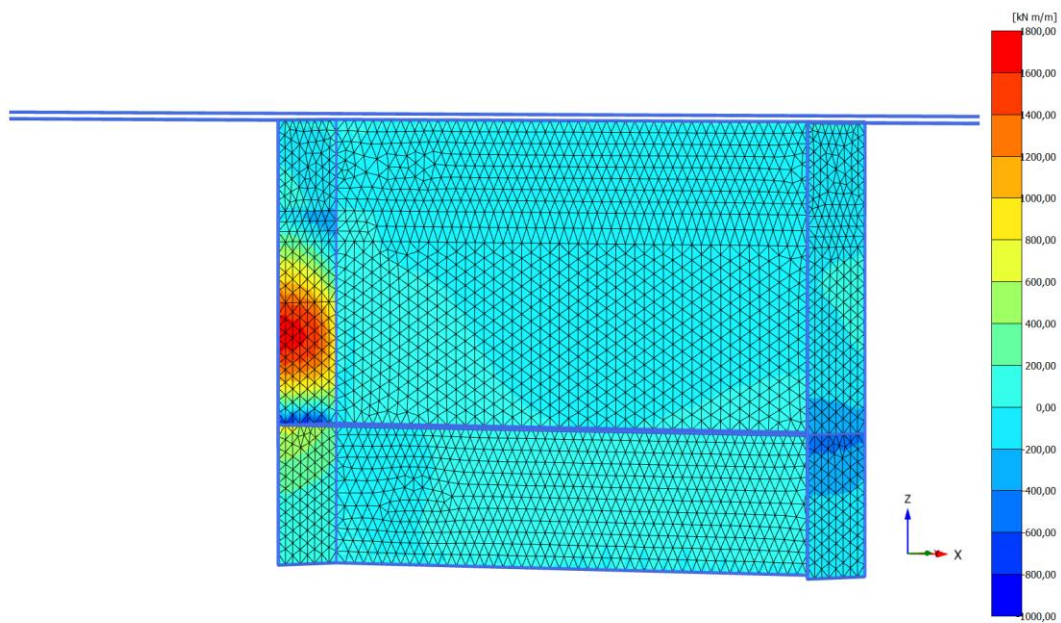
Minimum value = -361,6 kN/m (Element 1407 at Node 167900)



Shear forces Q_{13}

Maximum value = 1357 kN/m (Element 4302 at Node 157843)

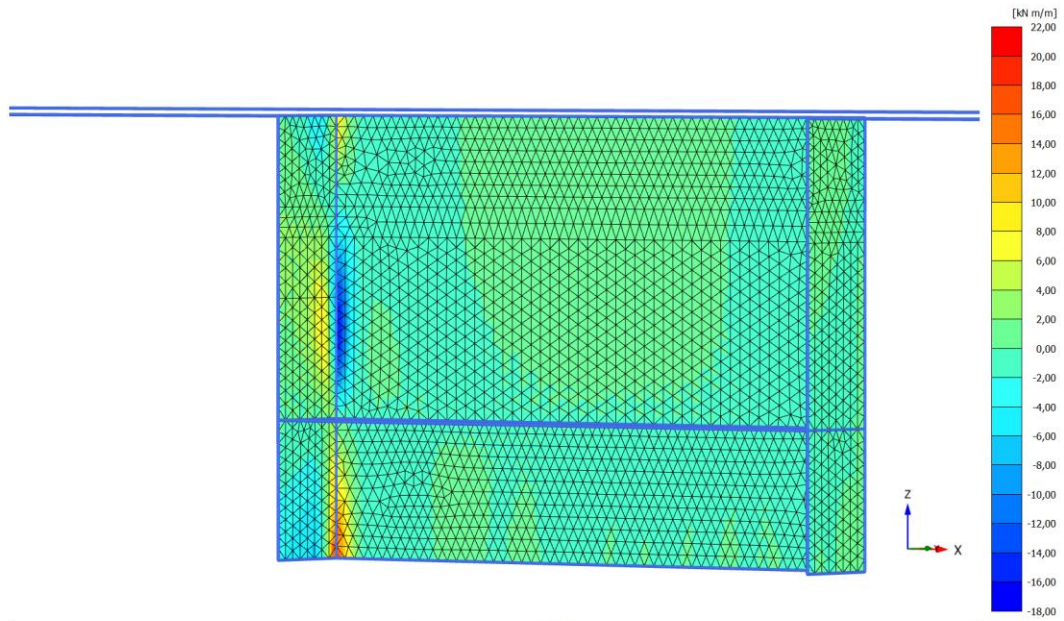
Minimum value = -3729 kN/m (Element 71 at Node 229503)



Bending moments M_{11}

Maximum value = 1711 kN m/m (Element 7 at Node 202697)

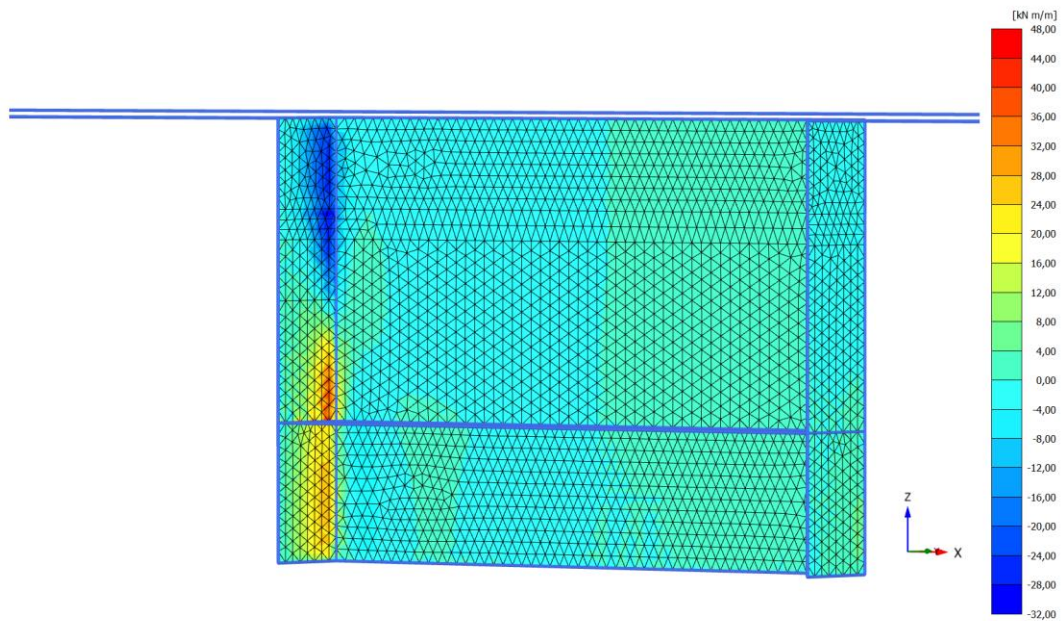
Minimum value = -920,6 kN m/m (Element 150 at Node 203943)



Bending moments M_{22}

Maximum value = 20,60 kN m/m (Element 2602 at Node 147614)

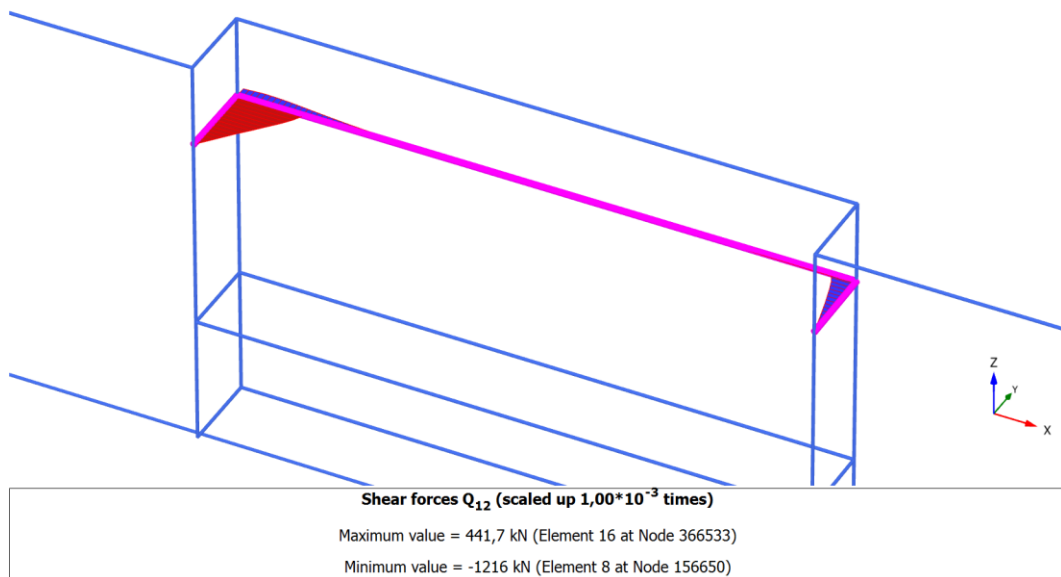
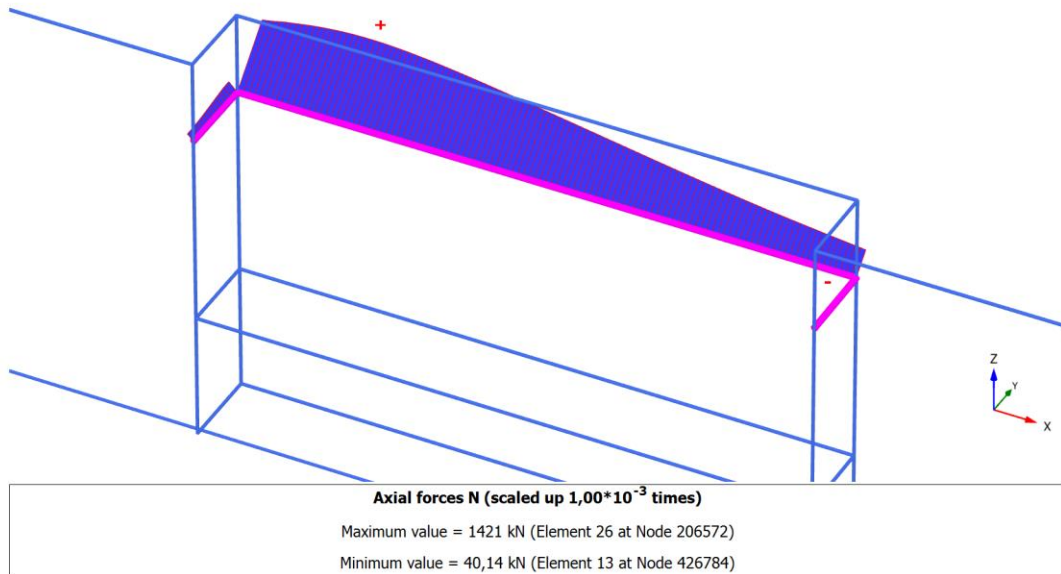
Minimum value = -16,04 kN m/m (Element 4568 at Node 158871)

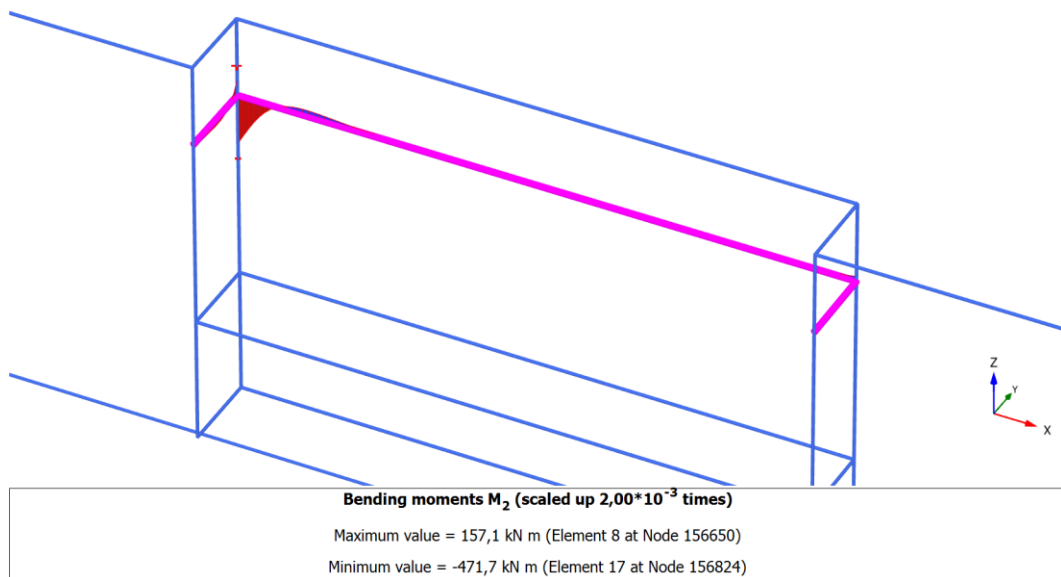
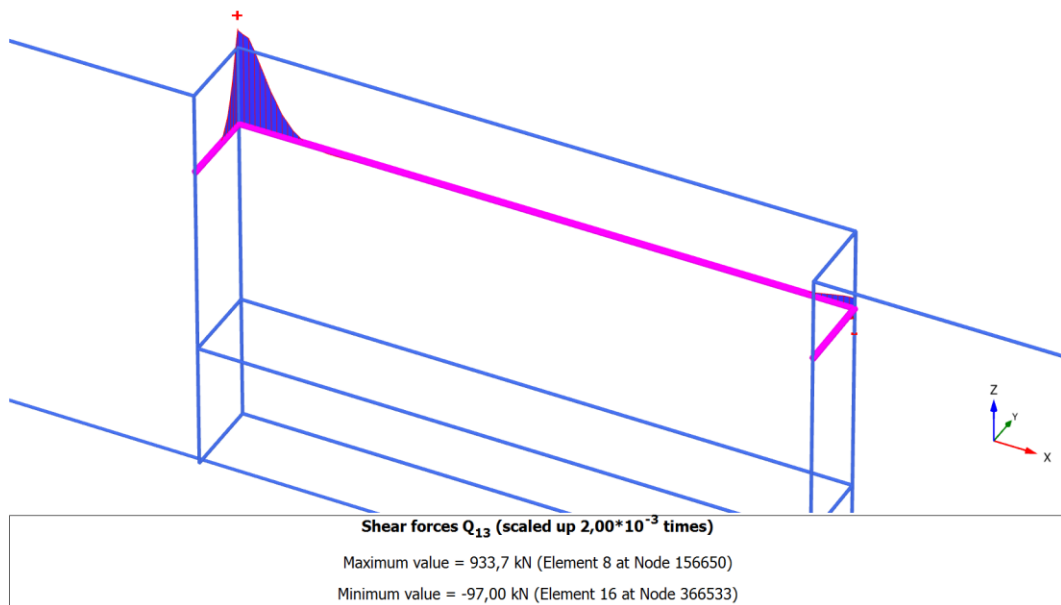


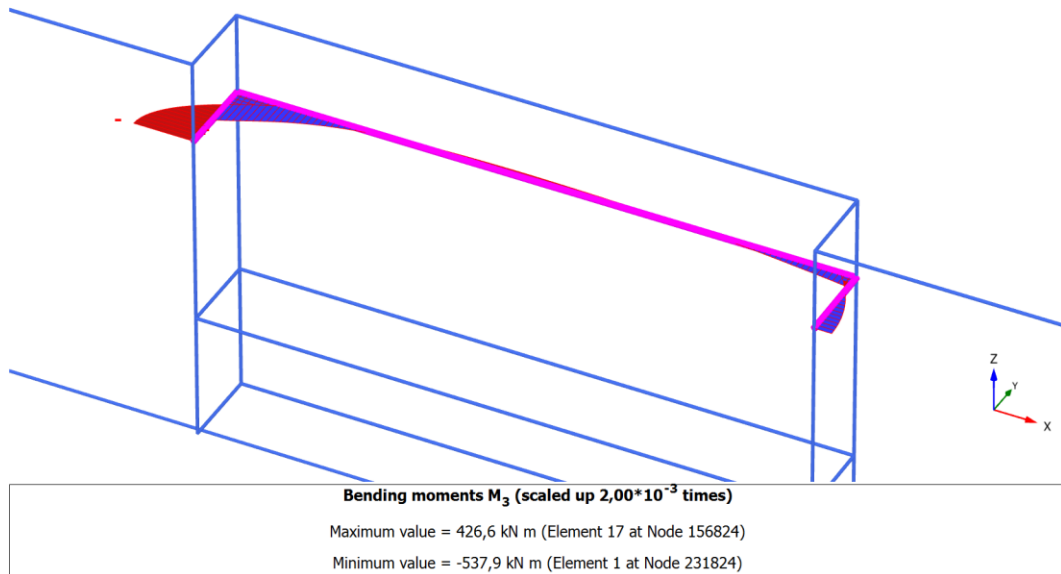
Torsion moments M_{12}

Maximum value = 47,38 kN m/m (Element 152 at Node 183331)

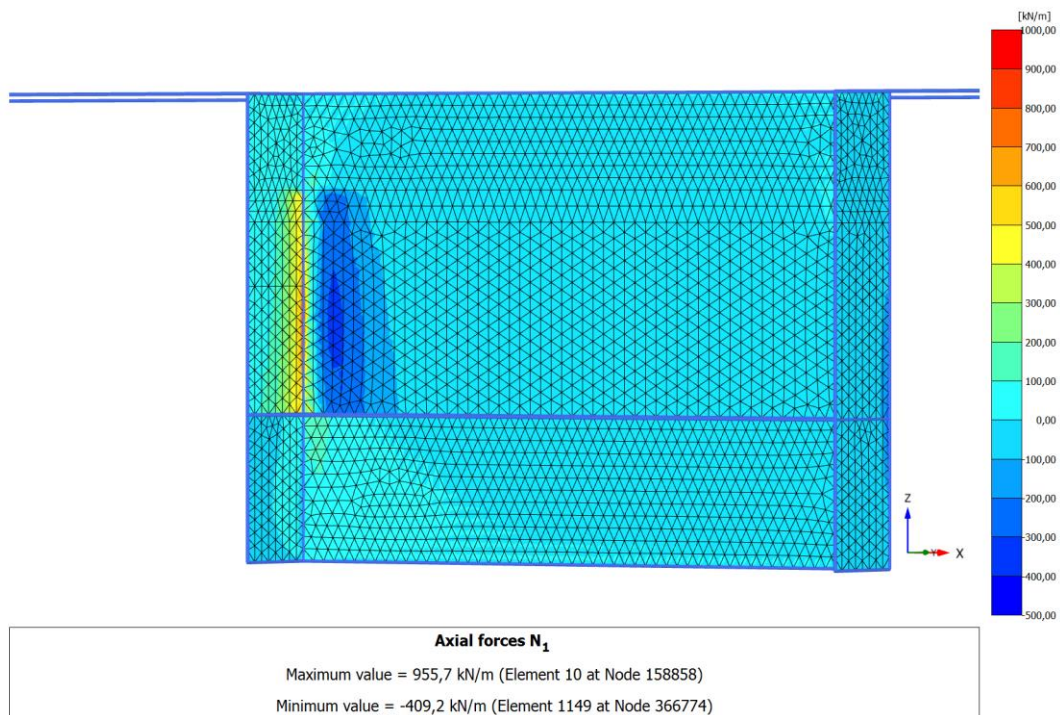
Minimum value = -31,87 kN m/m (Element 4080 at Node 156456)

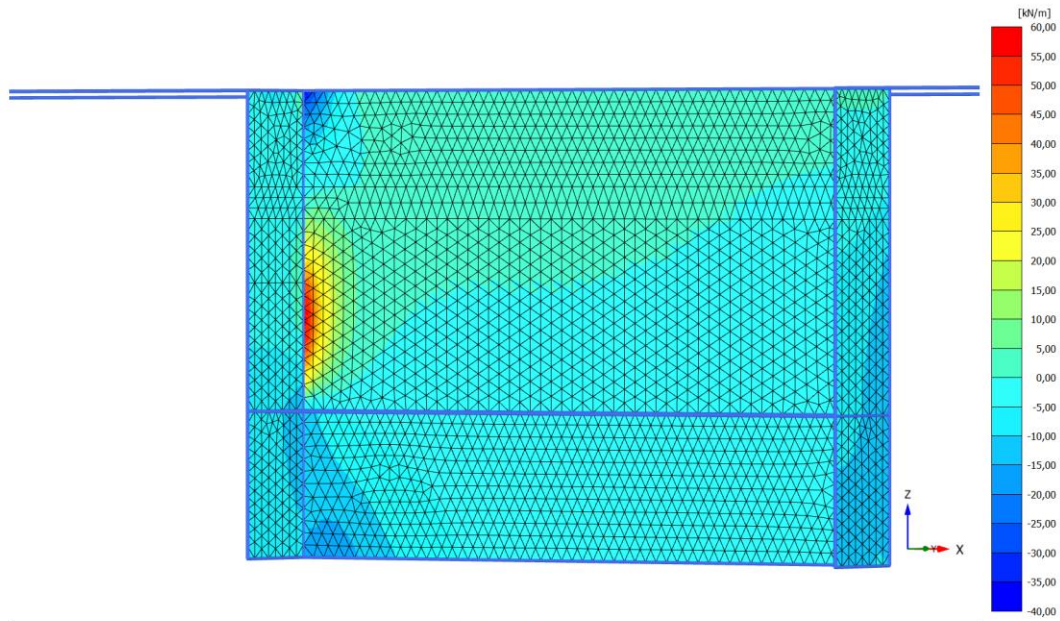






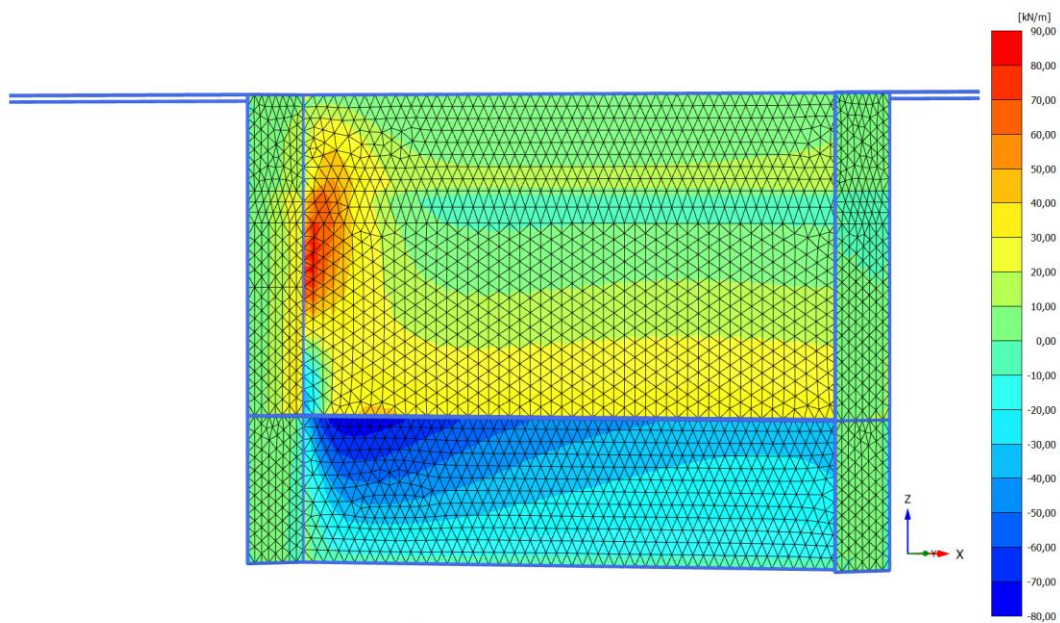
A.1.2.3 Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden pålastet til 771 kPa



**Axial forces N_2**

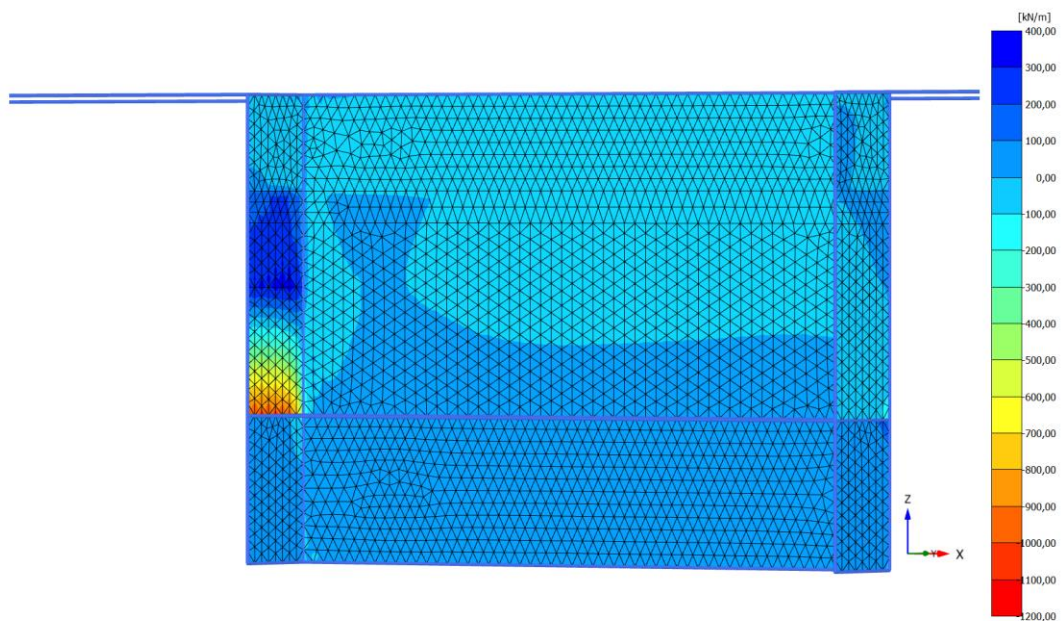
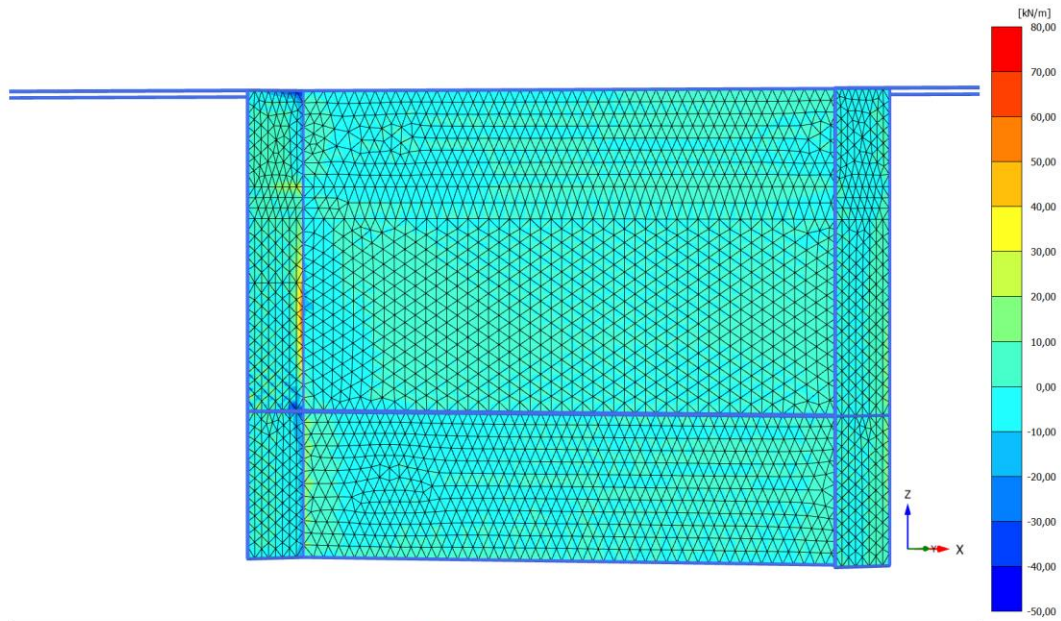
Maximum value = 56,19 kN/m (Element 4567 at Node 159253)

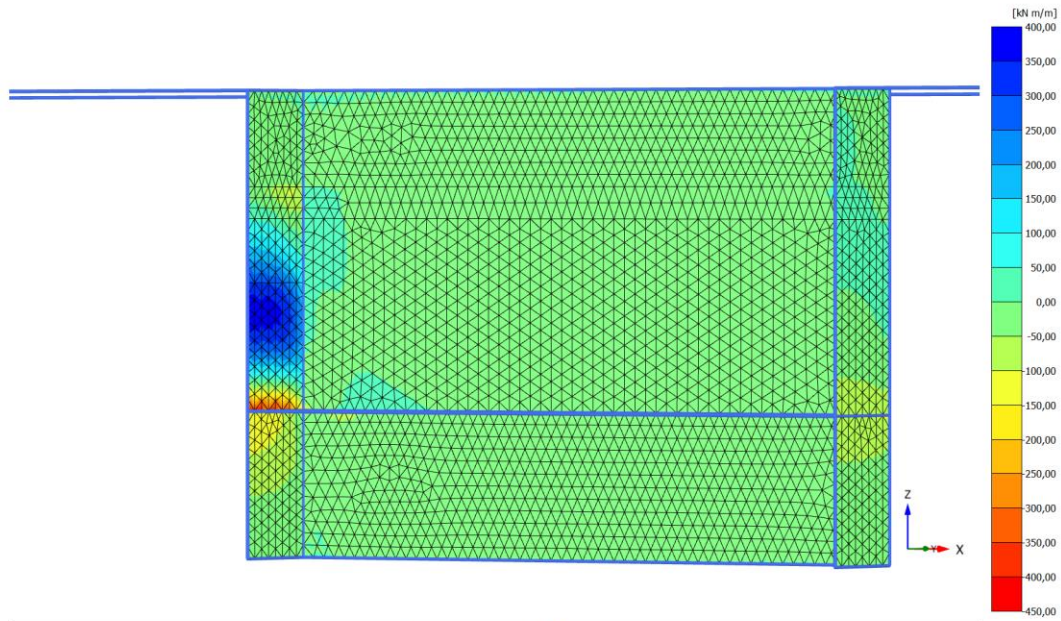
Minimum value = -37,41 kN/m (Element 3829 at Node 178764)

**Shear forces Q_{12}**

Maximum value = 84,06 kN/m (Element 4587 at Node 157865)

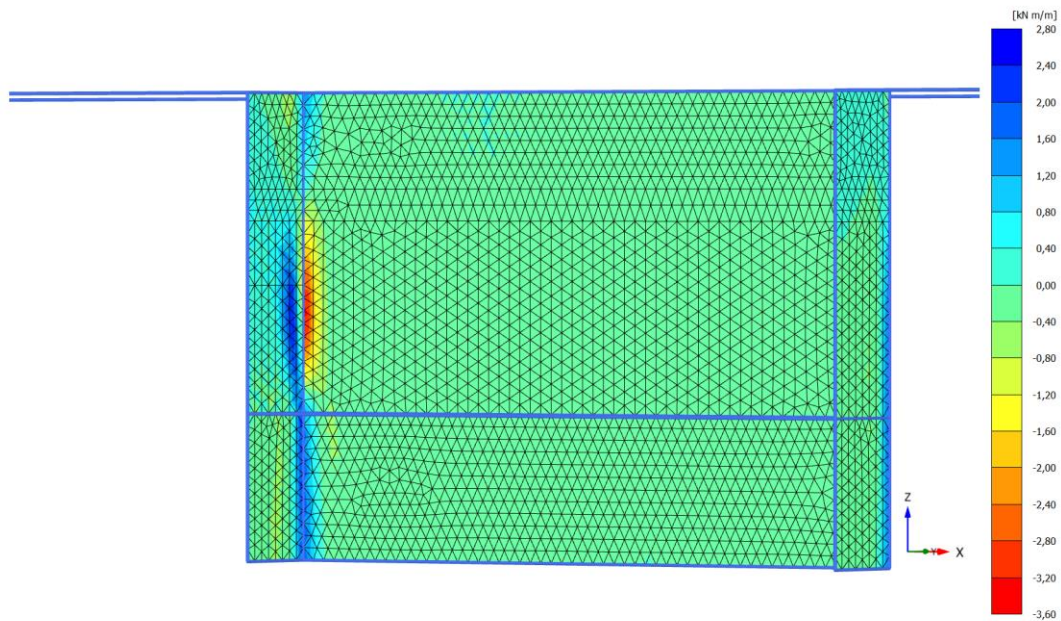
Minimum value = -77,90 kN/m (Element 1416 at Node 187666)



**Bending moments M_{11}**

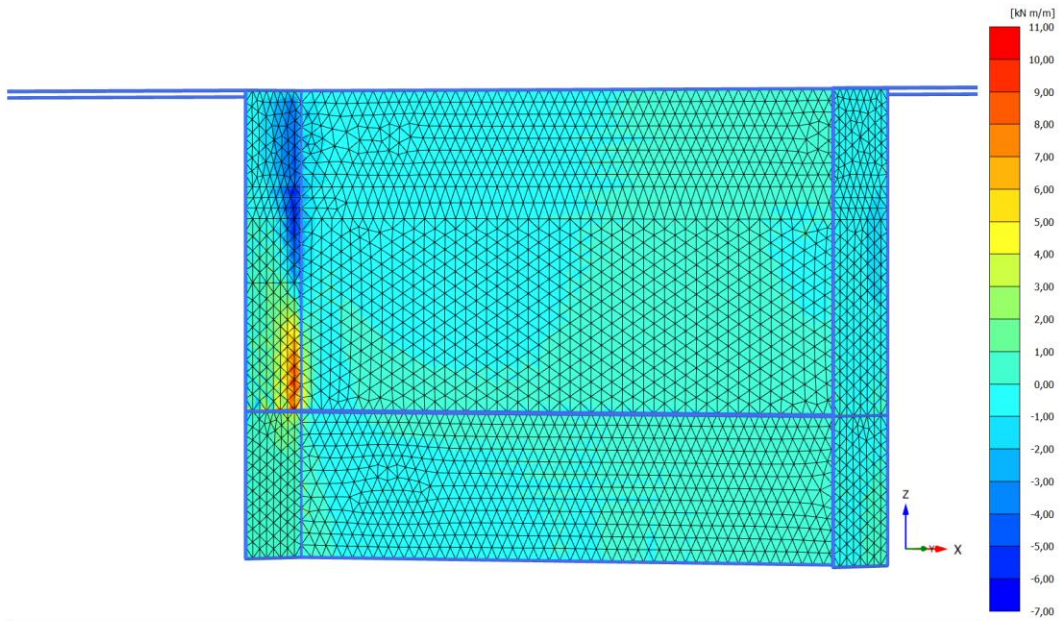
Maximum value = 379,5 kN m/m (Element 7 at Node 202696)

Minimum value = -422,4 kN m/m (Element 71 at Node 229505)

**Bending moments M_{22}**

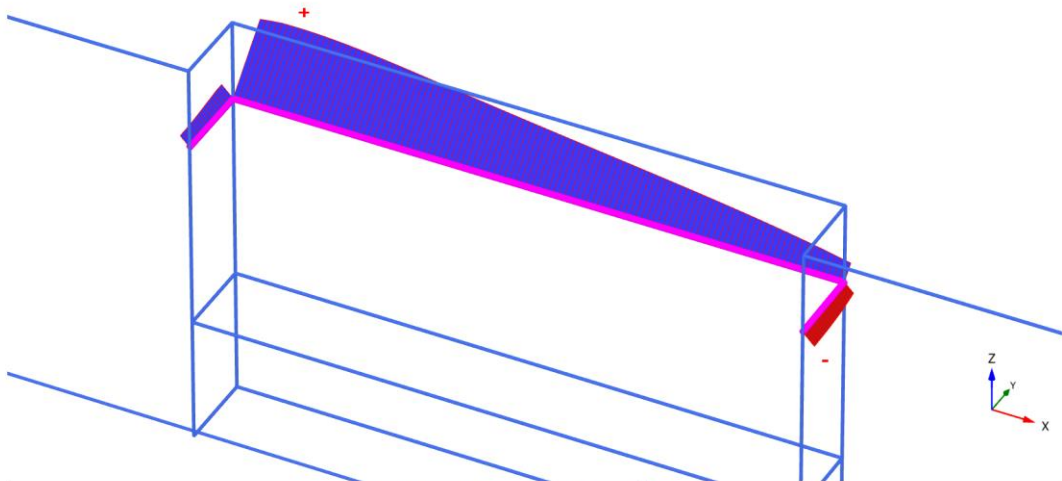
Maximum value = 2,431 kN m/m (Element 29 at Node 158856)

Minimum value = -3,316 kN m/m (Element 4568 at Node 158871)

**Torsion moments M_{12}**

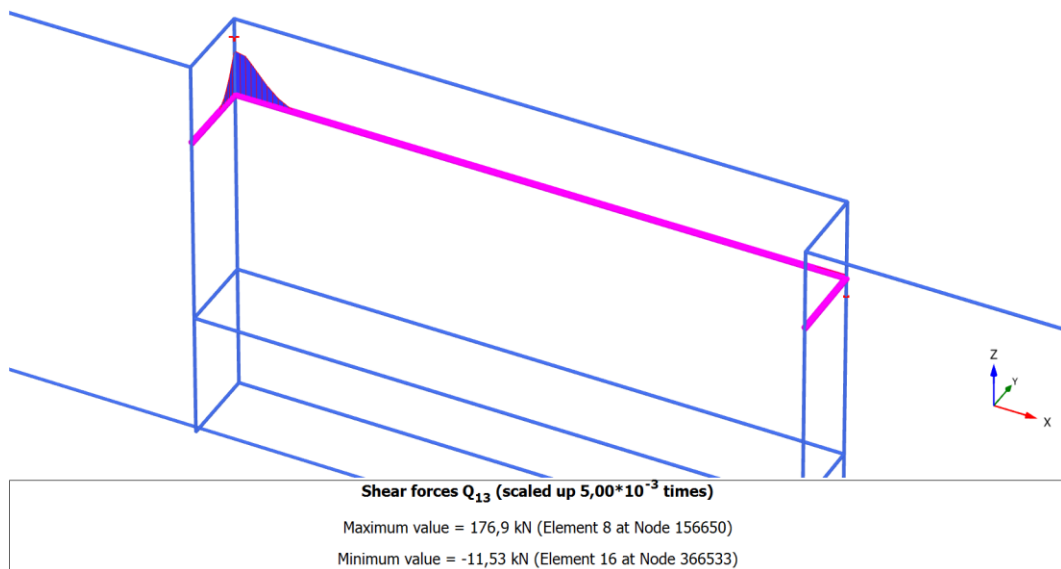
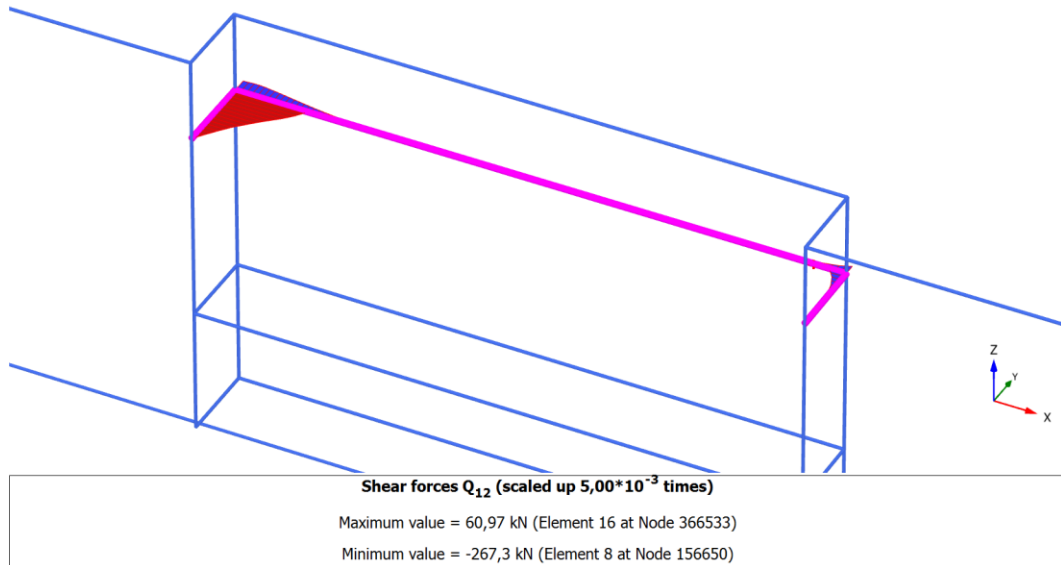
Maximum value = 10,88 kN m/m (Element 152 at Node 183331)

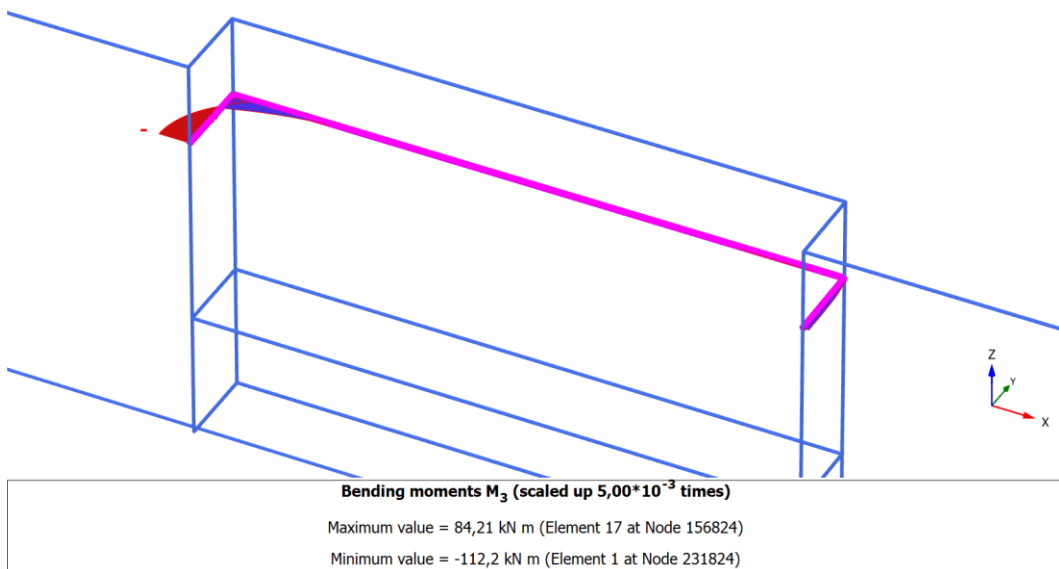
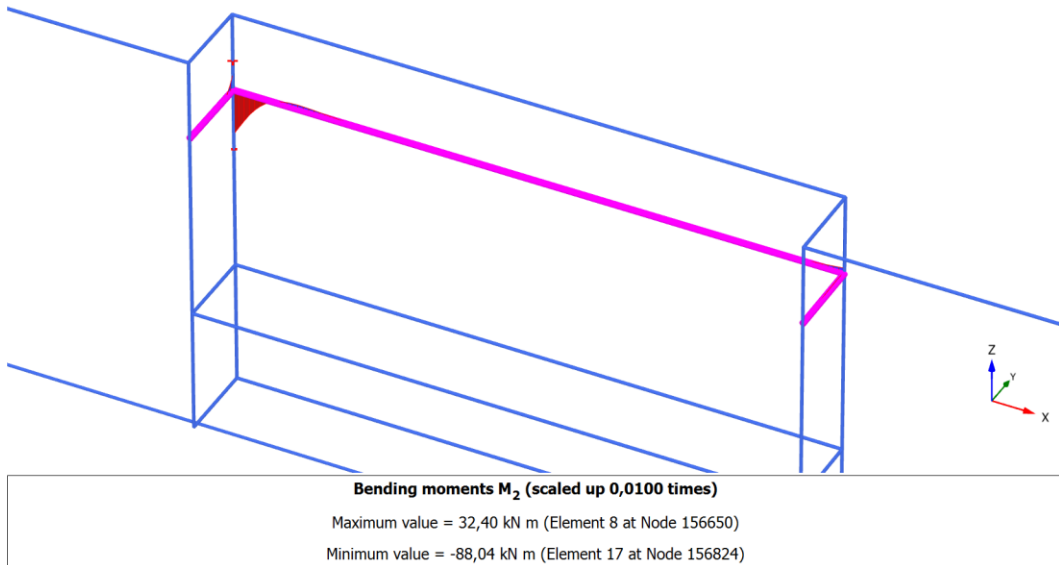
Minimum value = -6,357 kN m/m (Element 4080 at Node 156456)

**Axial forces N (scaled up $5,00 \cdot 10^{-3}$ times)**

Maximum value = 279,6 kN (Element 20 at Node 179558)

Minimum value = -59,10 kN (Element 9 at Node 490814)

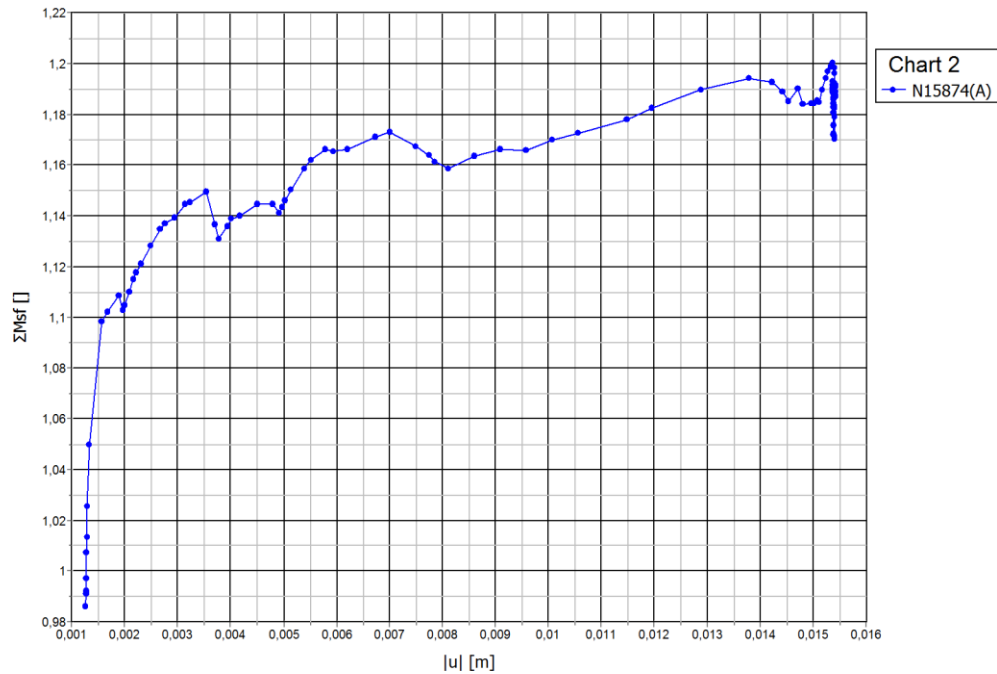




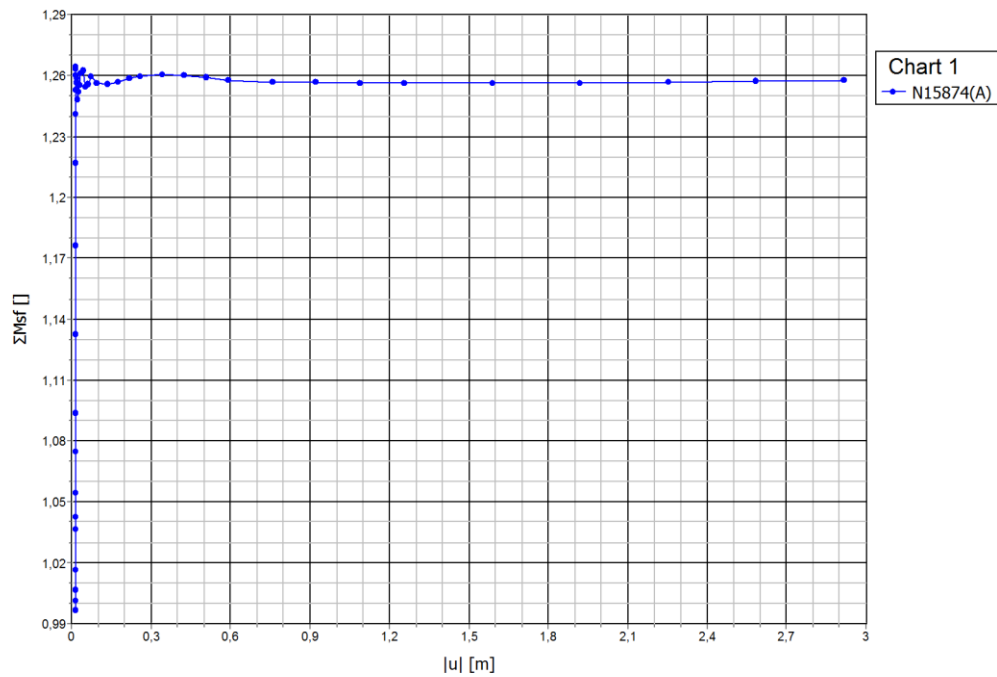
A.2 Sikkerhet etter fase med full utgraving

A.2.1 Plaxis 2D

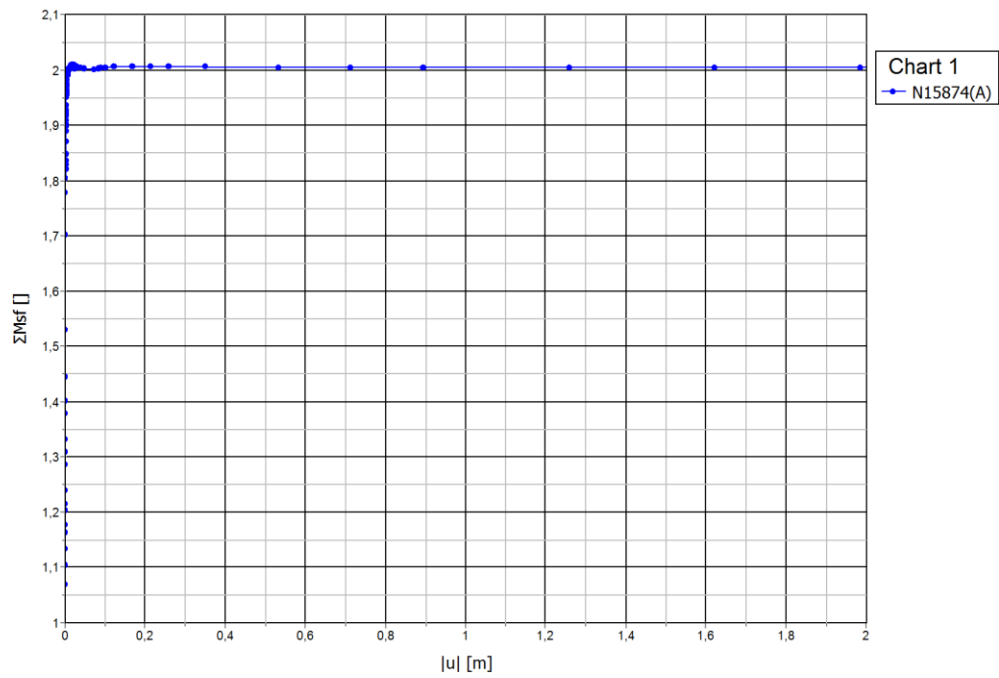
A.2.1.1 Drenert tilfelle i sand



A.2.1.2 Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden

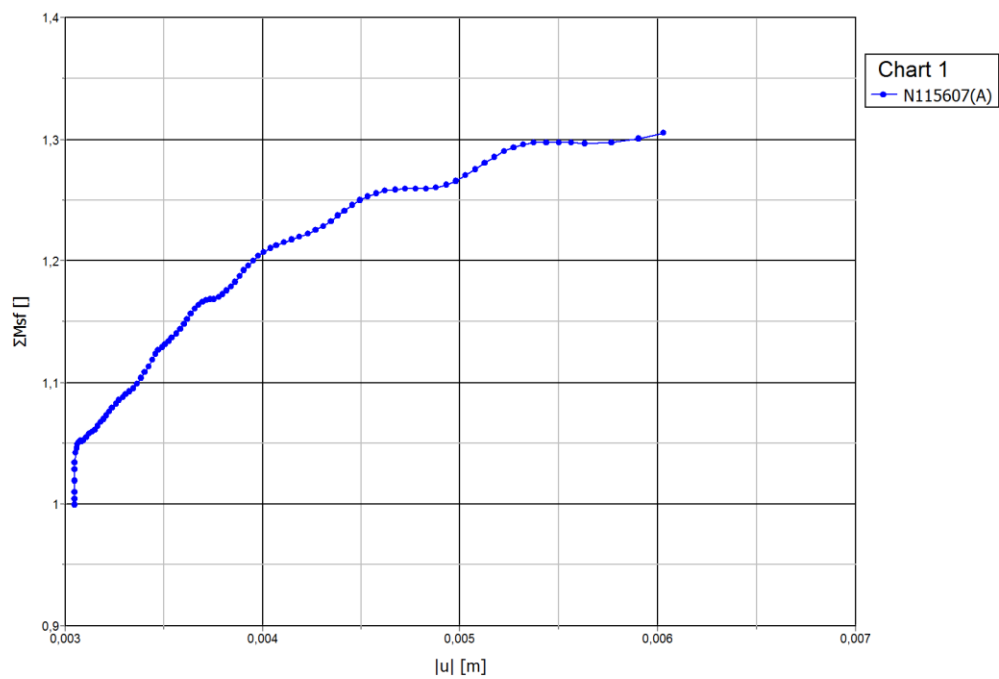


A.2.1.3 Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden

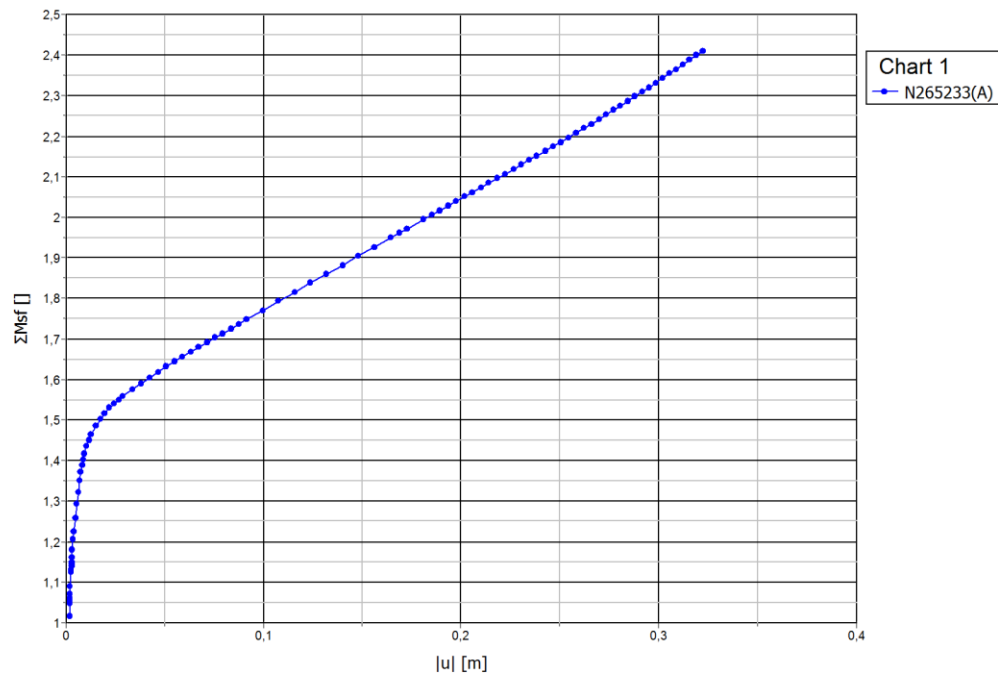


A.2.2 Plaxis 3D

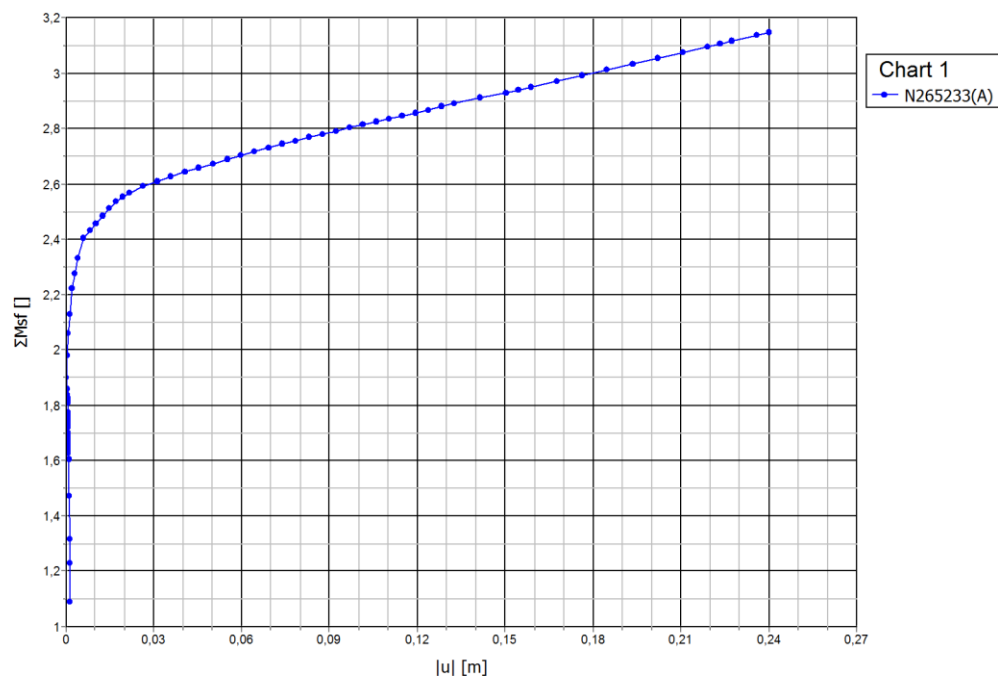
A.2.2.1 Drenert tilfelle i sand



A.2.2.2 Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden



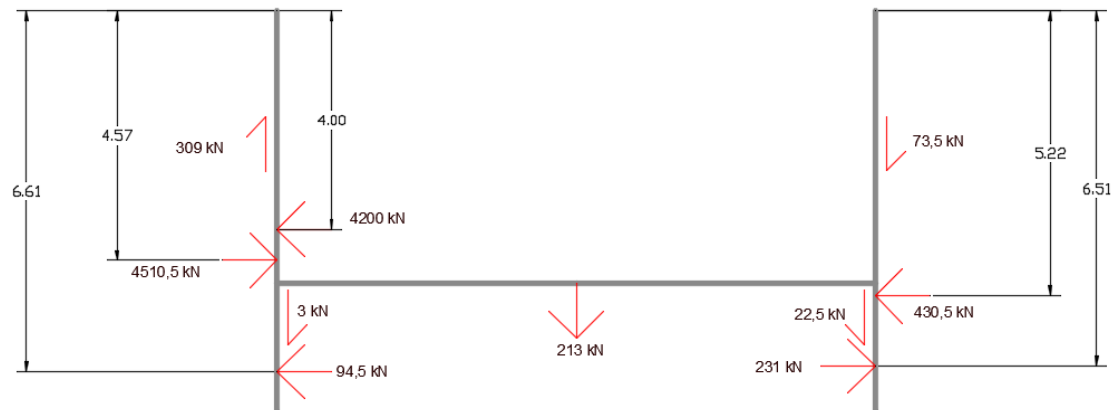
A.2.2.3 Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden



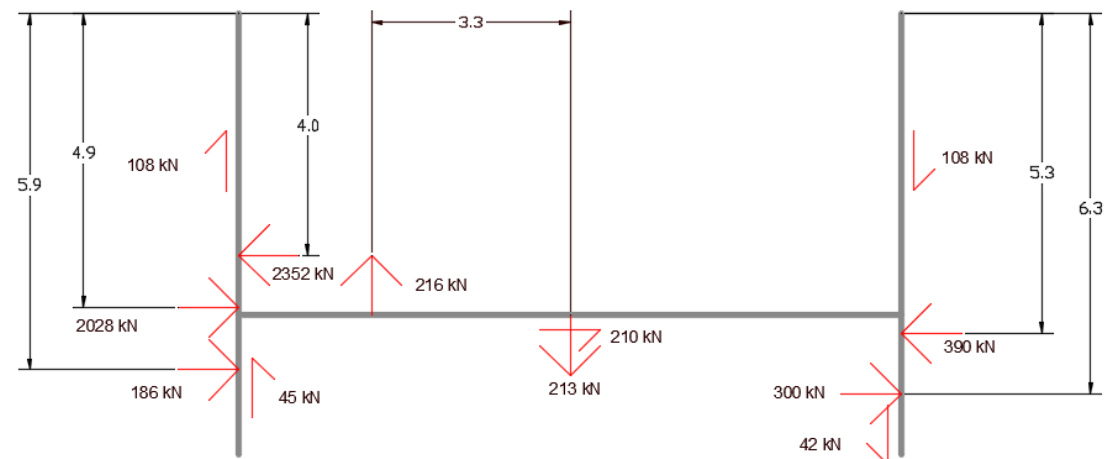
A.3 Kraftresultanter og angrepspunkt på pressegrøp under pressing

A.3.1 Plaxis 2D

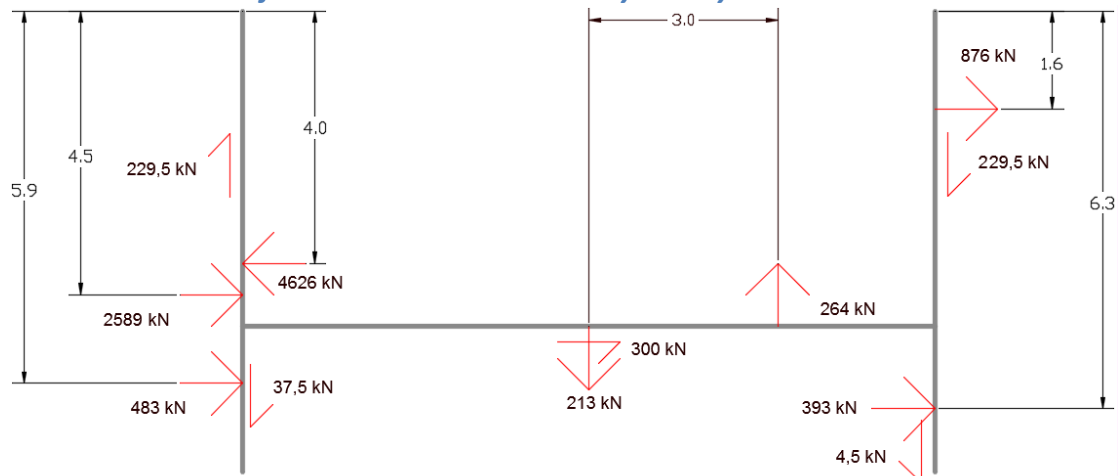
A.3.1.1 Drenert tilfelle i sand



A.3.1.2 Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden

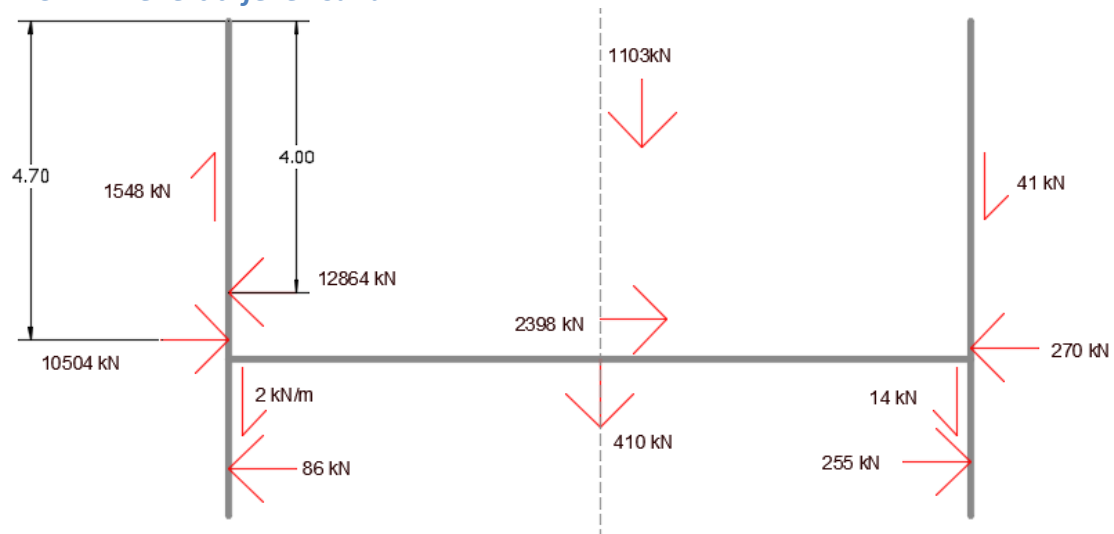


A.3.1.3 Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden

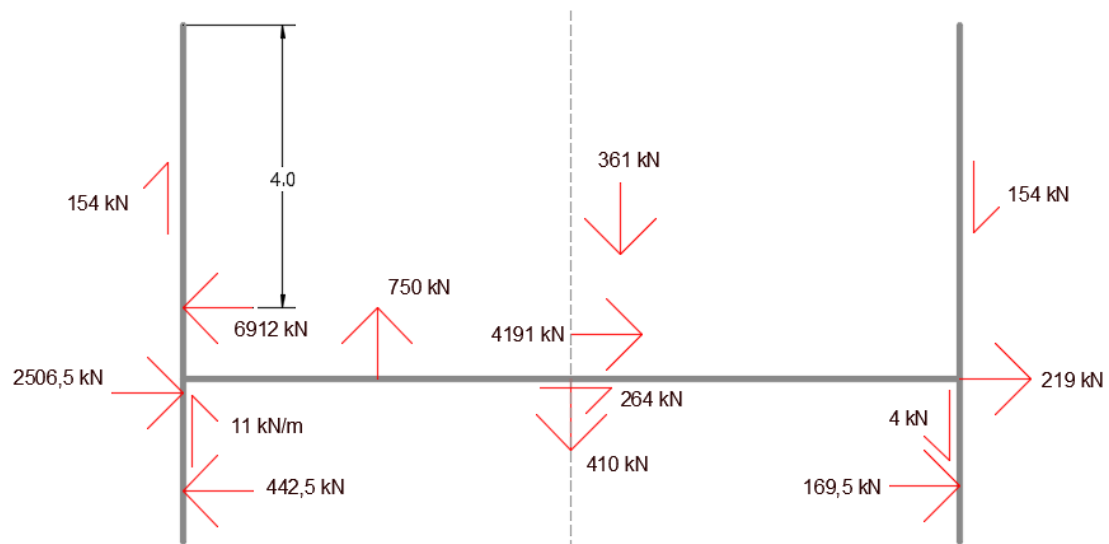


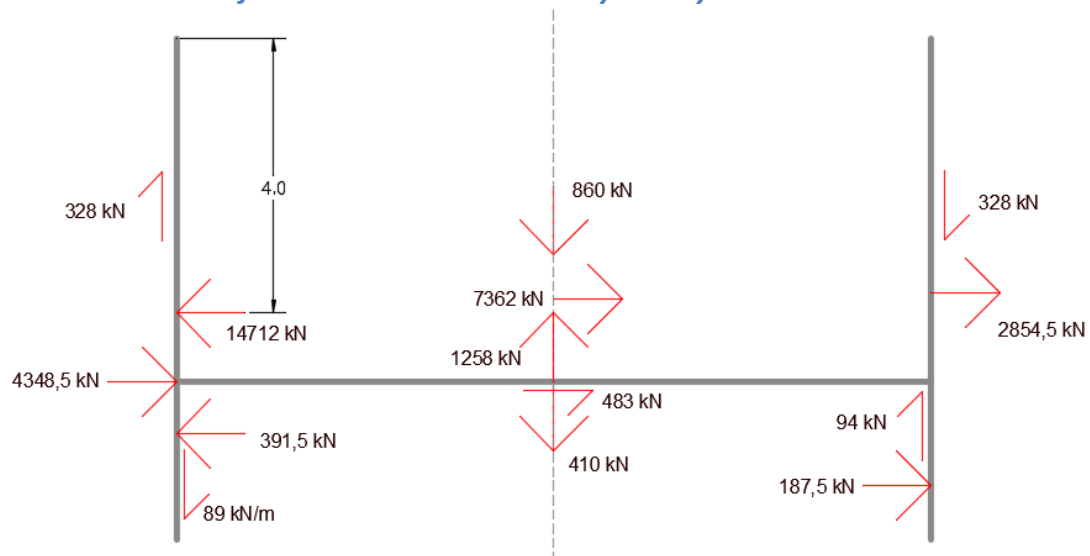
A.3.2 Plaxis 3D

A.3.2.1 Drenert tilfelle i sand



A.3.2.2 Udrenert tilfelle i leire med økende styrke i dybden



A.3.2.3 Udrenert tilfelle i leire med konstant styrke i dybden

B Vedlegg – Korrespondanse

B.1 Ragnhild Saarem (Norconsult)

Hei

Beklager igjen at dette kommer litt sent, men forhåpentligvis bedre sent enn aldri.

Det stemmer at vi har bruk en modell i plan tøyning i Plaxis 2D i beregningene, og vi har ikke tatt hensyn til eventuelle skjærkrefter langs sideveggene. Vi har regnet på dette som et rent jordtrykksproblem, først for installasjon av spunt og utgaving til ønsket gravenivå, og deretter med en last på bakveggen som representerer pressekraften. Denne fikk vi oppgitt av entreprenøren, og da oppga de maksimal kraft som utstyret kan oppnå.

Dimensjonene på gropen er minst mulig ja, men vi sørget for å ha stor nok lysåpning (altså innenfor skråstiverne) til å kunne få presseutstyret ut og inn. I tillegg ble den oppgitte pressekraften fordelt over en betongplate med et visst areal, og siden høyden på den platen er begrenset, måtte den være bred nok (og dermed også gropen) slik at lasten ble fordelt over et så stort areal at jorden bak spuntveggen ikke går til brudd. Dybden på gropen var tilpasset dybden til røret som skulle presses.

En siste ting vi fant ut var å forutsette at sveisene i skråstiverne ryker ved strek, slik at en pressekraft bakover ikke drar inn sideveggene.

Håper dette er til hjelp.

Med vennlig hilsen

Ragnhild Saarem

Sivilingeniør Geoteknikk Dir: +47 67571653 | Mob: +47

48124222 ragnhild.saarem@norconsult.com Norconsult AS, Postboks 626, NO-1303

Sandvika Vestfjordgaten 4, NO-1338 Sandvika Tel: +47 67 57 10 00 | Fax: +47 67 54 45

76 www.norconsult.no

B.2 Notat skrevet etter samtale med Arne Valle (Olimb)

Samtale med Arne Valle prosjektleder/kalkulator hos Olimb Anlegg 18/9 2015

-Mikrotunnelering:

Åpen front= kan gå ut på stuff

Med eller uten graver i front. Masser blir trukket ut med skuff. Dominerende i leire uten fritt vann til stede. Har den store fordelen at man kan gå inn og sprengne/borre bort berg eller skjære gjennom bygningsrester som ligger i jorda.

Lukket front= kan ikke gå ut. Benyttes vanligvis i frikjonsmasser(også morene) der man har fritt vann til stede. Roterende borhode løsriver materialet. Fjerner massene enten mekanisk(skru ut), manuelt, ved spyling eller med et boreslamsystem.

Kan kjøre overtrykk på begge.

-Rørbruk:

Spesiellagde betong, stål eller glassfiberrør(GRP).

-Mothold holder av og til ikke. Flytter både hele pressegruppa og låsene mellom spuntene ryker. Kjedelig om låsene ryker ved høy grunnvannstand, mens å etablere nytt mothold med utleggelse av masser og komprimering er kostbart ved flytting av pressegruppa.

-Tidsbruk mellom hver seksjon presses er i størrelsesorden timer. Ikke uvanlig at det kan ta 2-3 timer.

-Merker betydelig set-up effekt om de blir stående for lenge. Krever av og til enorme krefter å komme i gang igjen.

-Varerør=rør i rør. Altså rør man kan legge andre rør i.

-Max pressedybde har vært noen og 20 m, normalt ligger på 4-5 m.

-Bruker ikke standard pressesjakter på grunne pressinger da situasjonene ofte er så forskjellige.

-Styrt boring fra spuntsjakt forekommer også. Trekkraft på 100 tonn. PE rør. Strekkfaste. Eller sveiset stålrør.

-Ser problemer med stein/blokk som sitter i overkant rør når presses. Må av og til splittes. Risikabel jobb.

-Nødvendig presskrefter tas litt på feelingen(erfaring)