



Kunnskap for en bedre verden

Vurdering av spenninger og deformasjoner i tuber av geosyntet fylt med lettklinker, for bygging av lette støttekonstruksjoner og bratte skrånninger.

Lise Storvann

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Arnfinn Johannes Emdal, IBM

Medveileder: Arnstein Watn, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Oppgavens tittel: Vurdering av spenninger og deformasjoner i tuber av geosyntet fylt med lettlinker, for bygging av lette støttekonstruksjoner eller bratte skråninger.	Dato: 07.06.2018
	Antall sider (inkl. bilag): 148
	Masteroppgave x
Navn: Lise Storvann	
Faglærer/veileder: Asst. Prof. Arnfinn Emdal	
Eksterne faglige veiledere: Arnstein Watn, Watn Consult og Dr. Geir Svanø, BaneNOR	

Sammendrag:

LiTuWa (Lett tubevegg) er et system for bygging av lette støttekonstruksjoner. Systemets frontvegg består av tuber av geosyntet fylt med løs lettlinker. Tubene installeres lagvis, ved innblåsing av lettlinker på byggeplassen. De er forankret i tilbakefyllingen med geotekstiler, der armert jord-prinsippet utnyttes. I denne rapporten er tubenes oppførsel under vertikal belastning studert. Innvirkende faktorer og tubens forventede stivhet er funnet. Dette er studert ved fysiske belastningsforsøk og numeriske analyser.

Det er utført fysiske belastningsforsøk på lettlinker innkapslet i et gummimateriale. Last og påfølgende deformasjoner i tuben er registrert. Tubens fasong og strekkøying i gummimaterialet er målt underveis i forsøket. Sikteanalyse er utført for påvirket lettlinker og lettlinker utsatt for belastning for å vurdere komprimeringen og belastningens effekt på materialet. Resultatene fra belastningsforsøket viser at tubens stivhet øker med lastnivået. Registrering av fasong viser at tverrsnittarealet øker ved belastning. Dette er forårsaket av dilatans i lettlinkeren. Strekkøyingene i gummimaterialet øker etterhvert som tuben deformeres. Sikteanalysen indikerer liten grad av nedknusing av materiale.

Effekten av ulike parametere på tubens deformasjon ved belastning er studert i FEA-verktøyet PLAXIS 2D. Resultatene fra belastningsforsøket er benyttet for kalibrering og sammenligning. Ut fra dette og teoretiske beregninger er materialparametere bestemt. Resultatene viser at deformasjonene er plastiske, altså innvirker ikke E-modul i lettlinker på tubens stivhet. Aksialstivheten i innkapslingsmaterialet påvirker tubens stivhet betydelig. Både dilatansvinkel og friksjonsvinkel påvirker tubens stivhet. Dilatansvinkel er bestemt ved sammenligning mot registrert fasong for tilsvarende belastning, tubens aksialstivhet er beregnet og verifisert, mens friksjonsvinkel er tilpasset tubens stivhet fra belastningsforsøk.

Materialparametere funnet ved sammenligning mot resultater fra belastningsforsøk er anvendt for å lage en tilsvarende numerisk modell med størrelse og innkapslingsmateriale som i geotekstiltuber anvendt i LiTuWa. Ulike stivheter i innkapslingsmaterialet er testet. Resultatet fra numerisk analyse viser at tubene har en lav stivhet ved belastning inntil omtrent 40--50~kPa. Etter dette oppnår tubene en tilnærmet lineær sammenheng mellom vertikalspenning og -tøying fra omtrent 40--50 til 200~kPa. Stivheten varierer med geotekstilets aksialstivhet, tubenes E-modul er gitt ved følgende ligning: $E=0,1443 \cdot \ln(\text{Aksialstivhet}) + 1,4093$

Ligningen er gyldig for geotekstiler med aksialstivhet mellom 30 og 120~kN/m. En komprimering av tubenes øvre del i lengderetning etter at tubene er fylt med lettlinker, kan gi tubene tilsvarende stivhet som etter vertikal belastning til 40--50~kPa. Dette må verifiseres med fysiske belastningsforsøk på komprimerte tuber. Dersom bestemt stivhet stemmer, kan en forenklet fullskala konstruksjon modelleres i PLAXIS, der tubene kan modelleres som lineært elastiske materialer. Alternativt kan modellering utføres i ABAQUS FEA, hvor konstruksjonens komponenter og samvirket mellom disse kan modelleres.

Stikkord:

1. Lettlinker
2. Geosyntet
3. LiTuWa

Lise Storvann

MASTER DEGREE THESISSpring 2018
for

Student: Lise Storvann

Evaluation of stresses and deformation in geosynthetic tubes filled with light weight clay aggregate for the construction of light weight retaining walls or steep slopes**BACKGROUND**

LiTuWa is a system for the construction of retaining walls or steep slopes using a combination of reinforced soil with a front solution of geosynthetic tubes filled with expanded clay lightweight aggregates (ECLWA). The system is developed in a French-Norwegian research and development project, TeMaSi, and is intended used for the construction of retaining walls or steep slopes in areas with soft subsoil and limited access. For the design and construction of the LiTuWa structure it is important to be able to estimate the stresses and deformations during construction and in the service lifetime. As a part of the R&D-project a test structure has been constructed at Borge in Norway and a pilot structure at Rælingen in Norway where the principle has been tested including load tests and deformation measurements.

TASK

The aim of the thesis is to develop a proposed procedure for design modelling of the LiTuWa system based on Finite Element Analyses (FEA). The thesis should include a literature study of properties and utilisation of geosynthetics and ECLWA and the principle and utilisation of the LiTuWa system. It should develop a method for evaluating stresses and deformations of the geosynthetic tubes filled with ECLWA subjected to vertical loading. The method should be based on theoretical analyses using FEA in combination with medium scale loading tests on tubes filled with aggregates for calibration of the FEA. The results of the study should be presented and discussed with recommendations for design modelling of geosynthetic bags filled with ECLWA.

Professor in charge:

Asst. Prof. Arnfinn Emdal

Co-supervisors:Arnstein Watn, Watn Consult
Dr. Geir Svanø, BaneNor

Department of Civil and Transport Engineering, NTNU

Date: 06.06.2018



Professor in charge (signature)

Forord

Dette er en masteroppgave innen geoteknikk, som en del av masterprogrammet Bygg- og miljøteknikk ved NTNU. Oppgaven er skrevet gjennom vårsemesteret 2018.

Oppgaven er foreslått i samarbeid med Arnfinn Emdal og Arnstein Watn, som sammen med Geir Svanø fra BaneNOR har vært veiledere gjennom utførelsen av oppgaven dette semesteret.

Jeg vil gi en stor takk til alle veiledere for gode faglige råd og veiledning gjennom semesteret. I tillegg vil jeg takke professor Gustav Grimstad for hjelp til modellering og forståelse av PLAXIS 2D, samt NTNUs ansatte på laboratorie og verksted for klargjøring av utstyr og hjelp underveis ved laboratorieforsøk. Takk til den geotekniske avdelingen ved NTNU for et godt faglig og sosialt miljø.

Sammendrag

LiTuWa (Lett tubevegg) er et system for bygging av lette støttekonstruksjoner. Systemets frontvegg består av tuber av geosyntet fylt med løs lettlinker. Tubene installeres lagvis, ved innblåsing av lettlinker på byggeplassen. De er forankret i tilbakefyllingen med geotekstiler, der armert jord-prinsippet utnyttes. I denne rapporten er tubenes oppførsel under vertikal belastning studert. Innvirkende faktorer og tubens forventede stivhet er funnet. Dette er studert ved fysiske belastningsforsøk og numeriske analyser.

Det er utført fysiske belastningsforsøk på lettlinker innkapslet i et gummimateriale. Last og påfølgende deformasjoner i tuben er registrert. Tubens fasong og strekktøyning i gummimaterialet er målt underveis i forsøket. Sikteanalyse er utført for upåvirket lettlinker og lettlinker utsatt for belastning for å vurdere komprimeringen og belastningens effekt på materialet. Resultatene fra belastningsforsøket viser at tubens stivhet øker med lastnivået. Registrering av fasong viser at tverrsnittarealet øker ved belastning. Dette er forårsaket av dilatans i lettlinkeren. Strekktøyningene i gummimaterialet øker etterhvert som tuben deformeres. Sikteanalysen indikerer liten grad av nedknusing av materiale.

Effekten av ulike parametere på tubens deformasjon ved belastning er studert i FEA-verktøyet PLAXIS 2D. Resultatene fra belastningsforsøket er benyttet for kalibrering og sammenligning. Ut fra dette og teoretiske beregninger er materialparametere bestemt.

Resultatene viser at deformasjonene er plastiske, altså innvirker ikke E-modul i lettlinker på tubens stivhet. Aksialstivheten i innkapslingsmaterialet påvirker tubens stivhet betydelig. Både dilatansvinkel og friksjonsvinkel påvirker tubens stivhet. Dilatansvinkel er bestemt ved sammenligning mot registrert fasong for tilsvarende belastning, tubens aksialstivhet er beregnet og verifisert, mens friksjonsvinkel er tilpasset tubens stivhet fra belastningsforsøk.

Materialparametere funnet ved sammenligning mot resultater fra belastningsforsøk er anvendt for å lage en tilsvarende numerisk modell med størrelse og innkapslingsmateriale som i geotekstiltuber anvendt i LiTuWa. Ulike stivheter i innkapslingsmaterialet er testet.

Resultatet fra numerisk analyse viser at tubene har en lav stivhet ved belastning inntil omtrent 40–50 kPa. Etter dette oppnår tubene en tilnærmet lineær sammenheng mellom vertikalspenning og -tøyning fra omtrent 40–50 til 200 kPa. Stivheten varierer med geotekstilets aksialstivhet, tubens E-modul er gitt ved følgende ligning:

$$E = 0,1443 \cdot \ln(\text{Aksialstivhet}) + 1,4093$$

Ligningen er gyldig for geotekstiler med aksialstivhet mellom 30 og 120 kN/m. Komprimering av tuber etter innblåsing eliminerer deformasjonene som oppstår initielt ved belastning. En komprimering av tubenes øvre del i lengderetning etter at tubene er fylt med lettlinker, kan gi tubene tilsvarende stivhet som etter vertikal belastning til 40–50 kPa. Dette må verifiseres med fysiske belastningsforsøk på komprimerte tuber. Dersom bestemt stivhet stemmer, kan en forenklet fullskala konstruksjon modelleres i PLAXIS, der tubene kan modelleres som lineært elastiske materialer. Alternativt kan modellering utføres i

ABAQUS FEA, hvor konstruksjonens komponenter og samvirket mellom disse kan modelleres.

Abstract

LiTuWA (lightweight tube wall) is a system for construction of lightweight retaining walls or steep slopes. The front wall consists of geosynthetic tubes filled with lightweight aggregates (LWA). The tubes are anchored into the backfill using the principle of reinforced soil. In this report, the tube's behaviour during vertical loading is studied. Factors affecting the stiffness of the tube are identified, and expected stiffness of the tube is found. Studies are done by physical loading tests and numerical analysis.

Physical loading tests are conducted on lightweight aggregates encapsulated in a rubber material. Load and the following deformations are registered. The shape of the tube and strain in the rubber is measured during loading. Sieving analysis is conducted on the LWA before and after loading to evaluate the effect of vertical loading. The results show that the tube's stiffness increases with the load level. Shape measurements show that the cross sectional area increases when the tube is subjected to loading. This is induced by dilatancy in the LWA. Strains in the rubber material increase as the tube is deformed. The sieving analysis indicates no significant crushing of the LWA.

A finite element analysis (FEA) is conducted using PLAXIS 2D. The effect of different material parameters on the tube during loading is tested. The results from the physical loading tests are used to calibrate the model. From theoretical calculations and comparison with results from the loading test, input material parameters in the model are determined.

Results from the numerical model show that the deformations are plastic, hence the E-modulus does not affect the stiffness of the tube. The axial stiffness in the encapsulating material affects the stiffness of the tube considerably. Both the dilatancy- and the friction angle have an influence on the stiffness of the tube. The dilatancy angle is determined by comparing the shape of the tube subjected to vertical loading in the model with the shape of the tube subjected to the same load in the loading test. The axial stiffness of the rubber material is calculated and verified, the friction angle is adjusted to make the deformation of the tube in the model comparable to the deformation in the loading test for corresponding vertical stress.

The material parameters found are used to make a numerical model adapted to the size and shape of actual geosynthetic tubes used in LiTuWa structures. The stiffness of the encapsulating material is set to the axial stiffness of relevant geotextiles. Several axial stiffnesses are tested. The results from the model show that the tube has a low stiffness for loading up to 40–50 kPa. Further the results show a linear dependency between the vertical stresses and the strain for vertical stresses between 40–50 kPa and 200 kPa. The dependency varies with the axial stiffness in the geotextile. It is given in the following equation:

$$E = 0,1443 \cdot \ln(\text{Axialstiffness}) + 1,4093$$

The equation is valid for axial stiffnesses between 30 and 120 kN/m. Compaction of tubes after filling by blowing may eliminate the initial low stiffness. Compaction may give the

tubes corresponding stiffness as vertical loading to 40–50 kPa, but this must be validated by physical loading tests on compacted tubes. If the stiffness can be verified, a simplified full scale LiTuWa structure may be modelled. The tubes can be defined as linear elastic materials. An alternative may be modelling in ABAQUS FEA, where the components in the structure and the interaction between different components may be modelled in a more proper way.

Innhold

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
Innholdsfortegnelse	ix
Tabelliste	xii
Figurliste	xv
Forkortelser og symboler	xvi
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
1.3 Formål og omfang	2
1.4 Tidligere relevante studier	3
1.5 Disposisjon	3
2 Litteraturstudie	5
2.1 LiTuWa-konstruksjonen	5
2.1.1 Innledning	5
2.1.2 Prinsippet LiTuWa	5
2.1.3 Innblåsingsprosesser	6
2.1.4 Komprimeringsforsøk	7
2.1.5 Belastningsforsøk	10
2.1.6 Fullskala testkonstruksjon	13
2.1.7 Tidligere numerisk analyse på geosyntettuber	16
2.2 Lettklinker	17

2.2.1	Innledning	17
2.2.2	Produksjon	18
2.2.3	Mekaniske egenskaper	19
2.2.4	Termiske egenskaper	24
2.2.5	Konstruksjonsegenskaper	24
2.3	Geosynteter	25
2.3.1	Innledning	25
2.3.2	Ulike typer geosyntet	25
2.3.3	Egenskaper og prinsipper	28
2.4	Interaksjon mellom geosynteter og lettklinker	31
2.4.1	Fysisk interaksjon	31
2.4.2	Kjemisk interaksjon	31
2.5	Gummi	32
2.5.1	Innledning	32
2.5.2	Egenskaper og anvendelsesområder	33
2.6	Sammendrag	34
3	Grunnleggende teori	37
3.1	Jordmodellen Mohr-Coulomb	37
3.2	Elastoplastisitet	39
3.3	Elementmetode i geoteknikk	41
3.4	Plaxis 2D	42
4	Belastningsforsøk	43
4.1	Innledning	43
4.2	Metode	43
4.2.1	Innledende bestemmelse av materialparametere	43
4.2.2	Beskrivelse av utstyr	47
4.2.3	Forsøksprosedyre	48
4.2.4	Behandling av registrert data i belastningsforsøket	51
4.3	Resultater	52
4.3.1	Innledende bestemmelse av materialeegenskaper	52
4.3.2	Belastningsforsøk	54
5	Numerisk modellering av lettklinker innkapslet i gummi	59
5.1	Innledning	59
5.2	Metode	59
5.2.1	Prosedyre	59
5.2.2	Beskrivelse av modell	60
5.2.3	Utfordringer og løsninger	61
5.2.4	Parameterbestemmelse	66
5.2.5	Beregningsfaser i PLAXIS 2D	68
5.3	Resultater	70
5.3.1	E-modul i lettklinker	70
5.3.2	Aksialstivhet i gummimaterialet	70
5.3.3	Friksjonsvinkel i lettklinker	71

5.3.4	Dilatansvinkel i lettklinker	72
5.3.5	Sammenligning mot resultater fra belastningsforsøk	72
6	Numerisk modellering av lettklinker innkapslet i geotekstil	75
6.1	Innledning	75
6.2	Metode	75
6.2.1	Prosedyre	75
6.2.2	Beskrivelse av modell	76
6.3	Resultater	77
6.3.1	E-modul i lettklinker	77
6.3.2	Dilatansvinkel i lettklinker	77
6.3.3	Aksialstivhet og krefter i innkapslingsmaterialet	78
6.3.4	Sammenligning med resultater fra belastningsforsøk	78
7	Diskusjon	81
7.1	Innledende forsøk	81
7.2	Belastningsforsøk	82
7.3	Numerisk modellering av lettklinker innkapslet i gummidmateriale	85
7.4	Numerisk modellering av lettklinker innkapslet i geotekstil	87
7.5	Resultater anvendt i LiTuWa	89
8	Konklusjon og forslag til videre arbeid	91
8.1	Konklusjon	91
8.2	Forslag til videre arbeid	93
	Bibliografi	93
	Vedlegg	99
A	Utleddning av justeringsfaktor for beregninger i PLAXIS 2D	99
B	Beregninger og beskrivelse av initiale forsøk	101
B.1	Densitet	101
B.2	Vanninnhold	102
B.3	Strekkforsøk	102
B.4	Beregnet todimensjonal stivhet i EPDM 50	103
B.5	Sikteanalyse	104
C	Beregning av gjennomsnittlig σ'_3 og E-modul for anvendelse i PLAXIS	107
D	Egenskaper for ulike geotekstiler anvendt i tidligere forsøk	111
E	Rådata, registrert fra belastningsforsøk	113

Tabeller

2.1	Endring i areal og omkrets ved ulike komprimering, etter at tube 2 og 3 er fjernet (Górniak, 2013).	8
2.2	Høyde/breddeforhold før og etter 30,34 kN/m belastning for tverrsnitt 1, 2 og 3 (se figur 2.7) for tre tuber av ulike geotekstil fra Texinov målt med 3D laserscanner (Górniak, 2013).	11
2.3	Løs densitet for lettklinker i tubene for belastet og ubelastet del. Densitet for upåvirket lettklinker skal fra tidligere tester være omkring 244 kg/m ³ (Górniak, 2013).	12
2.4	Egenskaper for lettklinker 10–20 mm (Høva og Gylland, 2009b).	20
2.5	Friksjonsvinkel for ulike jordarter (Emdal, 2014)	21
2.6	Hovedfunksjonene til ulike typer geosynteter (Koerner, 2012)	25
2.7	Estimerte verdier for friksjonskoeffisient mellom ulike geosyntetprodukter og lettklinker fra uttrekksforsøk (Górniak, 2013)	31
2.8	Vanlige egenskaper for de mest brukte EPDM-gummitypene (Morton, 2013)	33
3.1	Parametere i Mohr-Coulombmodellen (Brinkgreve et al., 2017b)	39
4.1	Materialegenskaper E550 EPDM (Trelleborg, 2014)	47
4.2	Enaksiell stivhet i gummimaterialet for ulike tøyingsnivå	53
4.3	Parametere for hvert forsøk, og gjennomsnittet av alle forsøk	54
5.1	Materialegenskaper for Leca lettklinker 10–20 ISO anvendt i modellering av belastningsforsøk	67
5.2	Materialegenskaper, bunn- og belastningsplate	68
5.3	Materialegenskaper, grensesnitt mellom tuben og flatene ved etablering av kontaktformuleringer	68
5.4	Materialegenskaper geogrid, tilsvarende gummi	68
6.1	Materialegenskaper geotekstil, strekkstyrke fra vedlegg D	76

6.2	Høyde/breddeforhold ved angitt teoretisk og registrert vertikal belastning, sammenlignet med resultat fra modellering	80
7.1	Beregnet stivhet i tube for tre geotekstiler med ulik aksialstivhet fra figur 7.3	89
8.1	Tilpassede parametere ved sammenligning mot resultater fra belastningsforsøk	91
B.1	Løs densitet, Leca lettklinker 10–20 ISO	101
B.2	Vanninnhold	102
B.3	Resultater fra strekkforsøk	103
B.4	Beregnet E-modul for ulike tøyingsnivå	103
B.5	Sikteanalyse for ubelastet materiale	104
B.6	Sikteanalyse for belastet materiale	105
C.1	E-modul for 0,5 % tøyning fra figur 2.20, vist som plot i figur C.2.	108

Figurer

1.1	Prinsippskisse av LiTuWa-systemet (Górniak, 2013)	2
2.1	Fasadesystemet i LiTuWa (Finseth et al., 2013).	6
2.2	Innblåsing av lettklinker i tuben ved fylling fra et bevegelig punkt (Górniak, 2013)	6
2.3	Tubens form etter innblåsing med metode C, avstand til tubens lukkede ende er angitt.	7
2.4	Tubens tverrsnitt etter henholdsvis 4, 6, 8 og 10 passeringer med vibroplate, etter at to overliggende tuber er fjernet (Górniak, 2013)	8
2.5	Bulkdensitet for ulike antall passeringer. Tube 1 ligger i bunnen, tube 2 i midten og tube 3 øverst (Górniak, 2013).	9
2.6	Andel korn mindre enn 10 mm. Tube 1 ligger i bunnen, tube 2 i midten og tube 3 øverst. (Górniak, 2013).	9
2.7	Belastningsforsøk. 1, 2 og 3 viser hvor 3D laserscanner registrerer tverrsnittet. I, II og III er hvor deformasjonsmålerne er plassert. Over og under tverrsnitt 1 er lastcelle plassert (Górniak, 2013).	11
2.8	Sammenligning av siktekurve for Avelar lettklinker 10-20 fra fabrikk og etter innblåsing i tubene med innblåsingsmetode B (HTS) (Górniak, 2013).	12
2.9	Effekt av innblåsingsmetode på stivhet fra enaksialt strekkforsøk (Górniak, 2013).	13
2.10	Prinsippskisse av de ulike sonene i testkonstruksjonen (Górniak, 2013)	14
2.11	Konstruksjonens deformasjoner ved belastning, sone 2 (Górniak, 2013).	15
2.12	Konstruksjonens deformasjoner ved belastning, sone 3 (Górniak, 2013).	15
2.13	Konstruksjonens deformasjon ved undergraving, bildet i bakgrunnen er ikke et referansebilde (Górniak, 2013).	16
2.14	Fordeling av kontaktkrefter mellom granulære lettklinkerkorn i fire faser av beregningene. Rødt viser de største kontaktkreftene, skala til høyre for hver figur (Górniak, 2013).	17
2.15	Løs Leca lettklinker 10–20 ISO	18
2.16	Anvendelsesområder for løs lettklinker (Watn et al., U.Å.).	19

2.17	Produksjon av lettklinker (Rapidbau, 2010)	20
2.18	Kornfordeling Leca 10–20 (Høva og Gylland, 2009b).	22
2.19	Spennings-tøyingskurver for ulike komprimeringsgrader og omtrent samme sideinnspenning (Høva og Gylland, 2009b).	23
2.20	Spennings-tøyingskurve og E-modul for svensk lettklinker 12–20 ved sideinnspenning 20, 40 og 80 kPa og 5 % komprimering (Høva og Gylland, 2009b)	23
2.21	Idealiserte ødometerkurver for lettklinker (Furuberg og Solheim, 2000).	24
2.22	Ulike typer geosynteter (Górniak, 2013)	26
2.23	Prinsippskisse av spenningsopptaket i armeringsmaterialet (De geotekniske foreningene i Norden, 2006).	28
2.24	Last-deformasjonsegenskaper for ulike materialer (De geotekniske foreningene i Norden, 2006).	29
2.25	Kryp i ulike materialer belastet med henholdsvis 20 % og 60 % av bruddlast (den Hoedt, 1986).	30
2.26	Typisk spennings-tøyingskurve for gummi i strekk (Bauman, 2012).	34
3.1	Mohr-Coulombs bruddkriterium i $\tau - \sigma'$ -planet (Nordal, 2017)	37
3.2	Coulombs bruddkriterie i hovedspenningsrommet (Brinkgreve et al., 2017b)	38
3.3	Plastisk spenningselement $d\vec{\sigma}^p$ i $\sigma'_1 - \sigma'_3$ -planet, med påfølgende tøying proposjonal med plastisk spenning (Nordal, 2017).	39
3.4	Prinsippet dilatans (Nordal, 2017)	40
3.5	Trekantede elementer med 6 og 15 noder (Nordal, 2017)	41
4.1	Løs densitet	44
4.2	Strekksforsøk	45
4.3	Sikteanalyse	46
4.4	Prinsippskisse av belastningspressen	48
4.5	Utstyr anvendt under belastningsforsøket	49
4.6	Belastningsforsøk	50
4.7	Omtrentlig posisjon på tuben hvor tøyingene ble registrert	50
4.8	Resultat av sikteanalyse før og etter belastningsforsøk, sammenlignet med analyse utført av Høva og Gylland (2009b), flerfarget i bakgrunnen. Merk at resultatet kun er vist for d mellom 2 og 32 mm. Korngradering vises normalt for kornstørrelse 0,0006 til 2000 mm.	53
4.9	Spennings-tøyingskurve EPDM 50 fra strekksforsøk	54
4.10	Kraft-deformasjonskurver for forsøk 1 til 6	55
4.11	Spennings-deformasjonskurver for forsøk 2, 4, 5 og 6	55
4.12	Formutvikling ved belastning for forsøk 2, 4, 5 og 6.	56
4.13	Endring av tubens tverrsnittareal ved økende vertikal belastning	57
4.14	Gjennomsnittlig strekktøying ved økt belastning	57
4.15	Strekktøying i gummimaterialet i radiell retning, i forsøk 4, 5 og 6 for lasttrinn 1–7	58
5.1	Tuben slik den er modellert i PLAXIS 2D, med belastnings- og bunnplate.	60

5.2	Resultat av forskyvning i topp, belastningsplaten og geosyntettuben registrerer ikke at de kommer i kontakt. Platen skyves gjennom tuben der den ikke har vært i kontakt i tidligere fase	62
5.3	Etablering av kontaktformuleringer mellom tuben og belastningsplaten og underlaget	62
5.4	Effekt av endret materialstivhet i overgangen mellom horisontal og skrå del av bunnflate	63
5.5	Sammenligning av resultat av nedtrykking av tuben før og etter justering av forskyvningsdistanse for underlaget. Sort linje viser faktisk horisontal flate.	64
5.6	Geometri av faktisk nedbøying ved foreskrevet forskyvning med lengde x	65
5.7	Geometri av faktisk nedbøying ved justert foreskrevet forskyvning	65
5.8	Faser i numerisk analyse	69
5.9	Sammenligning av last-deformasjonskurve for tube modellert med E-modul 5,3 MPa og 15 MPa	70
5.10	Sammenligning av spenning-tøyningskurve for tuber modellert med aksialstivhet 3,9, 5,4, 10, 15 og 30 kN/m	71
5.11	Modell med friksjonsvinkel 35° , 40° og 45°	71
5.12	Sammenligning av last-deformasjonskurve for tube modellert med dilatansvinkel 12° , 18° og 20°	72
5.13	Sammenligning av spenning-tøyningskurve for tube modellert med parametere som gitt i kapittel 5.2.4, og $\psi = 12^\circ$, mot beregnede spenninger og deformasjoner fra belastningsforsøk i kapittel 4.	73
5.14	Sammenligning av tubens form i belastningsforsøk 5 og i modell med parametere som angitt i kapittel 5.2.4. Tubens form i modellen er vist med blått fyll og gule grenser	73
5.15	Aksialkrefter i gummimaterialet i alle belastningsforsøk ved ca 15 cm vertikal belastning sammenlignet med PLAXIS-modell	74
6.1	Geometri av tube, inkludert belastnings- og bunnplate	76
6.2	Spenning-tøyningskurve for med E-modul 5 MPa og 10 MPa	77
6.3	Spenning-deformasjonskurve for belastningsforsøk med dilatansvinkel 9° , 12° og 15°	78
6.4	Spenning-tøyningskurve for belastningsforsøk med aksialstivhet 30, 60 og 120 kN/m	79
6.5	Gjennomsnittlig aksialkraft ved belastning for ulike aksialstivhet i geotekstilet.	79
6.6	Høyde/breddeforhold for modellert tube av TMS PP 64 og TMS PP PVA 72	80
7.1	Tuben er lengre enn belastningsplaten	83
7.2	Deformasjon av tuben ved for liten bredde på belastningsplaten.	88
7.3	Spenning-tøyningskurve, med inntegnet lineær stivhet fra 40–50 kPa til 200 kPa	90
7.4	Sammenheng mellom lineær stivhet i tuben og aksialstivhet i innkapslingsmaterialet ut fra numerisk modell for aksialstivhet mellom 30 og 120 kN/m	90

Forkortelser og symboler

Norsk

A	=	Areal
a	=	Attraksjon
c	=	Kohesjon
$C_i\Phi$	=	Friksjonskoeffisient mellom lettklinker og geosyntet
E	=	Elastisitetsmodul
H_0	=	Initiell høyde
H	=	Høyde
J_1	=	Initiell strekkstivhet (geotekstil)
J_2	=	Sekantstivhet (geotekstil)
K_0	=	Hviletrykkskoeffisient
l_0	=	Initiell lengde
l	=	Lengde
m	=	Masse
m_s	=	Masse stoff
m_w	=	Masse vann
P	=	Trykk
S_u	=	Udrenert skjærfasthet
V	=	Volum
w	=	Vanninnhold

Gresk

α	=	Samvirkefaktor for friksjon mellom jord og armering
γ	=	Tyngdetetthet
ϵ	=	Tøyning
ϵ_r	=	Tøyning i radiell retning
ϵ_y	=	Tøyning i vertikal retning
ν	=	Poissontallet
ρ	=	Densitet
ρ_l	=	Løst densitet
σ, σ'	=	Total- og effektivspenning
σ_1, σ_3	=	Største og minste hovedspenning
τ_f	=	Bruddkriterium i Mohr-Coulomb
τ_r	=	Maksimal mobilisering av strekkspenninger i samvirket jord-armering
ϕ	=	Friksjonsvinkel
Ψ	=	Dilatansvinkel

Forkortelser

DEM	=	Distinct/Discrete element method
FEA	=	Finite element analysis
FEM	=	Finite element method
HTS	=	Høytrykssystem
LiTuWa	=	Lightweight Tube Wall
LTS	=	Lavtrykssystem
LWA	=	Lightweight aggregates, lettklinker
PA	=	Polyamid
PE	=	Polyetylen
PET	=	Polyester
PP	=	Polypropylen
PVA	=	Polyvinylalkohol
SP	=	Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
TeMaSi/TMS	=	Texinov Maxit Sintef, tidligere navn på LiTuWa

Kapittel 1

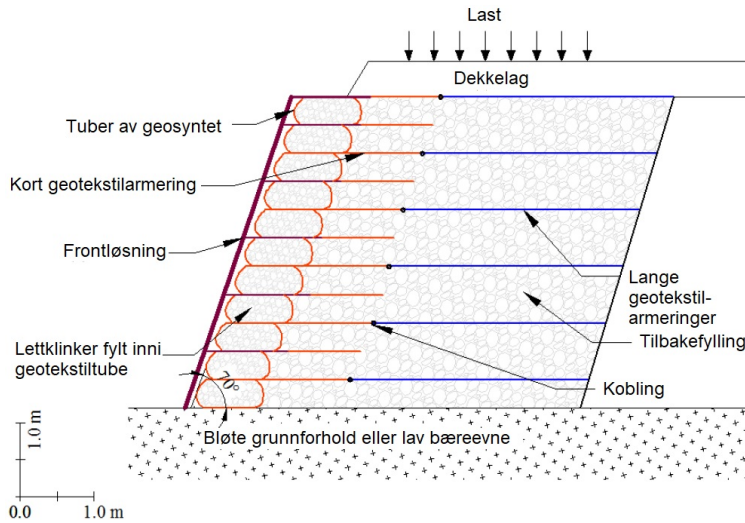
Innledning

1.1 Bakgrunn

Lette fyllinger og støttekonstruksjoner er hensiktsmessig i områder med dårlige grunnforhold. Armert jord kan gi løsninger som er gunstige både økonomisk og teknisk, og lette fyllmasser blir ofte anvendt i konstruksjoner for å redusere vekten (Finseth et al., 2013).

LiTuWa (Lightweight Tube Wall, lett tubevegg) er en lett armert støttekonstruksjon som består av lettklinker og geotekstil. Systemet er utviklet i et forsknings- og utviklingsprosjekt som et fransk-norsk samarbeid. LiTuWa er per mai 2018 ikke benyttet som permanent løsning i kommersielt prosjekt, men to testkonstruksjoner er bygget. Prinsippet er vist i figur 1.1. Støttekonstruksjonen består av en vegg der tuber av geotekstil fylt med Leca lettklinker er stablet oppå hverandre. Tubene er forankret i tilbakefyllingen ved hjelp av et geotekstil som festes til hver tube, og prinsippet armert jord utnyttes. Lettklinker blåses inn i tubene lagvis, ved hjelp av en spesialkonstruert slede og dyse på stedet. Tilbakefyllingen installeres underveis. For hver tube som fylles, komprimeres konstruksjonen. Tubene har en teoretisk diameter på 60 cm, men komprimering reduserer høyden. LiTuWa har en frittstående frontløsning, der ulike fasader kan monteres. Konstruksjonen kan dermed enkelt tilpasses omkringliggende miljø. LiTuWa har en betydelig lavere tyngde enn konvensjonelle støttekonstruksjoner og fyllinger. Det gjør konseptet særlig egnet i områder med dårlige grunnforhold. Den kan bygges med inntil 90° helning, og tubene fylles på stedet. Dette gjør at byggeprosessen krever forholdsvis lite areal (Finseth et al., 2013).

I forbindelse med utviklingen av LiTuWa, er det nødvendig å studere tubenes oppførsel ved belastning. Dette er viktig for å bestemme forventede deformasjoner ved belastning, og dermed kunne beregne nødvendig antall tuber for å oppnå planlagt høyde i konstruksjonen.



Figur 1.1: Prinsippkisse av LiTuWa-systemet (Górniak, 2013)

1.2 Problemstilling

Denne rapporten fokuserer på oppførselen til tubene i LiTuWA ved påført vertikal belastning, både ved numerisk FEA (endelig-elementmetodeanalyse) og belastningsforsøk. Problemstillingen er definert som følgende:

1. Hvordan er oppførselen til tuber av geotekstil fylt med lettklinker ved vertikal belastning, og hvilke faktorer påvirker oppførselen?
2. Hvilken stivhet kan forventes i tuber av geotekstil med ulik aksialstivhet fylt med lettklinker.

1.3 Formål og omfang

Formålet med oppgaven er å lage en pålitelig numerisk modell av en tube, og studere oppførselen av denne ved ulike innkapslingsmaterialer og lastnivå. Ut fra dette kan forventede deformasjoner av tuber ved belastning bestemmes, avhengig av aksialstivheten i geotekstilet.

Omfanget er begrenset til å studere oppførselen til tuber under vertikal belastning, både i laboratorium og ved numerisk analyse. I laboratorium studeres tuber med gummi som innkapslingsmateriale, grunnen til det er at gummi er svært elastisk og tøyninger oppnås ved forholdsvis lave strekkspenninger sammenlignet med geotekstiler. Numeriske analyser utføres i PLAXIS 2D. Resultater fra laboratorieforsøk anvendes for å kalibrere parametre i modellen. Videre lages en modell med form som angitt i Górniak (2013) etter inn-

blåsing av lettklinker, og hvor innkapslingsmaterialet har stivhet som oppgitt for anvendte geotekstiler i tidligere utført belastningsforsøk.

1.4 Tidligere relevante studier

Materialoppførselen til lettklinker er godt dokumentert gjennom tidligere analyser, både i laboratorium og i felt. Blant annet er eksisterende tilgjengelige data som omhandler lett-klinkers materialegenskaper samlet i et utvidet produkttestingprogram utført av SINTEF, Maxit group og Sveriges Tekniska Forskningsinstitut (SP). Supplerende forsøk er gjort for en mer fullstendig materialbeskrivelse (Høva og Gylland, 2009b). Også materialegenskapene til ulike typer geotekstiler er studert tidligere. I et doktorgradsstudie utført i Frankrike av Joanna Górniak, er mange aspekter ved LiTuWa-konstruksjonen studert, blant annet er en instrumentert testkonstruksjon bygget og testet i Borge i Østfold. Fysiske forsøk som tidligere er utført relatert til LiTuWa er:

- Testing av ulike metoder for å fylle tubene
- Belastningsforsøk
- Komprimeringsforsøk
- Fullskalaforsøk

Tre ulike innblåsingsmetoder er testet, og metoden som er mest skånsom for materialene og gir den mest uniforme tuben er funnet. I belastningsforsøket er høyde/breddeforholdet av tubene ved ca 30 kN vertikal belastning bestemt. I komprimeringsforsøket er nødvendig komprimering funnet, og i fullskalaforsøket er konstruksjonens oppførsel ved belastning studert (Górniak, 2013).

1.5 Disposisjon

Oppgaven er videre delt inn i følgende kapitler:

Kapittel 2 er et litteraturstudie som tar for seg beskrivelse av LiTuWa, inkludert tidligere utførte studier på konstruksjonen, samt en beskrivelse av egenskaper og bruksområder for ulike typer geosynteter og lettklinker. Kjemisk og fysisk interaksjon mellom disse materialene er også beskrevet. Kapittelet tar i tillegg for seg teori om egenskaper i gummimaterialer, ettersom gummi er anvendt i utført belastningsforsøk. Deler av kapittel 2 er modifisert etter prosjektoppgave utført av forfatteren selv høsten 2017.

Kapittel 3 tar for seg en beskrivelse av grunnleggende teori, og inkluderer jordmodellen Mohr Coulomb, elastoplastisitet, elementmetode anvendt i geoteknikk og elementmetodeverktøyet PLAXIS 2D.

Kapittel 4 gir en beskrivelse av utført belastningsforsøk, og presenterer resultater fra dette.

Kapittel 5 gir en beskrivelse av numerisk modellering av lettklinker innkapslet i et gummi-materiale, samt resultater sammenlignet med belastningsforsøk fra kapittel 4.

Kapittel 6 beskriver numerisk modellering av lettklinker innkapslet i stivere materiale, med aksialstivhet tilsvarende aktuelle geotekstiler. Modellen er tilpasset oppgitt form for tuber, der lettklinker er blåst inn i tuben. Resultatet er presentert, og sammenlignet med resultater fra belastningsforsøk utført av Górnjak (2013).

Kapittel 7 gir en diskusjon av resultater funnet i kapittel 4, 5 og 6.

Kapittel 8 gir en kort oppsummering av resultater og endelige konklusjoner funnet i arbeidet. Forslag til videre arbeid presenteres.

Enkelte utledninger, beregninger og registrerte data fra belastningsforsøk er gitt i vedlegg.

Kapittel 2

Litteraturstudie

2.1 LiTuWa-konstruksjonen

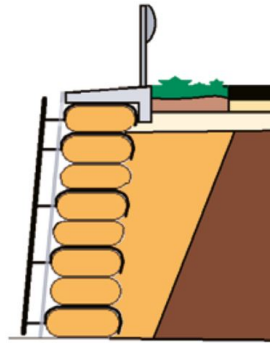
2.1.1 Innledning

LiTuWa-konstruksjonen er en lett støttekonstruksjon der støtteveggen består av tuber av geotekstil, fylt med lettklinker. Veggen er forankret i en tilbakefylling ved utnyttelse av prinsippet armert jord. Ulike fasadeløsninger kan monteres i front for å tilpasse konstruksjonen estetisk til nærmiljøet. Geotekstilene anvendt i prosjektet er produsert av franske Texinov (Finseth et al., 2013).

2.1.2 Prinsippet LiTuWa

Tubene installeres lagvis, der lettklinker blåses inn i sirkulære tuber av geotekstil på byggeplassen. Geotekstiltuber med en tett ende tres på en spesialkonstruert slede, og lettklinker blåses inn med en dyse fastkoblet til sleden. Etterhvert som tuben fylles opp, dras sleden kontinuerlig tilbake med vinsj. For hver tube som fylles, installeres en tilbakefylling. Armeringsmaterialet festes så til tuben, før tuben og tilbakefyllingen komprimeres (Finseth et al., 2013). Armeringens lengde og styrke dimensjoneres ut fra prinsipper for armert jord, se Håndbok for armert jord og fyllinger (De geotekniske foreningene i Norden, 2006). Tilbakefyllingen er primært lettklinker, men også granulære masser kan benyttes.

Det er utviklet en frittstående fasadeløsning, hvor ulike fronter kan monteres. Konstruksjonen kan dermed tilpasses ulike miljø estetisk. Frontsystemet består av vertikale stålstendere forankret i både tilbakefyllingen og et fundament i bunnen. Fasaden monteres direkte i stenderne. Prinsippet er vist i figur 2.1 (Finseth et al., 2013).



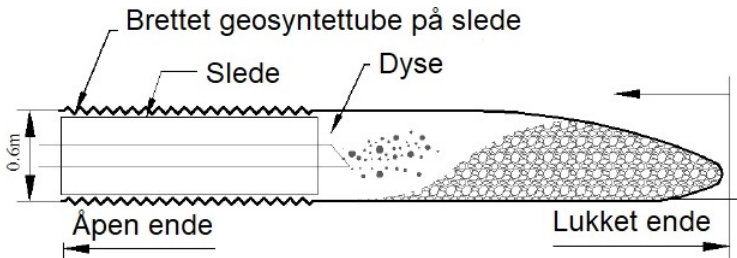
Figur 2.1: Fasadestystemet i LiTuWa (Finseth et al., 2013).

Det er i doktorgradsavhandlingen Górnjak (2013) utført ulike forsøk og studier for å vurdere byggemetode og egenskaper. Det er undersøkt hvordan tubene bør fylles og nødvendig komprimeringsenergi for å oppnå tilstrekkelig komprimering. Det er også utført belastningsforsøk for å studere effekten av vertikal belastning. Metoder og resultater av tidligere studier er presentert kort nedenfor.

2.1.3 Innblåsingsprosesser

I doktorgradsavhandlingen til Górnjak (2013) er ulike metoder for å fylle tubene sammenlignet. Effekten av to blåsetrykk er vurdert, 0,8 og 2 bar. I tillegg er innblåsning med dyse i fast posisjon sammenlignet med innblåsning der dysen dras mot den åpne enden etterhvert som tuben fylles. Dette er illustrert i figur 2.2. Totalt tre metoder er testet:

- Metode A: Lavt blåsetrykk og dyse i konstant posisjon (LTS)
- Metode B: Høyt blåsetrykk og dyse i konstant posisjon (HTS)
- Metode C: Lavt blåsetrykk og dyse i bevegelse.

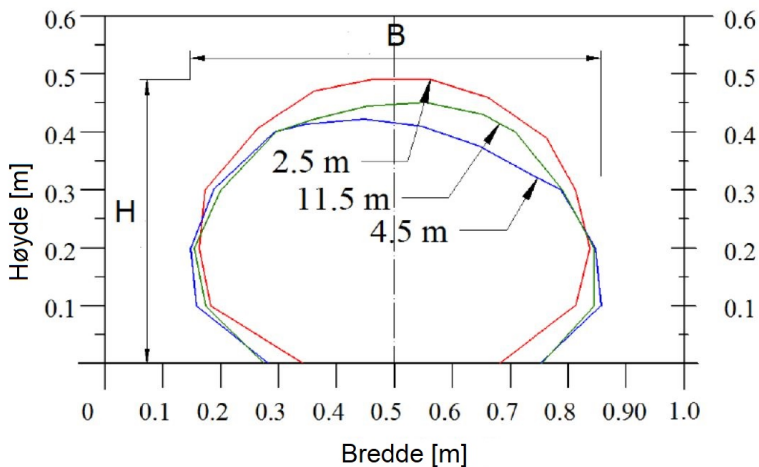


Figur 2.2: Innblåsning av lettlinker i tuben ved fylling fra et bevegelig punkt (Górnjak, 2013)

Fylling fra et fastholdt punkt (metode A og B) resulterte i redusert strekkstyrke i geosynte-

tet i tuben. I tillegg ble mengden lettlinker ujevnt fordelt i tuben, noe som ga et ujevnt tverrsnitt. Metode A økte bulkdensiteten til lettlinkeren med 20–30%, mens metode B økte bulkdensiteten med 80–100% som følge av nedknusing av materiale. Innblåsningsmetode B produserte en betydelig større mengde støv og finstoff, på grunn av det høye blåsetrykket (Górniak, 2013).

Ved innblåsing med metode C, hvor dysen er i bevegelse, blir lettlinkeren fordelt jevner i tuben. Dette gir et mer uniformt tverrsnitt langs tuben. I tillegg gjør metoden det mulig å fylle lengre tuber. Effekten av innblåsningsmetode C på lettlinkeren er ikke dokumentert i avhandlingen. I figur 2.3 er tubens fasong ved innblåsningsmetode C vist. Fasongen varierer, som figuren viser, noe med avstand til tubens lukkede ende. Metode A og B gir større variasjon i tverrsnitt langs tuben. Det konkluderes med at metode C med innblåsing fra et punkt i bevegelse er den mest hensiktsmessige løsningen (Górniak, 2013). Det er mulig å produsere inntil 30 m lange tuber, og fylle de med en hastighet på rundt 2–3 m per minutt (Finseth et al., 2013).



Figur 2.3: Tubens form etter innblåsing med metode C, avstand til tubens lukkede ende er angitt.

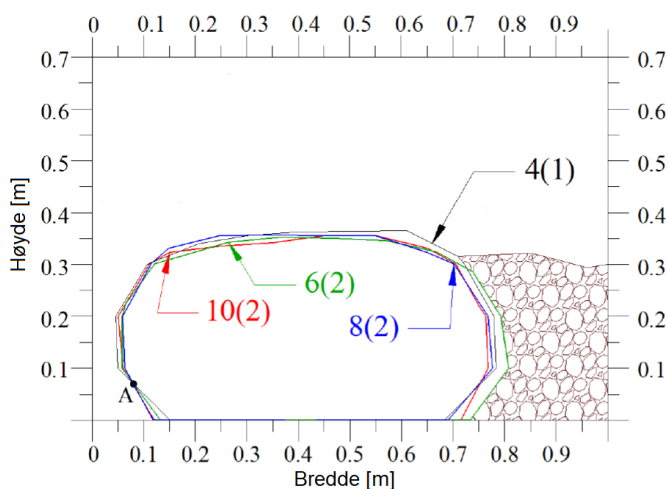
2.1.4 Komprimeringsforsøk

For å sikre et jevnt tverrsnitt langs tuben, samt unngå ujevne deformasjoner og sikre best mulig stabilitet i konstruksjonen, må tubene og tilbakefyllingen komprimeres underveis i byggeprosessen. I Górniak (2013) er det utført komprimeringsforsøk på tuber med tilbakefylling av lettlinker for å bestemme nødvendig komprimeringsenergi. I forsøket ble det benyttet en 92 kg *Dynapac LF 82* vibroplate. Tubene ble fylt med innblåsningsmetode C, lavt blåsetrykk og dyse i bevegelse. Geotekstilet anvendt i forsøket er av typen GT PES 55, TMS PP 50 eller GT PP 50, materialegenskaper er gitt i vedlegg D. Norsk Leca 10–20 ISO er brukt, materialegenskaper er gitt i kapittel 2.2.

Det ble totalt installert to rader med tre tuber i høyden i hver rad. Mellom radene ble en

tilbakefylling av lettklinker fylt opp lagvis for hver tube som ble installert i høyden. Både tuben og tilbakefyllingen ble komprimert for hvert lag. Fasongen på tubene ble registrert både etter fylling og etter komprimering. Tubene ble delt inn i fire soner, hvor sonene ble komprimert med henholdsvis 4, 6, 8 og 10 passeringer. Etter at alle tre tubene var ferdig komprimert, ble tilbakefyllingen og de to øverste tubene fjernet. Formen til tuben i bunnen ble igjen registrert for å bestemme effekten av overliggende tuber og komprimering av disse. Til slutt ble det utført densitetsmåling og sikteanalyse av lettklinkeren inne i tubene for å vurdere effekten av innblåsing og komprimering.

Resultatet viser at tuben i bunnen har omtrent samme høyde etter at to overliggende tuber er installert og komprimert, og deretter fjernet, som etter at tuben kun var utsatt for komprimering. Etter fire passeringer med vibroplate, gir ytterligere passeringer minimal effekt på tubens høyde. I figur 2.4 er tubens tverrsnitt vist for 4, 6, 8 og 10 passeringer med vibroplate, etter at to overliggende tuber er fjernet. Det vil si at fire passeringer med vibroplate gir tilnærmet optimal lagringstetthet. Registrert endring i omkrets og areal i forhold til en perfekt sirkel med diameter 0,6 m er gitt i tabell 2.1.



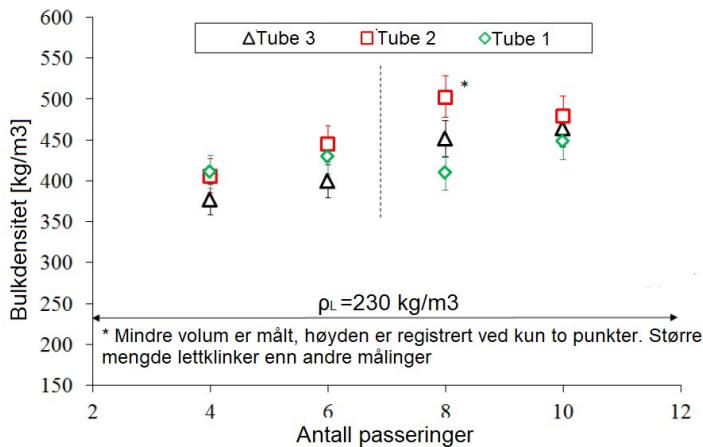
Figur 2.4: Tubens tverrsnitt etter henholdsvis 4, 6, 8 og 10 passeringer med vibroplate, etter at to overliggende tuber er fjernet (Górniak, 2013)

Tabell 2.1: Endring i areal og omkrets ved ulik komprimering, etter at tube 2 og 3 er fjernet (Górniak, 2013).

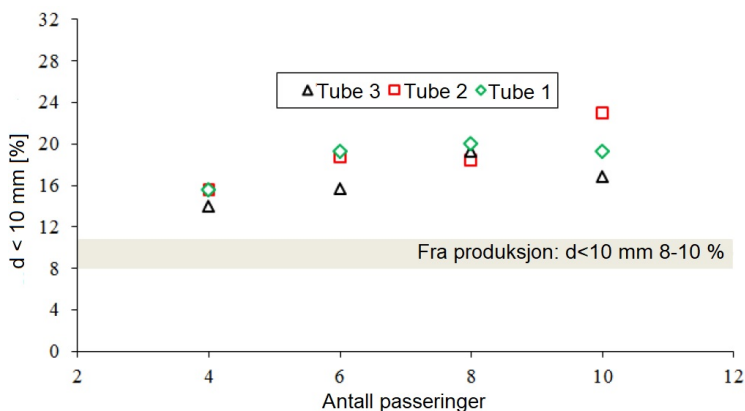
Antall passeringer	Endring i areal	Endring i omkrets
4	-7,9 %	+3,0 %
6	-7,3 %	+3,4 %
8	-9,3 %	+3,4 %
10	-12,6 %	+2,5 %

Resultatet fra densitetsmåling og sikteanalyse er vist i figur 2.5 og 2.6. Trenden viser at bulkdensiteten til lettklinkeren øker noe med antall passeringer. Det er ikke utført sikteana-

lyse eller densitetsmåling på lettklinker fra tuber etter innblåsing med metode C, før komprimering. Det er derfor ikke mulig å vurdere hvordan komprimering isolert påvirker materialet i dette forsøket. Densiteten er beregnet ut fra høyden på tuben og tyngden på lettklinkeren inne i tuben, beregninger og eventuelle antakelser er ikke beskrevet. Påliteligheten av resultatet kan dermed ikke vurderes.



Figur 2.5: Bulkdensitet for ulike antall passeringer. Tube 1 ligger i bunnen, tube 2 i midten og tube 3 øverst (Górniak, 2013).



Figur 2.6: Andel korn mindre enn 10 mm. Tube 1 ligger i bunnen, tube 2 i midten og tube 3 øverst. (Górniak, 2013).

Sikteanalyse viser at andel korn med diameter mindre enn 10 mm øker noe med antall passeringer med vibroplate. Resultatet er vist i figur 2.6. Det er gitt fra fabrikk at andelen korn med kornstørrelse mindre enn 10 mm er 8–10%. Det er ingen tydelig sammenheng mellom tubens plassering i høyden, og andel knuste korn. Andel korn med diameter mindre enn 10 mm etter fylling av tubene er ikke registrert. Det er derfor ikke mulig å vurdere hvor

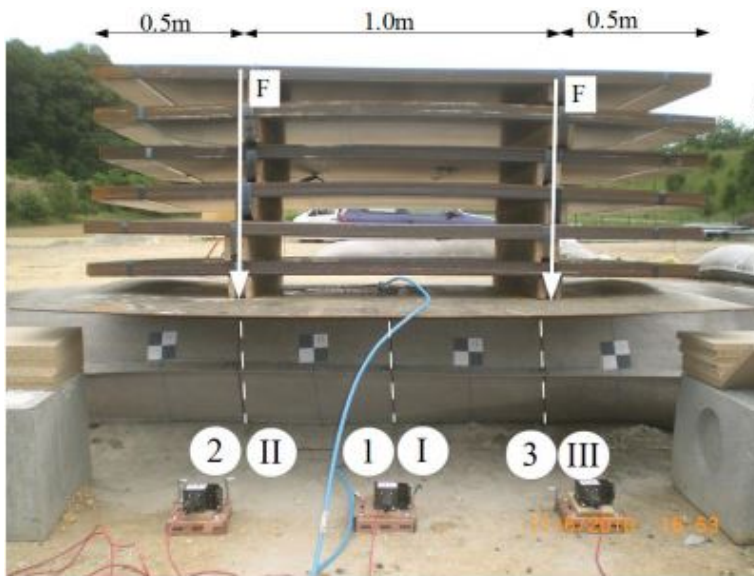
stor andel av nedknutningen som skyldes fire passeringer med vibroplate, og hvor stor andel som skyldes innblåsing.

2.1.5 Belastningsforsøk

I Górnaiak (2013) er det utført belastningsforsøk på tuber av geosyntet fylt med lettklinker av typen Avelar fra Portugal i 10–20-fraksjonen. Forsøket er utført på tre ulike geosyntet-produkter produsert av franske Texinov, TMS PP-PVA 72, TMS PVA 70 og TMS PP 64. Materialeegenskaper er gitt i vedlegg D. Hensikten med forsøket var å studere oppførselen til tubene ved belastning. Tubene ble fylt med metode B, HTS med fastholdt dyse. Det vil si at egenskapene til lettklinkeren inne i tubene vil avvike fra egenskapene ved fylling med metode C, som i kapittel 2.1.3 ble vurdert til å være den mest skånsomme metoden. Innblåsing gir et ujevnt tverrsnitt langs tuben, og tubene komprimeres ikke før belastning. Tubene er instrumentert med lastcelle i toppen og i bunnen av tuben. Tre deformasjonsmålere (displacement wire transducer) er installert rundt tubens omkrets med 0,5 m avstand. Tubenes fasong etter fylling og etter belastning er registrert med en 3D laserscanner. Forsøket ble utført på følgende måte:

- Fylling av tube med innblåsingsmetode B.
- Registrering av tubens form med 3D laserscanner.
- Innledende registreringer av lastceller og deformasjonsmålere, før belastning.
- Installasjon av støtteplate med lastcelle, som totalt gir en belastning på 0,41 kN/m.
- Kontinuerlig registrering av spenning og tøyning i geotekstilet med deformasjonsmålere.
- Trinnvis belastning med 1,0 m · 2,0 m stålplater.
 1. 2 stålplater: $F_v = 8,20$ kN/m
 2. 4 stålplater: $F_v = 16,40$ kN/m
 3. 6 stålplater: $F_v = 22,96$ kN/m
 4. 8 stålplater: $F_v = 30,34$ kN/m
- Stabilisering av verdier mellom hvert lasttrinn for all instrumentering
- Registrering av endelig form ved teoretisk belastning med 30,34 kN/m, tilsvarende omtrent 100 kPa.
- Sikteanalyse og bestemmelse av løs densitet for lettklinkermaterialet fra tubene etter belastning.

Figur 2.7 viser hvordan forsøket er gjennomført, og tverrsnittsregistreringenes posisjon. Som figuren viser er belastningen påført som punktlaster over en stiv flate. Det er derfor mulig at tverrsnitt 2 og 3 påføres en større belastning enn tverrsnitt 1, avhengig av støtteplatens stivhet.



Figur 2.7: Belastningsforsøk. 1, 2 og 3 viser hvor 3D laserscanner registrerer tverrsnittet. I, II og III er hvor deformasjonsmålerne er plassert. Over og under tverrsnitt 1 er lastcelle plassert (Górniak, 2013).

Resultatet fra belastningsforsøket er presentert som høyde/breddeforholdet etter fylling av tubene og etter belastning med 30,34 kN/m, gitt i tabell 2.2. Tabellen viser at høyde/breddeforholdet varierer langs tuben, hvor tverrsnitt 3 har lavest høyde/breddeforhold for to av tre geotekstilmaterialer. Det er notert at belastningsplatene heller i retning av dette tverrsnittet, noe som kan gi høyere belastning og dermed større deformasjon.

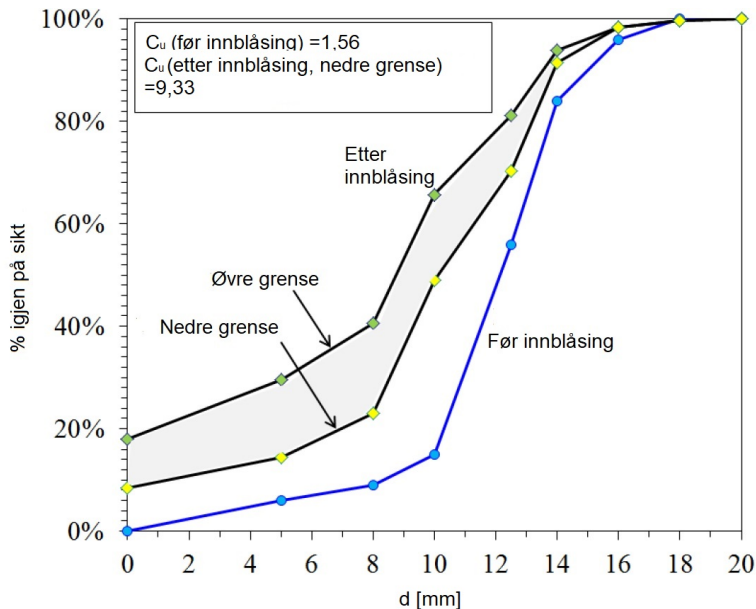
Tabell 2.2: Høyde/breddeforhold før og etter 30,34 kN/m belastning for tverrsnitt 1, 2 og 3 (se figur 2.7) for tre tuber av ulik geotekstil fra Texinov målt med 3D laserscanner (Górniak, 2013).

Geosyntet	Før belastning			Etter belastning		
	2	1	3	2	1	3
Tverrsnitt						
TMS PP-PVA 72	0,73	0,73	0,75	0,55	0,56	0,54
TMS PVA 70	0,66	0,68	0,63	0,57	0,56	0,54
TMS PP 64	0,68	0,68	0,68	0,57	0,56	0,54

Tubenes omkrets er målt etter fylling av tubene, samt etter belastning. Dette er gjort både ved hjelp av 3D laserscanner og deformasjonsmålere. Grunnet problemer med deformasjonsmålerne, anses ikke resultatet derfra som pålitelige. Resultatet fra laserscanneren viser at endringen i omkrets er mellom +0,2 % og +3,4 %. Omkretsen avhenger betydelig av tubens form før belastning, og økningen av omkrets er større for tverrsnittene med antatt høyest belastning. Det samme gjelder for endringen av tverrsnittenes areal.

I figur 2.8 er siktekurven til lettklinkermaterialet etter innblåsing sammenlignet med korn-

gradering gitt for upåvirket materiale. Det er ikke gjennomført sikteanalyse etter belastning. Innblåsingen er utført med høytrykkssystemet, med fastholdt dysse. Denne metoden er vurdert til å føre til nedknusing av materialet, og er ikke anbefalt. Merk at % igjen på sikt er oppgitt på y-aksen, ikke vekt% d, og at horisontal skala ikke er logaritmisk.



Figur 2.8: Sammenligning av siktekurve for Avelar lettlinker 10-20 fra fabrikk og etter innblåsning i tubene med innblåsingsmetode B (HTS) (Górniak, 2013).

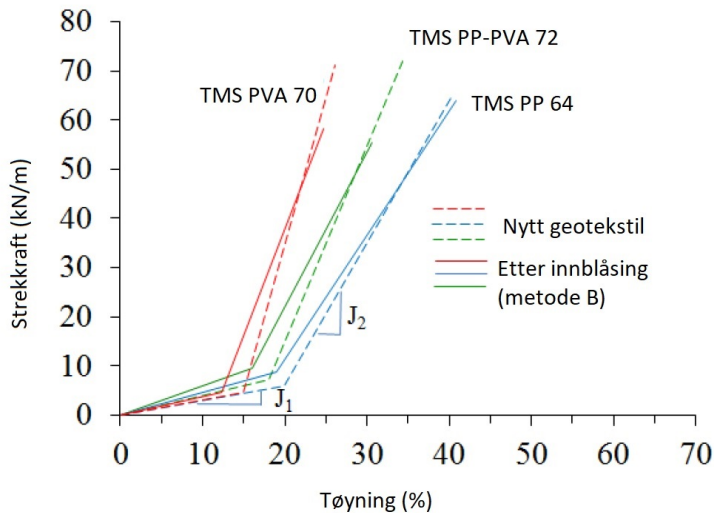
Lettlinker er tatt ut fra geosyntetene for å vurdere kvaliteten. Bestemmelse av løs densitet er utført både på materialet i belastet og i ubelastet del. I tabell 2.3 er resultatet presentert. Initiell løs densitet for Avelar lettlinker 10-20 mm er 244 kg/m^3 (Wood og Høva, 2009) ved 7 % vanninnhold. Den dynamiske prosessen innenfor tuben ved innblåsning gjør at materialet knuser, og det produseres støv og finstoff. Det er observert at innblåsingsprosessen fører til en overkomprimering av lettlinkermaterialet, etter at materialet tas ut fra geosyntetet er det fortsatt ikke i løs tilstand. Også stor økning i løs densitet i ubelastet del viser at innblåsingsmetoden i betydelig grad påvirker materialet.

Tabell 2.3: Løs densitet for lettlinker i tubene for belastet og ubelastet del. Densitet for upåvirket lettlinker skal fra tidligere tester være omkring 244 kg/m^3 (Górniak, 2013).

Geosyntet	Løs densitet [kg/m^3]	
	Ubelastet del	Belastet del
TMS PP-PVA 72	467 ± 22	474 ± 21
TMS PVA 70	481 ± 22	454 ± 21
TMS PP 64	465 ± 21	451 ± 21

Løs densitet er lavere for materiale fra belastet del i to av tre tilfeller i tabell 2.3 sammenlignet med materiale fra ubelastet del. Mulige årsaker til dette er ikke diskutert i Górnjak (2013).

Etter belastningsforsøket er det utført strekkforsøk på prøver av geotekstilmaterialene. Prøvene er fra øvre del av tuben, fra både belastet og ubelastet del. Geotekstilene er deformert etter testing, og strukturen følger ikke opprinnelig retning. Resultatet viste ingen tydelig effekt av belastning, men innblåsingsprosessen (metode B) fører til noe økning i innledende enaksial strekkstivhet (J_1), mens sekantstivheten (J_2) reduseres noe, vist i figur 2.9.



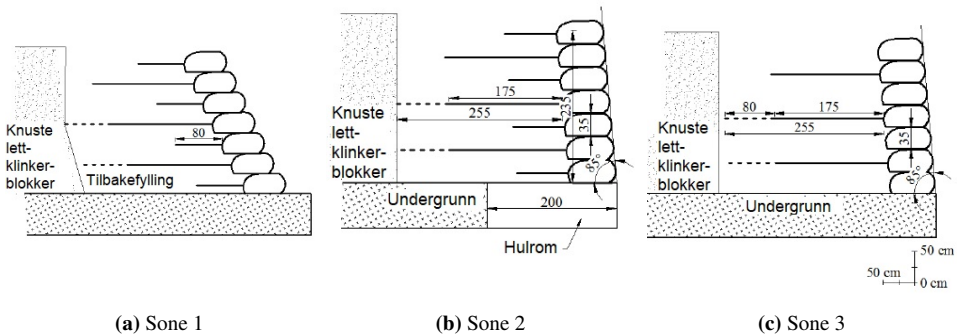
Figur 2.9: Effekt av innblåsingsmetode på stivhet fra enaksialt strekkforsøk (Górnjak, 2013).

2.1.6 Fullskala testkonstruksjon

Det er bygget en testkonstruksjon ved fabrikkanlegget til Leca i Borge i Østfold. Konstruksjonens egenskaper og byggemetode, samt dens egenskaper ved belastning er testet og dokumentert. Konstruksjonen er instrumentert.

Testkonstruksjonen er 2,35 m høy, og består av sju tuber. Hver tube har 0,6 m diameter, og er omtrent 0,35 m høy etter komprimering. Tubene i konstruksjonen er fylt med innblåsingsmetode C. Dette er samme metode som ble benyttet i komprimeringsforsøket. Komprimeringen er utført med samme utstyr som komprimeringsforsøkene, *Dynapac LK 82*, 90,2 kg. Konstruksjonen er bygget med norsk Leca lettklinker 10–20 ISO. Konstruksjonen er delt inn i tre soner, som vist på figur 2.10. Sone 1 er bygget med omtrent 75° helning, sone 2 og 3 har 90° helning. Sone 2 er forankret med både lange (2,55 m) og middels lange (0,8 m) geotekstilarmeringer, mens sone 3 er forankret med bare lange geotekstilarmeringer. Sone 1 er forankret som sone 2. Under nederste tube i sone 2, er det gravet et hull

som er fylt igjen med lettklinker, og dekket med en geotekstilduk. Lettklinkeren i hullet er senere fjernet for å teste konstruksjonens reaksjon på redusert understøttelse, som for eksempel ved undergraving eller setninger.

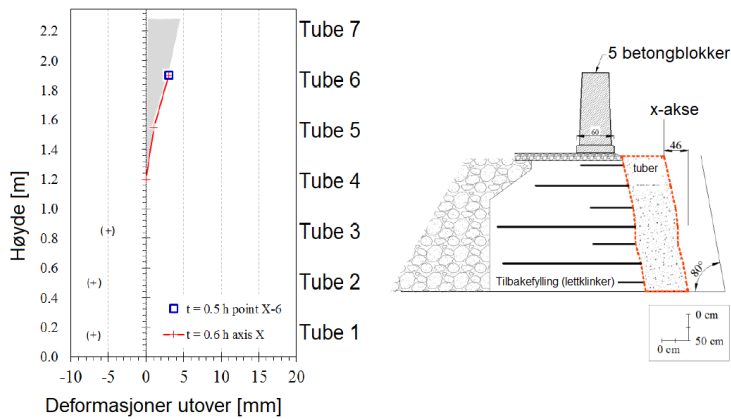


Figur 2.10: Prinsippskisse av de ulike sonene i testkonstruksjonen (Górniak, 2013)

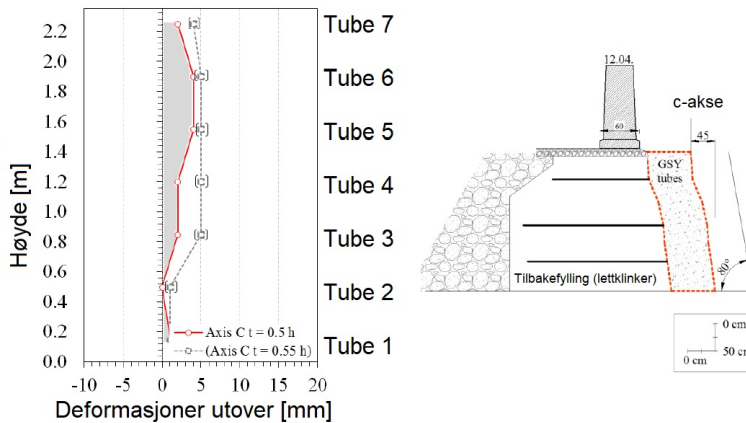
Konstruksjonen er instrumentert for å kartlegge tubenes bevegelse under bygging og ved belastning av ferdig konstruksjon. Målingene er utført ved hjelp av en totalstasjon plassert foran veggen, hver tube i veggen er instrumentert med faste målepunkter. Posisjonen til punktene er registrert for hvert steg i byggeprosessen. I tillegg er det installert trykkceller over og under nederste tube, mellom tredje og fjerde tube fra bunnen, samt i tilbakefyllingen. Ved komprimering viser resultatet fra posisjonsmålinger med totalstasjon at tubenes høyde reduseres, samtidig som de deformeres horisontalt utover. Etter at overliggende tube er fylt og komprimert, er deformasjonene i tuben minimal gjennom byggeprosessen.

Belastningsforsøk er utført på de to vertikale delene av konstruksjonen (Sone 2 og 3). Sone 2 ble belastet med 5 betongblokker, plassert 0,8 m fra ytterkanten av tubeveggen. Hvert betongelement gir ca. 10,8 kN fordelt på $60 \cdot 60$ cm flate. Posisjonsmålinger av tube nr. 6 fra bunnen ble gjort etter 30 minutter og av hovedaksene etter 36 minutter. Dagen etterpå ble konstruksjonen belastet med ytterligere to blokker bak de gjenstående fem fra dagen før. Posisjonsregistreringer ble så utført, 18 timer etter at de første blokkene ble plassert. Deretter ble betongblokkene fjernet. Samme prosedyre ble gjort for sone 3. Til slutt ble massene i hullet under sone 2 fjernet, og posisjonen til målepunktene registrert.

Trykkcellene i konstruksjonen viser at spenningsøkningen er omtrent som teoretiske estimater. Teoretiske estimater er beregnet for trykkcellens plassering i veggen, med antatt spenningsfordeling på 38° , tilsvarende intern friksjonsvinkel for lettklinker, og 20 kN/m belastning (Górniak, 2013). Betongblokkene veier 20 kN/m^3 , og har en grunnflate på $60 \cdot 60 \text{ cm}^2$. Høyden er 150 cm, men blokkene er ikke rektangulære. Altså veier de mindre enn 10,8 kN, som gir 18 kN/m. De teoretiske estimatene er utført for 20 kN/m belastning. Dette gir ikke et konservativt teoretisk estimat på tubenes deformasjoner ved belastning av konstruksjonen. Posisjonsmålingene viser at veggen deformerer seg utover ved belastning i topp, og at deformasjonene er størst i øvre del av konstruksjonen. Deformasjonen er vist i figur 2.11 og 2.12 for henholdsvis sone 2 og 3 (Górniak, 2013).



Figur 2.11: Konstruksjonens deformasjoner ved belastning, sone 2 (Górniak, 2013).



Figur 2.12: Konstruksjonens deformasjoner ved belastning, sone 3 (Górniak, 2013).

Resultatet fra fjerning av massene i hullet under sone 2, viser at konstruksjonen kan opprettholde stabiliteten for dens egenvekt uten understøttelse over omtrent 2 m. De fire nederste tubene forskyves nedover. I figur 2.13 er konstruksjonens reaksjon på undergraving vist. Tallene representerer punktenes forskyvning millimeter. Bildet i bakgrunnen er brukt for å illustrere reaksjonen, det er ikke et referansebilde.



Figur 2.13: Konstruksjonens deformasjon ved undergraving, bildet i bakgrunnen er ikke et referansebilde (Górniak, 2013).

2.1.7 Tidligere numerisk analyse på geosyntettuber

I Górniak (2013) er det utført numerisk modellering av belastningsforsøk. Modelleringen er i 3D på 1 m lange geosyntettuber med diameter 0,6 m. I modellen er lettklinkermaterialet definert som partikulære diskrete elementer (DEM) og geotekstilet i form av trekantede elementer (FEM). Analyseverktøyet er ikke spesifisert.

Den numeriske analysen er utført i fire steg:

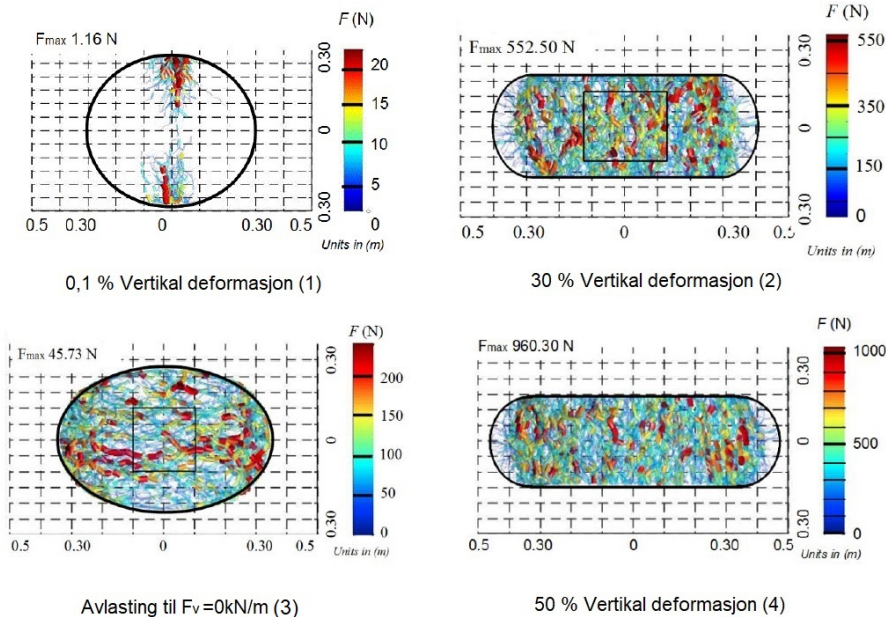
1. Fylling av tuben
2. Vertikal belastning til 30 % aksial deformasjon
3. Avlastning til null trykkrefter er oppnådd
4. Vertikal belastning til 50 % av vertikal deformasjon

Ved belastning oppstår det kontaktkrefter mellom lettklinkerkulene. Resultatet viser at kontaktkreftene øker ved belastning, og er størst der belastningen påføres. Se figur 2.14.

Effekten av ulike friksjonsforhold er vurdert:

- Uten friksjon
- Friksjon mellom geotekstil og lettklinker
- Friksjon mellom geotekstil og belastningsplate og bunnflate
- Friksjon mellom geotekstil og lettklinker, belastningsplate og underlag

Resultatet viser at friksjon mellom lettklinker og geotekstil har liten effekt på strekkspenninger i geotekstilet. Effekten av friksjon mellom tube og belastningsflate og underlag har betydelig effekt på strekkspenningene i tekstilet. Overflatene som er i kontakt med geotekstilet hindres i å bevege seg fritt ved trykkbelastning. Det fører til økte strekkspenninger i sidene av tuben, mens strekkspenningen i kontakt med flatene er lavere.



Figur 2.14: Fordeling av kontaktkrefter mellom granulære lettklinkerkorn i fire faser av beregningene. Rødt viser de største kontaktkreftene, skala til høyre for hver figur (Górniak, 2013).

Det er konkludert med at bæreevnen til tubene i hovedsak avhenger av strekkstivheten i geotekstilmaterialiet, men også friksjonsvinkelen og volumetrisk ekspansjon i lettklinkeren påvirker bæreevnen i følge Górniak (2013). Resultatet tyder på at høyere stivhet i geotekstilet hindrer ekspansjon av det granulære materialet inne i tuben. Ved avlastning er høyden kun en funksjon av materialparameterene til det granulære materialer, i hovedsak friksjon og volumetrisk ekspansjonskoeffisient (Górniak, 2013).

2.2 Lettklinker

2.2.1 Innledning

Løs lettklinker er et granulært materiale som produseres av leire. Leiren varmes opp til den ekspanderer og det dannes små porøse kuler med en hard overflate. Figur 2.15 viser hvordan løs lettklinker ser ut. Kulene har et høyt porevolum, lav densitet og høy styrke. I tillegg har materialet gode termiske egenskaper (Leca, 2017). I konstruksjonsformål brukes lettklinker som fyllmateriale, isolasjon og i drenerende lag. Lettklinker er produsert av naturlig marin leire, og regnes derfor som et naturmateriale (Furuberg og Solheim, 2000). Norsk Leca lettklinker 10-20 ISO produsert på Rælingen er brukt i forsøkene i kapittel 4, og i LiTuWa-testkonstruksjonene bygget i Norge. Litteraturstudiet vil derfor fokusere på denne typen lettklinker.



Figur 2.15: Løs Leca lettklinker 10–20 ISO

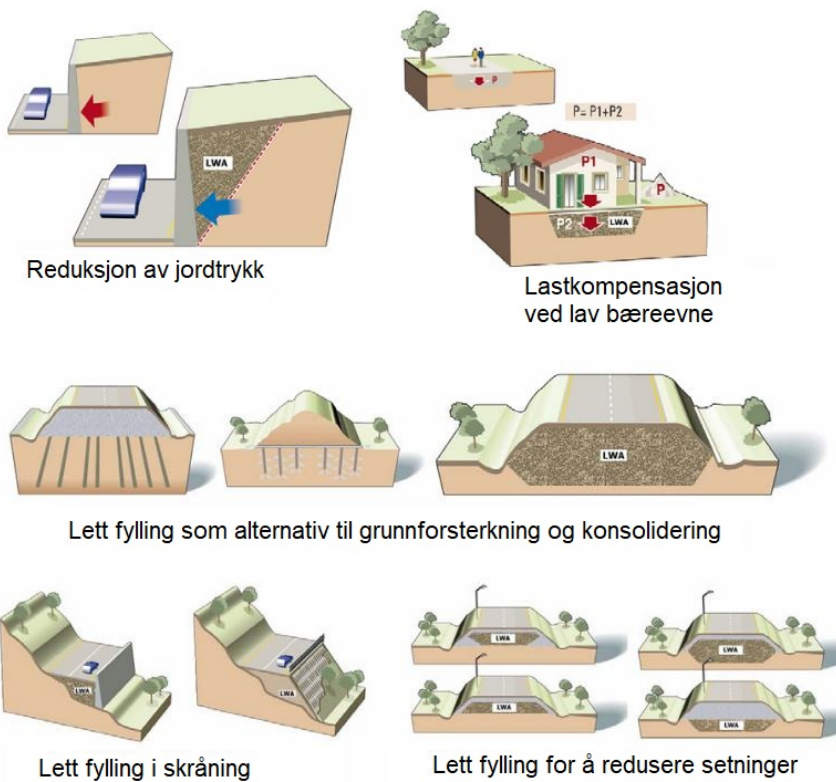
Lettklinker har egenskaper som gjør materialet velegnet i flere geotekniske formål. Figur 2.16 viser ulike anvendelsesområder for løs lettklinker. Lettklinker kan benyttes som stabilitetssikring på grunn av dens lave densitet. Det er også vanlig å anvende lettklinker for å forebygge setningsutvikling som kan skade veg- og jernbane, ledninger og andre konstruksjoner. Materialet gir et lavt jordtrykk sammenlignet med konvensjonelle byggemasser. Kompensert fundamentering er også et vanlig bruksområde. Stedlige masser byttes ut med lettklinker for å redusere tyngde, og dermed oppnå tilnærmet setningsfri direktefundamentering ved dårlige grunnforhold. På grunn av materialets gode termiske egenskaper blir det ofte benyttet som isolasjonsmateriale for å hindre skader i veier, jernbaner, grøfter og kunstgressbaner som følge av frostutvikling (Leca, 2018).

2.2.2 Produksjon

For at leire skal ekspandere, må følgende to betingelser være tilstede (Riley, 1951):

1. Materialet må danne en glassaktig fase ved høye temperaturer. Denne må ha en viskositet som er høy nok til å forhindre at gasser slipper ut fra innsiden.
2. Materialet må inneholde substanser som frigir gass ved samme temperatur som den glassaktige fasen oppstår.

I Norge produseres lettklinker ved å blande leire, vann og organisk materiale. Blandingene transporteres til en rotasjonsovn, hvor det tørkes og varmes opp til det ekspanderer (Valente og Vold, 2013). Temperaturen i rotasjonsovnen er inntil 1200° C. Høy temperatur fører til ekspansjon av leirematerialet, det dannes kuleformede korn med et hardt ytre skall, og en indre porøs kjerne (Statens Vegvesen, 2014). Produksjonsprosessen gir lettlinkerkulene varierende størrelse og form, med diameter mellom 0 og 32 mm. Siste del av produksjonen er sikting av lettlinkeren til ulike fraksjoner. (Chandra og Berntsson, 2002). De mest vanlige fraksjonene i Norge er 0-32, 0-2, 2-4, 4-10 og 10-20 (Valente og Vold, 2013). Figur 2.17 viser produksjonsprosessen.



Figur 2.16: Anvendelsesområder for løs lettklinker (Watn et al., U.Å.).

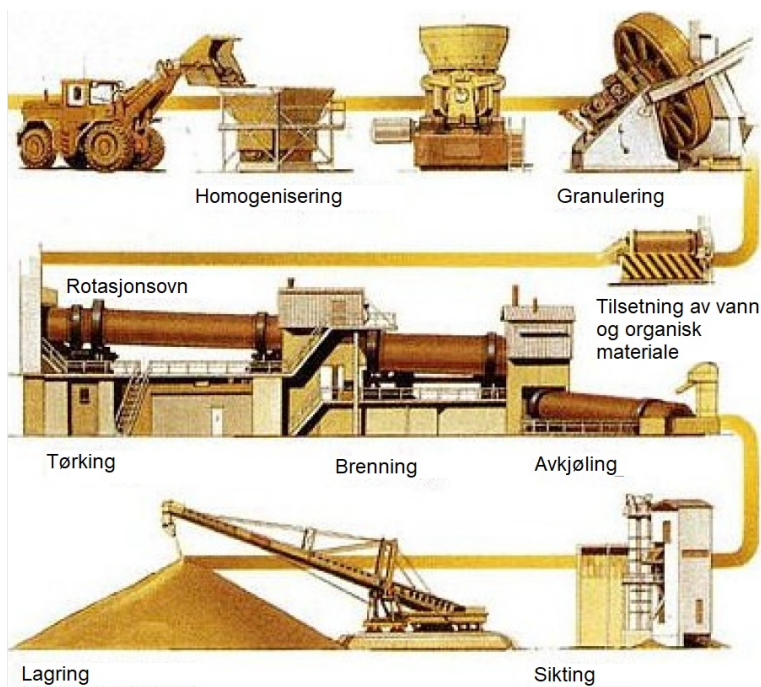
2.2.3 Mekaniske egenskaper

Lettklinker skiller seg fra tradisjonelle konstruksjonsmaterialer ved materialets lave densitet og høye styrke. I tillegg er materialet:

- Isolerende
- Drenerende
- Fuktsikkert
- Frostsikkert

Lettklinker har tilsvarende stivhet og friksjonsegenskaper som konvensjonelle byggematerialer for spenningsnivå lavere enn knusingsnivået. Dersom spenninger i lettklinkeren overstiger knusegrensen oppstår knusing. Knusing av et korn fører til at spenningene overføres til omkringliggende korn, som også knuser. For å unngå dette må spenningsnivået i lettklinkeren begrenses (Furuberg og Solheim, 2000).

I et utvidet produkttestingsprogram utført av SINTEF, Maxit Group og Sveriges Tekniska Forskningsinstitut (SP), er lettklinkers materialegenskaper bestemt ut fra eksisterende



Figur 2.17: Produksjon av lettklinker (Rapidbau, 2010)

tilgjengelige data (Høva og Gylland, 2009b). Disse egenskapene er benyttet som grunnlag for parameterbestemmelse i de numeriske modelleringene utført i PLAXIS 2D, i kapittel 5 og 6.

Tabell 2.4: Egenskaper for lettklinker 10–20 mm (Høva og Gylland, 2009b).

Egenskap	Verdi
Vanninnhold, w [%]	1
Løs bulkdensitet ρ_l [kg/m^3]	231
Friksjonsvinkel, ϕ [$^\circ$]	>37
Ødometermodul, M [kPa] ($\sigma_y = 0\text{--}50$ kPa)	26300
($\sigma_y = 50\text{--}150$ kPa)	10 000

Deformasjonsegenskaper

Permanente deformasjoner i lettklinker oppstår hovedsakelig av to mekanismer (Furuberg og Solheim, 2000):

1. Reorganisering av korn på grunn av skjærspenninger som overstiger elastisitetsgrensen

2. Knusing av korn forårsaket av høye spenninger

Deformasjonegenskapene til lettklinker er særlig viktig i veg- og banekonstruksjoner, hvor eventuelle deformasjoner forplanter seg til overflaten og forårsaker skade på vegdekkeket eller jernbanen. Forsøk utført av SINTEF på lettklinker, viser at permanente deformasjoner i lettklinker hovedsakelig kommer av reorganisering av korn. Testene indikerer også at elastisitetsgrensen er omtrent den samme som for konvensjonelle byggematerialer, men at elastisitetsgrensen er nærmere knusenivået for lettklinker som betyr at belastning opp mot elastisitetsgrensen gir større sannsynlighet for knusing av lettklinkerkuler, enn det vil gjøre for konvensjonelle byggematerialer (Furuberg og Solheim, 2000).

Lettklinker har høy motstandsevne mot skade fra gjentatte fryse- og tineprosesser samt aldring. Styrkeegenskapene til materialet påvirkes ikke av forurensning ved f.eks. oljeprodukter (Furuberg og Solheim, 2000).

Densitet

Densiteten til lettklinker varierer med komprimeringsgrad, fraksjon og vanninnhold. Tørr, løs bulkdensitet for Leca lettklinker 10–20 er omtrent 231 kg/m^3 . For lettklinker komprimert med vibrasjon til 12 % komprimering, i forhold til løseste lagring, er densiteten rundt 262 kg/m^3 .

Friksjonsegenskaper

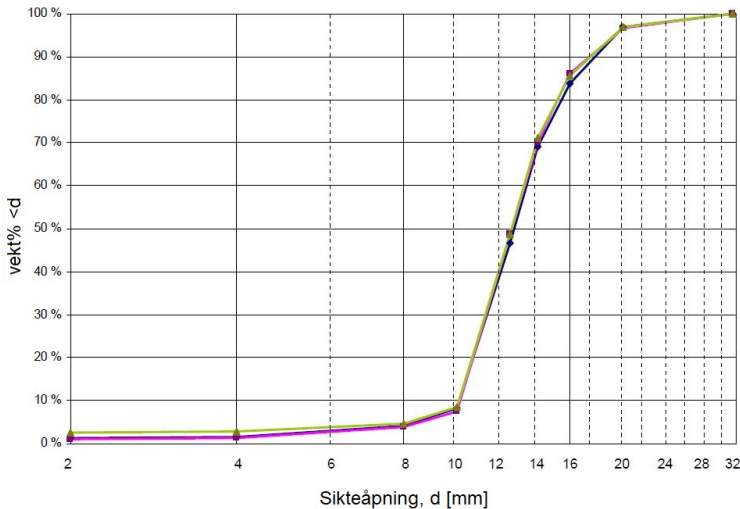
Statiske treaksialforsøk på ulike typer lettklinker er utført i henhold til prEN15732 for spenninger opp til 250 kPa. Fra resultatene i disse forsøkene er det observert at bruddvinkelen til lettklinker avhenger av densiteten, altså komprimeringen. Laveste observerte bruddvinkel er 37° , og høyeste observerte verdi er 48° . Resultatene viser også at den velgraderte 0–32-fraksjonen har høyere friksjonsvinkel enn 10–20-fraksjonen under tilsvarende forhold (Høva og Gylland, 2009a). I tabell 2.5 er friksjonsvinkelen til lettklinker presentert sammen med friksjonsvinkel for ulike jordarter (Emdal, 2014).

Tabell 2.5: Friksjonsvinkel for ulike jordarter (Emdal, 2014)

Jordart	Friksjonsvinkel ϕ [$^\circ$]
Lettklinker	37,0–48,0
Normalkonsolidert leire	16,7–31,0
Overkonsolidert leire	21,8–35,0
Silt	26,6–38,7
Sand	31,1–42,0
Morene	26,2–45,0

Korngradering

Korngraderingen til Leca lettklinker 10–20 funnet av SINTEF er vist i figur 2.18.



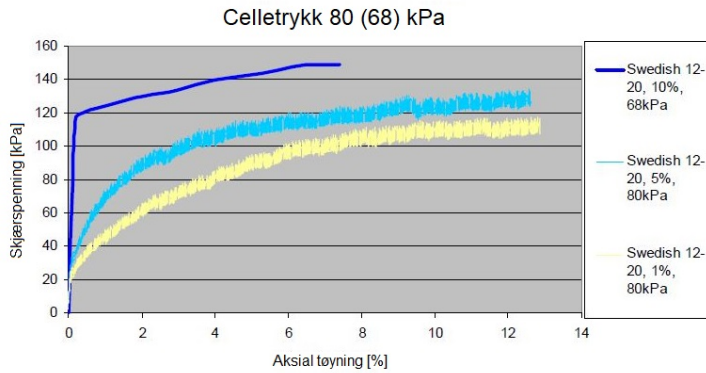
Figur 2.18: Kornfordeling Leca 10–20 (Høva og Gylland, 2009b).

Stivhet

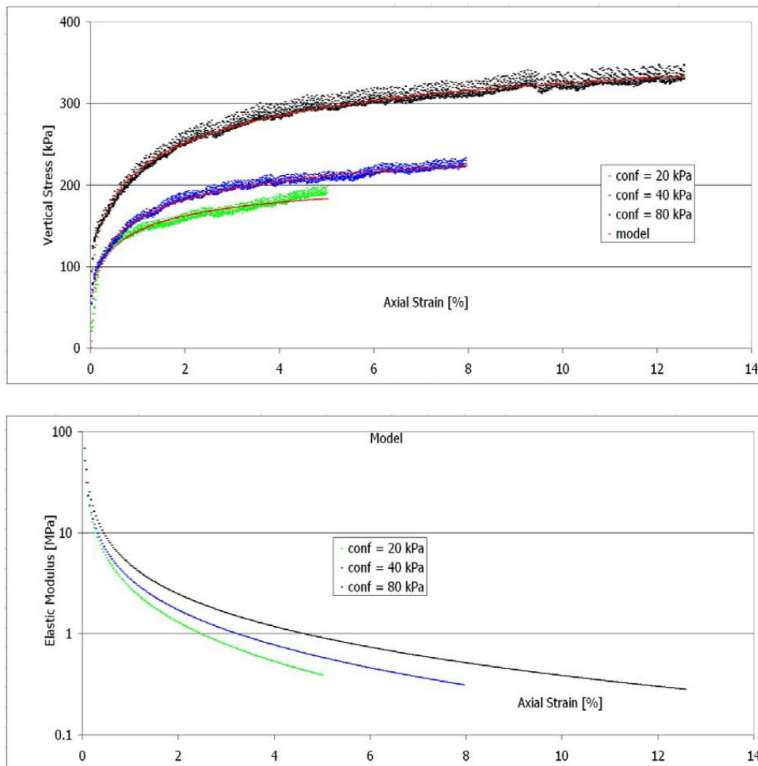
Treksialforsøk viser at stivheten til lettklinker i 10–20-fraksjonen avhenger betydelig av komprimeringsgraden. Figur 2.19 viser stivheten til svensk lettklinker 12–20 for 1, 5 og 10 % komprimering ved 80 kPa sideinnspenning for 1 % og 5 %, og 68 kPa for 10 % (Høva og Gylland, 2009b).

Sideinnspenningen innvirker også på materialets stivhet. Figur 2.20 viser spenning-tøyningskurve og beregnet elastisitetsmodul for svensk lettklinker 12–20 ved 5 % komprimering, for henholdsvis 20, 40 og 80 kPa sideinnspenning (Høva og Gylland, 2009b).

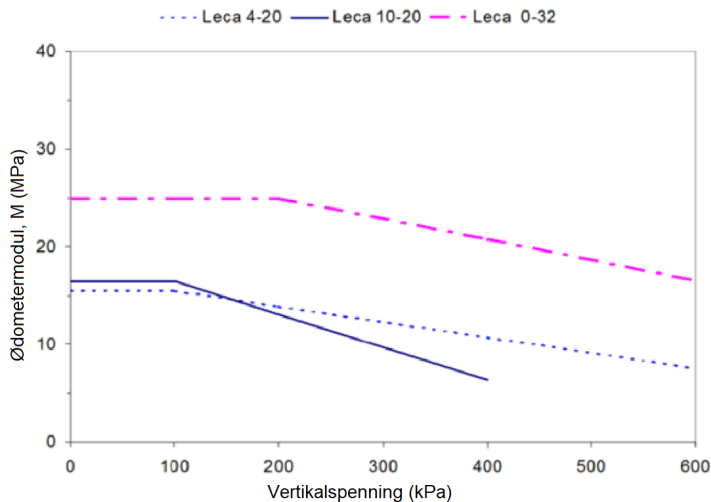
Idealiserte modulkurver for komprimert lettklinker i ulike fraksjoner er presentert i figur 2.21, etter ødometerforsøk i et ekstra stort ødometer. Den idealiserte ødometermodulen er konstant inntil spenningsøkning gir avskalling eller knusing av lettlinkerkulene. Når knusing oppstår, reduseres stivheten i materialet. Ved lavere spenningsnivå har materialet stivhet på nivå med tradisjonelle naturmaterialer som sand og grus. Løst lagret lettklinker har stivhet omtrent 1/3 av komprimert materiale (Furuberg og Solheim, 2000).



Figur 2.19: Spennings-tøyningskurver for ulike komprimeringsgrader og omtrent samme sideinnspenning (Høva og Gylland, 2009b).



Figur 2.20: Spennings-tøyningskurve og E-modul for svensk lettklinker 12–20 ved sideinnspenning 20, 40 og 80 kPa og 5 % komprimering (Høva og Gylland, 2009b)



Figur 2.21: Idealiserte ødometerkurver for lettklinker (Furuberg og Solheim, 2000).

2.2.4 Termiske egenskaper

På grunn av lettklinkerens gode isolasjonsegenskaper, er materialet velegnet til bruk som frostbeskyttelse. De termiske egenskapene til materialet avhenger av vanninnhold, temperatur og densitet. Absorpsjon av fuktighet øker den termiske konduktiviteten, men samtidig øker den volumetriske varmekapasiteten. Dette gjør at isolasjonsegenskapene ikke reduseres betydelig, grunnet økt volumetrisk varmekapasitet og lagring av latent varme som frysevarme (Furuberg og Solheim, 2000).

2.2.5 Konstruksjonsegenskaper

Lettklinkerens lave vekt og høye interne friksjonsegenskaper, gjør den forholdsvis enkel å håndtere. Flere metoder kan benyttes for å distribuere lettklinker (Furuberg og Solheim, 2000):

- Utdosing fra tipp
- Utlegging med gravemaskin fra bil eller tipp
- Blåsing fra bil med blåseaggregat

Lettklinker krever mindre komprimering enn granulære materialer på grunn av sfærisk kornform og lav vekt. Det er mulig å redusere volumet med inntil 10–12 % ved komprimering, sammenlignet med løseste lagring, uten å knuse materialet. Maksimalt anbefalt komprimeringstrykk er 50 kN/m². Doser, beltegående gravemaskin eller vibroplate benyttes vanligvis (Furuberg og Solheim, 2000).

2.3 Geosynteter

2.3.1 Innledning

Geosynteter er polymere produkter som benyttes sammen med jord, stein eller lignende materialer (Müller og Saathoff, 2015). Formålet er hovedsaklig armering, separasjon, filtrering, beskyttelse og erosjonskontroll (Watn, 1996). Rundt 95 % av geosynteter er laget av syntetiske polymerer. Ulike polymerer benyttes til ulike formål (Koerner, 2012). De vanligste polymerene i geosynteter er (van Santvoort, 1995):

- Polyetylen (PE)
- Polypropylen (PP)
- Polyamid (PA)
- Polyester (PET)

Det finnes flere ulike typer geosynteter, hvor egenskapene avhenger av geosyntetets funksjon. Tabell 2.6 viser ulike typer geosynteter, og hvilke funksjoner de i hovedsak har. Figur 2.22 viser ulike typer geosynteter.

Tabell 2.6: Hovedfunksjonene til ulike typer geosynteter (Koerner, 2012)

Type geosyntet	Separasjon	Armering	Filtrering	Drenering	Omslutning
Geotekstil	X	X	X	X	X
Geogitter		X			
Geonett				X	
Geomembran					X
Geokompositt	X	X	X	X	X

2.3.2 Ulike typer geosyntet

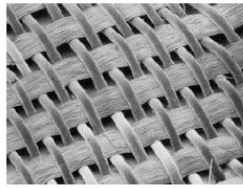
Geotekstiler

Geotekstiler er produsert av syntetiske fibre som er bundet sammen til fleksible, porøse tekstiler. De kan være vevd, ikke-vevd, filtet eller strikket. Det er viktig at de er porøse, så væsker kan flyte gjennom. Hovedfunksjonene er vist i tabell 2.6. Egenskapene til et geotekstil avhenger av polymer-, fiber- og tekstiltype (Koerner, 1998).

Polymermaterialet lages til fibre ved å smelte og deretter trykke materialet gjennom en spinndyse. Videre herdes eller forsterkes materialet med en av følgende tre metoder: Våt, tørr eller smeltet. Det er mest vanlig å benytte smeltemetoden, hvor materialet kjøles ned for å herde. Samtidig eller i etterkant strekkes det. Ved strekking organiseres molekylene i materialet på en ryddig måte. Dette gjør at diameteren reduseres, samtidig som styrken øker. Det fører også til redusert tøyning ved brudd, samt at modulen øker.



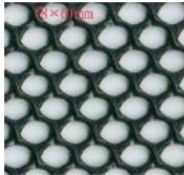
Ikke-vevd geotekstil



Vevd geotekstil



Strikket geotekstil



Geonett



Geogitter



Geomembran



Geokompositt

Figur 2.22: Ulike typer geosynteter (Górniak, 2013)

I geotekstiler benyttes ulike typer garn av polymerfibre. Flerfilamentgarn er garn med flere polymerer, dette kan også benyttes i geotekstiler. Flerfilamentgarn produseres ved å tvinne flere fibre sammen. Andre typer fibre er tau og flat film eller tape. Tau består av tusenvis av filamenter, mens film eller tape er produsert av kontinuerlige polymerark som skjæres til filamenter (Koerner, 1998).

Vevde geotekstiler produseres av tekstilvevemaskiner. Vevemetoden påvirker både fysiske, mekaniske og hydrauliske egenskaper. I ikke-vevde geotekstiler bindes fibre normalt sammen ved varmebinding, harpiksbinding eller nålefilting. Varmebindingsprosessen går ut på å smelte filamenter eller fibre sammen i krysningspunktene. Ved bruk av harpiksbinding, sprayer eller impregneres et fibernet med akrylharpiks, og etter herding dannes det bånd mellom fibre. Filtingsprosessen er den mest brukte bindemetoden. Fibernet sendes gjennom en maskin hvor et sett nåler trykkes gjennom fibernet, og omorganiserer fibre slik at mekaniske bindinger oppstår mellom de enkelte fibre (Koerner, 1998). De to mest vanlige strikketeknikkene brukt i strikkede geotekstiler er enkel rettstrikk og kjedestrikk. Ved bruk av rettstrikk kan geotekstiler produseres både som flate tekstilduker og i rørform, avhengig av strikkemaskinen. I strikkede geotekstiler er det mulig å legge inn innleggsgarn i begge retninger. Disse kan endre egenskapene til tekstilet i den aktuelle retningen. Tøyningen reduseres i retning av innleggsgarnet, mens stivheten og styrken øker (Gommers et al., 1998).

Geogitter

Geogitter er plastmaterialer formet som en gitterstruktur med forholdsvis store åpninger. Åpningene i gitteret må ha en størrelse som tillater at jordmaterialet trenger gjennom. Sammenlignet med geotekstiler er geogittere stive (Koerner, 1998).

Geogittere produseres enten ved strekking i en eller to retninger eller veving med spesielle vevemetoder. Geogittere kan også produseres ved sammenbinding av stenger eller strop- per (Koerner, 2012). Vevde geogittere produseres i hovedsak av polyester belagt av PVC, lateks eller bitumen. I geogittere som strekkes, er polymermaterialene anvendt av høy densitet polyetylen eller polypropylen. Produksjonsprosessen starter med 4–6 mm tykke plater av polyetylen eller polypropylen. Det stemples ut hull i platen, i et regulært mønster. Deretter strekkes platen i en eller to retninger. Viktige faktorer i prosessen er temperatur, strekkhastighet, strekkforhold, molekylær vekt, fordeling av molekylær vekt samt grad av forgreining og kryssbindinger. Strekkeprosessen øker materialets styrke og stivhet, i tillegg til at sensitiviteten for kryp reduseres (Koerner, 1998).

Geogittere produsert ved bruk av tekstilvevmaskiner er mer fleksible og tekstilaktige geogittere dannet av polyesterfibere. Gitteret består av hundrevis av fibere samlet som danner gitterstrukturen med relativt store åpninger. Krysningspunktene festes ved strik- king eller sammenfletting før hele gitteret dekkes med et beskyttende belegg (Koerner, 1998).

Geonett

Geonett er en type geosyntet som i hovedsak brukes til dreneringsformål. Produktene er i de aller fleste tilfeller laget av polyetylen (Koerner, 1998).

Geonett produseres ved ekstrudering, hvor polymeren formes i to parallelle sett. Åpningen er diamantformet, hvor lengden typisk er 12 mm og bredden 8 mm. Etter ekstrudering bråkjøles nettet i vann, og det får sin endelige form. Krysningspunktene er ikke rettvink- lede, som gir anisotrope egenskaper (Koerner, 1998).

Geomembraner

Geomembraner er tynne, impermeable ark av polymere materialer. Produksjonsprosessen begynner med å danne råmaterialet, polymerharpiks med varierende tilsetningsstoffer. Vi- dere er det tre produksjonsmetoder som benyttes for å produsere geomembraner (Koerner, 1998).

Alle polyetylenggeomembraner, og noen fleksible geomembraner av polypropylen, produ- seres ved ekstrusjon som resulterer i tynne ark. Ekstrusjonsprosessen kan foregå på to ulike måter, den ene benytter en flat dyse mens den andre benytter en sirkulær dyse. Ved teksturering i etterkant av produksjonen er det mulig å lage overflater med høy friksjon. Geomembraner av PVC fremstilles ved kalandreringsmetoden. Geomembraner kan også

produseres ved betrykning, det vil si at et tekstil dekkes av et tynt lag av smeltede polymerer (Koerner, 1998).

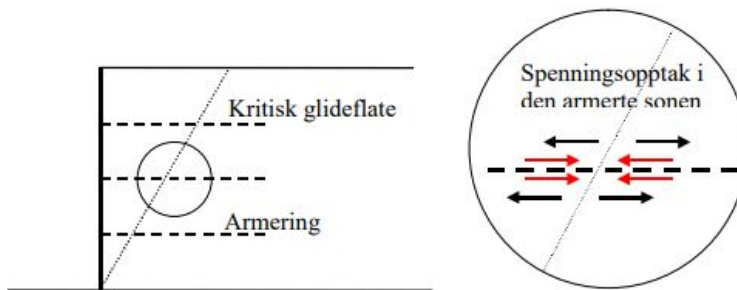
Geokompositter

I geokompositter er to eller flere ulike geosyntetprodukter kombinert, det kan være både geotekstiler, geonett, geogittere og geomembraner. Dermed kan geokompositter tilfredsstille alle funksjoner som geosynteter vanligvis benyttes til. Det er også mulig å produsere geokompositter hvor et geosyntetmaterialet er kombinert med andre materialer som ikke er syntetiske.

2.3.3 Egenskaper og prinsipper

Geosynteters egenskaper avhenger av funksjonen. Her er egenskaper for geosynteter benyttet til armeringsformål beskrevet, da det er mest relevant for oppgaven.

I armert jord tilfører armeringen strekkstyrke til jordmaterialet. Armeringsmaterialet krever en viss deformasjon for å aktivere strekkstyrken (De geotekniske foreningene i Norden, 2006). Jordmaterialet utvikler størst strekkbelastning i minste hovedspenningsretning. Armeringen vil derfor fungere mest effektivt i den retningen. Strekkbelastning i jordmaterialet forårsaker skjærspenninger mellom jordmaterialet og armeringen. Armeringen reduserer utviklingen av tøyninger i jordmaterialet og øker styrken i den sammenhengende konstruksjonen av armering og jord, som vist på figur 2.23 (Watn, 1996).



Figur 2.23: Prinsippskisse av spenningsopptaket i armeringsmaterialet (De geotekniske foreningene i Norden, 2006).

Jordarmeringens virkning avhenger i hovedsak av samvirkeegenskapene mellom jorda og armeringsmaterialet, ikke på egenskapene til jordmaterialet og armeringsmaterialet separat. Strekkeegenskapene i jordmaterialet relativt til armeringen er viktig, jordmaterialer utvikler normalt brudd ved 2–5% tøyning. Dette begrenser tillatt tøyning i armeringsmaterialet. Mobilisering av skjærspenninger mellom jordmaterialet og armeringen avhenger av interaksjonen mellom materialene. Friksjonen avhenger av jordart og type armering. Maksimal mobilisering av strekkspenninger i samvirket jordmateriale-armering, τ_r , er uttrykt ved formel 2.1 for totalspenningsbasis og 2.2 for effektivspenningsbasis. Ved bruk

av geonett, oppnås maksimal friksjon når forholdet mellom gjennomsnittlig kornstørrelse i jordmaterialet og minste åpningsvidde i nettet er mellom 2 og 3,5 (Watn, 1996).

$$\tau_r = \alpha \cdot s_u \quad (2.1)$$

$$\tau_r = \alpha \cdot (a + \sigma') \cdot \tan \phi \quad (2.2)$$

α = Samvirkefaktor for friksjon mellom jord og armering

s_u = Udrenert skjærstyrke

a = Attraksjon

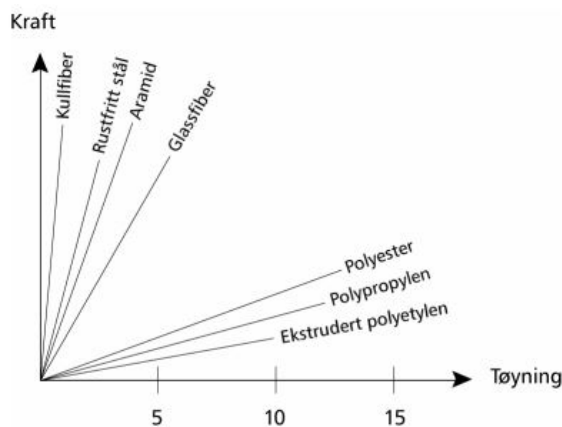
σ = Effektivspenning normalt på samvirkeplanet

ϕ = Friksjonsvinkel i jordmaterialet

(Watn, 1996)

Egenskapene til geosynteter avhenger av hvilket materiale produktet er laget av, produksjonsmetode og strukturen i produktet (Sandven, 1998). Funksjonen bestemmes i stor grad av materialets lastkapasitet og tøyningsegenskaper over tid. De viktigste egenskapene, i tillegg til samvirkeegenskaper mellom jord og geosyntet, er (De geotekniske foreningene i Norden, 2006):

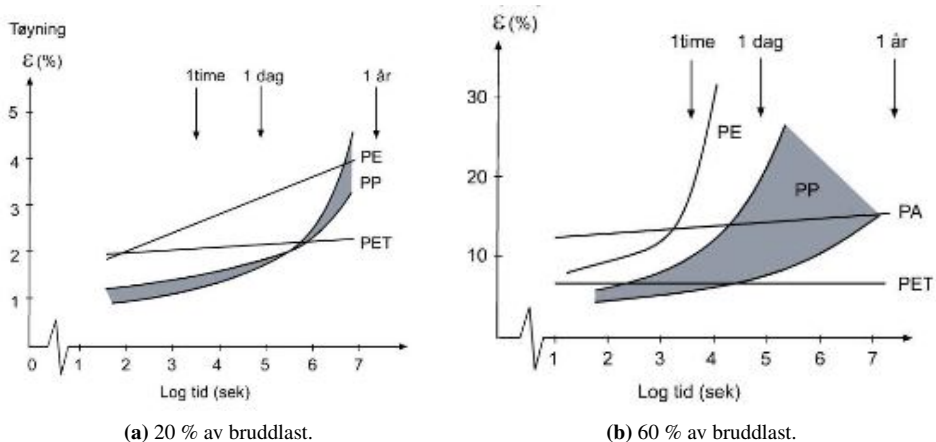
- Last-deformasjon
- Kryp
- Produksjonsegenskaper
- Motstand mot skade under installasjonsprosessen
- Motstand mot kjemisk og biologisk påvirkning



Figur 2.24: Last-deformasjonsegenskaper for ulike materialer (De geotekniske foreningene i Norden, 2006).

For geosynteter benyttet til armering er materialenes last-deformasjonsegenskaper meget viktige. Figur 2.24 viser typiske last-deformasjonsegenskaper for materialer som anvendes for jordarmering (De geotekniske foreningene i Norden, 2006).

Krypeffekten er også en viktig egenskap for geosynteter anvendt for armering. Kryp betyr at tøyningen er tidsavhengig ved konstant belastning. Ulike polymerer har ulike krypegenskaper, som vist i figur 2.25. Polyetylen, polypropylen og polyester kan benyttes ved belastning på 20 % av bruddlast dersom total tøyning er akseptabel for konstruksjonen. For polyetylen og polypropylen endres egenskapene ved belastning til 60 % av bruddlast. Ved slike lastnivåer er materialene ikke egnet, og brudd kan oppstå i konstruksjonen. I tillegg til polymertype, avhenger også kryppoppførselen av hvordan utgangsmaterialet er behandlet termomekanisk. (De geotekniske foreningene i Norden, 2006). Kryppoppførselen i geosynteter kan bestemmes ved kryppforsøk i henhold til NS-EN ISO 13431.



Figur 2.25: Kryp i ulike materialer belastet med henholdsvis 20 % og 60 % av bruddlast (den Hoedt, 1986).

For geosynteter i bruk over lang tid er bestandighet avgjørende. Med det menes materialets motstand mot forvitring, mikrobiologisk nedbrytning, syrer og basiske væsker, hydrolyse og termisk oksidasjon (De geotekniske foreningene i Norden, 2006).

Geosynteter som ikke overdekkes av jord, eller som eksponeres for lys gjennom levetiden til konstruksjonen er særlig utsatt for forvitring. Mikrobiologisk nedbrytning av sopp og bakterier i jord, kan ødelegge polymermaterialet i geosyntetet. Sure og basiske væsker i kontakt med geosynteter kan påvirke materialet. Geosyntetets motstand mot kjemisk nedbrytning avhenger av geosyntetets utforming, behandling, tekstilstruktur og eventuelle eksisterende skader. Sammensetningen av væsker og in situ-forhold, som temperatur, trykk og spenninger har innvirkning på effekten (NS-EN 14030, 2001). Ved kontakt med vann, kan hydrolyse av polyestere oppstå. Hydrolyse er det motsatte av krystallisering. Vannmolekyler knyttes til polyestermolekyler. Intern hydrolyse kan forekomme ved høye temperaturer. Ved lave temperaturer kan også ekstern hydrolyse oppstå. Når geosynteter

er i kontakt med oksygen kan oksidative nedbrytningsprosesser oppstå. Dette er vanligvis saktegående prosesser som øker polymerenes sprøhet og reduserer styrken (De geotekniske foreningene i Norden, 2006). Polyetylen og polypropylen er mer sensitive for oksidasjon enn polyester. Ved å tilsette stabiliserende stoffer i polymermaterialet kan oksidasjonsprosessene reduseres NS-EN ISO 13438 (2005).

2.4 Interaksjon mellom geosynteter og lettklinker

Samvirket mellom geosyntet- og lettklinkermaterialet er viktig ved dimensjonering av LiTuWa-konstruksjonen. Konstruksjonens globale stabilitet og anvendbarhet avhenger av samvirket mellom materialene, som påvirkes av stedlige forhold, eksterne påvirkninger, komprimeringsgrad, vanninnhold og type geosyntet (Górniak, 2013).

2.4.1 Fysisk interaksjon

I doktoravhandlingen til Górniak (2013) er ulike typer geosyntetprodukter testet i kombinasjon med lettklinker 10–20 (type er ikke spesifisert) i uttrekksforsøk. Hensikten med forsøkene er å bestemme interaksjonskoeffisienten mellom geosyntet- og lettklinkermaterialet.

Materialet som ble testet var lettklinker i 10–20-fraksjonen, med 3–4% vanninnhold og løstet tetet omkring 300 kg/m^3 . Tre ulike geosyntetmaterialer ble testet, NO-C PES 150, NO-G PES 150 og GT PP 150. NO-C PES 150 er et geogitter, mens NO-G PES 150 og GT PP 150 er geotekstiler. Materialeegenskaper er gitt i vedlegg D. Forsøket er utført med tre ulike normalspenningsnivåer for hver geosyntet. Alle forsøk er utført to ganger.

Tabell 2.7: Estimerte verdier for friksjonskoeffisient mellom ulike geosyntetprodukter og lettklinker fra uttrekksforsøk (Górniak, 2013)

Produkt	Bredde [m]	Lengde [m]	Friksjonsvinkel, $\tan \phi$	
			Lettklinker-Geosyntet	Friksjonskoeffisient $C_{i\phi}$
NO-C PES 150	1,0	2,0	0,62	0,79
NO-G PES 150	1,0	2,0	0,48	0,61
GT PP 150	1,0	2,0	0,57	0,73

2.4.2 Kjemisk interaksjon

Nedbrytning av geosyntetmaterialet kan påvirke viktige egenskaper i materialet gjennom levetiden, se kapittel 2.3.3. For å minimere nedbrytningen av geosyntetmaterialet grunnet kjemiske reaksjoner, er det viktig å kjenne de kjemiske forholdene geosyntetet utsettes for og velge materialer ut fra dette.

Det er utført forsøk for å bestemme pH i lettklinker av Høva (2011). To testserier der pH i vannet er målt over 7 dager er gjort:

1. Lettklinker neddykket i vann i 1 time
2. Lettklinker neddykket i vann i 24 timer

I forsøket er det springvann fra Trondheim med pH omtrent 8,4 testet. pH-verdien i regnvann er normalt under sju. Test 1 indikerer effekten av nedbør på miljøet i lettklinker. Resultatet fra testen viste ingen stabil reaksjon, grunnet begrenset tid. pH falt fra 12,56 til 9,43 gjennom 7 dager. Test 2 kan indikere effekten av at lettklinker blir liggende i vann over tid. Resultatet fra test 2 viste en mindre reduksjon i pH, den falt fra 12,8 til 10,94.

Før resultatet fra disse forsøkene kan overføres til LiTuWa-konseptet må flere faktorer vurderes:

- Mengden vann benyttet tilsvarer ikke reelle situasjoner.
- Observasjonene er basert på kun to testserier
- Observasjoner over en uke viser ikke at pH stabiliseres på et lavere nivå
- pH i det anvendte vannet tilsvarer ikke pH i nedbør

Resultatene fra forsøket indikerer likevel at pH kan overstige 9 for vann i kontakt med lettklinker. For å redusere faren for kjemisk nedbrytning av geosyntetmaterialet i LiTuWa-konstruksjoner bør polypropylenbaserte geosynteter anvendes i kontakt med lettklinker (Górniak, 2013).

2.5 Gummi

2.5.1 Innledning

Gummimaterialet som er anvendt i belastningsforsøket (kapittel 4) er et syntetisk gummi av typen EPDM 50 (Etylen Propylen Dien Monomer), med en hardhet på 50 shore A. Hovedfokus i dette delkapittelet er derfor på det aktuelle gummimaterialet og dets egenskaper. Materialet er benyttet på grunn av dets elastiske egenskaper som medfører store tøyninger ved strekkbelastning.

Definisjonen på gummi er at det er et materiale som ved avlastning etter strekking raskt går tilbake til omtrent sin opprinnelige form. Råmaterialet i naturgummi dannes i enkelte tropiske planter, og består i hovedsak av polyisopren. Gjennom en vulkaniseringsprosess gis materialet egenskaper som kjennetegner gummi. (Ciesielski, 1999). Vulkanisering er en prosess der (blant annet) et vulkaniseringsmiddel blandes sammen med råmaterialet og binder molekylkjedene i gummimaterialet sammen til et tredimensjonalt nettverk. Dette øker materialets mekaniske styrke og elastisitet. Vulkaniseringen reduserer også klebrigheten, og øker bestandigheten mot varme, lys og aldringsprosesser (Morton, 2013).

2.5.2 Egenskaper og anvendelsesområder

Det finnes flere typer syntetiske gummimaterialer, der egenskapene er tilpasset ulike formål. Gummi er delt inn i tre hovedklasser, bestemt ut fra materialenes bruksområder og egenskaper:

- Generelle formål
- Motstandsdyktig mot løsemidler
- Varmeresistent

Hver hovedklasse inneholder flere ulike gummityper. For hver gummitype finnes det flere ulike varianter, der egenskapene avhenger av produksjonsprosess, gummikvalitet og polymerblanding (Morton, 2013).

EPDM tilhører hovedklassen for generelle formål. EPM består av etylen og propylen, og har den samme polymerstrukturen som naturgummi får ved hydrogenisering. EPDM ble utviklet på grunn av utfordringer med vulkanisering av EPM. EPDM er EPM kopolymerisert med en tredje monomer, som er et dien. Hvilket dien som er anvendt påvirker egenskapene i materialet. I tillegg varierer egenskapene med blandingsforholdet etylen, propylen og dien, molekylær vekt og fordelingen av denne, samt produksjonsmetode og produsent. Egenskapene tilpasses formålet materialet skal anvendes for. I tabell 2.8 er egenskapene for de mest vanlige EPDM-typene slått sammen ut fra gitte egenskaper for EPDM i Morton (2013), avhengig av anvendelsesområde.

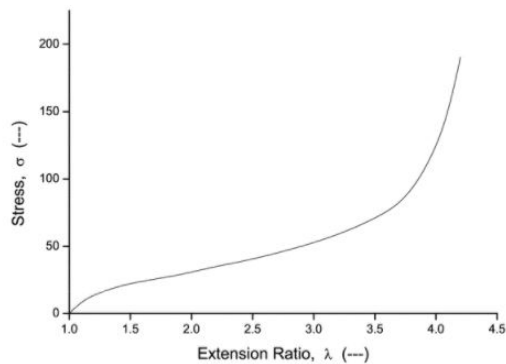
Mest vanlige anvendelsesområder for EPDM:

- Belegg
- Kjøretøy
- Ledninger og kabler
- Mekaniske artikler, maskiner og apparater

Tabell 2.8: Vanlige egenskaper for de mest brukte EPDM-gummitypene (Morton, 2013)

Egenskap	Verdi
Strekstyrke ved brudd [MPa]	5,9–17,4
Tøyning ved brudd [%]	150–450
200 % modul [MPa]	6,5–8,1
Hardhet [Durometer A]	65–75
Rivestyrke [N/mm]	36,8

Gummi er et materiale som deformeres i høy grad ved belastning. Strekkbelastning gir en spennings-tøyningskurve som er ikke-lineær. I tillegg endres materialoppførselen ved flere lastsykluser. Figur 2.26 viser en typisk spennings-tøyningskurve for et gummimateriale. Det finnes ikke en konstant elastisitetsmodul for gummimaterialer, og Hookes lov er kun gyldig dersom E er variabel (Bauman, 2012).



Figur 2.26: Typisk spennings-tøyningskurve for gummi i strekk (Bauman, 2012).

2.6 Sammendrag

Det er vist at innblåsingsprosessen av lettlinker inn i tubene, reduserer kvaliteten på materialene. Det er konkludert med at metode C gir et jevnere tverrsnitt enn metode A og B. I tillegg gir metode C redusert nedknusing av lettlinker, sammenlignet med andre metoder. Effekten av innblåsning med metode C på lettlinkermaterialet er ikke dokumentert, men kvaliteten forringes trolig noe, da metode B gir en betydelig nedknusing av materialet (figur 2.8).

I LiTuWa-konstruksjoner må tubene komprimeres i byggeprosessen for å unngå ujevne deformasjoner og øke stabiliteten. Det er bevist at antall passeringer med vibroplate etter 4 ganger har liten betydning for tubens tverrsnitt. Vekten av overliggende tuber og komprimeringen av disse har liten effekt på underliggende tuber og materialet inne i de. Densiteten på komprimerte tuber med fire passeringer ligger mellom 370 og 420 kg/m³. Det vil si at komprimeringsgraden ligger omkring 60–83 %. Dette er svært høyt. Densiteten er ikke registrert før komprimering. Tubene er fylt med metode C, som er den mest skånsomme metoden. Figur 2.6 viser en trend der andelen korn med diameter mindre enn 10 mm øker med antall passeringer med vibroplate. Komprimering forringer dermed også sannsynligvis kvaliteten på materialet noe.

Belastningsforsøket i Górnjak (2013) resulterer i en sammenligning av høyde/breddeforhold for tre tverrsnitt på tre tuber av forskjellige geotekstiler (tabell 2.2).

Numerisk analyse av geosyntettuber med en kombinasjon av DEM og FEM, viser at samvirkeegenskapene (friksjonen) mellom geotekstil og lettlinker har minimal betydning, mens friksjonen mellom geotekstil og belastningsplate og bunnflate har stor effekt på strekkutviklingen i geotekstilet. Dette resultatet kan sammenlignes med målt strekk i gummiduken i belastningsforsøket i kapittel 4. Det er konkludert med at bæreevnen til tubene i hovedsak avhenger av strekkstyrken i geotekstilmaterialiet, men også friksjonsvinkel og volumetrisk ekspansjonskoeffisient påvirker bæreevnen. Høy stivhet i geotekstilet hindrer ekspansjon av granulært materiale inne i tubene Górnjak (2013).

Lettklinker er et lett materiale, produsert av leire. Materialet har lav densitet og forholdsvis høy styrke. I tillegg har materialet gode termiske egenskaper. Ved belastning oppstår permanente deformasjoner i hovedsak av reorganisering av korn eller knusing av korn, avhengig av spenningsnivået. Materialeegenskapene i lettklinker varierer avhengig av komprimeringsgrad og spenningsforhold. Ved høye spenninger knuser materialet lett. Karakteristiske mekaniske egenskaper er presentert i tabell 2.4.

Det finnes mange ulike typer geosynteter, og de har flere ulike bruksområder. I dette tilfellet er armering og barriere. Armering for armering av tubene i tilbakefyllingen og barriere for innkapsling av lettklinker i tubene. Tubene må være fleksible, så geotekstil er anvendt. Geotekstiler kan være vevd, ikke-vevd, tilfeldig sammenfiltret eller strikket. I tubene er strikkede geotekstiler mest hensiktsmessig, da de kan strikkes rundt i passende form. En unngår dermed svakheter ved søm. Armeringsmaterialet kan i prinsippet være flere typer geosyntet, men de må kunne festes til tubene. Geotekstil er derfor benyttet i testkonstruksjonene. Materialenes egenskaper avhenger av type polymer, produksjonsmetode og strukturen i produktet. I armeringsformål er samvirkeegenskapene med jordmaterialet svært viktig.

Lettklinker og regnvann produserer sammen et basisk miljø, hvor pH kan overstige 9. I slike miljøer er polypropylenbaserte geosynteter mest bestandig, og bør derfor benyttes i LiTuWa-konstruksjoner. For polypropylen er kryp en viktig faktor, store deformasjoner kan oppstå ved høy belastning over tid. Dette er viktig å dimensjonere for.

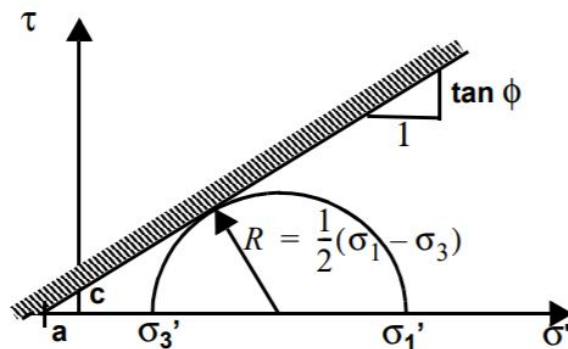
Gummi er definert som et materiale som ved strekkføyning raskt oppnår opprinnelig form ved avlastning. Det finnes mange ulike typer gummi, der egenskapene avhenger av gummi materialets formål. Gummi deformeres i høy grad ved belastning, og kan oppnå inntil 450 % føyning før materialet går til brudd. Spenning-føyningsskurven for gummi er ikke-lineær ved strekkføyninger.

Grunnleggende teori

3.1 Jordmodellen Mohr-Coulomb

Mohr-Coulomb er en lineær elastisk, perfekt plastisk modell. Modellen er en forenkling av virkeligheten, hvor stivheten til et jordmateriale avhenger av spenningsnivå, spenningssti og tøyingsnivå (Brinkgreve et al., 2017b).

Den lineærelastiske delen av modellen er basert på Hookes lov for isotrop elastisitet, mens den plastiske delen er basert på Mohr-Coulombs bruddkriterium (Brinkgreve et al., 2017b). Et bruddkriterium er et matematisk uttrykk for styrken til et material, uttrykt ved spenningskomponenter og materialegenskaper. Coulombs bruddkriterium er definert ved ligning (3.1), vist på figur 3.1 der ϕ er bruddkriteriets vinkel. I Mohr-Coulomb-modellen er alle tøyninger elastiske for spenninger under bruddkriteriet (Nordal, 2017)

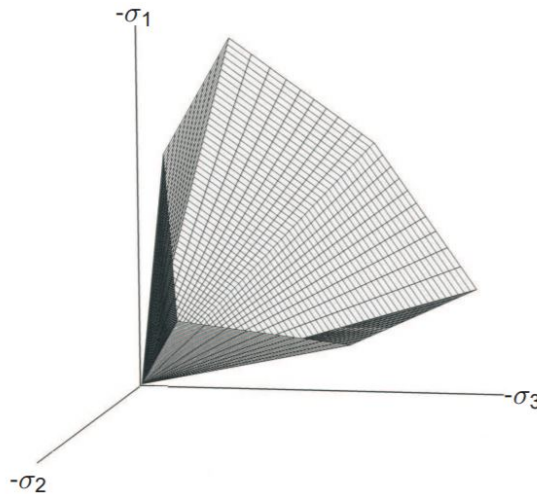


Figur 3.1: Mohr-Coulombs bruddkriterium i $\tau - \sigma'$ -planet (Nordal, 2017)

$$\tau_f = c + \sigma' \cdot \tan \phi = (\sigma' + a) \cdot \tan \phi \quad (3.1)$$

$\tan \phi$ = friksjonskoeffisient
 a = attraksjon
 $c = a \cdot \tan \phi$ = kohesjon

I Mohr-Coulombmodellen er coulombkriteriet utvidet til generelle spenningstilstander. Det vil si bruddkriteriet gjelder i alle plan innen et materialelement. Det utvidede coulombkriteriet består av seks bruddkriterier, som til sammen utgjør et sekskantet i hovedspenningsrommet, som vist i figur 3.2 (Brinkgreve et al., 2017b). Spenningen innenfor bruddkriterier er elastiske, og følger Hookes lov.



Figur 3.2: Coulombs bruddkriterie i hovedspenningsrommet (Brinkgreve et al., 2017b)

I tillegg er seks plastiske potensialfunksjoner definert for modellen. Hensikten med de er å inkludere plastisk volumøkning som følge av dilatans (i tett lagrede jordmaterialer). Når kohesjon større enn 0 er definert tillater Mohr-Coulombkriteriet strekk. I realiteten kan jordmaterialer ta opp lite eller ingen strekkspenninger. Ved å spesifisere avskjæring ved strekk kan dette inkluderes i modellen. Avskjæring ved strekk introduserer tre bruddfunksjoner til. Disse gjør at materialet ikke tåler strekkspenninger. I Mohr-Coulombmodellen må parametrene gitt i tabell 3.1 bestemmes av brukeren. Det er alternativt mulig å benytte stivhetsparametrene skjærmodul (G) og ødometermodul, for E -modul og poissontall (Brinkgreve et al., 2017b).

Tabell 3.1: Parametere i Mohr-Coulombmodellen (Brinkgreve et al., 2017b)

Parameter	
E-modul	E
Poissonstall	ν
Kohesjon	c
Friskjonsvinkel	ϕ
Dilatansvinkel	ψ
Hviletrykkskoeffisient	K_0'

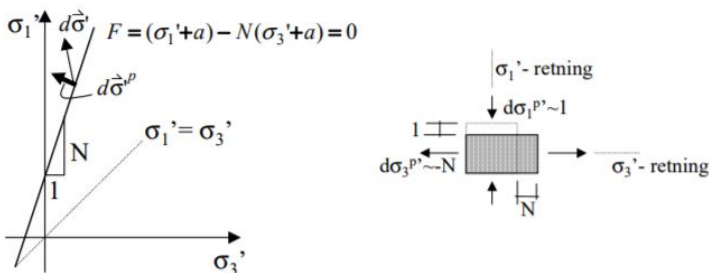
3.2 Elastoplastisitet

Elastoplastisitet er basert på prinsippet der tøyninger består av en elastisk og en plastisk tøyningsskomponent. Elastiske tøyninger er reversible, mens plastiske tøyninger er permanente. Tøyninger i det elastiske området (definisjonen av elastisk område avhenger av jordmodell, i Mohr-Coulomb: under bruddkriteriet, figur 3.1) gis av en spenningsendring og følger sammenhengen i Hookes lov (3.2).

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3.2)$$

For spenninger på nivå med bruddkriteriet, vil flyt oppstå i materialet. Det betyr at plastiske tøyninger kan utvikles.

I figur 3.3 er et todimensjonalt spenningsrom og Coulombs bruddkriterium benyttet. Ved spenningsøkning til et nivå over bruddkriteriet vil materialet være spesielt sensitiv mot den plastiske spenningskomponenten (se figur 3.3), som er definert som spenningskomponenten vinkelrett på bruddkriteriet. Spenningskomponenten er den mest kritiske for overstigelse av bruddkriteriet. Det er den plastiske spenningskomponenten som forårsaker plastiske tøyninger. Den elastiske spenningskomponenten følger bruddkriteriet, og gir elastiske tøyninger. Som vist i figur 3.3 er forholdet mellom spenningskomponentene i plastisk spenningsinkrement N , definert av bruddkriteriet gitt ved ligning (3.3) for Mohr-Coulomb.



Figur 3.3: Plastisk spenningselement $d\sigma^p$ i $\sigma_1' - \sigma_3'$ -planet, med påfølgende tøyning proporsjonal med plastisk spenning (Nordal, 2017).

$$N = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3.3)$$

Ved brudd er plastisk stivhet i materialet null, og ubegrensede plastiske tøyninger oppstår. I figur 3.3 er bruddkriteriet definert ved F . Dersom plastisk spenningsinkrement alene gir plastisk deformasjon kan det antas at plastiske deformasjoner er proporsjonale med spenningsinkrementet. Altså er også de plastiske deformasjonene avhengige av N . Proporsjonalitet mellom plastiske spenninger og plastiske tøyninger kalles assosiert flyt, og er gitt ved ligning (3.4).

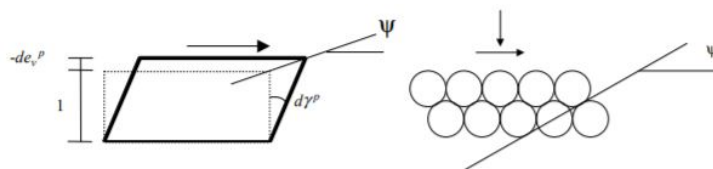
$$d\vec{\epsilon}^p = \begin{bmatrix} d\epsilon_1^p \\ d\epsilon_3^p \end{bmatrix} = d\lambda \begin{bmatrix} 1 \\ -N \end{bmatrix} = d\lambda \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \sigma_1'} \\ \frac{\partial F}{\partial \sigma_3'} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Som høyre del av figur 3.3 viser, øker bredden til elementet betydelig ved vertikal sammentrykking. Dette stemmer ikke i alle tilfeller, og kan justeres for ved å legge til en plastisk potensialflate der spenningsinkrementet treffer bruddkriteriet gitt ved F , definert ved Q gitt i ligning (3.5). Q avhenger av materialets dilatansvinkel som gir faktisk plastisk tøyning for gitt spenning. Den plastiske tøyningkomponenten er ortogonal på Q , og gir en tøyningkomponent avhengig av N_ψ , som er definert ved materialets dilatansvinkel ψ . Der ligning (3.6) definerer N_ψ .

$$Q = \sigma_1' - N_\psi \cdot \sigma_3 \quad (3.5)$$

$$N_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (3.6)$$

Dilatans er volumutvidelse som følge av skjærtøyninger. Ved påført skjærtøyning må tett lagrede korn klatre over hverandre for å forflyttes. Dette øker volumet, som vist i figur 3.4.



Figur 3.4: Prinsippet dilatans (Nordal, 2017)

Ligning (3.7) beskriver plastisk tøyning som ikke er proporsjonal med plastisk spenning. Den kalles derfor ikke-assosiert flyt. ψ er dilatansvinkelen, som beskriver volumutvidelse som følge av plastisk flyt.

$$d\vec{\epsilon}^p = \begin{bmatrix} d\epsilon_1^p \\ d\epsilon_3^p \end{bmatrix} = d\lambda \begin{bmatrix} 1 \\ -N_\psi \end{bmatrix} = d\lambda \begin{bmatrix} \frac{\partial Q}{\partial \sigma_1'} \\ \frac{\partial Q}{\partial \sigma_3'} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Ligning (3.8) beskriver volumendring ϵ_v mot ϵ_1 . Ligningen gir følgende sammenheng mellom volumendring og vertikal tøyning (Nordal, 2017):

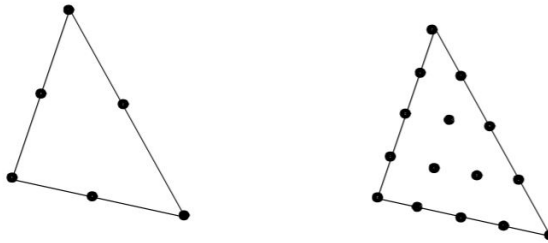
$$\frac{d\epsilon_v^p}{d\epsilon_1^p} = \frac{1 - N_\psi}{1} = \frac{-2 \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (3.8)$$

3.3 Elementmetode i geoteknikk

Elementmetode i geoteknikk er en numerisk tilnærming til jordmaterialers respons til ytre påvirkninger. Ved bruk av beregningsprogrammer overlates tunge numeriske algoritmer til programmet, og brukeren kan fokusere på geotekniske prinsipper. Hovedoppgaven til brukeren er å forstå og definere problemet, samt å vurdere materialets oppførsel. I dette delkapittelet er kompendium for faget Geoteknikk videregående kurs av Nordal (2017) benyttet som kilde.

Forskjellen mellom klassiske beregningsprinsipper og elementmetodeberegninger er at klassiske geotekniske prinsipper ofte er basert på likevektsberegninger. Likevektsberegninger avhenger av et bruddkriterium, som definerer jordmaterialets styrke. I likevektsberegninger er deformasjoner normalt ikke inkludert. Dette må utføres i separate beregninger. Ved bruk av elementmetode er spenninger og deformasjoner integrert i samme beregning. Belastninger påføres normalt trinnvis, til hele lasten er påført. Påfølgende deformasjon beregnes dermed gradvis. Begge beregningsmetodene skal gi omtrent samme resultat.

Elementmetodeberegninger gir ikke resultater som beskriver virkeligheten, men de kan gi en god tilnærming. Metoden er derfor velegnet for å løse geotekniske problemer. Kvaliteten på resultatet avhenger av forenklinger og antagelser som gjøres underveis i modelleringen. Beregningsverktøyet er i seg selv ikke nøyaktig. Unøyaktigheter kan oppstå på grunn av feil valg av elementstørrelse. Det kan også oppstå problemer i beregningsprosessen, som kan gi ubalanserte krefter eller divergens i beregningene. Dette fører til at kriteriene i beregningsalgoritmen i enkelte tilfeller må kontrolleres.



Figur 3.5: Trekantede elementer med 6 og 15 noder (Nordal, 2017)

I elementmetoden deles konstruksjoner og jordvolum inn i elementer. Elementene kan være enten trekantet eller firkantet, og kan deformeres ved forflytning av noder. Grensene kan også være buet. Noder er punkter i hvert element. Flere noder øker nøyaktigheten i beregningene. Videre utvikles en omtrentlig beskrivelse av oppførselen til hvert element

ut fra forskyvning i nodene, før oppførselen til alle elementer settes sammen i en numerisk, matematisk integrasjonsprosess for hele konstruksjonen eller jordvolumet.

Programmet begynner med å modellere elementer. Det produserer ligningssett i form av stivhetsmatriser ut fra nodenes forflytning i elementet. Deretter settes stivhetsmatrisene for hvert element sammen til et stort ligningssystem som danner en global stivhetsmatrise. Videre bestemmes en inkrementell lastvektor, før det globale ligningssystemet løses for det påførte lastinkrementet. Dette gir ett forskyvningsinkrement. Så benyttes forskyvningsinkrementet til å bestemme tøyningen i hvert element, og dermed spenningsinkrementet. Spenningsinkrementet beregnes i hver node i elementet. Dersom beregningene viser en for stor ubalanse i krefter, vil det være nødvendig å justere lastinkrementet eller øke antall iterasjoner, og deretter utføre prosessen om igjen til resultatet konvergerer. Når beregningene konvergerer, legges last- og deformasjonsinkrementer til, og totale deformasjoner og spenninger bestemmes. Til slutt beregnes et nytt lastinkrement på samme måte. Dette gjøres til hele lasten er påført, eller brudd oppstår.

3.4 Plaxis 2D

PLAXIS 2D er et beregningsprogram som benytter elementmetoden i to dimensjoner. Programmet er utviklet som et verktøy for å analysere deformasjoner, stabilitet og grunnvannsstrømninger i geoteknisk ingeniørarbeid. For tredimensjonale analyser kan PLAXIS 3D benyttes. Brukeren beskriver geometrien i problemet, velger passende jordmodell og materialparametere, bestemmer påført belastning, grenser og innledende forhold. Resultatet av beregninger utført med PLAXIS, avhenger i stor grad av brukerens kunnskaper. Resultatet i beregningene avhenger av (Brinkgreve et al., 2017a):

- Modellering av problemet
- Forståelse for de ulike jordmodellene og deres begrensninger
- Valg av materialparametere
- Evne til å dømme resultatet

Elementmetodeberegningsprogrammer, som bl.a. PLAXIS 2D, er basert på elastoplastiske jordmodeller hvor materialene hovedsakelig tilegnes egenskaper som stivhet og styrke (Nordal, 2017). I programmet finnes både Mohr-Coulomb- og Hoek-Brownmodellen, samt mer avanserte jordmodeller som Hardening Soil og Soft Soil Creep. Det er også mulig å legge inn egne brukerdefinerte jordmodeller (Brinkgreve et al., 2017b). Jordmodellen anvendt i dette prosjektet er nærmere beskrevet i kapittel 3.1

I PLAXIS 2D finnes det såkalte geogridelementer, som brukes for å simulere geonett og geotekstiler i kombinasjon med jordelementer. Geogrid er strekkelementer som tilegnes en materialoppførsel, elastisk, elastoplastisk eller viskoelastisk. Elastiske elementer tilegnes aksialstivheter. Geogridelementer er ofte hensiktsmessig å benytte i kombinasjon med *interface* for å modellere grensesnittet mellom geosyntet og jordmateriale (Brinkgreve et al., 2017a).

Kapittel 4

Belastningsforsøk

4.1 Innledning

Det er utført et belastningsforsøk på tuber av gummi, EPDM 50, fylt med Leca lettklinker 10–20 ISO. Formålet med forsøket er å bestemme egenskapene til lettklinker innkapslet i et elastisk materiale. Gummi er et svært elastisk materiale. Det er benyttet som alternativ til geotekstil fordi store tøyninger oppnås i gummi ved forholdsvis lave spenningsnivå. Dette gjør at spenningene i innkapslingsmaterialet blir tydeligere, og dermed synliggjør effekten av innkapslingsmaterialets stivhet i større grad enn et geotekstil hvor høye spenninger gir lavere strekktoyning. Det er ikke aktuelt å benytte gummi i LiTuWa-konstruksjoner. Det er benyttet her kun for å studere innkapslingsmaterialets tøyning ved belastning. Belastningen er gjort trinnvis, og påfølgende deformasjoner er registrert.

4.2 Metode

4.2.1 Innledende bestemmelse av materialparametere

Før belastningsforsøket ble utført, ble diverse innledende forsøk gjort for å vurdere materialegenskaper. Etter belastningsforsøk er sikteanalyse utført for å vurdere effekten av belastning.

Løs densitet

For å bestemme komprimeringsgraden til lettklinkermaterialet inne i tubene i belastningsforsøket må den løse densiteten i materialet være kjent. Det er derfor utført forsøk for å

bestemme løs densitet i materialet.

Forsøket er utført etter Webers retningslinjer for bestemmelse av løs bulkdensitet. Retningslinjene er utviklet i henhold til NS-EN 1097-3:1998. Lettklinkermaterialet er ikke tørket i henhold til standard da materialet som benyttes i forsøket ikke er tørket. Figur 4.1 illustrerer forsøket.



Figur 4.1: Løs densitet

Det er totalt utført tre densitetsmålinger, hvor gjennomsnittet av disse målingene er bestemt. Densiteten er funnet ved hjelp av ligning (4.1). Massen av lettklinkermaterialet er veid for hvert forsøk, og volumet til sylindren er kjent, $0,00964 \text{ m}^3$.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.1)$$

ρ = Densitet

m = Masse lettklinker

V = Volum sylinder

Vanninnhold

Vanninnholdet i lettklinkermaterialet ble bestemt ved standard rutinetest for bestemmelse av vanninnhold. En representativ prøve av materialet er tatt ut. Vekten er registrert, og materialet tørket i varmeskap til vekten er stabilisert. Vanninnhold bestemt etter tørking

for sikteanalyse er også lagt til, og et gjennomsnitt er bestemt. Vanninnholdet beregnes ut fra ligning (4.2).

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 \% \quad (4.2)$$

w = vanninnhold gitt i vektprosent

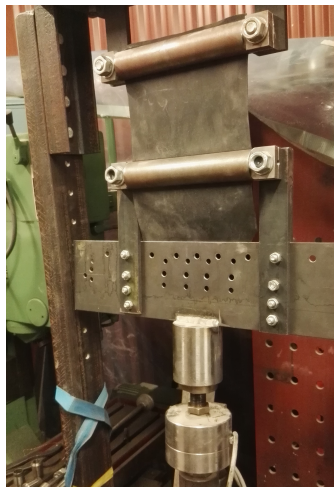
m_w = masse av vann i prøven

m_s = masse av faststoff

Vanninnholdet er bestemt slik materialet ble levert fra fabrikk. Det kan variere avhengig av lagringsforhold. Vanninnholdet bør være kjent for å kunne vurdere bestemmelsen av løst densitet.

Aksialstivhet i gummi

Enaksialt strekkforsøk ble utført på et prøvestykke av anvendt gummimateriale. Hensikten med dette er å bestemme elastisitetsmodulen for materialet. Prøvestykket er 10 cm langt og 20 cm bredt. Dette er standard prøvestørrelse ved strekkforsøk på geosynteter i henhold til NS-EN ISO 10319:2015. Det ble festet med klemmer i topp og bunn, som vist i figur 4.2, og hengt opp. I bunnen ble det trinnvis lagt på vekt med kjent masse, for å oppnå 25 % tøyning. Lengden på gummimaterialet, og tyngden det ble utsatt for ble registrert ved økende belastning. Ut fra dette ble E-modul for materialet bestemt for hvert tøyingsnivå ved ligning (4.3) for enaksial belastning. Data fra forsøket er gitt i vedlegg B.



Figur 4.2: Strekkforsøk

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (4.3)$$

Stivhet i materialet ved fastholdt bredde og strekkføyning i en retning, tilsvarende lengden og radiell retning av tuben, er beregnet ved hookes tredimensjonale lov, ligning (4.4). Det ble antatt lineært elastisk materiale til aktuelt føyningsnivå. Det er også antatt at føyningen i tubens lengderetning er null. Tverrkontraksjonstallet for gummi er 0,5 (Mott og Roland, 2009). Utregninger er gitt i vedlegg B.

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu \cdot \sigma_2 - \nu \cdot \sigma_3) \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu \cdot \sigma_1 - \nu \cdot \sigma_3) \\ \epsilon_3 &= \frac{1}{E}(\sigma_3 - \nu \cdot \sigma_1 - \nu \cdot \sigma_2)\end{aligned}\tag{4.4}$$

Sikteanalyse

Kornfordelingen til lettklinkermaterialet ble bestemt ved sikteanalyse både før og etter belastning. Det ble utført sikteanalyse etter metode gitt i NS 8005:1990. Grunnet lav vekt og relativt ensgradert materiale ble en mindre mengde enn 2 kg materiale benyttet for å unngå overbelastning av siktene. I tillegg ble sikt med maskevidde 11,2 mm inkludert for å gi flere verdier i det mest aktuelle størrelsesområdet (10–20 mm). Figur 4.3 illustrerer sikteprosessen. Materialet ble ristet i 10 minutter med siktemaskin.



Figur 4.3: Sikteanalyse

For å få plass til hele siktesatsen i siktemaskinen, måtte enkelte sikt utelates. Dermed ble de minste siktesatsene vurdert til å være minst aktuell for forsøket. 75 μm –2 mm ble utelatt.

Ved knusing av lettklinker, deles kulene ofte i to. Dette reduserer ikke diameteren, og vil dermed i mindre grad vises ved sikteanalyse. Materialet er derfor vurdert visuelt i tillegg.

4.2.2 Beskrivelse av utstyr

Tube

Gummimaterialet som er benyttet heter *E550 EPDM*, og er produsert av Trelleborg. Materialets egenskaper er gitt i tabell 4.1. Gummimaterialet ble levert som en duk på rull. Denne ble skåret opp til passende størrelse og limt sammen i lengderetningen for å danne en sylindrisk tube. Limingen ble utført med en tokomponents spesiallim fra leverandøren av gummimaterialet. I den ene enden ble tuben tettet ved å legge inn et sirkulært gummistykke, og brette inn gummi fra ytterkanten av tuben. På innsiden av tuben ble det plassert en sirkulær treplate, som gummimaterialet ble skrudd fast i fra utsiden. Platen har mindre diameter enn tuben. Lengden på tuben er i underkant av 1 m, avhengig av mengden lettlinker ved lukking. Lengden er begrenset av belastningspressen. Omkrets før fylling av materialet er 130,4 cm. På gummi er flere punkter med kjent avstand markert for innmåling, se figur 4.6.

Tabell 4.1: Materialeegenskaper E550 EPDM (Trelleborg, 2014)

Egenskap	Verdi	Standard
Densitet [g/cm^3]	$1,17 \pm 0,05$	
Hardhet [Shore A]	50 ± 5	ASTM D2240
Strekstyrke ved brudd [MPa]	≥ 9	ISO 37
Tøyning ved brudd [%]	≥ 450	ISO 37
Rivestyrke [N/mm]	≥ 23	ISO 34-1
Tykkelse [mm]	2	
Strekstyrke ved 25,9 % tøyning [kPa]*	2697	

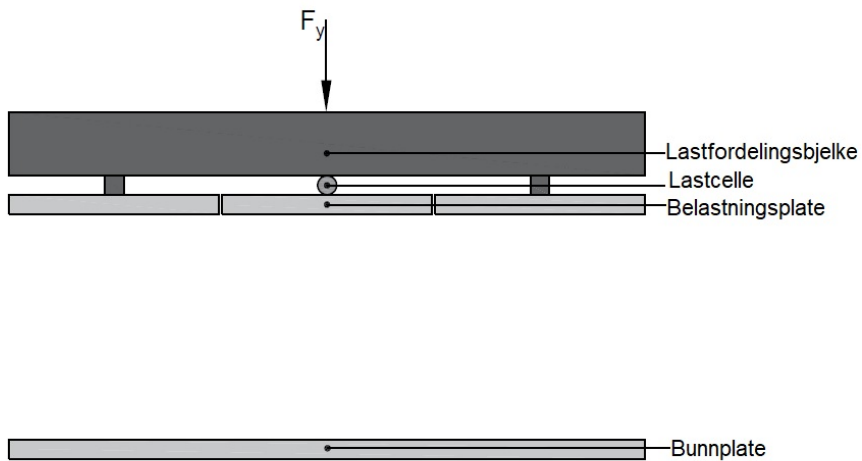
*Beregnet i vedlegg B fra utført strekkforsøk

Lettlinker 10–20 ISO

Leca lettlinker 10–20 ISO produsert på Rælingen, er benyttet i forsøket. Denne fraksjonen er valgt fordi den er mest egnet for blåsing, og dermed mest aktuell for LiTuWa-konstruksjoner.

Belastningspresse

Tuben er belastet ved hjelp av en belastningspresse. Denne er instrumentert med en lastcelle som registrerer belastning og påfølgende vertikal deformasjon. Belastningspressen består av en tredelt belastningsplate, bunnplate, lastfordelingsbjelke og en trykcelle, som illustrert på prinsippskissen i figur 4.4. Et bilde er vist i figur 4.5c. Tuben plasseres mellom belastningsplaten og bunnplaten. Belastningsplaten er tredelt for å registrere last og deformasjon på den midtre delen av tuben isolert, der lastcellen er plassert. Dette gjøres for å unngå randeffekter av tubens ender.



Figur 4.4: Prinsippskisse av belastningspressen

Rør

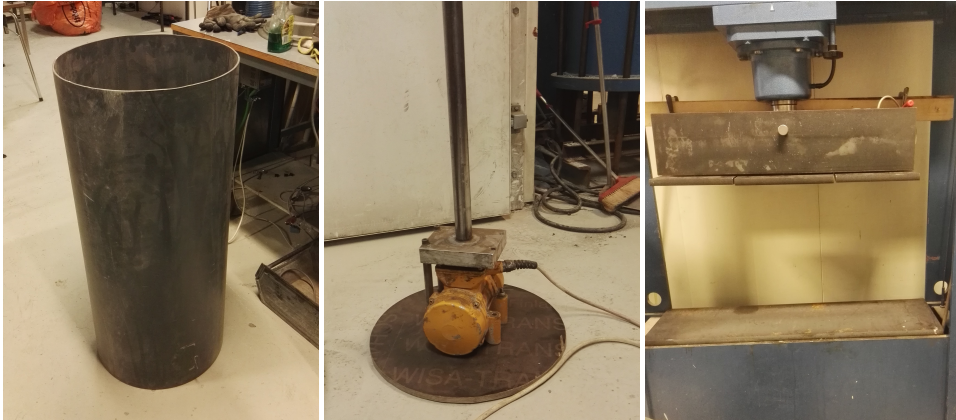
Et sirkulært plastrør er benyttet under innfyllingsprosessen. Røret er vist i figur 4.5a. Diameteren i røret er noe større enn diameteren i gummituben. Hensikten med røret er å stabilisere tuben under innfyllingsprosessen. Det er skåret et hull i nedre del av røret for å gjøre plass til jekken i jekkestroppen som benyttes for å holde tubens form og høyde stabil ved flytting og løfting i belastningspressen.

Platevibrator

En platevibrator, som vist i figur 4.5b, er benyttet for å komprimere lettklinkeren inne i tuben. Diameteren på platen er omtrent samme størrelse som gummituben.

4.2.3 Forsøksprosedyre

Tuben ble plassert vertikalt i plastrøret vist i kapittel 4.2.2. Den tette enden ble plassert i bunnen. Deretter ble tuben fylt opp lagvis. En bønne (ca. 20 l) med lettklinker ble helt i tuben for hvert lag. Materialet i bønne ble veid for hver fylling, for å vite total vekt av lettklinkermaterialet inne i tuben. For hver fylling ble avstanden til toppen av plastrøret målt. Avstanden varierte noe for hver fylling. Deretter ble materialet komprimert i fem sekunder med platevibrator, og avstanden til toppen av plastrøret ble målt igjen. Ut fra dette er total høyde med lettklinker inne i tuben for hver fylling beregnet. Denne prosessen ble gjentatt for hver fylling. Siste lag ble i enkelte forsøk mindre enn 20 l, for å oppnå høyde i underkant av 1 m. Dette medførte at et mindre lag ble komprimert.



(a) Rør anvendt for stabilisering under fylling
 (b) Platevibrator benyttet for komprimering
 (c) Belastningspressen benyttet i forsøket

Figur 4.5: Utstyr anvendt under belastningsforsøket

Tube ble deretter lukket på samme måte som i bunnen. En treplate ble lagt i toppen, og dekket av et sirkulært gummistykke. Deretter ble endene av tube brettet over, og skrudd fast i treplaten.

På utsiden av tube ble plate plassert i hver ende. Ved hjelp av jekkestropp festet rundt tubes lengde, hindret disse at lengden økte ved flytting og løfting. Platen i bunnen ble plassert før fylling, og platen i toppen etter fylling og lukking. Platene hadde omtrent samme diameter som tube. Disse platene hindrer deformasjoner i lengderetningen også gjennom belastningsforsøket.

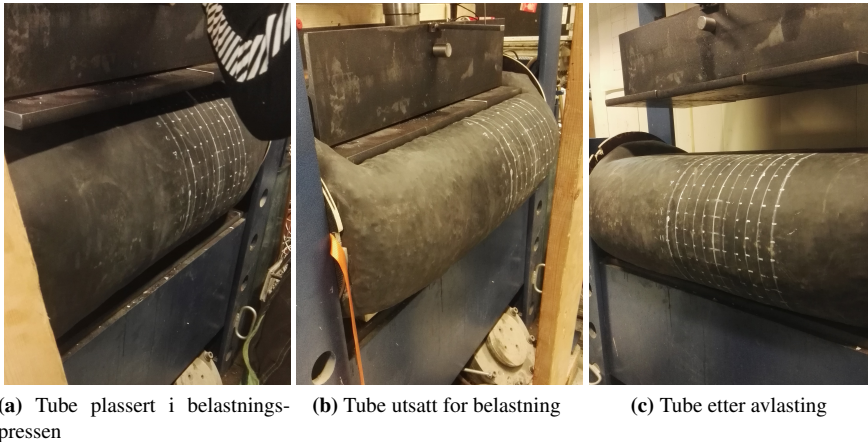
For å kunne fjerne plastrøret fra tube, måtte røret, inkludert tube, vendes opp-ned av praktiske årsaker, da røret ikke kunne løftes direkte av på grunn av jekken fra jekkestroppen. Plastrøret ble så tatt bort fra tube. Omkretsen ble målt i toppen, i bunnen og på midten. Ved å anta sirkulært tverrsnitt og lineær endring i tverrsnittareal, ble tverrsnittarealet og videre volumet beregnet.

Tube ble lagt inn i belastningspressen. Jekkestroppen ble fjernet, og tube ble så påført belastning, registreringer ble gjort for hver 3. cm. Etter 12 cm vertikal deformasjon, ble den vertikale forskyvningen kjørt til maksimum, begrenset av pressen.

Posisjonen til flere punkter langs samme tverrsnitt omtrent midt på tube ble registrert. Horizontal avstand ble målt fra en referansebjelke med tommestokk. Her burde vater vært brukt for å sikre at avstanden var horisontal. Vertikal koordinat ble også målt langs referansebjelken. I første lasttrinn ble utgangsposisjonen til punktene registrert uten påført last. I forsøk 2 ble posisjonen til de samme punktene markert på gummimaterialet registrert for hvert lasttrinn. I forsøk 3-6 ble horizontal avstand registrert for samme Y-koordinat for alle lasttrinn. Avstanden mellom punktene i vertikal retning var dermed den samme for alle lasttrinn. Metoden for å registrere posisjonen på punkter ble endret etter forsøk 2 fordi

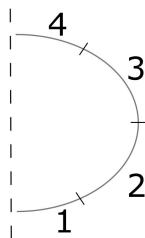
metoden var tidkrevende, samt at sannsynligheten for feile og unøyaktige målinger økte da både X- og Y-koordinat ble målt for alle punkt.

Figur 4.6 viser hvordan tuben ble belastet, referansebjelke og markeringer på selve tuben. Alle lasttrinn er ikke inkludert i figuren.



Figur 4.6: Belastningsforsøk

Avstanden mellom punkter markert på gummi ble også målt med målebånd for hvert lasttrinn for å bestemme tøyningen i gummi materialet underveis i forsøket. I Forsøk 2 ble avstanden målt mellom punkter med avstand omtrent 3 cm. I Forsøk 3-6 ble avstanden økt til 9 cm. Posisjonen på tuben hvor avstandene ble målt er illustrert i figur 4.7. Ved kort måleavstand, vil små unøyaktigheter påvirke resultatet i større grad. Derfor ble måleavstanden endret etter forsøk 2.



Figur 4.7: Omtrentlig posisjon på tuben hvor tøyningene ble registrert

I tillegg ble arealet av kontaktflaten mellom tuben og belastningsplaten registrert for alle lasttrinn for å senere beregne påførte vertikalspenninger.

Siste lasttrinn er avlasting av tuben. Samme registreringer ble gjort etter avlasting av tuben og er dokumentert forsøket. Avlasting er ikke vektlagt videre. PLAXIS 2D er ikke laget for avlasting, det ville dermed vært vanskelig å modellere.

Det er utført totalt fem slike forsøk, i tillegg til et testforsøk (Forsøk 1) hvor formen på tuben ikke ble registrert underveis. I testforsøket ble det funnet ut at belastningspressen ikke kunne gi store nok deformasjoner, grunnet for stor avstand mellom tuben og belastningsplaten før nedpressing. I påfølgende forsøk ble underlaget bygget opp, slik at vertikale deformasjoner til omtrent 15 cm kunne oppnås. I Forsøk 3 oppsto en feil ved lagring som førte til at registreringene forsvant.

Ved vending og flytting av tuben kan lagringstettheten og fordelingen av lettlinker i tuben ha blitt påvirket. Jekkestroppen hindrer kun forlengelse av tuben, som betyr at lengden kan reduseres noe ved vending og løfting. Fordelen med å utføre belastningsforsøk med innkapsling av gummi, i stedet for geotekstil, er at deformasjonene blir tydelige. Ulempen er at materialeegenskapene er forskjellige. Det kan påvirke resultatet.

4.2.4 Behandling av registrert data i belastningsforsøket

Spenning og tøyning

Spenningsnivået er funnet ved ligning (4.5) for hvert lasttrinn. Lastcellen har registrert vertikal belastning. Tverrsnittarealet er beregnet ut fra målt kontaktflate i forsøket, den er antatt firkantet og derfor ikke helt nøyaktig før hele flaten er i kontakt med tuben. Hele flaten er i kontakt ved lasttrinn 4.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.5)$$

P = Vertikal belastning (kN)

A = Areal (m²)

Vertikal tøyning er forholdet mellom endring i tubens høyde, og tubens opprinnelige høyde for alle lasttrinn. Ligning (4.6) er benyttet.

$$\epsilon_y = \frac{H_0 - H}{H_0} \quad (4.6)$$

H_0 = Høyde før belastning

H = Høyde ved måling

Tubens form og egenskaper

Tubens volum er beregnet ut fra de tre omkretsmålingene som er gjort i hvert forsøk, og antatt lineær sammenheng mellom registreringene. Densiteten er bestemt ut fra tyngden av lettlinkeren inne i tuben og beregnet volum. Videre er komprimeringsgraden bestemt som forholdet mellom løs densitet funnet i kapittel 4.2.1, og beregnet densitet i tuben.

For hvert lasttrinn ble posisjonen til flere punkter langs samme tverrsnitt registrert. Ved lineær interpolasjon mellom punktene er tubens form bestemt. X-koordinaten er beregnet ut fra horisontal avstand fra bjelke til punkt, der avstanden mellom bjelken og tubens senter er kjent. Bjelken ble tatt av, og montert på nytt for hvert forsøk. Avstanden mellom

bjelken og tubens senter ble derfor bestemt for alle forsøk. Hvordan bjelken ble montert påvirket avstanden til tuben og dens skjevhet. Dette ble derfor registrert for alle forsøk. X-koordinaten ble justert for skjevhet i bjelken, som er antatt lineær.

Tubens tverrsnittareal er beregnet ut fra innmålte punkter for alle lasttrinn. Det er antatt at tuben ligger midt i belastningspressa og at deformasjonen er lik på begge sider. Begge sider burde vært registrert for å øke nøyaktigheten.

Spenning og tøying i gummien

Ut fra registrerte avstander mellom punkter på gummien, er tøyingen i gummimaterialet bestemt ved ligning 4.7

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (4.7)$$

l_0 = Avstand mellom punktene før fylling.

l = Avstand mellom punktene ved registrering.

Ved å benytte E-modul beregnet i strekkforsøket, se kapittel 4.2.1, kan spenningene i gummien bestemmes ved omformulering av ligning (4.3). Siden E-modul for gummi ikke er lineær, og er beregnet for belastning til 25,9 %, vil den ikke være nøyaktig for lave tøyningsnivå.

4.3 Resultater

4.3.1 Innledende bestemmelse av materialegenskaper

Løs densitet

Data fra forsøk og beregninger er gitt i vedlegg B. Registrert løs densitet varierer mellom 241,18 kg/m³ og 244,40 kg/m³ Gjennomsnittlig løs densitet er:

$$\rho = 242,91 \text{ kg/m}^3$$

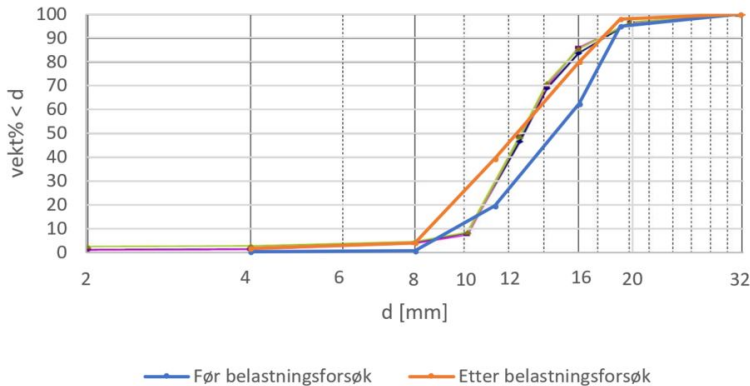
Vanninnhold

Registrerte data er gitt i vedlegg B. Vanninnholdet varierer mellom 0,20 % og 1,47 % i det testede materialet. Gjennomsnittlig verdi er:

$$w = 1 \%$$

Sikteanalyse

Korngraderingskurve fra sikteanalyse er vist i figur 4.8, der både ubelastet og belastet materiale er presentert sammen med tidligere analyser for upåvirket Leca 10–20 ISO i bakgrunnen.



Figur 4.8: Resultat av sikteanalyse før og etter belastningsforsøk, sammenlignet med analyse utført av Høva og Gylland (2009b), flerfarget i bakgrunnen. Merk at resultatet kun er vist for d mellom 2 og 32 mm. Korngradering vises normalt for kornstørrelse 0,0006 til 2000 mm.

Figur 4.8 viser at lettklinkermaterialet har en noe større mengde innhold av finere korn etter belastningsforsøk sammenlignet med før belastningsforsøk. Det ble observert ved sikting av belastet materiale at siktesats med maskevidde 11,2 mm ble overbelastet, og korn med mindre diameter vanskelig kunne trenge gjennom maskeåpningene.

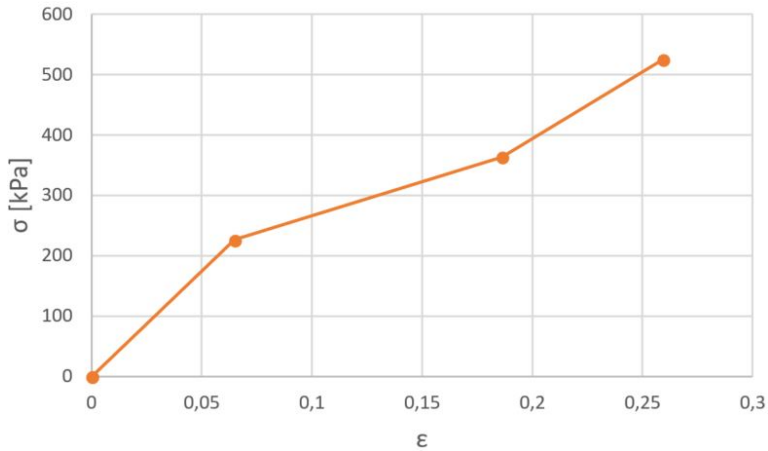
Gummi: EPDM 50

Tabell 4.2 viser gummimaterialets beregnede stivhet for ulike tøyingsnivå fra enaksialt strekkforsøk. Spenning-tøyingskurven er presentert i figur 4.9. Sammenlignet med figur 2.26 stemmer resultatet overens med teorien i kapittel 2.5, hvor strekkstivheten er høyere initialt, før den så reduseres, og videre øker med belastning.

Tabell 4.2: Enaksial stivhet i gummimaterialet for ulike tøyingsnivå

Tøyning	E-modul [kPa]
0,065	3 489
0,186	1 948
0,259	2 023

I belastningsforsøket forhindres store deformasjoner i gummimaterialet, det er delvis fastholdt i tubens lengderetning. Tøyningene oppstår i hovedsak i radiell retning. Dette med-



Figur 4.9: Spenning-tøyningskurve EPDM 50 fra strekkforsøk

fører høyere stivhet. Beregnet stivhet med fastholdt lenderetning og 25,9 % tøying er:

$$E = 2697kPa$$

Utgangspunkt er gitt i vedlegg B.

4.3.2 Belastningsforsøk

Registreringer

I tabell 4.3 er diverse registreringer for hver tube og gjennomsnittet av disse presentert. Tabellen viser at volumet er målt til å være omtrent det samme i alle forsøk, men at massen av lettklinkeren varierer, og dermed gir en varierende komprimeringsgrad. Vedlegg E gir alle registreringer for hvert forsøk.

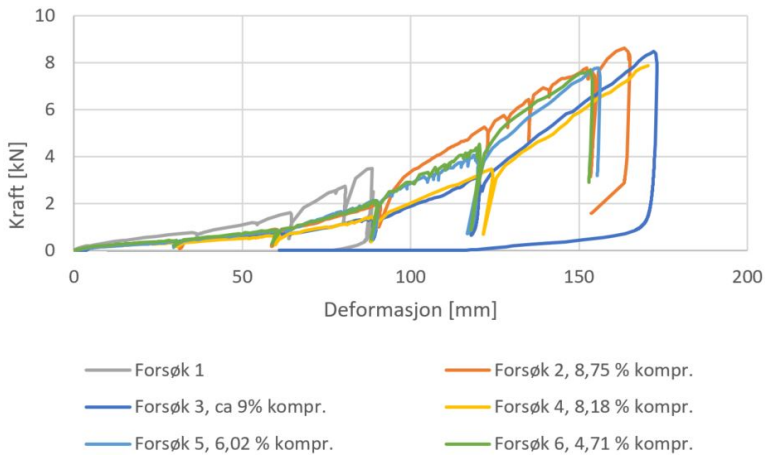
Tabell 4.3: Parametere for hvert forsøk, og gjennomsnittet av alle forsøk

Forsøk nr.	Mengde lettklinker [kg]	Volum [m ³]	Densitet [kg/m ³]	Komprimeringsgrad
2	37,4	0,142	264,15	8,75 %
4	37,9	0,144	262,77	8,18 %
5	36,7	0,142	257,52	6,02 %
6	35,9	0,141	254,33	4,71 %
Gjennomsnitt	37	0,142	259,7	6,9 %

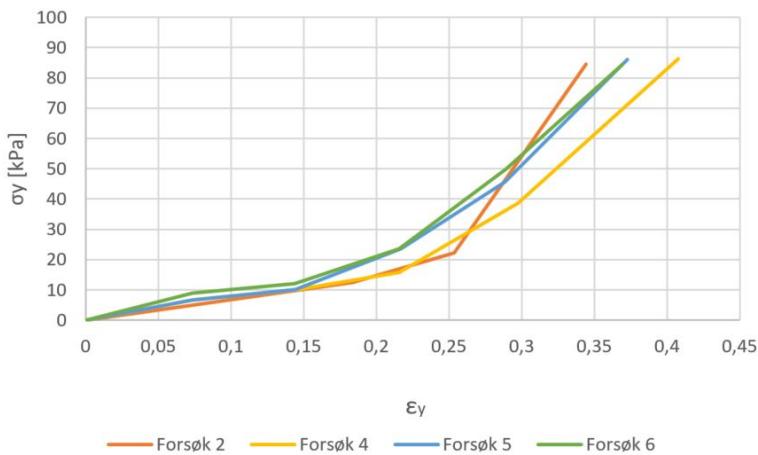
Massen kan variere på grunn av ulikt vanninnhold i lettklinkeren i de ulike forsøkene.

Last-deformasjonsegenskaper

Last-deformasjonskurve for forsøk 1–6 er presentert i figur 4.10. Beregnet spenning-tøyningskurve for forsøk 2, 4, 5 og 6 er presentert i figur 4.11. Figurene viser at stivheten i tuben øker med lastnivået. Forsøk 1 var et testforsøk, og bunnplaten var ikke bygget opp. Spenninger er ikke beregnet for forsøk 1 fordi bjelke for posisjonsmålinger ikke var montert på det aktuelle tidspunktet. Innmålte data for forsøk 3 ble borte ved lagring. Det er ingen tydelig sammenheng mellom tubenes beregnede komprimeringsgrad og lastreaksjon.



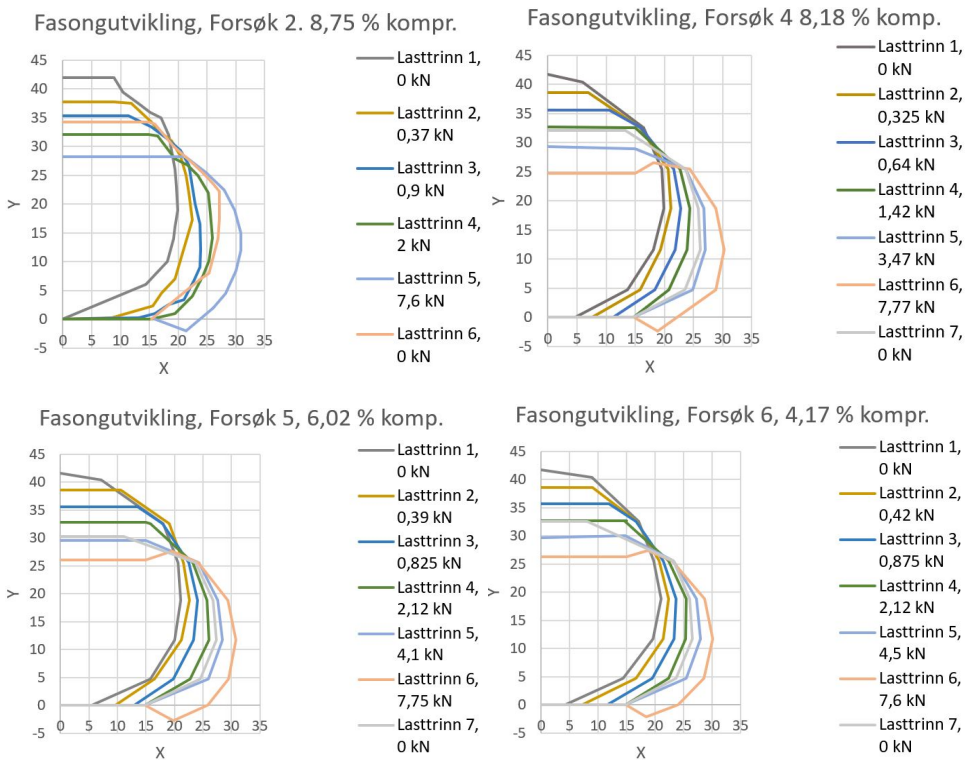
Figur 4.10: Kraft-deformasjonskurver for forsøk 1 til 6



Figur 4.11: Spenning-deformasjonskurver for forsøk 2, 4, 5 og 6

Tubens fasong ved belastning

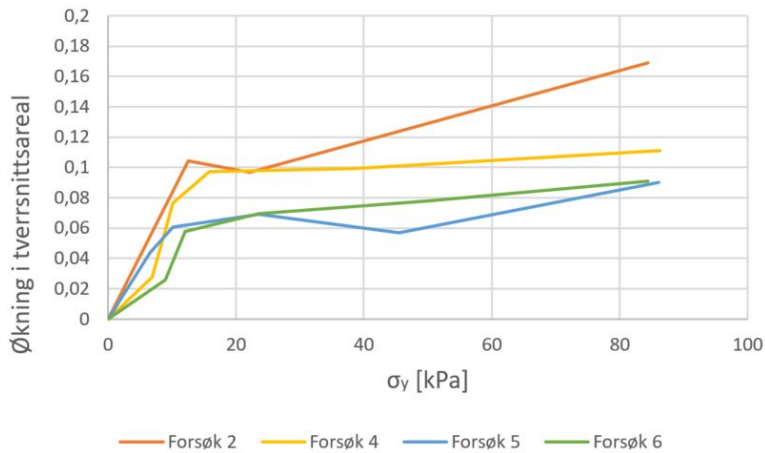
I figur 4.12 er tubens fasong presentert ved økende belastning. Alle lasttrinn er presentert for hvert forsøk. Enkelte lasttrinn i forsøk 2 er tydelig unøyaktig målt, og bør derfor sees bort fra.



Figur 4.12: Formutvikling ved belastning for forsøk 2, 4, 5 og 6.

Endring i tverrsnittareal

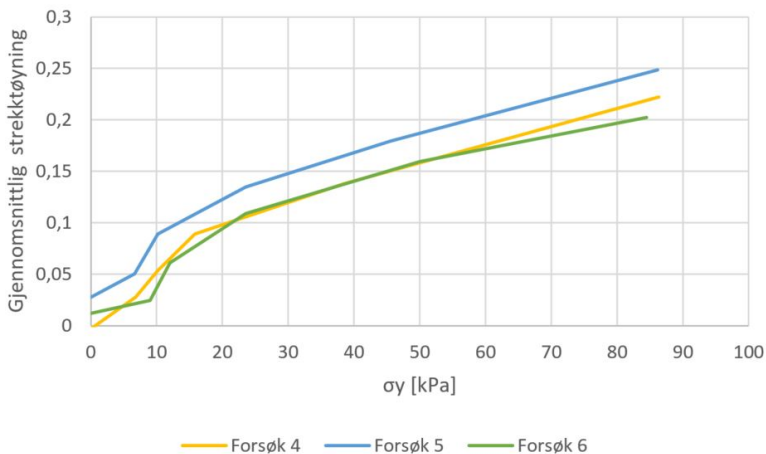
Endring av tverrsnittareal som følge av økt vertikal belastning er vist i figur 4.13 for forsøk 2, 4, 5 og 6. På grunn av at deformasjoner i lengderetningen ikke er tillat, gir endring i tverrsnittareal et mål på volumendring. Volumet øker ved belastning. Endringen er høyest ved lav belastning (0–15 kPa), før den flater ut etter omtrent 15 kPa. Merk at punktregistreringen i forsøk 2 er noe unøyaktig, og kan gi et feilaktige arealberegninger. Posisjonsmålingene er kun gjort på en side av tuben. Det er antatt symmetri om tubens lengdeakse.



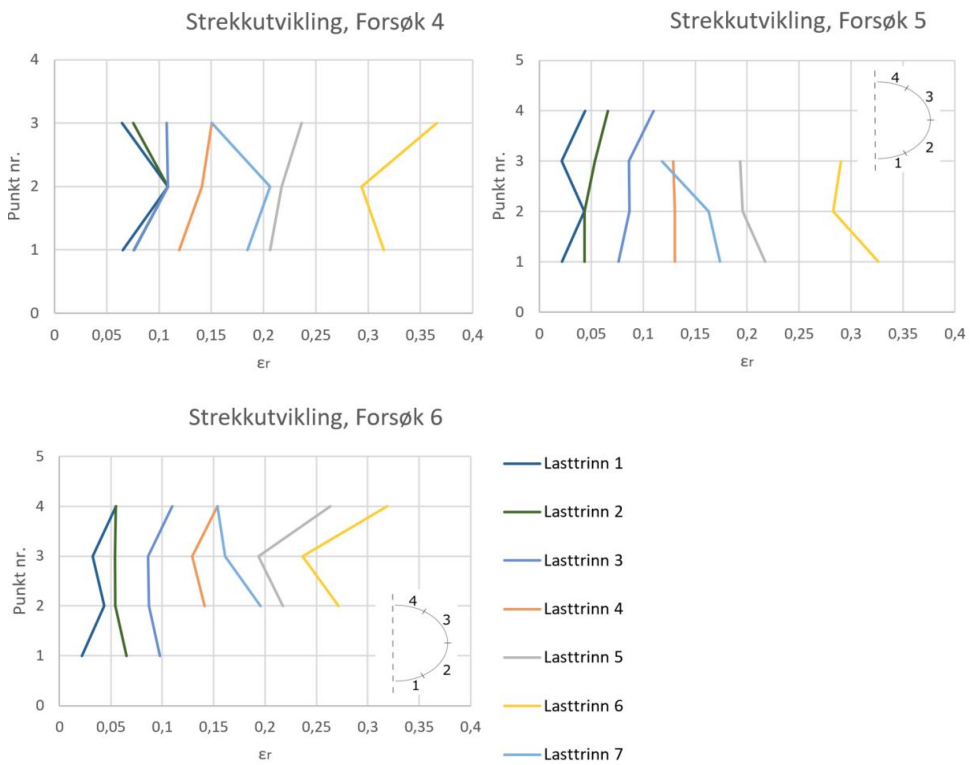
Figur 4.13: Endring av tubens tverrsnittsareal ved økende vertikal belastning

Strekk�øyning i gummimaterialet ved belastning

Gjennomsnittlig tøyning i gummimaterialet ved økende belastning er vist i figur 4.14 for forsøk 4, 5 og 6. Resultatet viser at strekk�øyningen øker med belastningsnivået. I figur 4.15 er utviklingen av strekk�øyning i avstand 1–4 vist for forsøk 4–6. I forsøk 4 er tøyningen målt langs tre lengder, mens i forsøk 5 og 6 er fire lengder målt som vist i figuren. Resultatet viser at strekk�øyningene er større i øvre og nedre del av tuben, særlig ved høy belastning.



Figur 4.14: Gjennomsnittlig strekk�øyning ved økt belastning



Figur 4.15: Strekkutøying i gummidaterialet i radiell retning, i forsøk 4, 5 og 6 for lasttrinn 1–7

Kapittel 5

Numerisk modellering av lettklinker innkapslet i gummi

5.1 Innledning

I tillegg til fysiske forsøk på geosyntettuber fylt med lettklinker, er det samme modellert ved hjelp av elementmetodeprogrammet PLAXIS 2D. Formålet med modellen er å analysere deformasjoner av tuben ved vertikal belastning. Modelleringen gjør det mulig å studere effekten av hver parameter separat. Belastningsforsøket presentert i kapittel 4 modelleres, og materialegenskaper bestemmes ved sammenligning av resultater.

5.2 Metode

5.2.1 Prosedyre

Første del av den numeriske analysen gikk ut på å lage en fungerende modell i PLAXIS 2D. Dette medførte mange utfordringer, særlig mangelen på kontaktformuleringer har medført utfordringer. Utfordringene er utdypet i kapittel 5.2.3. Deretter var det nødvendig å bestemme jordmodell, og videre hvilke parametere som skulle anvendes i både lettklinker-materialet, innkapslingsmaterialet og belastnings- og bunnplate. Enkelte parametere funnet i Høva og Gylland (2009b) ble benyttet for lettklinker. Andre parametere er beregnet ut fra resultater funnet i belastningsforsøket og dets innledende forsøk, se kapittel 5.2.4. Et parameterstudie er også utført ved å variere enkelte parametere og studere effekten av disse. Resultater fra belastningsforsøket i kapittel 4 er benyttet som grunnlag for å bestemme parametere.

Vertikalspenningene i toppen av tuben ble registrert i flere punkter langs tubens overflate. Gjennomsnittet av vertikalspenningene i punktene ble beregnet fra betydelige spenninger ble registrert i det aktuelle punktet.

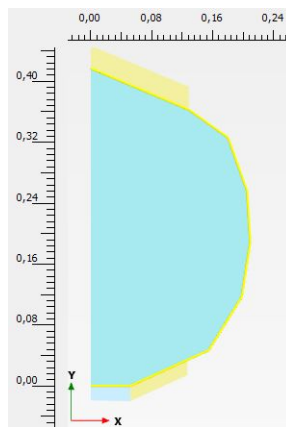
I tidligere utført numerisk analyse, kort beskrevet i kapittel 2.1.7, er det konkludert med at friksjon mellom geotekstil og lettlinker ikke gir betydelig effekt på strekkutviklingen i innkapslingsmaterialet. Effekten av friksjon mellom geotekstilet og plateelementene i kontakt, påvirket derimot strekkraften i geotekstilet ved belastning. Friksjon mellom geotekstilet og kontaktflatene er derfor definert.

5.2.2 Beskrivelse av modell

Geometrien til tuben i modellen er laget ut fra registreringer av tubens form før belastning i belastningsforsøkene. Dette er modellert ved å tegne et jordvolum med den gitte fasongen (blå i figur 5.1). Langs grensene til jordvolumet er det lagt geogridelementer (gule linjer i figur 5.1). Dette er linjeelementer som kun kan ta opp strekkrefter.

Nedenfor tuben er det lagt inn en stiv bunnplate som ikke skal deformeres for det aktuelle spenningsnivået i modellen. Ovenfor tuben er det lagt inn en stiv belastningsplate. Denne påføres vertikal forskyvning som trykker tuben sammen. Bredden på bunn- og belastningsplaten er beregnet ved formel (5.2), hvor det er forsøkt å oppnå 15 cm horisontal kontaktflate fra senter av tuben. Se kapittel 5.2.3.

I øvre del av tuben er interpolasjon mellom to registrerte punkter benyttet for å gi belastningsplaten en tilnærmet korrekt bredde. Bunnplaten er gitt bredde ut fra tilsvarende beregninger, men interpolasjon mellom punkter ble ikke nødvendig for å oppnå ønsket bredde.



Figur 5.1: Tuben slik den er modellert i PLAXIS 2D, med belastnings- og bunnplate.

5.2.3 Utfordringer og løsninger

PLAXIS 2D er et program som i utgangspunktet er utviklet for å analysere klassiske geotekniske utfordringer som setninger og stabilitet. Geometrien i modellen som er laget er noe annerledes. Dette har ført til en del utfordringer underveis. Hovedutfordringene har vært:

- Problemer med å generere elementnett
- Kontaktformuleringer
- Bøying av stivt elastisk materiale
- Manglende kontakt mellom elastisk materiale i bunnen
- Kontakflatenes horisontale bredde

Gjennom hele analysen har det i de fleste fasene vært nødvendig å justere iterasjonsparametere. Maksimalt antall steg ble økt, og maksimal lastendring per steg ble redusert. I tillegg ble ønsket antall iterasjoner per steg redusert. Antall steg per fase og antall iterasjoner per steg har vært avgjørende for å unngå divergens og ubalanserte krefter. Ved bruk av standard iterasjonsparametere stoppet beregningene. Ved deformasjoner av tuben har det vært nødvendig å oppdatere elementnettet i hver beregningsfase.

Problemer med å generere elementnett

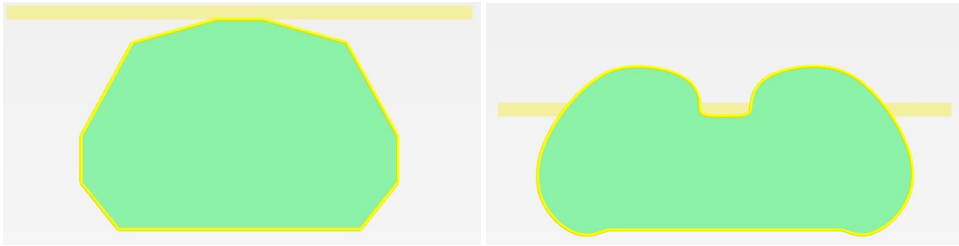
PLAXIS har tidvis ikke klart å generere elementnett for den aktuelle geometrien, selv om ulike materialelementer ikke har vært definert over hverandre. Dette til tross for at det har vært mulig for tilsvarende geometri i tidligere modeller. Dette gjelder for både fint og grovt nett. Årsaken er ikke funnet.

Løsningen ble å definere belastnings- og bunnplaten slik de er i figur 5.1, hvor belastningsplaten er definert 1 cm tykkere enn bunnplaten.

Kontaktformuleringer

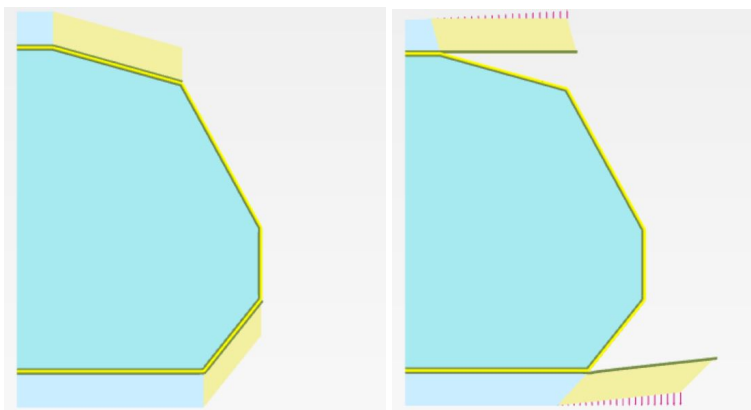
PLAXIS er et program som ikke har kontaktformuleringer. Det vil i praksis si at programmet ikke automatisk registrerer at to adskilte materialer kommer i kontakt med hverandre. Ved modelleringen av denne situasjonen har manglende kontaktformuleringer skapt utfordringer da tuben i realiteten kommer i kontakt med belastningsplaten og underlaget i økende grad ved belastning, uten at dette registreres av programmet. Dette er illustrert i figur 5.2.

Belastningsplaten er her derfor definert som et lineært elastisk materiale som dekker øvre del av geosyntettuben, som vist i figur 5.1, så langt tuben kommer i kontakt med belastningsplaten i forsøkene i kapittel 4. Mellom belastningsplaten og innkapslingsmaterialet legges det et grensesnitt med funksjonen *consider gap closure* aktivert. *Consider gap closure* er en funksjon som gjør at det dannes et mellomrom mellom materialer dersom



Figur 5.2: Resultat av forskyvning i topp, belastningsplaten og geosyntettuben registrerer ikke at de kommer i kontakt. Platen skyves gjennom tuben der den ikke har vært i kontakt i tidligere fase

strekkestyrken til grensesnittet mellom materialene nås, og materialene dras fra hverandre. I det lasten reverseres, etableres det kontakt mellom materialene før det utvikles trykkspenninger i kontaktflaten (Brinkgreve et al., 2017a). Det settes en lineær foreskrevet forskyvning på belastningsplaten som skal rette ut platematerialet slik at det ligger horisontalt i overkant av tuben, før platen senere skal trykkes vertikalt nedover. Tilsvarende er gjort med underlagsmaterialet for å skape kontakt mellom underlaget og tuben. Figur 5.3 viser grafisk hvordan dette er utført.



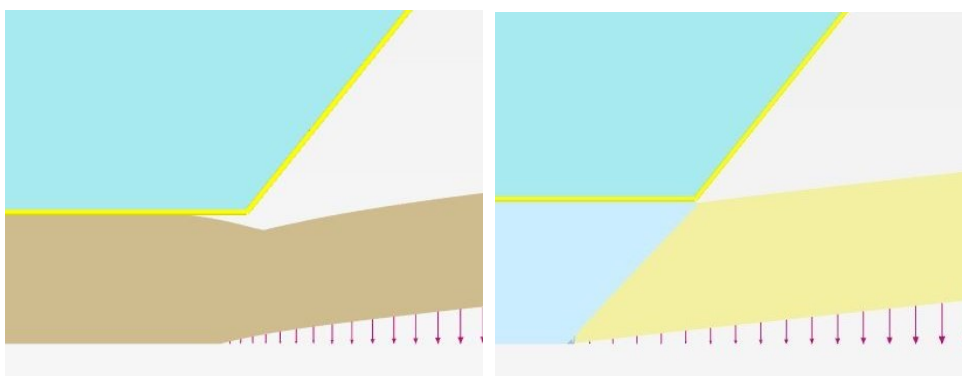
Figur 5.3: Etablering av kontaktformuleringer mellom tuben og belastningsplaten og underlaget

For å unngå at geotekstiltuben deformeres i det belastningsplaten i toppen av tuben forskyves opp, må ikke strekkspenninger tillates i kontaktflaten. Det samme gjelder i bunnen av tuben. Ved å benytte et grensesnitt hvor *tension cut off* er aktivert, vil ikke strekkspenninger oppstå i kontaktflaten og det dannes et mellomrom mellom materialene momentant ved strekkpåvirkning. Materialeegenskapene til grensesnittet er gitt i tabell 5.3. Geotekstiltuben er fastholdt i fasen hvor belastnings- og bunnplaten forskyves for å unngå deformasjoner.

Bøying av stivt elastisk materiale

For at belastningsplaten skal kunne skyves fra tuben, må forskyvningen settes i toppen av platen. En lav E-modul i platematerialet vil da føre til deformasjoner i materialet, i stedet for at bunnen av platen forskyves tilsvarende som toppen. Det er derfor viktig at E-modulen i materialet er tilstrekkelig høy.

Høy E-modul fører videre til at motstanden mot bøying av materialet er stor. I overgangen mellom horisontal og skrå del av platematerialet, vist i figur 5.4a, vil det da oppstå store spenninger når den skrå delen rettes ut. Dette gjør at platematerialet ikke blir horisontalt i overgangen.



(a) Samme materialegenskaper i hele nedbøyingsflaten (b) Lavere stivhet i materialet i horisontal del av flaten (Lysblå farge)

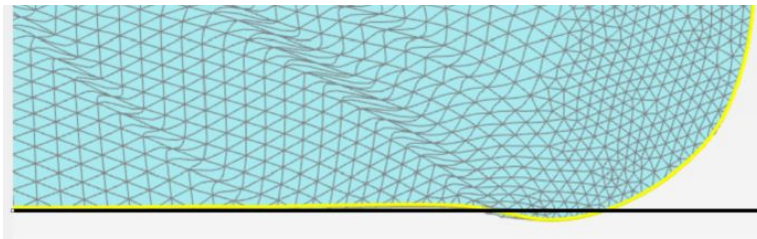
Figur 5.4: Effekt av endret materialstivhet i overgangen mellom horisontal og skrå del av bunnflate

Dette er løst ved å gi den horisontale delen av belastningsplaten lavere stivhet (blå del i figur 5.4b). Dette gjør at materialet deformeres lettere, og bøyeproblematikken som er vist i figur 5.4a unngås. Resultatet er vist i figur 5.4b. Etter at den skrå delen av materialet er bøyd horisontalt, byttes materialegenskapene i den horisontale delen slik at hele belastningsplaten har samme egenskaper. Det samme er gjort i bunnen. For å unngå at det myke materialet i underkant av tuben deformeres av tubens tyngde, settes alt i vektløs tilstand frem til belastning aktiveres i toppen av belastningsplaten.

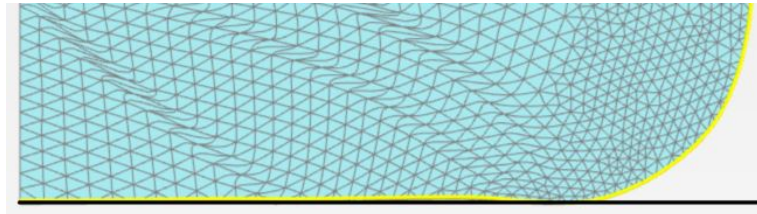
Manglende kontakt mellom bunnflate og tube etter etablering av kontakt

Belastning i toppen av tuben gjør at den deformeres som antatt, høyden reduseres og bredden øker. Da viser resultatet i PLAXIS 2D at elementer fra tuben og elementer fra underlaget legges over hverandre. De er ikke i kontakt, selv om kontaktformuleringer er etablert. Se figur 5.5a.

Forskyvningen av underlagsmaterialet (figur 5.3) ble først bestemt som den vertikale avstanden mellom underlaget og geotekstiltuben (x i figur 5.6), mens forskyvningen i x -



(a) Før justering av forskyvningsdistanse.



(b) Etter justering av forskyvningsdistanse.

Figur 5.5: Sammenligning av resultat av nedtrykking av tuben før og etter justering av forskyvningsdistanse for underlaget. Sort linje viser faktisk horisontal flate.

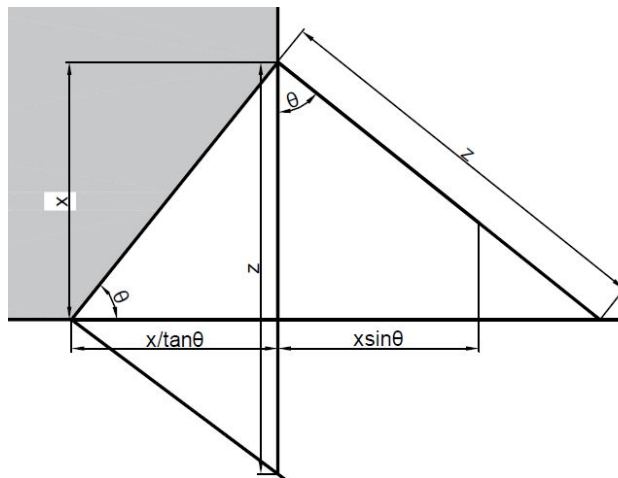
retning ble satt til å være fri. Fri x -retning gjør at ingen krefter påvirker materialet i x -retning ved forskyvning, og PLAXIS forskyver dermed materialet i retning normalt på opprinnelig vinkel (θ , som vist i figur 5.6, linje z). Det fører videre til at vertikal foreskrevne forskyvning ikke forskyver elementet rent vertikalt. Total forskyvningsdistanse blir dermed lengden z i figur 5.6. Gapet som dannes mellom tuben og underlaget som følge av at underlaget forskyves, tolkes av PLAXIS som lengden z i vertikal retning som illustrert på 5.6. Det vil si at vertikal avstand fra utgangsposisjonen blir lengden z . Denne lengden er større enn x , som gjør at underlaget forskyves under den horisontale flaten i bunnen av tuben, illustrert på figur 5.6. Tuben oppretter dermed ikke kontakt med en horisontal flate som den skal, konsekvensen av dette er at tuben ikke kommer i kontakt med en horisontal flate ved deformasjon som følge av belastning, som vist på figur 5.5a.

Ved å justere forskyvningslengden med en faktor k gitt ved formel (5.1), blir den vertikale forskyvningslengden x , som vist i figur 5.6. Dette gjør at underlagsmaterialet forskyves avstanden x i vertikal retning, og underlaget danner en horisontal flate. I figur 5.5 er det vist hvordan justering av forskyvningen med en faktor k påvirker resultatet i PLAXIS 2D. I figur 5.5a og 5.5b er tuben utsatt for samme foreskrevne forskyvning i topp. Utledning av justeringsfaktor k er vist i vedlegg A.

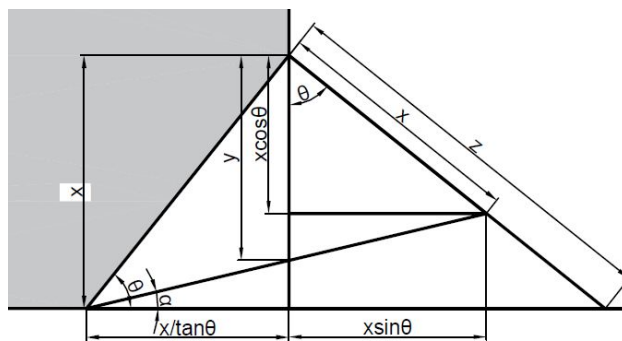
$$k = \frac{\cos \theta + \sin \theta \cdot \tan \theta}{1 + \sin \theta \cdot \tan \theta} \quad (5.1)$$

k = Justeringsfaktor

θ = Vinkel mellom tuben og horisontalt underlag i overgang, se figur 5.6.



Figur 5.6: Geometri av faktisk nedbøying ved foreskreven forskyvning med lengde x



Figur 5.7: Geometri av faktisk nedbøying ved justert foreskreven forskyvning

Ved å benytte justert forskyvningsdistanse med en faktor k , blir mellomrommet mellom materialene korrekt. Forskyvningen i resultatet i PLAXIS 2D vises som at ikke materialet er forskjøvet tilstrekkelig for å oppnå en horisontal flate, men kontakten i figur 5.5 viser at tuben kommer i kontakt med en horisontal flate ved belastning.

Horisontal bredde av kontaktflater

I belastningsforsøket er bunn- og belastningsplaten 30 cm brede. Ved store belastninger deformeres tuben utover dette, som det kan ses i figur 4.6b. I første omgang ble det antatt at lengden av kontaktflaten horisontalt ble tilsvarende horisontalt ø lengde av horisontal og skrå del. Ved belastning var det tydelig at dette ikke stemte. Videre ble horisontal lengde

antatt å være lengden av horisontal del og nedbøyd del, gitt ved:

$$l = \frac{\frac{x}{\tan \theta} + x \cdot \sin \theta}{\cos \alpha} \quad (5.2)$$

Vinkler og lengder fra figur 5.7.

Det viste seg at heller ikke denne lengden stemmer. Lengden øker med økende belastning av tuben. For 15 cm vertikal forskyvning av tuben gir modellen at horisontal kontaktflate i toppen er 15,5 cm, mens ved 20 cm vertikal forskyvning er kontaktflatene 16,6 cm lang. Bunnplaten gir horisontal lengde henholdsvis 15,1 og 16,3 cm. Beregnet med ligning (5.2) skal lengden være 15 cm. Differansen mellom faktiske kontaktflater i belastningsforsøk (kap. 4) og kontaktflatene i PLAXIS ved 15 cm vertikal forskyvning er så liten (0,5 og 0,1 cm) at det likevel aksepteres for dette forsøket.

5.2.4 Parameterbestemmelse

Anvendte materialparametere i modellen er bestemt ved beregninger, tidligere utførte studier og parameterstudier i modellen. Gjennomsnittlig sideinnspenning ble bestemt ut fra beregnet strekkraft i gummi materialet. Videre ble E-modulen for 0,5 % tøyning bestemt fra figur 2.20 for 20, 40 og 80 kPa sideinnspenning. Sammenhengen mellom sideinnspenning og E-modul ble bestemt, og det ble utført ekstrapolering for å bestemme E-modul ved beregnet sideinnspenning. Alle beregninger er vist i vedlegg C, som gir at:

$$E = 5,3 \text{ MPa}$$

Det ble i samarbeid med veileder Arnstein Watn vurdert at forskjellen mellom norsk Leca 10–20 ISO og svensk 12–20 er små, ut fra sammenligningsforsøk av materialelegenskaper av Høva og Gylland (2009a). I Høva og Gylland (2009b) er det kun dokumentert treaksiale forsøk på norsk leca lettlinker 10–20 ved 10 % komprimering. Dette er en høyere komprimeringsgrad enn i de utførte belastningsforsøkene. Beregningene er derfor basert på resultater for treaksialforsøk på svensk lettlinker 12–20 ved 5 % komprimering.

Aksialstivheten, EA, i gummi materialet ble beregnet ut fra Hooke's lov for tre dimensjoner, vist i vedlegg B. Det er antatt tilnærmet null tøyning av gummi materialet i tubens lengderetning på grunn av at den er fylt og dermed ikke forkortes. Plater i endene hindrer forlengelse. Gummi har tverrkontraksjon, $\nu = 0,5$ (Mott og Roland, 2009). Tverrkontraksjonen for EPDM 50 spesifikt er ikke spesifisert i produktdatabladet, og oppgitt tverrkontraksjon for gummi antas som gyldig. Ut fra dette er radiell aksialstivhet i gummi materialet bestemt til å være:

$$EA = 5,4 \text{ kN/m}$$

Modellen er testet for flere aksialstivheter i gummi materialet for å verifisere beregningene. EA=3,9 kN/m ble testet fordi dette er beregnet enaksial stivhet fra strekkforsøket, og

5,4 kN/m er beregnet stivhet. I tillegg ble 10, 15 og 30 kN/m testet for å studere effekten av høyere stivhet.

Ulike dilatansvinkler og friksjonsvinkler i lettklinkermaterialet ble testet. Tubens form i modellen ble sammenlignet med tubens form i belastningsforsøket ved omtrent samme deformasjonsnivå. Ut fra dette ble den mest passende dilatansvinkelen bestemt. Spenning-tøyningsegenskapene ble sammenlignet med resultater fra belastningsforsøk for å bestemme friksjonsvinkel.

Spenning-tøyningsegenskapene funnet i belastningsforsøkene er benyttet som grunnlag for sammenligning av effekten av ulike parametere. I modellen er spenningene presentert som gjennomsnittspenningen av tre punkter i toppen av tuben under belastningsplaten. Last-deformasjonsegenskaper i belastningsforsøket er registrert av lastcelle, og vil derfor i utgangspunktet være et mer nøyaktig grunnlag for sammenligning. Spenninger i belastningsforsøket er funnet ved et beregnet kontaktareal med forenklinger. PLAXIS 2D gir vertikal belastning totalt for hele modellen. Før påført vertikal deformasjon av tuben, er det påført vertikal forskyvning som genererer vertikalkrefter både i belastningsplaten og i bunnplaten i modellen. Dette vil påvirke totale vertikalkrefter i PLAXIS. I beregningsfase 1 forskyves belastnings- og bunnplate. Denne forskyvningen holdes til fase 4, hvor oppadrettet forskyvning i belastningsplaten gjøres om til nedadrettet forskyvning. Det er ikke kjent hvor i beregningsfasen denne omgjøringen foregår og det er dermed ikke mulig å sammenligne kreftene med krefter i belastningsforsøket. Gjennom hele beregningen virker nedadrettede vertikale krefter på bunnplaten.

Jordvolumet er tilegnet egenskaper som lettklinker, angitt i tabell 5.1. Jordmodellen Mohr-Coulomb benyttes fordi materialet viser en tilnærmet lineær oppførsel før materialet går til brudd i treaksiale forsøk, som vist i figur 2.20, for aktuelle spenningsnivå. I tabell 5.2 er materialparametere og -modell for belastnings- og bunnplate angitt, tabell 5.3 angir materialeegenskaper for grensesnittet mellom tuben og flatene ved etablering av kontaktformuleringer. Tabell 5.4 viser materialparametere for geogridelementene, som tilsvare gummimaterialet i belastningsforsøkene.

Tabell 5.1: Materialeegenskaper for Leca lettklinker 10–20 ISO anvendt i modellering av belastningsforsøk

Parameter	Verdi	Kilde
Materialmodell	Mohr-Coulomb	Beskrevet ovenfor
Tyngdetetthet, γ [kN/m ³]	2,6	Tabell 4.3
E-modul [MPa]	5,3	Beregnet i vedlegg C Verifisert ved parameterstudie
Poissontallet, ν	0,3	Stemmer overens med resultater
Kohesjon, c' [kPa]	0	Høva og Gylland (2009c)
Friskjonsvinkel, ϕ [°]	40	Høva og Gylland (2009c) Verifisert ved parameterstudie
Dilatansvinkel, ψ [°]	12	Parameterstudie

Tabell 5.2: Materialegenskaper, bunn- og belastningsplate

Parameter	Verdi
Materialmodell	Lineær elastisk
Tyngdetetthet, γ [kN/m ³]	0
E-modul [kN/m ²]	1 000 000
Poissontallet, ν	0

Tabell 5.3: Materialegenskaper, grensesnitt mellom tuben og flatene ved etablering av kontaktformuleringer

Parameter	Verdi
Materialmodell	Mohr-Coulomb
Tyngdetetthet, γ [kN/m ³]	0
E-modul [kN/m ²]	10 000
Poissontall, ν	0
Kohesjon, c' [kN/m ²]	1
Friskjonsvinkel, ϕ [°]	20
Dilatansvinkel, ψ [°]	0

Tabell 5.4: Materialegenskaper geogrid, tilsvarende gummi

Parameter	Verdi	Kilde
Materialoppførsel	Elastisk	Definisjon på gummi, kap. 2.5
Strekkestyrke, EA [kN/m]	5,4	Beregnet i vedlegg B Verifisert med parameterstudie

5.2.5 Beregningsfaser i PLAXIS 2D

Innledende fase

I den innledende fasen er tuben og belastningsplatene aktivert. Gummimaterialet er fastholdt for å unngå deformasjoner. Materialparametere som i kapittel 5.2.4, utenom for bunn- og belastningsplate som har stivhet $E=100\,000$ kPa i de gule feltene i figur 5.8a og $E=100$ kPa i det lyseblå feltet. Årsaken til dette er beskrevet under *Bøying av stivt elastisk materiale* i kapittel 5.2.3. Tyngdekraften er ikke aktivert. Fasen er vist i figur 5.8a.

Fase 1

Åpningen mellom tube og belastningsplate, og mellom tube og bunnplate dannes ved at bunn- og belastningsplate forskyves for å danne horisontale flater, som vist i figur 5.8b. Tuben er fastholdt, og tyngdekraften er ikke aktivert. Foreskrevet forskyvning i bunnplaten er lineær fra 0 til $-0,0315$ m, beregnet ut fra vertikal avstand justert med formel fra ligning (5.1), der θ er vinkelen mellom nedre del av tuben og horisontallinjen. Horisontal lengde

er beregnet som vist i kapittel 5.2.3. I toppen er foreskrevet forskyvning lineær fra 0 til 0,0505 m, beregnet på tilsvarende måte som bunnplaten.

Fase 2

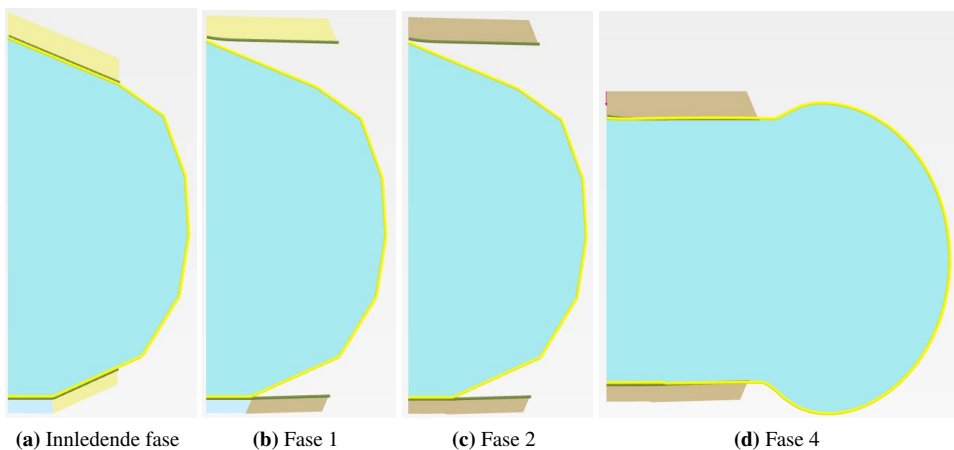
Materialet i belastningsplaten og bunnplaten gjøres om til et elastisk materiale med høyere stivhet, gitt i tabell 5.2. Dette er vist i figur 5.8c. Hensikten er å unngå deformasjoner i platematerialet ved påført belastning i fase 4.

Fase 3

Tyngdekraften aktiveres. Elementnettet oppdateres. Grensesnittmaterialet mellom gummi materialet og platene i topp og bunn byttes til et materiale med friksjonsegenskaper som det er mellom gummi og stål.

Fase 4

Foreskrevet forskyvning av tuben til omtrent 15 cm deformasjon, tilsvarende som i belastningsforsøket. Vist i figur 5.8d Forskyvningen er angitt lineært fra -0,15 m i senter av belastningsplaten til -0,0958 m i ytterkant. Elementnettet oppdateres.

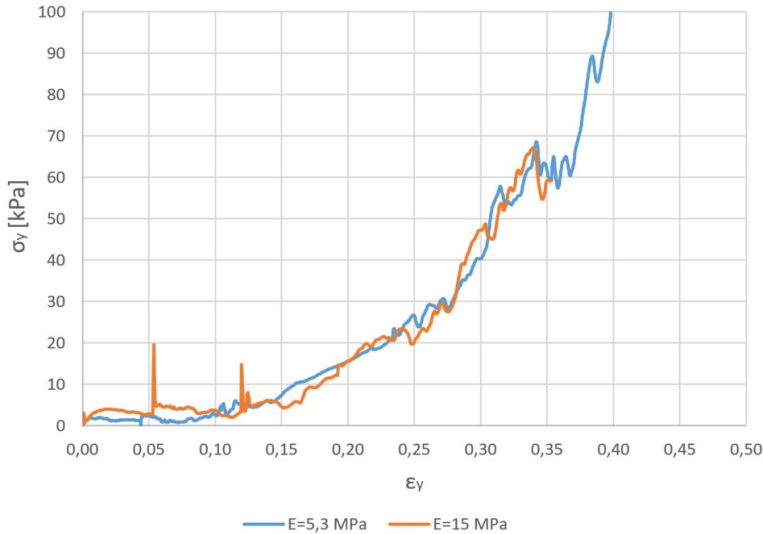


Figur 5.8: Faser i numerisk analyse

5.3 Resultater

5.3.1 E-modul i lettlinker

I figur 5.9 er last-deformasjonskurven vist for to beregninger der E-modulen er henholdsvis 5,3 og 15 MPa. Resterende materialparametere er som angitt i kapittel 5.2.4.



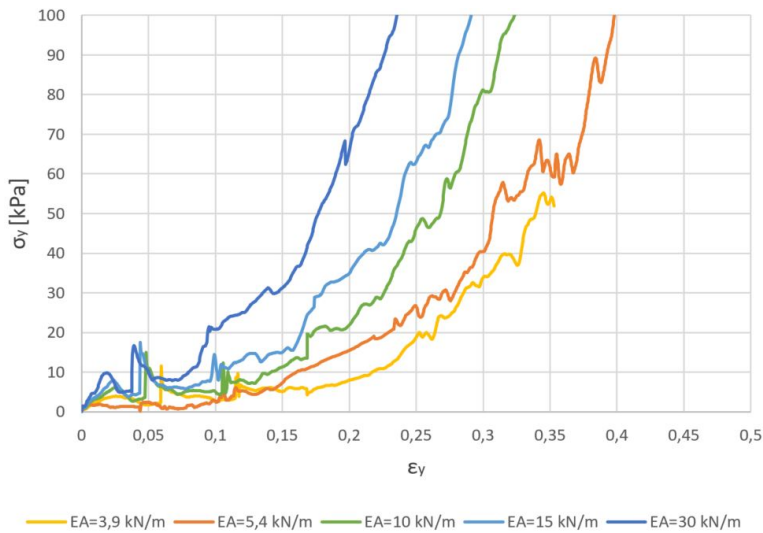
Figur 5.9: Sammenligning av last-deformasjonskurve for tube modellert med E-modul 5,3 MPa og 15 MPa

Figuren viser at i belastningsforsøk med et relativt fleksibelt innkapslingsmateriale har stivheten i lettlinkermaterialet liten effekt på deformasjonen ved belastning. I figur 5.9 er differansen mellom stivheten i forsøkene stor, uten at det gir betydelig innvirkning på deformasjonen.

5.3.2 Aksialstivhet i gummimaterialet

Deformasjonsegenskaper med ulik aksialstivhet i gummimaterialet er presentert i figur 5.10 for tre aksialstivhet, 3,9, 5,4, 10, 15 og 30 kN/m. Parametere i forsøket er ellers som i kapittel 5.2.4.

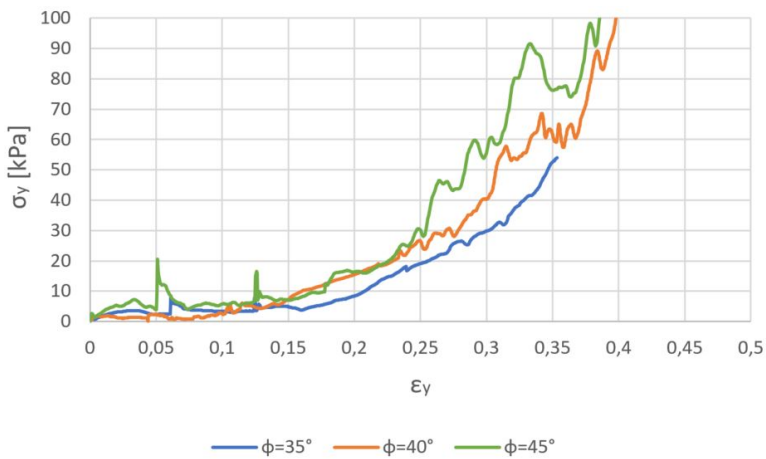
Resultatet viser at aksialstivheten i innkapslingsmaterialet har relativt stor effekt på deformasjonsutviklingen ved belastning. I figur 5.10 vises det at relativt små endringer i aksialstivhet gir betydelig effekt på deformasjonsegenskapene i tuben.



Figur 5.10: Sammenligning av spenning-tøyningskurve for tuber modellert med aksialstivhet 3,9, 5,4, 10, 15 og 30 kN/m

5.3.3 Friksjonsvinkel i lettlinker

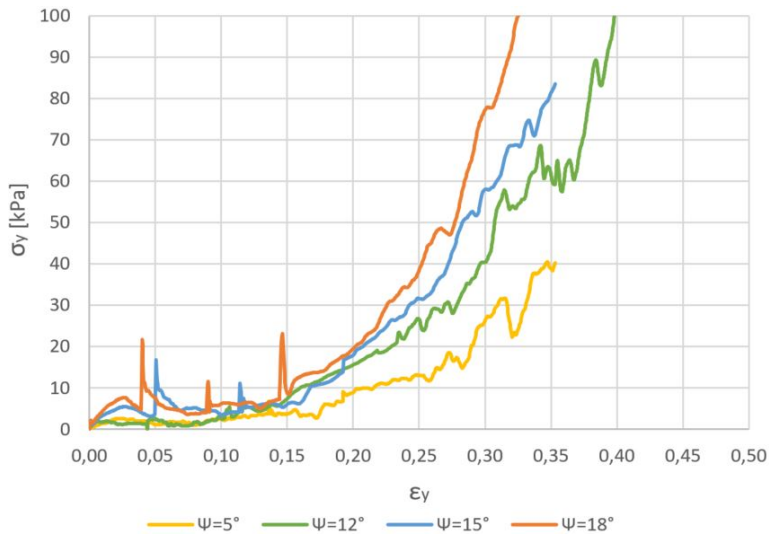
Figur 5.11 viser at friksjonsvinkelen i lettlinkermaterialet påvirker tubens totale stivhet.



Figur 5.11: Modell med friksjonsvinkel 35° , 40° og 45°

5.3.4 Dilatansvinkel i lettklinker

Spennings-tøyningskurve for tuben med dilatansvinkel henholdsvis 5° , 12° , 15° og 18° , er presentert i figur 5.12. Resterende parametere er som angitt i kapittel 5.2.4.



Figur 5.12: Sammenligning av last-deformasjonskurve for tube modellert med dilatansvinkel 12° , 18° og 20°

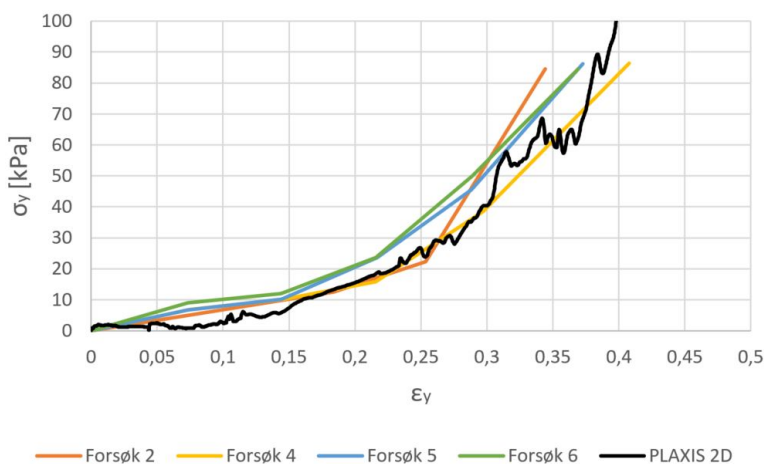
Som figuren viser, har dilatansvinkelen i materialet relativt stor effekt på deformasjonsutviklingen ved belastning. Resultatet viser at tubens stivhet øker med dilatansvinkelen i fyllmaterialet.

5.3.5 Sammenligning mot resultater fra belastningsforsøk

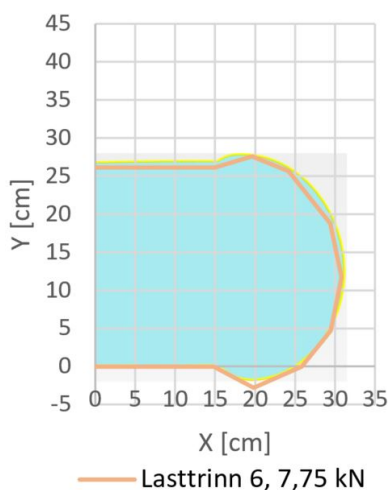
Fra resultatene presentert ovenfor er modellen tilpasset resultatet fra belastningsforsøket i kapittel 4 ved å vurdere parametere. I figur 5.13 er resultatet fra modelleringen sammenlignet med resultater fra belastningsforsøk. ψ er 12° , ϕ er 40° , E er 5300 kPa. Aksialstivheten i gummimaterialet er $5,4$ kN/m. Resterende parametere er som angitt i kapittel 5.2.4. Som figuren viser, er det godt samsvar med resultater fra belastningsforsøk for dette lastnivået.

I figur 5.14 er tubens fasong i modellen sammenlignet med tubens fasong i belastningsforsøk 5, ved omtrent samme lastnivå. I belastningsforsøk 5 er påført vertikalspenning i overkant av 86 kPa, mens i modellen er påført vertikalspenning 90 kPa. Belastningsplaten er i modellen $15,5$ cm bred, mens i forsøket er den 15 cm målt fra senter og utover. Resultatet kan tyde på at en dilatansvinkel på 12° gir samme volum som ved omtrent tilsvarende belastning i belastningsforsøket.

I figur 5.15 er aksialkreftene i geogridelementene i modellen sammenlignet med beregnet aksialkraft i gummimaterialet ved belastningsforsøk 4, 5 og 6 ved omtrent 15 cm vertikal



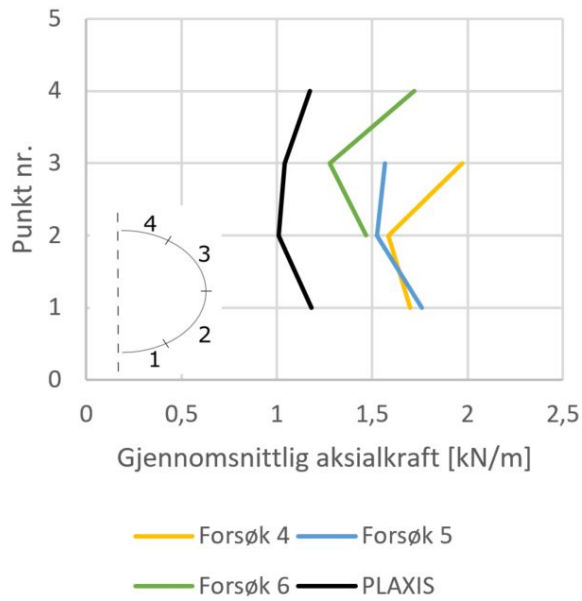
Figur 5.13: Sammenligning av spenning-tøyningskurve for tube modellert med parametere som gitt i kapittel 5.2.4, og $\psi = 12^\circ$, mot beregnede spenninger og deformasjoner fra belastningsforsøk i kapittel 4.



Figur 5.14: Sammenligning av tubens form i belastningsforsøk 5 og i modell med parametere som angitt i kapittel 5.2.4. Tubens form i modellen er vist med blått fyll og gule grenser

deformasjon. De beregnede aksialkreftene fra belastningsforsøket er utført med E-modul 2697 kPa, fra vedlegg C. Gummimaterialets ikke-lineære elastisitet er ikke tatt hensyn til i beregningene.

Gjennomsnittlig aksialkraft i gummimaterialet i modellen ser ut til å være noe lavere enn i belastningsforsøket. Dette kan komme av at det i belastningsforsøket påføres strekk i gummimaterialet ved innfylling og komprimering. Denne prosessen er ikke inkludert i modellen, og vil derfor få en noe lavere strekkraft. Figur 5.15 viser likevel at tøyningen



Figur 5.15: Aksialkrefter i gummi materialet i alle belastningsforsøk ved ca 15 cm vertikal belastning sammenlignet med PLAXIS-modell

i gummi materialet er større i punkt 1 og 4, enn den er i 2 og 3. Dette samsvarer med resultatet fra belastningsforsøket.

Kapittel 6

Numerisk modellering av lettklinker innkapslet i geotekstil

6.1 Innledning

Det er laget en modell med lettklinker innkapslet i et stivere materiale, tilsvarende et geotekstil, oppgitt i vedlegg D. Modellen er tilpasset belastningsforsøk utført av Górnjak (2013), for sammenligning av resultater. Formålet med modelleringen er å verifisere at modellen utviklet i kapittel 5 også stemmer for lettklinker innkapslet i et stivere materiale, tilsvarende et geotekstil.

6.2 Metode

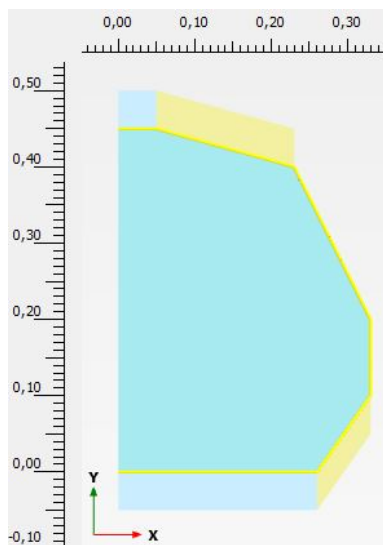
6.2.1 Prosedyre

Resultater bestemt i kapittel 5 for lettklinkermaterialet er benyttet for å modellere tube innkapslet i geotekstil. Aksialstivheten til geotekstilmaterialene TMS PP 64 og TMS PP PVA 72, som er henholdsvis 30 og 60 kN/m fra vedlegg D, er benyttet. I tillegg er et materiale med stivhet 120 kN/m testet. Det er i samarbeid med veileder Arnstein Watn vurdert at tverrkontraksjonen i disse strikkede geotekstilene er lav. Grunnen til det er at geotekstilene er strikket, og fibre retningsorientert. Dette gir mindre tverrkontraksjon. Fastholdingen i tubens lengderetning påvirker derfor ikke stivheten i radiell retning betydelig. Oppgitt enaksial stivhet er derfor benyttet direkte. Tverrkontraksjonstallet ν er ikke oppgitt i materialbeskrivelsen i Górnjak (2013). Geotekstilene som benyttes i LiTuWa er utviklet spesielt for dette formålet, og finnes derfor ikke i kommersielle produktdatablader. Resultatet fra

modelleringen er sammenlignet med resultatet fra Górnaiak (2013) sine belastningsforsøk på geotekstiltuber, presentert i kapittel 2.1.5.

6.2.2 Beskrivelse av modell

Det er tatt utgangspunkt i geometrien fra figur 2.3, som angir geometrien i en reell tube etter innblåsning av lettlinker. Innblåsingsmetoden benyttet i Górnaiak sitt belastningsforsøk og i registreringen av form i figur 2.3 er ikke den samme. Fasongen i modellen er tilpasset høyde/breddeforhold for tuben etter fylling, oppgitt i tabell 2.2, uten å påvirke omkrets i stor grad. Geometrien er vist i figur 6.1



Figur 6.1: Geometri av tube, inkludert belastnings- og bunnplate

Materialparametere for grensesnittet mellom tuben og flatene er gitt i tabell 5.3. Materialeegenskaper for geotekstilene er gitt i tabell 6.1. Innledende aksialstivhet (J_1) gjelder inntil 20–30 % tøyning, og er derfor benyttet. For lettlinkermaterialet er materialparametrene som angitt i tabell 5.1, utenom E-modul = 50 MPa og dilatansvinkel = 12° . Densiteten er byttet ut med oppgitt løs densitet for belastningsforsøkene etter innblåsning i tubene fra tabell 2.3, som er rundt $4,65 \text{ kN/m}^3$ etter belastning.

Tabell 6.1: Materialeegenskaper geotekstil, strekkstyrke fra vedlegg D

Parameter	TMS PP 64	TMS PP PVA 72
Materialoppførsel	Elastisk	Elastisk
Strekkstyrke, EA [kN/m]	30	60

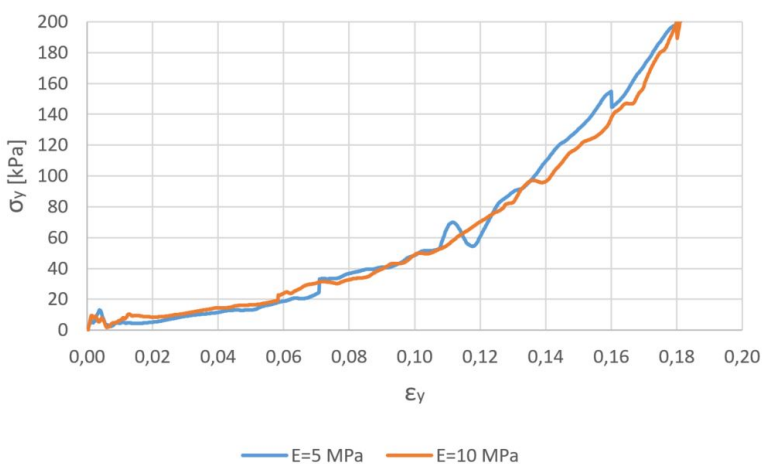
Beregningsfasene er tilsvarende som i kapittel 5.

6.3 Resultater

I modelleringen av belastningsforsøk med geotekstil er resultatet sammenlignet med resultatet fra belastningsforsøk utført av Górnaiak (2013), beskrevet i kapittel 2.1.5.

6.3.1 E-modul i lettklinker

I figur 6.2 er spenning-tøyningskurve for to beregninger, hvor E-modulen er henholdsvis 5 og 10 MPa, presentert. Resterende materialparametere er like, som angitt i kapittel 5.2.4. Geotekstilet er tilegnet stivhet $EA=30$ kN/m.



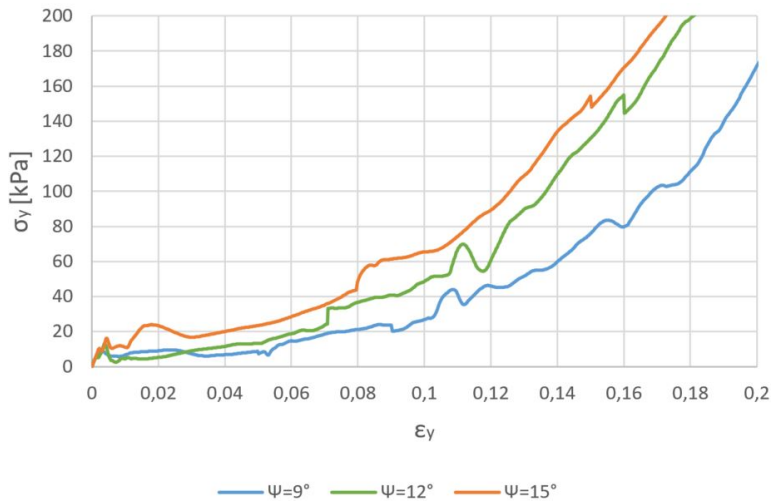
Figur 6.2: Spenning-tøyningskurve for med E-modul 5 MPa og 10 MPa

Resultatet viser at elastisitetsmodulen ikke påvirker deformasjonsegenskapene i tuben.

6.3.2 Dilatansvinkel i lettklinker

Figur 6.3 viser spenning-tøyningskurve for numerisk modell med dilatansvinkel henholdsvis 9° , 12° og 15° i lettklinkermaterialet. Resterende parametere er som gitt i kapittel 5.2.4. Stivheten i geotekstilet er som TMS PP 64, 30 kN/m. Høyde før belastning er 0,45 m.

Også når lettklinkermaterialet er innkapslet i et stivere materiale, påvirker dilatansvinkelen vertikal deformasjon ved belastning betydelig. Resultatet viser at økning i dilatans fra 12° til 15° , ikke påvirker tubens stivhet i like stor grad som økning fra 9° til 12° .



Figur 6.3: Spenning-deformasjonskurve for belastningsforsøk med dilatansvinkel 9° , 12° og 15°

6.3.3 Aksialstivhet og krefter i innkapslingsmaterialet

I figur 6.4 er spenning-tøyningskurve med ulike aksialstivheter vist. Dilatansvinkelen er 12° , friksjonsvinkelen er 40° og E-modulen er 5 MPa, etter beregninger og funn i kapittel 5.

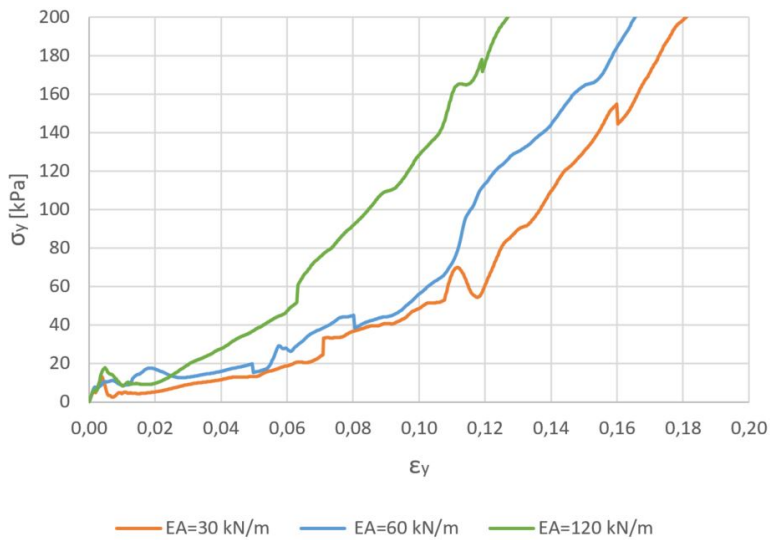
Resultatet viser at stivheten i innkapslingsmaterialet påvirker deformasjonene av tuben ved belastning. Økt stivhet i innkapslingsmaterialet gir økt stivhet for hele tuben.

I figur 6.5 er gjennomsnittlig mobilisert strekkraft i innkapslingsmaterialet presentert for tre ulike aksialstivheter. Gjennomsnittlig aksialkraft er funnet ved 0, 5 og 10 cm vertikal deformasjon (0 %, 11 % og 22 %) for alle tre modellforsøk. I tillegg er gjennomsnittlig aksialkraft for det stiveste geotekstilet funnet ved 3 cm vertikal deformasjon, for sammenligning. Resultatet viser at stivere innkapslingsmateriale gir høyere mobilisert aksialkraft ved belastning.

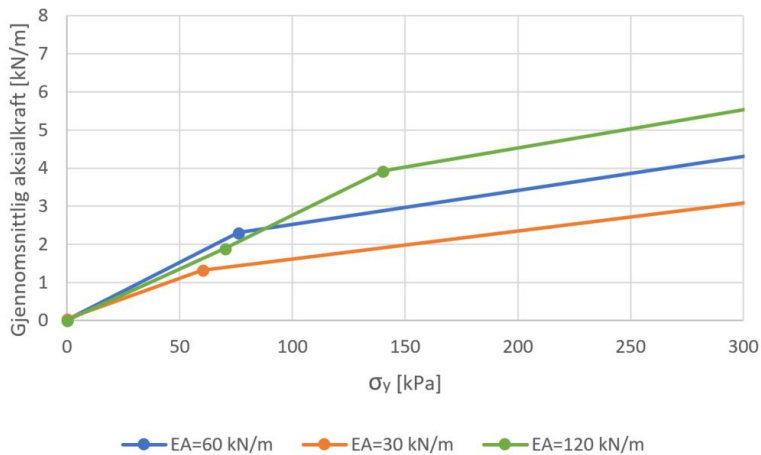
6.3.4 Sammenligning med resultater fra belastningsforsøk

I figur 6.6 er forholdet mellom tubens høyde og maksimale bredde avhengig av gjennomsnittlig vertikalspenning i toppen av tuben presentert.

I belastningsforsøk utført av Górnjak (2013), er resultatet presentert som et forholdstall mellom høyde og bredde ved 30,34 kN vertikal belastning. Dette tilsvarer omtrent 100 kPa vertikalspenning, målt av lastcelle og beregnet teoretisk. Høyde/breddeforhold for to ulike geotekstiltuber er gitt i tabell 6.2, både fra modell og fra belastningsforsøk utført av Górnjak (2013).

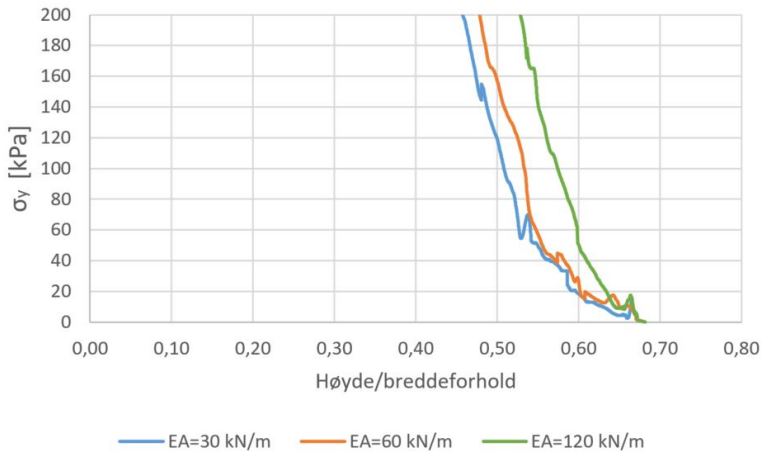


Figur 6.4: Spenning-tøyningskurve for belastningsforsøk med aksialstivhet 30, 60 og 120 kN/m



Figur 6.5: Gjennomsnittlig aksialkraft ved belastning for ulike aksialstivhet i geotekstilet.

For gitte vertikalspenninger i øvre del av tuben, er høyde/breddeforholdet fra modellen rimelig likt høyde/breddeforholdet i reelle forsøk. Tabell 6.2 viser at modellen gir et noe lavere forholdstall enn forsøkene.



Figur 6.6: Høyde/breddeforhold for modellert tube av TMS PP 64 og TMS PP PVA 72

Tabell 6.2: Høyde/breddeforhold ved angitt teoretisk og registrert vertikal belastning, sammenlignet med resultat fra modellering

Geotekstil	Høyde/breddeforhold i modell	Høyde/breddeforhold i forsøk	σ_y [kPa]
			Teori/Registrert
TMS PP 64	0,51	0,54–0,57	103,28/102,4
TMS PP PVA 72	0,53	0,54–0,56	94,87/101,4
EA=120 kN/m	0,56	-	-

Diskusjon

7.1 Innledende forsøk

Løs densitet

Løs densitet i lettklinker 10–20 ISO er i Høva og Gylland (2009a) funnet å være 231 kg/m^3 , i dette forsøket ble den funnet til å være $242,9 \text{ kg/m}^3$. Løs densitet er bestemt for utørket materiale, noe som gir større masse enn tørket materiale. Vanninnholdet er varierende, men et gjennomsnittlig vanninnhold på 1 % påvirker ikke tyngden betydelig. Bestemmelse av løs densitet er et sensitivt forsøk, som i stor grad avhenger av forsøksprosedyre. I dette forsøket tilfredsstillers den anvendte sylindere kravene i henhold til NS-EN 1097-3:1998, men forholdet mellom diameter og høyde er i nedre del av kravspesifikasjonen. I tillegg er volumet større enn minstekravet. Dette kan øke densiteten i materialet. I dette tilfellet er hensikten med å bestemme løs densitet å bestemme materialets komprimeringsgrad i tubene før belastningsforsøk. For dette formålet vurderes resultatet som tilfredsstillende.

Vanninnhold

Vanninnholdet bestemt i forsøket, er det samme som gjennomsnittlig vanninnhold i Leca lettklinker 10–20 ISO funnet av Høva og Gylland (2009b), som gitt i tabell 2.4. Resultatet viser også at vanninnholdet er relativt varierende. Dette kan påvirke registrert masse av lettklinker i hver tube. Materialet midt i sekken med lettklinker som er brukt i disse forsøkene var synlig fuktigere enn materialet i øvre og nedre del. Det er usikkert hvor stor andel av materialet som kom fra hver del av sekken i forsøket for bestemmelse av vanninnhold, noe som øker usikkerheten i resultatene.

Sikteanalyse

Sikteanalysen viser at det ikke er en betydelig endring av korndiameter i lecakulene etter belastning. Sammenlignet med sikteanalyse utført på tilsvarende materiale av Høva og Gylland (2009b) i figur 4.8 er det ikke tydelig at belastningsforsøket gir betydelig knusing. Lettklinkerkulene kan ved høy belastning deles i to. Dette er en nedknusing som ikke synliggjøres i en sikteanalyse, da diameteren ikke reduseres. For å bestemme knusingsgraden av materialet, er ikke sikteanalyse alene egnet. Visuell inspeksjon er like egnet som sikteanalyse for å vurdere nedknusing. Observasjoner tyder på at komprimering og belastning i liten grad knuste materialet.

Differansen mellom de to utførte sikteanalyser kan delvis forklares med overbelastning av siktesats med maskevidde 11,2 mm. Det kan se ut som at enkelte lettklinkerkuler har knust ved komprimering eller belastning, men det er ikke en betydelig andel.

Maksimalt oppnådd spenningsnivå i forsøket er 85 kPa. Dette er under knusenivået for Leca 10–20 ISO. Det er derfor rimelig at materialet ikke knuser.

Strekkforsøk

Strekkforsøk er utført med enaksial belastning. Dette resulterer i elastisitetsmodul som gjelder kun ved enaksiale spenninger. I belastningsforsøket er materialet delvis fastholdt, og tøyningene som oppstår i tubens lengderetning er små. I beregningene av enaksial stivhet ved fastholding er null deformasjon i horisontal retning antatt. Dette stemmer ikke helt overens med situasjonen i tuben, men er mer korrekt enn at materialet kan tøyes fritt i horisontal retning. E-modul er beregnet for 25,9 % tøyning. Materialet er stivere fra 0 til 6,5 % tøyning enn det er videre. Beregnet E-modul er derfor en gjennomsnittlig E-modul inntil 25,9 % tøyning. Verdien anvendes i numerisk analyse i PLAXIS, hvor materialet defineres lineært elastisk. Denne verdien vil derfor være den mest korrekte for belastning som medfører inntil 26 % tøyning i innkapslingsmaterialet. Endring i materialets tykkelse er ikke inkludert i spenningsberegningene da denne var for liten til å måles. Dette påvirker beregnet E-modul og EA brukt i numerisk analyse.

Strekkforsøket gir tre punkter på kurven. Flere punkter ville gitt en mer nøyaktig beskrivelse. Registrering av endret tykkelse ville også gitt mer korrekt beregnet spenning. Gummi er ikke lineært elastisk, så det er fra kapittel 2.5 ikke mulig å benytte Hooke's lov, med mindre E-modul for aktuelt tøyingsnivå er kjent. Siden belastningsforsøket gir tøyning til i overkant av 30 % er beregnet gjennomsnittlig E-modul noe lav.

7.2 Belastningsforsøk

Utførte belastningsforsøk gir sammenligningsgrunnlag for numerisk analyse. Belastningsforsøket gir tubens faktiske reaksjon på vertikal belastning.

Last-deformasjonskurvene registrert av lastcelle viser at tubenes stivhet øker med lastnivået. Omregnet til spenning og tøyning viser kurvene en trend der tuben er stivere ved første belastning, før den reduseres noe i neste lasttrinn, og deretter øker igjen. Gummimaterialet oppfører seg på samme måte ved enaksialt strekkforsøk. Dette tyder på at stivheten i tuben avhenger av stivheten i innkapslingsmaterialet.

Tverrsnittarealet øker med økende belastning. Økt tverrsnittareal betyr at volumet øker, og at lettklinkeren dilaterer. Resultatet viser at økningen er størst ved lave spenningsnivå, inntil omtrent 15 kPa, før den så flater ut. Dette kan være forårsaket av at materialet har oppnådd maksimal volumekspansjon ved 15 kPa belastning. Det kan også komme av at hele belastningsplaten har oppnådd kontakt med tuben, og ytterligere belastning i større grad gir skjærdeformasjoner. På grunn av lettklinkermaterialets høye interne porevolum, vil nedknusing redusere volumet. Volumøkningen bygger derfor opp under resultatet fra sikteanalysen, som indikerer liten grad av knusing.

Tuben er noe lengre enn belastningsplatene, se figur 7.1. Det medfører at tubens fulle lengde ikke belastes, noe som kan føre til at deler av lettklinkermaterialet flyttes til de ubelastede endene. Effekten av dette er trolig liten fordi tuben er hindret i å forlenges og alle registreringer er gjort på midtre del av tuben. I tillegg er tuben ikke mer enn 5 cm lengre enn belastningsplaten i hver ende. Også belastningsplatenes bredde er mindre enn tubens maksimale bredde gjennom forsøkene. I siste lasttrinn før avlastning, er bredden på belastningsplaten for liten for å tilføre vertikal belastning over hele tubens bredde. Se figur 5.14. Det er da ikke tubens fullstendige motstand mot vertikal belastning som registreres av lastcellen. Forsøkene er hovedsakelig utført for å gi et sammenligningsgrunnlag for numerisk modellering. Ved å legge inn samme bredde på belastningsplaten i den numeriske analysen, vil resultatet likevel gi korrekt sammenligningsgrunnlag.



Figur 7.1: Tuben er lengre enn belastningsplaten

Ved avlastning går tuben tilbake mot opprinnelig form. Dette vises både i presentasjonen

av formendring i figur 4.12, og at strekktøyningene i gummien reduseres ved avlastning i siste lasttrinn, vist i figur 4.15. Dette er gummimaterialet som søker sin opprinnelige form, lettklinker omlagres ikke på denne måten uten ytre påvirkning.

Tøyingsnivået i gummimaterialet øker med økende belastning. Det er større tøyning i gummien i øvre og nedre del av tuben, nærmest kontaktflatene. Dette kan komme av at friksjon mellom gummimaterialet og platene i topp og bunn hindrer bevegelse i materialet under platen, som videre medfører økt strekk nærmest platene. Etter avlastning er ikke strekktøyningene tydelig større i øvre del. Da er også friksjonen mot belastningsplaten borte, mens bunnplaten fortsatt er i kontakt med tuben og viser en noe større strekktøyning enn øvre del. Dette tyder på at hypotesen om økt strekk på grunn av friksjon, kan stemme.

Ved å utføre belastningsforsøk på lettklinker innkapslet i gummi, blir deformasjoner i innkapslingsmaterialet svært synlige på grunn av gummiens høye elastisitet. Dette gjør at effekten av belastning på innkapslingsmaterialet kan studeres i større grad enn dersom et stivere geotekstil hadde vært benyttet. Det er ikke aktuelt å benytte gummi som innkapslingsmateriale i reelle prosjekter, dette er kun et laboratorieforsøk for å studere hvordan strekkstyrken i innkapslingsmaterialet utnyttes ved belastning.

I teorien skal økt komprimeringsgrad gi større dilatans. Det skal også føre til at friksjonsvinkelen i lettklinkeren øker, og videre gir tuben stivere oppførsel. Det er ikke funnet noen tydelig sammenheng mellom beregnet komprimeringsgrad og oppførsel. Volumet er bestemt for tuben før den er løftet inn i belastningspressen. Løftingen påvirker lettklinkerens lagring. Omkrets burde vært målt etter at tuben var plassert i pressa for bedre nøyaktighet. Ved volumberegning er i tillegg antakelser gjort, dette kan påvirke beregnet volum og dermed komprimeringsgrad. Volumet er beregnet med antatt lineær sammenheng mellom bunn og midt, og mellom midt og topp, ut fra målt omkrets i disse posisjonene. Omkretsen varierer langs tuben, og avhenger betydelig av materialets komprimering. Øvre del av hvert fyllingslag, nærmest platevibratoren, er komprimert i større grad enn nedre del av samme lag. Dette er synlig grunnet større omkrets der materialet er mest komprimert. I tillegg er øvre del av tuben mer komprimert, grunnet et mindre fyllingslag. Dette gjør også at antakelsen om lineær sammenheng mellom de registrerte omkretsene ikke stemmer helt. Dette er en systematisk feil, som påvirker alle forsøk i samme grad.

Vanninnholdet i lettklinkermaterialet er varierende, og kan påvirke beregnet komprimeringsgrad på grunn av vannets tyngde. Alle forsøk er utført med samme metode, og lik komprimeringsprosess. Komprimeringsgraden bør derfor ikke være så varierende som her. Ved visuell inspeksjon så det ut til at lettklinkermaterialet i midtre del av sekken var fuktigere enn materialet i øvre og nedre del. Dette kan være årsaken til at beregnet komprimeringsgrad er høyere for forsøk 2 og 4 enn forsøk 5 og 6. Vanninnholdet burde vært bestemt i alle tre deler av sekken.

Det er ifølge veileder Arnstein Watn oppnådd omtrent samme komprimeringsgrad ved komprimeringsprosessen i dette forsøket som ved innblåsing og komprimering av lettklinker med metode C i tuber av geotekstil. Det finnes ingen dokumentasjon, kjent for forfatteren, på oppnådd densitet ved innblåsing av lettklinker med innblåsingsmetode C. Lettklinkermaterialet oppnår en høy komprimering i forsøket. Komprimeringen er i forsøket utført på lettklinkeren inne i tuben, der tuben er stående. I LiTuWa komprimeres tubens øvre

del, i liggende posisjon, etter fylling. Dette medfører en forskjell som påvirker sammenligningsgrunnlaget. For å sikre tilsvarende komprimering som ved innblåsing med metode C i felt, burde samme prosedyre vært benyttet også i dette forsøket. Eventuelt kan oppnådd komprimeringsgrad ved innblåsingsmetoden dokumenteres, og sammenlignes med komprimeringsgraden her. Gummi ville i så fall ikke vært et aktuelt innkapslingsmateriale, på grunn av at dens impermeabilitet ville gitt problemer med innblåsing.

Det er kun utført seks belastningsforsøk, hvorav fire har fullstendige måledata. Flere forsøk ville økt påliteligheten av resultatene. Innfyllingslagene burde vært noe mindre for å oppnå jevnere tverrsnitt gjennom hele tuben. For å kartlegge effekten av komprimeringsgrad, burde for eksempel varigheten på komprimeringen vært variabel. Registrering av tubens form på begge sider av tubens lengdeakse, ville gitt mer pålitelige resultater. Belastning til et høyere lastnivå kunne gitt resultater som også viser reduksjon i stivheten som følge av at lettlinkeren knuser. I disse forsøkene ble maksimal belastning begrenset av belastningspressens maksimale vertikale forskyvning.

7.3 Numerisk modellering av lettklinker innkapslet i gummimateriale

Numerisk analyse av utført belastningsforsøk på tuber av lettklinker innkapslet i et lineært elastisk materiale med aksialstivhet som beregnet for gummi i vedlegg B.4 er utført. Ulike materialparameteres effekt på tubens reaksjon på belastning er studert.

E-modul i lettlinkermaterialet ser ikke ut til å gi noen effekt på tubenes stivhet ved de numeriske analysene. Årsaken til dette er at plastiske deformasjoner oppstår for lavere belastning ved lav innspenning. Elastisitetsmodulen angir materialets stivhet i det elastiske spenningsområdet. For plastiske deformasjoner er det rimelig at E-modulen i lettlinkermaterialet ikke påvirker deformasjonene av tuben ved vertikal belastning. I Mohr-Coulombmodellen oppnås plastiske deformasjoner ved overstigelse av bruddkriteriet. Beregnede gjennomsnittlige horisontalspenninger (σ_3) er i dette tilfellet svært lave, ca 10 kPa ved 80 kPa vertikal belastning. Ved å anta en plan tøyningstilstand der kohesjonen er 0 og friksjonsvinkelen 40° , overstiges Mohr-Coulombs bruddkriterium tidlig i belastningsforsøkene. Ved første registrering etter belastning i kapittel 4, er strekkraften i gummien ca. 0,05. Dette gir horisontalspenning 1,4 kPa, beregnet med samme metode som i vedlegg C. Vertikalspenningen er på dette tidspunktet 8 kPa, som gir mobilisert skjærfasthet over bruddkriteriet. Altså medfører første lasttrinn i utført belastningsforsøk medfører plastiske deformasjoner, som altså betyr at elastisitetsmodulen ikke påvirker tubens deformasjon ved belastning.

Som antydnet i kapittel 7.2, viser resultatene fra den numeriske modellen at stivheten i innkapslingsmaterialet påvirker tubens stivhet i vesentlig grad. Ved lav aksialstivhet påvirker selv en liten økning i aksialstivheten tubens stivhet betydelig. Ved høyere aksialspenningsnivå påvirker ikke økt stivhet like mye. Høyere aksialstivhet gir økt innspenning for lettlinkermaterialet i tuben. Det genereres større strekkrefter i innkapslingsmaterialet, som begrenser omlagring av korn i større grad og dermed gir tuben en stivere oppførsel.

I modellen er materialoppførselen i innkapslingsmaterialet definert lineært elastisk. Gummi er ikke lineært elastisk. Dette gjør at stivheten i innkapslingsmaterialet i modellen ikke stemmer overens med gummi i belastningsforsøkene ved tøyning mindre enn ca. 25 %. Denne tøyningen oppnås i belastningsforsøket ved ca 15 cm vertikal deformasjon. Inntil 25 % tøyning i innkapslingsmaterialet oppnås, er beregnet stivhet gjennomsnittlig. Dette er en detalj som kan føre til at deformasjonene i modellen ikke stemmer helt overens med deformasjonene i belastningsforsøkene. Strekktoyning som følge av fylling og komprimering er ikke inkludert i modellen. Dette gir et lavere tøyingsnivå ved belastning, som også medfører at tilegnet strekkstivhet ikke er helt korrekt.

Resultatene viser at økt friksjonsvinkel gir økt stivhet i tuben. Høyere friksjonsvinkel gir et høyere bruddkriterium i Mohr-Coulomb, som medfører økt skjærfasthet i materialet og i større grad reduserer plastiske deformasjoner.

Også lettklinkermaterialets dilatansvinkel gir stor effekt på tubens stivhet. I modellen øker volumet gjennom hele belastningsprosessen. Dilatansvinkel på 12° er derfor kun gyldig inntil ca. 15 cm vertikal deformasjon i tuben. Ved lavere deformasjoner bør dilatansvinkelen i denne modellen være høyere for å oppnå tilsvarende volumøkning som i belastningsforsøket. I denne modellen er tverrsnittets areal i øvre del av tuben noe redusert for å oppnå tilnærmet riktig bredde på belastningsplaten. Interpolasjon mellom to registrerte punkter er benyttet. Dette kutter av en andel av tubens tverrsnittareal i de innledende fasene. Interpolasjonen som allerede er utført ved å trekke linjer mellom registrerte punkter gir også et noe redusert tverrsnittareal, men dette gjelder både modell og forsøk. I innledende fase er tverrsnittarealet i modellen $1367,6 \text{ cm}^2$, mens i belastningsforsøket er tverrsnittarealet $1401,2 \text{ cm}^2$. Etter omtrent 15 cm vertikal deformasjon har modellen og tuben registrert omtrent likt tverrsnitt, se figur 5.14. Dette indikerer at dilatansvinkel $\psi = 12^\circ$ er noe høyt, fordi total volumøkning er større i den numeriske modellen. Ved å gjennomføre den numeriske analysen i et annet program, for eksempel Abaqus FEA, er kontaktformuleringer etablert. Da er det ikke nødvendig med beregningsfasene som etablerer kontaktformuleringer, og belastningsplaten kan defineres horisontal. Tilpasning av belastningsplaten bredde er da ikke nødvendig, og tubens tverrsnittareal reduseres ikke som følge av interpolasjon.

I den numeriske modellen oppnås ikke samme aksialkraft i innkapslingsmaterialer som i belastningsforsøket. Dette kan komme av at gummi materialet i belastningsforsøket er i strekk før belastning på grunn av innfylling og komprimering. Det er det ikke i modellen. Differansen vurderes som relativt liten. Ved å trekke fra beregnet aksialkraft før belastning i belastningsforsøkene, er differansen mellom strekkraft i forsøk og modell liten. Aksialkraften i belastningsforsøket er beregnet fra målt tøyning til spenning ved bruk av utregnet E-modul og Hooke's lov. Kraften er funnet ved å multiplisere spenningen med materialets tykkelse. I belastningsforsøket oppnås omtrent samme tøyingsnivå som E-modul er beregnet for i siste lasttrinn. Beregnede strekkrefter fra belastningsforsøket er derfor mest riktig ved dette lasttrinnet. Med friksjon mellom kontaktflatene og innkapslingsmaterialet tilsvarende friksjon mellom gummi og stål i modellen, viser strekkraften beregnet av modellen at hypotesen om at friksjon forårsaker økt strekktoyning, kan stemme.

Bredden til horisontale kontaktflater øker med økende belastning i modellen, også etter at hele platen er kommet i kontakt med materialet. Dette er det ikke funnet noen geometrisk

forklaring på. Ved belastning til ca 15 cm vertikal deformasjon er kontaktflaten i modellen noe i overkant av 15 cm målt fra tubens senter. Det samme gjelder i bunnen. Differansen er så liten at det ikke påvirker tubens deformasjoner ved belastning betydelig.

7.4 Numerisk modellering av lettklinker innkapslet i geotekstil

Ved høy aksialstivhet i innkapslingsmaterialet er elastisitetsmodulen i lettklinkeren ubetydelig for vertikal belastning, av samme årsak som diskutert i kapittel 7.3. For relevante spenningsnivåer viser resultatet at en økning i dilatansvinkel fra 12° til 15° gir liten effekt på tubens vertikale deformasjoner ved belastning. Effekten av økning fra 9° til 12° er derimot betydelig. I figuren er det benyttet et innkapslingsmateriale med aksialstivhet 30 kN/m. Med lavere aksialstivhet ser det fra modellert belastningsforsøk med stivhet i innkapslingsmaterialet tilsvarende gummi, ut til at økning i dilatansvinkel gir større effekt på tubens stivhet ved belastning. Aksialstivheten i innkapslingsmaterialet påvirker tubens stivhet betydelig. Etter 40–50 kPa vertikal belastning stiger spennings-tøyningskurvene forholdsvis lineært til 200 kPa.

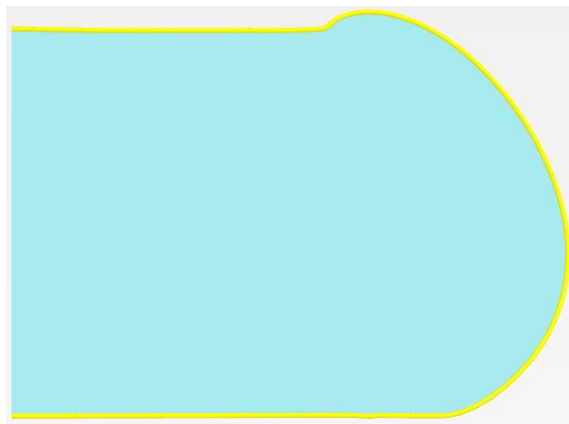
Resultatet viser at oppnådd gjennomsnittlig strekkraft i modellert belastningsforsøk ikke overstiger 6 kN/m ved belastning opp mot 300 kPa. Dette er langt under materialenes strekkstyrke ved brudd, gitt i vedlegg D. Ved 300 kPa er lettklinkermaterialet i stor grad knust. Det betyr at tubenes styrke begrenses av lettklinkermaterialet, ikke maksimal strekkstyrke i geotekstilet. Effekten av knusing er ikke inkludert i modellen. I den numeriske analysen utført av (Górniak, 2013), beskrevet kort i kapittel 2.1.7, er det konkludert med at tubenes bæreevne hovedsakelig avhenger av geotekstiletts strekkstivhet, men at også lettklinkerens friksjonsvinkel og volumetrisk ekspansjon innvirker på bæreevnen. Her er sannsynligvis stivhet ment, ikke bæreevne, da resultatene ikke indikerer strekbrudd i geotekstilet.

I tidligere utført belastningsforsøk av Górniak (2013), er resultatet presentert som forholdet mellom tubens høyde og bredde før og etter 30,34 kN/m belastning. På grunn av manglende informasjon om tuben både før og ved belastning, er det mange usikkerheter ved sammenligning av resultatene. En annen innblåsingsmetode og en annen type lettklinker er benyttet. Innblåsingsmetode B gir et ujevnt tverrsnitt langs tuben. Dette påvirker tubenes høyde/breddeforhold før belastning, som gitt i tabell 2.2, og påvirker dermed også lastfordelingen i belastningsforsøket der stålplater er lagt på toppen av tubene. Ujevnt tverrsnitt langs tuben gjør at belastningen ikke fordeles jevnt. Dette medfører at høyde/bredde-forholdet i de reelle forsøkene oppgitt i tabell 6.2 varierer også etter belastning. Det er dokumentert at en stor andel av lettklinkermaterialet er knust som følge av innblåsingsprosessen, se kapittel 2.1.5. Dette gjør materialet mer velgradert, og øker tyngdetettheten. Nedknusing av materialet vil påvirke dets egenskaper og oppførsel ved belastning. Effekten av belastning på lettklinkermaterialet er ikke dokumentert, foruten endring i løst densitet. Det er ikke mulig å vurdere om knusing oppstår som følge av belastning, eller om all nedknusing kommer av innblåsing. Det er i kapittel 2.1.5 dokumentert

at innblåsingsmetode B reduserer kvaliteten på geotekstilet. Initiell strekkstivhet (J_1) øker noe, mens sekantstivheten (J_2) reduseres ut fra strekkforsøk utført av Górnjak (2013). Effekten av metode C er heller ikke dokumentert, men installasjonsprosessen kan påvirke stivheten i geotekstilet noe.

Lasten er i forsøket utført av Górnjak (2013), påført som to punktlaster, med en stålplate mellom last og tube. Se figur 2.7. Dette kan gi ujevn lastfordeling, og dermed påvirke høyde/breddeforholdet. Lasten er registrert av lastcelle i midten mellom de to punktlastene, og tuben. Sammenlignet med teoretisk beregnet spenningsnivå, gir lastcellen likevel et pålitelig resultat ved maksimal belastning.

I modellen er belastningsplaten for smal til å oppnå kontakt med hele tuben, se figur 7.2. Årsaken til dette er beskrevet i kapittel 5.2.3. Bredden påvirker både spenningsnivået, og påfølgende deformasjoner av tuben.



Figur 7.2: Deformasjon av tuben ved for liten bredde på belastningsplaten.

Utgangsfasongen på modellert tube er basert på flere antagelser. Den påvirker hvordan tuben deformeres ved belastning. For å oppnå et bedre sammenligningsgrunnlag burde det vært utført belastningsforsøk på tuber av geotekstil i laboratorium, på tilsvarende måte som utført på gummi i kapittel 4.

Ettersom resultatene fra modelleringen indikerer at tubens stivhet øker med stivhet i innkapslingsmaterialet, er det naturlig å anta at høyde/breddeforholdet skal være høyere for tuber innkapslet i geotekstiler med høyere aksialstivhet ved lik belastning. I tidligere utførte forsøk er materialene TMS PP-PVA 72 og TMS PP 64, med stivhet henholdsvis 60 og 30 kN/m benyttet. TMS PP-PVA 72 er et stivere geotekstil enn TMS PP 64, og bør derfor resultere i et større høyde/breddeforhold ved belastning, dersom forholdene ellers er like. Fra forsøkene er omtrent samme høyde/breddeforhold dokumentert for geotekstiler med stivhet 30 og 60 kN/m. Dette, i tillegg til at forholdstallet varierer langs tuben i forsøkene, indikerer at oppgitt høyde/breddeforhold avhenger av mengden lettklinker i tuben, komprimeringsgrad og kvalitet på materialene.

7.5 Resultater anvendt i LiTuWa

På grunn av mange forskjeller mellom modellerte tuber og tuber anvendt i LiTuWa kan ikke egenskapene funnet i modellen overføres direkte til LiTuWa-konstruksjonen uten å verifisere modellen med fysiske forsøk. Resultatene fra modellen tyder på at stivheten i tubene avhenger av aksialstivheten i geotekstilet som benyttes, samt komprimeringsgrad.

I komprimeringsforsøket beskrevet i kapittel 2.1.4, er densiteten i Leca lettklinker 10–20 ISO mellom ca. 350 og 430 kg/m³ etter komprimering. Dette er relativt mye høyere enn densiteten i utførte belastningsforsøk, hvor densiteten er registrert mellom 254 og 264 kg/m³. Dersom densitetsberegningene i komprimeringsforsøket er korrekte, er lettlinkerkulene pakket svært tett. Deler av materialet knuser ved innblåsing og komprimering, som vist ved sikteanalyse og beregning av bulkdensitet i kapittel 2.1.4. Knusing og tett lagring gir materialet andre egenskaper enn i eget utført belastningsforsøk. Høy komprimeringsgrad gir lettklinker større friksjonsvinkel enn løsere lagret materiale, dersom kulene fortsatt er intakt. Fra resultatene funnet ved numerisk modellering er det tydelig at høyere friksjonsvinkel øker stivheten i tuben. Komprimeringsgrad påvirker også opptredende dilatans i materialet.

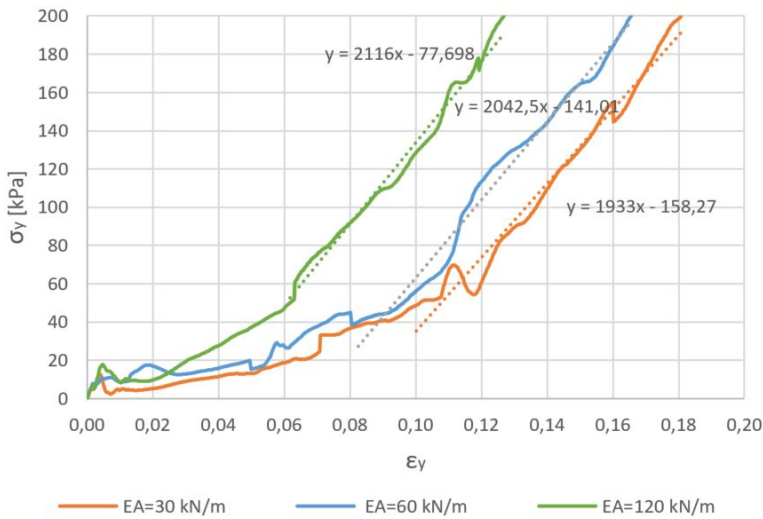
Modellerte tuber oppnår en tilnærmet lineær sammenheng mellom vertikalspenning og påfølgende tøyning mellom 40–50 og 200 kPa, dette er vist i figur 7.3. Spenninger over 200 kPa medfører knusing av lettklinker, og bør unngås. Som resultatet viser, er stivheten i tuben lavere ved lav belastning. Dette kommer av at vertikal tøyning registreres fra tverrsnittets høyeste punkt før belastning. Punktet forskyves vertikalt ved et svært lavt lastnivå, fordi deformasjonsprosessen hovedsakelig kommer av reorganisering av korn. Etterhvert som kontaktflatens areal øker, utnyttes tubens fulle stivhet for å hindre ytterligere deformasjon. Ved tilstrekkelig komprimering oppnås en tilnærmet horisontal overflate i toppen av tuben. Da elimineres trolig den første deformasjonsprosessen, og stivheten er tilnærmet lik den lineære delen av spenning-tøyningskurven for tuben, vist i figur 7.3 og tabell 7.1.

Fra resultater funnet ved numerisk modellering er tubens stivhet avhengig av aksialstivhet i geotekstilet. Stivheten fra 40–50 kPa til 200 kPa er presentert i tabell 7.1. Sammenhengen mellom aksialstivhet i geotekstilet og påfølgende E-modul er gitt ved ligning (7.1), den er gyldig for geotekstiler med aksialstivhet mellom 30 og 120 kPa. I figur 7.4 er sammenhengen vist.

Tabell 7.1: Beregnet stivhet i tube for tre geotekstiler med ulik aksialstivhet fra figur 7.3

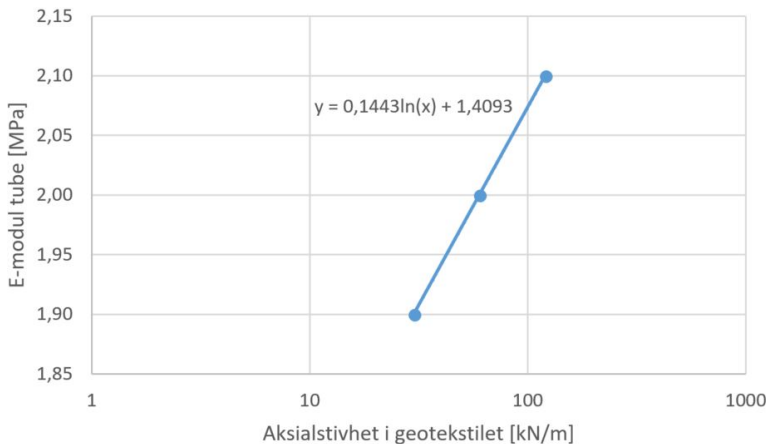
Aksialstivhet i geotekstil [kPa]	Stivhet i tube etter vertikal belastning til 40–50 kPa [MPa]
30	1,9
60	2,0
120	2,1

$$E = 0,1443 \cdot \ln(\text{Aksialstivhet}) + 1,4093 \quad (7.1)$$



Figur 7.3: Spenning-tøyningskurve, med inntegnet lineær stivhet fra 40–50 kPa til 200 kPa

For å overføre resultatet til LiTuWa må likningen verifiseres ved belastningsforsøk på tuber der lettlinker er blåst inn i geotekstilet med metode C, og tubens tverrsnitt deretter er komprimert. Det er mulig at resultatet kan overføres, da lettlinkeren i tuben i belastningsforsøkene er komprimert. I LiTuWa er tubene komprimert slik at tverrsnittet ikke er sirkulært. Ved ren vertikal belastning omformes tverrsnittet, og oppnår tilsvarende form som komprimering gir. Det kan derfor være mulig at tubene etter 40–50 kPa ren vertikal belastning oppnår omtrent tilsvarende stivhet som LiTuWa-tuber oppnår ved komprimering.



Figur 7.4: Sammenheng mellom lineær stivhet i tuben og aksialstivhet i innkapslingsmaterialet ut fra numerisk modell for aksialstivhet mellom 30 og 120 kN/m

Konklusjon og forslag til videre arbeid

8.1 Konklusjon

Resultater fra belastningsforsøk utført på tuber av lettklinker innkapslet i gummi tyder på at tubens stivhet øker med økende belastning. Resultatet indikerer også at stivheten i innkapslingsmaterialet påvirker tubens stivhet. Plastiske deformasjoner i forsøkene er hovedsakelig forårsaket av omlagring av korn, da verken sikteanalyse eller visuell observasjon indikerer betydelig nedknusing av lettklinker. I belastningsforsøket øker tverrsnittarealet med økende belastning. Det betyr at lettklinkeren dilaterer ved belastning.

Resultatene fra numerisk modellering av belastningsforsøk stemmer med resultatene fra belastningsforsøkene med parametere som oppgitt i tabell 8.1. Tverrsnittarealet før belastning er noe mindre i modellen enn i forsøket, mens tverrsnittarealet er like stort etter belastning. Derfor bør dilatansvinkelen justeres noe ned ved modellering av forsøk der arealet før belastning er riktig. Redusert stivhet som følge av redusert dilatansvinkel kan kompenseres for ved å øke friksjonsvinkelen.

Tabell 8.1: Tilpassede parametere ved sammenligning mot resultater fra belastningsforsøk

Parameter	Verdi
ψ	12°
ϕ	40°
E-modul [MPa]	5,3
Kohesjon [kPa]	0
Poissontall	0,3
EA [kN/m]	5,4

Numerisk modellering bekrefter at aksialstivhet i innkapslingsmaterialet påvirker tubens stivhet i stor grad. For å oppnå samme fasong på tuben i modellen som i belastningsforsøket, må dilatans tilegnes lettklinkermaterialet. Dilatansvinkelen innvirker også på tubens stivhet ved vertikal belastning, det samme gjør friksjonsvinkelen. E-modul i materialet påvirker ikke tubens reaksjon på vertikal belastning. Årsaken er at innspenningsnivået som oppnås er lavt, og deformasjonene som oppstår er plastiske.

Analyse av numerisk modell med innkapslingsmateriale tilsvarende som aktuelle geosynteter viser en relativt lav stivhet ved vertikal belastning inntil 40–50 kPa, se figur 7.3. Etter dette oppnås en tilnærmet lineær spenning-tøyningskurve inntil 200 kPa. Dersom det antas at en komprimeringsprosess eliminerer den lave stivheten tubene viser inntil 40–50 kPa, gir resultatet fra den numeriske modelleringen at E-modulen til tuben etter komprimering følger ligning (8.1). Den viser tubenes stivhet avhengig av geotekstiletts aksialstivhet i tubens tverretning, og er kun gyldig for geotekstiler med aksialstivhet mellom 30 og 120 kN/m. Øvre spenningsnivå er begrenset av lettklinkerens motstand mot betydelig nedknusing.

$$E = 0,1443 \cdot \ln(\text{Aksialstivhet}) + 1,4093 \quad (8.1)$$

Dette bør verifiseres med belastningsforsøk på virkelige tuber av geotekstil, der lettklinker er blåst inn i tubene med innblåsingsmetode C, og tubenes tverrsnitt deretter er komprimert.

Det vil være vanskelig å modellere en fullskala LiTuWa-konstruksjon med alle konstruksjonens komponenter ved bruk av PLAXIS. Dersom en fullskala numerisk analyse av LiTuWa-systemet skal utføres, må (8.1) valideres. Så fremt stivheten stemmer for komprimerte tuber kan en forenklet modellering utføres i PLAXIS. Dette er ikke gjort i forbindelse med arbeidet i denne rapporten på grunn av begrenset tid. Selve veggen kan modelleres som en enhet med lineært elastiske egenskaper og stivhet fra (8.1). Erfaring fra modellering av enkelttuber viser at andre jordmodeller ikke vil være aktuelle for modellering av LiTuWa i PLAXIS 2D. Ved å benytte et lineært elastisk materiale vil det være nødvendig å begrense spenningsnivået i veggen manuelt, det bestemmes av knusenivået i lettklinkermaterialet. Ved bruk av denne metoden vil det ikke være mulig å modellere selve byggeprosessen.

Et bedre alternativ kan være modellering i verktøyet ABAQUS FEA. Der vil det være mulig å modellere konstruksjonens komponenter, og samvirket mellom disse på en bedre måte enn i PLAXIS.

8.2 Forslag til videre arbeid

Det anbefales generelt å utføre flere belastningsforsøk på tuber. Det vil være interessant å studere effekten av å variere ulike forhold under belastning. Varierende komprimeringsgrad kan vise hvordan friksjonsvinkel og dilatansvinkel i materialet påvirkes av komprimering, og dermed hvordan tubens stivhet endres med komprimering. Ulike innkapslingsmaterialer med forskjellig stivhet kan benyttes for å verifisere effekten av stivhet i tuben. Stivheten i tuber av lettklinker innkapslet i geotekstil bør verifiseres med belastningsforsøk, der lettklinker er blåst inn i geotekstilet med innblåsingsmetode C, og deretter komprimert.

Ved å benytte tubenes stivhet funnet i denne rapporten, kan en numerisk analyse på en fullskala LiTuWa-konstruksjon utføres. Analysen bør inkludere forventede belastninger i både byggeprosessen og driftsfasen, som for eksempel trafikklast og ulykkesituasjoner ved bruk som vegfylling. For å kunne modellere forankringen av tubeveggen, må en festemekanisme mellom geotekstilet i tubene og geotekstilet som benyttes for armering utvikles. Strekkstyrken i denne overgangen bør bestemmes, da denne kan være utslagsgivende for maksimal belastning av konstruksjonen.

Bestemte materialparametere bør verifiseres ved numerisk analyse av tube med tverrsnittareal som en reell geosyntettube anvendt i LiTuWa.

Det anbefales å studere materialegenskapene i lettklinkermaterialet etter at det er blåst inn i tuber av geotekstil. Det vil være interessant å finne ut i hvor stor grad materialet knuser, og hvordan eventuell nedkusing påvirker materialets egenskaper ved belastning. Det bør studeres hvordan geotekstilet permeabilitet påvirker lettklinkeren ved innblåsing, og hvordan innblåsing med metode C påvirker geotekstilet. Komprimeringsens effekt på lettklinkermaterialet bør også testes i større grad.

Hvordan vertikal belastning påvirker lettklinkermaterialet inne i tubene bør studeres i større grad. For å bestemme maksimalt belastningsnivå bør belastningsforsøk utføres med høyere belastning. Hvilket lastnivå som medfører uakseptabel nedkusing av lettklinkermaterialet kan dermed bestemmes. Flere lastnivå bør testes, og effekten av belastning over tid bør studeres. Maksimal belastning vil bestemme LiTuWa-konstruksjonens maksimale høyde begrenset av tubenes bæreevne. For anvendelse av LiTuWa i veg- og jernbanefyllinger bør effekten av syklisk belastning studeres.

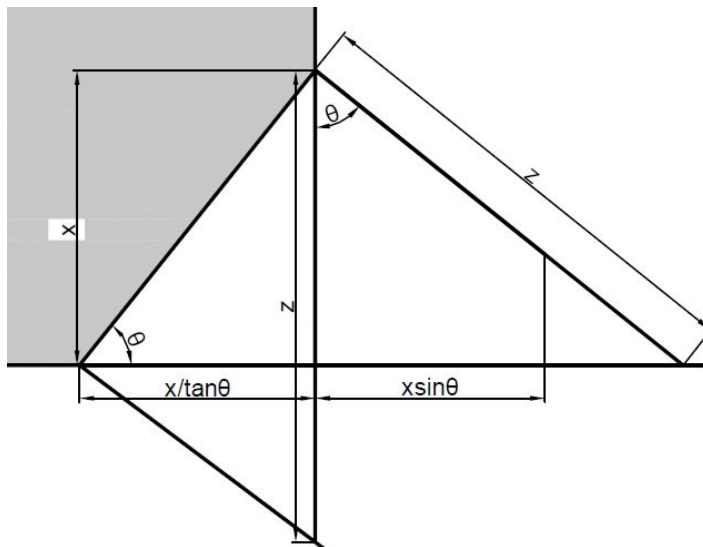
Bibliografi

- Bauman, J. T., 2012. *Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components: Guide for Design Engineers*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., 2017a. *PLAXIS 2017 Reference Manual*. Plaxis bv.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., 2017b. *PLAXIS Material Models Manual*. Plaxis bv.
- Chandra, S., Berntsson, L., 2002. *Production of Lightweight Aggregates and Its Properties*, Chapter 2. Elsevier B.V.
- Ciesielski, A., 1999. *An introduction to rubber technology*. iSmithers Rapra Publishing.
- De geotekniske foreningene i Norden, ., 2006. *Håndbok for armert jord og fyllinger*. Norsk Geoteknisk Forening.
- den Hoedt, G., 1986. Creep and relaxation of geotextile fabrics. *Geotextiles and geomembranes* 4 (2), 83–92.
- Emdal, A., 2014. *Introduksjon til geoteknikk*. NTNU, Geoteknikk.
- Finseth, J., Watn, A., Delmas, P., Górniak, J., Pettersen, T., 2013. *Temasi - innovativ løsning for bygging av bratte skråninger med geosynteter og lettklinker*. Fellesesjon bergmekanikk/geoteknikk 2013.
- Furuberg, T. Hoff, I., Solheim, O. M., 2000. *Miljøriktige isolasjonsprodukter for ba-bransjen. sluttrapport dp1: Leca frostsikring - veg, bane og grøft*. SINTEF Bygg og miljøteknikk.
- Gommers, B., Verpoest, I., Van Houtte, P., 1998. Analysis of knitted fabric reinforced composites: Part i. fibre orientation distribution. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 29 (12), 1579–1588.
- Górniak, J., 2013. *Geosynthetic tubes filled with lightweiht aggregate in new geotechnical structures: first studies*. Ph.D. thesis, Paris 6.

-
- Høva, M., 2011. Screening test: ph of lwa as a result of wash-out of water. internal report og the project. SINTEF Department of Building and Infrastructure.
- Høva, M., Gylland, A., 2009a. Correlation of material properties for leca lwa aggregates. SINTEF Building and Infrastructure.
- Høva, M., Gylland, A., 2009b. Documentation of material properties for leca aggregates. SINTEF Building and Infrastructure.
- Høva, M., Gylland, A., 2009c. Documentation of material properties for leca lwa aggregates and evaluated characteristic geotechnical parameters. SINTEF Building and Infrastructure.
- Koerner, R. M., 1998. Designing with geosynthetics. Vol. 1. Prentice Hall.
- Koerner, R. M., 2012. Designing with geosynthetics. Vol. 1. Xlibris Corporation.
- Leca, 2017. Hva er leca. <http://www.leca.no/om-leca/hva-er-leca/>, hentet 19.09.2017.
- Leca, 2018. Leca til geotekniske formål. <https://www.leca.no/teknisk-informasjon/leca-geoteknikk/leca-til-geotekniske-formal/>, hentet 04.04.2018.
- Morton, M., 2013. Rubber technology. Springer Science & Business Media.
- Mott, P., Roland, C., 2009. Limits to poisson's ratio in isotropic materials. Chemistry Division, Naval Research Laboratory, hentet 11.05.2018.
- Müller, W. W., Saathoff, F., 2015. Geosynthetics in geoenvironmental engineering. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5099829/>, hentet 21.09.2017.
- Nordal, S., 2017. TBA 4116 Geotechnical engineering advanced course. Norwegian University of Science and Technology.
- NS-EN 14030, ., 2001. NS-EN 14030:2001 Geotekstiler og geotekstilrelaterte produkter - Utsilingsprøving for bestemmelse av motstand mot sure og basiske væsker. Standard Norge.
- NS-EN ISO 13438, ., 2005. NS-EN ISO 13438 Geotekstiler og geotekstilrelaterte produkter Utsilingsprøving for bestemmelse av motstand mot oksidasjon. Standard Norge.
- Rapidbau, 2010. Baustoff. <http://www.rapidbau.ch/baustoff.htm>, hentet 05.06.2010.
- Riley, C., 1951. Relation of chemical properties to the bloating of clays, 121–128.
- Sandven, R., 1998. Jordarmering, beregningsprinsipper og praktisk utførelse. SINTEF Bygg og miljøteknikk.
- Statens Vegvesen, ., 2014. Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger. Statens Vegvesen.

-
- Trelleborg, 2014. E550 epdm. <http://www.trelleborg.com/en/fluidhandling/products--and--solutions/sheeting/epdm/e550>, hentet 10.05.2018.
- Valente, C., Vold, M., 2013. Environmental product declaration of leca lettlinker iso 10-20. http://epd.nsp01cp.nhosp.no/getfile.php/EPDer/Byggevarer/Isolasjon/120_Leca--Lettlinker-ISO-10-20.pdf, hentet 12.10.2017.
- van Santvoort, G. P. T. M., 1995. Geosynthetics in civil engineering. Balkema, A.A.
- Watn, A., 1996. Geotextiles and geogrids for soil reinforcement. SINTEF Bygg og miljøteknikk.
- Watn, A., Gylland, A., Reis, C., Hyrve, O., U.Å. Expanded clay lightweight aggregates for geotechnical applications. SINTEF and Maxit Group.
- Wood, J., Høva, E., 2009. Characterization of lwa for geotechnical applications. SINTEF.

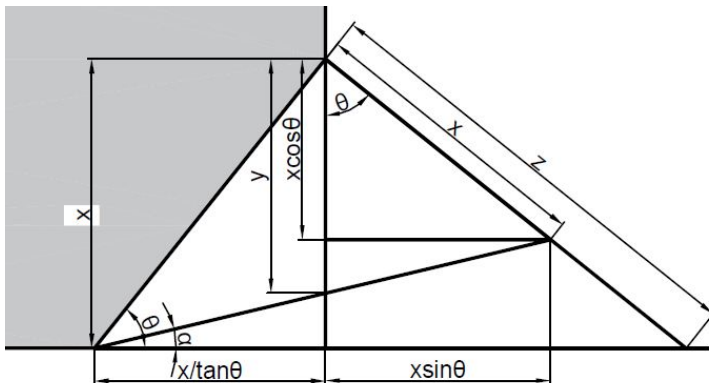
Utleddning av justeringsfaktor for beregninger i PLAXIS 2D



Figur A.1: Geometri av faktisk nedbøying ved foreskreven forskyvning med lengde x

For å justere forskyvningslengden til flatene slik at flatene oppnår kontakt med tuben langs en horisontal linje, slik det skal, må lengden på foreskreven forskyvning, x , justeres med en faktor k , slik at foreskreven forskyvning blir y . Åpningen som dannes mellom materialene får da avstand x . Se figur A.2. Dette kommer trolig av at PLAXIS 2D danner åpning med avstanden z , som vist i figur A.1. Der x er input foreskreven forskyvning, og forskyvning i

x-retning er fri.



Figur A.2: Geometri benyttet i utledning av formel 5.1

Formel 5.1 er utledet fra figur A.2 på følgende måte:

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{x - x \cdot \cos \theta}{\frac{x}{\tan \theta} + x \cdot \sin \theta} \\ \tan \alpha &= \frac{x - y}{\frac{x}{\tan \theta}} \\ \frac{x - x \cdot \cos \theta}{\frac{x}{\tan \theta} + x \cdot \sin \theta} &= \frac{x - y}{\frac{x}{\tan \theta}} \\ x^2 - x^2 \cdot \cos \theta &= x^2 + x^2 \cdot \sin \theta \cdot \tan \theta - x \cdot y - x \cdot y \cdot \sin \theta \cdot \tan \theta \\ x - x \cdot \cos \theta - x - x \cdot \sin \theta \cdot \tan \theta &= -y - y \cdot \sin \theta \cdot \tan \theta \\ \frac{y}{x} &= \frac{\cos \theta + \sin \theta \cdot \tan \theta}{1 + \sin \theta \cdot \tan \theta} \end{aligned}$$

Beregninger og beskrivelse av initielle forsøk

B.1 Densitet

Det er totalt utført tre densitetsmålinger, hvor gjennomsnittet av disse målingene er anvendt. Densiteten er funnet ved hjelp av formel B.1. Massen av lettklinkermaterialet er veid for hvert forsøk, og volumet til sylindere er kjent, 0,00964 m³. Resultatet er angitt i tabell B.1. Løs densitet i lettklinker 10–20 mm er i Høva og Gylland (2009a) 231 kg/m³.

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{B.1}$$

ρ = Densitet
 m = Masse lettklinker
 V = Volum sylinder

Tabell B.1: Løs densitet, Leca lettklinker 10–20 ISO

Forsøk	Densitet [kg/m ³]
1	241,18
2	244,40
3	243,15
Gjennomsnitt	242,91 kg/m³

Løs densitetsforsøk er et sensitivt forsøk, som i stor grad avhenger av forsøksprosedyre. I dette forsøket tilfredsstiller den anvendte sylindere kravene i henhold til NS-EN 1097-3:

1998, men forholdet mellom diameter og høyde er i nedre del av kravspesifikasjonen. I tillegg er volumet større enn minstekravet. Dette kan øke densiteten i materialet. I dette tilfellet er løs bulkdensitet funnet kun for å bestemme komprimeringsgraden av materialet inne i tubene som skal testes. For dette formålet er resultatet vurdert som godt nok.

B.2 Vanninnhold

En representativ prøve av materialet er tatt ut. Vekten er registrert, og materialet tørket i varmeskap til vekten er stabilisert. Vanninnholdet beregnes ut fra formel B.2. I tillegg ble materialet i sikteanalysen tørket, og vanninnholdet registrert.

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 \% \quad (\text{B.2})$$

w = vanninnhold gitt i vektprosent
 m_w = vekt av vann i prøven
 m_s = vekt av tørr prøve

Tabell B.2: Vanninnhold

m_w [g]	m_s [g]	w
2,18	162,52	1,34 %
1,7	869,8	0,20 %
13,4	913,2	1,47%

Resultatet viser at vanninnholdet i lettklinker materialet varierer. Gjennomsnittlig vanninnhold er 1 %.

Prøven har vært lagret innendørs i noen uker, dette kan påvirke vanninnholdet. Det kan også være årsaken til store variasjoner.

B.3 Strekkforsøk

Strekkforsøket er utført på et prøvestykke av gummimaterialet EPDM 50. Prøvestykket er satt fast med klemmer i topp og bunn, som vist i figur 4.2. I bunnen er det montert vekter med ulik tyngde for å øke spenningsnivået. Tabell B.3 viser resultatet fra forsøket, og tabell B.4 viser beregner E-modul for ulike tøyingsnivå. Figur 4.9 viser spennings-tøyingskurve fra forsøket. Strekkforsøket ble utført i to omganger. Derfor er to resultater uten belastning presentert i tabell B.3.

Tabell B.3: Resultater fra strekkforsøk

Belastning [kg]	Lengde [m]	Minste bredde [m]	Tverrsnittsareal [m ²]	Tøyning ϵ	Spenning σ [kPa]
0	0,102	0,2	0,0004	0	0
0	0,108	0,2	0,0004	0	0
9,036	0,115	0,196	0,000392	0,065	226,12
14,799	0,121	0,2	0,0004	0,186	362,94
19,781	0,136	0,185	0,00037	0,259	524,46

Tabell B.4: Beregnet E-modul for ulike tøyingsnivå

Tøyning	E-modul [kPa]
0,065	3 489
0,186	1 948
0,259	2 023

B.4 Beregnet todimensjonal stivhet i EPDM 50

Gummi er et elastisk materiale. Har fra den tredimensjonale Hooke's lov (Nordal, 2017) at:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu \cdot \sigma_2 - \nu \cdot \sigma_3) \quad (\text{B.3})$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu \cdot \sigma_1 - \nu \cdot \sigma_3) \quad (\text{B.4})$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E}(\sigma_3 - \nu \cdot \sigma_1 - \nu \cdot \sigma_2) \quad (\text{B.5})$$

Retning 1 er radielt på tuben, retning 2 er tubens lengderetning, og 3 normalt på tubens radius. Har da at $\sigma_3=0$, som gir:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu \cdot \sigma_2) \quad (\text{B.6})$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu \cdot \sigma_1) \quad (\text{B.7})$$

Gummimaterialet er fastholdt i lengderetningen i belastningsforsøket. Det antas derfor at $\epsilon_2 = 0$, som gir at:

$$\sigma_2 = \nu \cdot \sigma_1 \quad (\text{B.8})$$

Ved å anta $\nu = 0,5$ (Mott og Roland, 2009) og sette B.8 inn for σ_2 i B.6 blir:

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E} - \nu \cdot \frac{\nu \cdot \sigma_1}{E} \\ \epsilon_1 &= \frac{\sigma_1}{E} \cdot (1 - \nu^2) \\ \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} &= \frac{E}{1 - \nu^2} = \frac{2023 \text{ kPa}}{1 - 0,5^2} = 2697 \text{ kPa}\end{aligned}$$

Dette gir videre at inputparameteren EA i PLAXIS 2D er:

$$EA = 2697 \text{ kPa} \cdot 0,002 \text{ m} = 5,4 \text{ kN/m}$$

B.5 Sikteanalyse

Det er utført sikteanalyse på ubelastet og belastet lettklinkermateriale, vist i tabell B.5 og B.6. Kornfordelingskurven er vist i kapittel 4.3.1

Ubelastet materiale:

Vekt før tørking: 871,5 g

Vekt etter tørking: 869,8 g

Tabell B.5: Sikteanalyse for ubelastet materiale

Sikteåpning, d [mm]	Vekt av masse på sikt [g]	Vekt% < d
63	0	100
31,5	0	100
19	43,7	94,98
16	283,0	62,44
11,2	371,7	19,71
8	164,5	0,79
4	2,6	0,49
0	4,3	0

Belastet materiale:

Vekt før tørking: 926,6 g

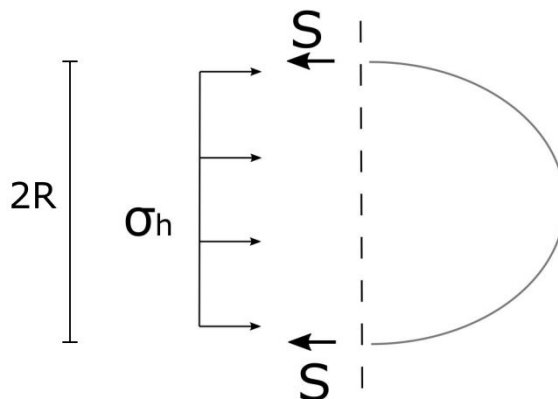
Vekt etter tørking: 913,2 g

Tabell B.6: Sikteanalyse for belastet materiale

Sikteåpning, d [mm]	Vekt av masse på sikt [g]	Vekt% < d
63	0	100
31,5	0	100
19	17,7	98,02
16	163,9	80,07
11,2	371,7	39,37
8	321,9	4,12
4	21,2	1,80
0	16,4	0

Beregning av gjennomsnittlig σ'_3 og E-modul for anvendelse i PLAXIS

For modellering av belastningsforsøk på tuber av gummi er gjennomsnittlig horisontal-spennning i lettlinkermaterialet beregnet ut fra figur C.1. Horisontaltøyning er tøyning ved lasttrinn 5 i belastningsforsøket. Ut fra denne er E-modul for det aktuelle tøyningsnivået (figur 4.9) benyttet, og videre er strekkkraften bestemt ved ligning (C.1).



Figur C.1: Beregninger av σ_h

$$S = E_{gummi} \cdot t_{gummi} \cdot \epsilon_{gummi} \quad (C.1)$$

$$S = 2697 \text{ kPa} \cdot 0,002 \text{ m} \cdot 0,26 = 1,4 \text{ kN/m} \quad (C.2)$$

S = Strekkraft i gummidaterialet (Se figur C.1)

R = Radius, fra belastningsforsøk 0,147 m

$\epsilon_{gummi} = 26 \%$, fra belastningsforsøk

$E_{gummi} = 2697 \text{ kPa}$ for 26 % tøyning

t_{gummi} = Tykkelse, antar ingen endring i tykkelse ved strekk

Får ved kraftlikevekt at:

$$\Sigma F_h = 0 \quad (C.3)$$

$$2 \cdot S = \sigma_h \cdot 2 \cdot R \sigma_h = \frac{S}{R} \quad (C.4)$$

$$\sigma_h = \frac{1,4 \text{ kN}}{0,147 \text{ m}} = 9,5 \text{ kPa} \quad (C.5)$$

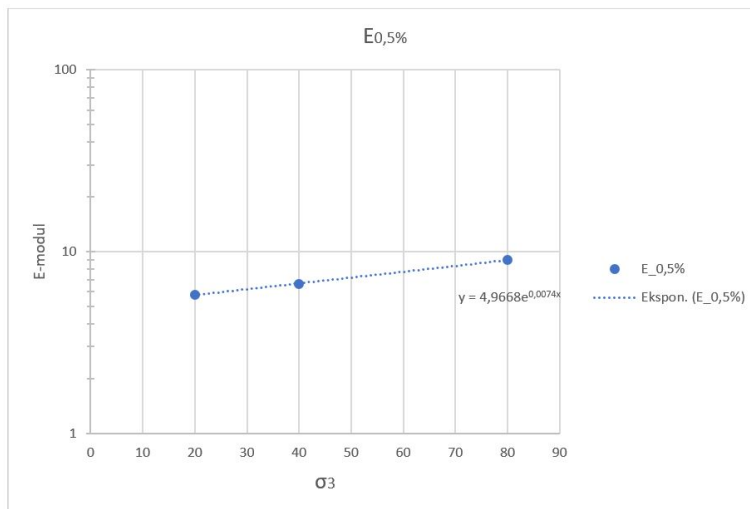
E-modulen for 0,5 % tøyning er lest av figur 2.20 for ulike σ'_3 , som gitt i tabell C.1. Utfra dette er en eksponentiell sammenheng funnet, gitt ved ligning (C.6). Sammenhengen er vist i figur C.2.

Tabell C.1: E-modul for 0,5 % tøyning fra figur 2.20, vist som plot i figur C.2.

σ'_3 [kPa]	$E_{0,5\%}$ [MPa]
20	5,8
40	6,6
80	9

$$E_{0,5\%} = 4,9668 \cdot e^{0,0074 \cdot \sigma'_3} \quad (C.6)$$

Ved å sette inn $\sigma'_3 = 9,5 \text{ kPa}$ i ligning (C.6), er E-modulen i lettklinkeren omtrent 5,3 MPa for beregnet sideinnspenning fra ligning (C.5) belastning.

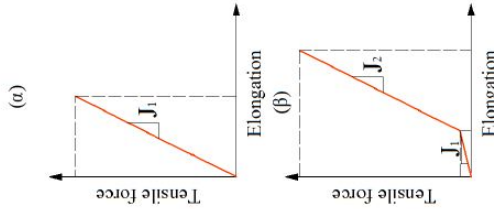


Figur C.2: Eksponentiell sammenheng mellom E-modul og sideinnspenning

Vedlegg **D**

Egenskaper for ulike geotekstiler anvendt i tidligere forsøk

Denomination	Polymer	Air permeability EN ISO 9237 ($l/m^2 \cdot s$)	Mechanical properties (ISO 10319)			Tensile strength – elongation curve
			Direction	Tensile strength at break (kN/m)	Elongation at break (%)	
NO-C PES 150g	PES	n e	MD	150	11*	$J_{2(\beta)} = 1500$
			CD	150	11*	
NO-G PES 150g	PES	n e	MD	150	11*	$J_{2(\beta)} = 2300$
			CD	50	11*	
GT PP 150g	PP	n e	MD	150	17*	$J_{2(\beta)} = 1100$
			CD	50	17*	
GT PES 100gc	PES	866	MD	100	11*	n e
			CD	50	11*	
TMS PVA 70g	PVA	3485	MD	41.2	17.89*	$J_{1(\beta)} = 93$ $J_{2(\beta)} = 328$ $J_{1(\beta)} = 30$ $J_{2(\beta)} = 599$
			CD	70.2	26.78*	
TMS PP 65g	PP	3555	MD	42.6	52.67*	$J_{1(\beta)} = 24$ $J_{2(\beta)} = 126$ $J_{1(\beta)} = 30$ $J_{2(\beta)} = 287$
			CD	64.9	40.43*	
TMS PP-PVA 72g	PP	3540	MD	37.6	30.42*	$J_{1(\beta)} = 36$ $J_{2(\beta)} = 244$ $J_{1(\beta)} = 60$ $J_{2(\beta)} = 396$
			CD	72.1	34.39*	
GT PP 100gc	PP	n e	MD	100	20*	n e
			CD	50	20*	
GT PES 55gc	PES	n e	MD	55	11*	n e
			CD	50	11*	
TMS PP 50g	PP	n e	MD	60	25*	$J_{1(\beta)} = 125$ $J_{2(\beta)} = 294$ $J_{1(\beta)} = 835$
			CD	50	7*	
GT PP 50gc	PP	n e	MD	60	23.65*	$J_{1(\beta)} = 225$ $J_{1(\beta)} = 568$
			CD	54	9.50*	



1) Elongation measurement: $\bar{}$ elongation measured between loading caps on 10 cm length, *elongation measured with optical tool (camera) in 6 cm x 6 cm zone. Note that the tool used to measure the deformation can have an influence on the elongation value. The comparison of stiffness should be made with precaution. 2) n e - not evaluated

Figur D.1: Egenskaper for ulike typer geotekstiler anvendt i (Górniak, 2013).

Vedlegg **E**

Rådata, registrert fra
belastningsforsøk

Forsøk 2

Innfylling av lag nr.	Vekt lettklinker (kg)	Avstand til øvre del av rør før komprimering (cm)	Avstand til øvre del av rør etter komprimering (cm)	Høyde
1	5,153	85	86	13,1
2	4,612	73	73	26,1
3	5,055	62	60	39,1
4	5,485	48	46	53,1
5	5,205	33	36	63,1
6	5,365	20	20	79,1
7	5,058	8	9	90,1
8	2,975	5	4	95,1
Total:	37,852			

Omkrets før fylling: 131 cm

Tverrsnittsareal før fylling: 1366,32 cm²

	Etter fylling, Bunn (cm)	Etter fylling, Midt	Etter fylling, Topp
Omkrets	139,5	135,5	136,7
Tverrsnittsareal (beregnet)	1549,4	1461,8	1487,8

Volum: 0,14172 m³

Densitet: 264,15 kg/m³

Avstand Bjelke-Belastningsplate: 26,4 cm

Innmålingspunkt	Avstand punkt-bjelke X:	Y
Lasttrinn 1	Last: 0 kN	Høyde: 43
Topp:	32,5	42
	31	39,4
	28,3	37,5
	26,3	36
	24,3	35
	23	32
	22	26
	21,7	23
	21,2	19
	21,9	16
	22,2	14
	23,3	10
	25,2	8
	27	6
Lasttrinn 2	Last: 0,37 kN	Høyde: 37,4
	32,5	37,4
	29,5	37,5
	26	34,2

	24,5	32,5
	22,5	31
	21	28,3
	20	25
	19,5	22
	19	17,3
	19,5	15,2
	20,5	11,9
	22	7
	24,2	4,6
	25,8	2,3
	32,9	0,3
Lasttrinn 3	Last: 0,9 kN	Høyde: 35,1
	30	35,4
	26	33,4
	23,2	31,2
	21	29,3
	19,5	26,8
	18,4	20
	17,6	16,5
	17,5	12,2
	17,6	9,1
	18,6	6,9
	20,4	3,4
	23	2,6
	25,4	1
	28,2	0,3
Lasttrinn 4	Last: 2 kN	Høyde: 32,1
	26,5	32,1
	25	31,8
	22	27,9
	19,8	26,8
	18	25
	16,2	21,9
	15,8	18,4
	15,5	14,1
	16	10,1
	17	7,7
	19	4
	22	1
Lasttrinn 5	Last: 7,6 kN	Høyde: 28,2
	24	28,2
	20,1	28,2
	16,5	25,5
	13,4	22,4
	11,6	19
	10,5	15
	10,5	12
	11,3	8,5
	13,2	4,5

	15,3	2
	20	-2
	25,5	0
Lasttrinn 6	Last: 0 kN	Høyde: 34,3
	26,5	34,3
	25,5	33,9
	22,2	30
	19	27,2
	17	25,3
	15,3	23,5
	14,3	22,2
	14,3	17,4
	14,5	14
	16	8
	17,5	7
	22	5,5
	26	0

Areal av kontaktflate:

	Lengde	Dybde
Lasttrinn 1	0	0
Lasttrinn 2	30	-
Lasttrinn 3	30	24
Lasttrinn 4	30	30
Lasttrinn 5	30	30
Lasttrinn 6	0	0
Lasttrinn 7	0	0

Strekk i duken. Avstand mellom to punkter målt langs midten, vertikalt (cm):

Punkt	Lasttrinn		
	1	2	5
3-4	3		
4-5	3	3,2	
5-6	3,2	3,2	4,4
6-7	3,2	3,2	4,2
7-8	3,3	3,2	4,3
8-9	3	3,2	4
9-10	3,2	3,2	4,1
10-11	3	3,1	3,8
11-12	3,2	3,4	4,2
12-13	3,1	3,3	4
13-14	3,1	3,1	4
14-15	3,5	3,4	5
15-16	3	3	
16-17	3,2		

Merknad:

Avstand Bjelke-Bunnplate er ikke målt, altså er det ikke i beregningene i resultatkapittelet justert for skjevhet i bjelken.

Forsøk 4

Innfylling av lag nr.	Vekt lettklinker (kg)	Avstand til øvre del av rør før komprimering (cm)	Avstand til øvre del av rør etter komprimering (cm)	Høyde
1	5,321	84	85	14,1
2	5,004	69	73,5	25,6
3	5,012	59	60	39,1
4	5,395	45,5	46,5	52,6
5	4,914	33	34	65,1
6	4,958	20	22	77,1
7	5,048	8	10	89,1
8	3,138	5	5,8	93,3
Total:	37,852			

Omkrets før fylling: 130,4 cm

Tverrsnittsareal før fylling: 1353,8 cm²

	Etter fylling, Bunn (cm)	Etter fylling, Midt	Etter fylling, Topp
Omkrets	137	140	140
Tverrsnittsareal (beregnet)	1494,3	1560,5	1560,5

Volum: 0,14405 m³

Densitet: 262,8 kg/m³

Avstand Bjelke-Belastningsplate: 27 cm

Avstand Bjelke-Bunnplate: 26,8 cm

Innmålingspunkt	Avstand punkt-bjelke X:	Y
Lasttrinn 1	Last: 0 kN	Høyde: 41,7
Topp:	42	41,7
7	36	40,4
6	25,5	32,5
5	22,4	25,4
4	22	18,7
3	23,7	11,6
2	28,1	4,7
1	37	0
Lasttrinn 2	Last: 0,325 kN	Høyde: 38,57
7	35,1	38,57
6	26,1	32,5
5	21,3	25,4
4	20,8	18,7
3	22,5	11,6
2	26	4,7
1	34,1	0
Lasttrinn 3	Last: 0,64 kN	Høyde: 35,61
	31,4	35,61
6	26	32,5

5	20,3	25,4
4	19,1	18,7
3	20	11,6
2	123,5	4,7
1	30,5	0
Lasttrinn 4	Last: 1,42 kN	Høyde: 32,7
6	27	32,5
5	19,2	25,4
4	17,5	18,7
3	17,9	11,6
2	21	4,7
1	27	0
Lasttrinn 5	Last:3,47 kN	Høyde: 29,3
	27	29,3
5	18,2	25,4
4	15,1	18,7
3	14,8	11,6
2	17	4,7
1	27	0
Lasttrinn 6	Last: 7,77 kN	Høyde: 26,5
	23,817,5	26,5
5	13	25,4
4	11,6	18,7
3	13	11,6
2	23	4,7
1	27	0
Lasttrinn 7	Last: 0 kN (avlasting)	Høyde: 32,1
	28,6	32,1
5	18,3	25,4
4	16	18,7
3	15,7	11,6
2	18,3	4,7
1	27	0

Areal av kontaktflate:

	Lengde	Dybde
Lasttrinn 1	0	0
Lasttrinn 2	30	15,8
Lasttrinn 3	30	21
Lasttrinn 4	30	30
Lasttrinn 5	30	30
Lasttrinn 6	30	30
Lasttrinn 7	0	0

Strekk i duken. Avstand mellom to punkter målt langs midten, vertikalt (cm):

Punkt	Lasttrinn						
	1	2	3	4	5	6	7
3	9,9	10	10,3	10,7	11,5	12,7	10,7
2	10,2	10,2	10,1	10,5	11,2	11,9	11,1
1	9,8	9,9	9,9	10,3	11,1	12,1	10,9
Plate-plate	35	37	38,7	41	44,2	49,7	43

Merknad:

Punkt 3, 2, 1 er målt for tredelt «halv omkrets»

Forsøk 5

Innfylling av lag nr.	Vekt lettklinker (kg)	Avstand til øvre del av rør før komprimering (cm)	Avstand til øvre del av rør etter komprimering (cm)	Høyde
1	5,193	83	85	14,1
2	5,019	73	71	28,1
3	5,319	54	58	41,1
4	5,318	41	44,5	54,6
5	5,313	32	32	67,1
6	5,464	17	17	82,1
7	5,094	4	4	95,1
	-0,039			
Total:	36,681			95,1

Omkrets før fylling: 130,4 cm

Tverrsnittsareal før fylling: 1353,8 cm²

	Etter fylling, Bunn (cm)	Etter fylling, Midt	Etter fylling, Topp
Omkrets	139,5	136,5	136,1
Tverrsnittsareal (beregnet)	1549,4	1483,5	1474,8

Volum: 0,1424 m³

Densitet: 257,5 kg/m³

Avstand Bjelke-Belastningsplate: 23 cm

Avstand Bjelke-Bunnplate: 23,3 cm

Innmålingspunkt	Avstand punkt-bjelke X:	Y
Lasttrinn 1	Last: 0 kN	Høyde: 41,6
Topp:	38	41,6
7	30,9	40,4
6	20	32,6
5	17,5	25,6
4	17,1	18,8
3	18,2	11,7
2	22,5	4,7
1	32,8	0
Lasttrinn 2	Last: 0,39 kN	Høyde: 38,6
	27,4	38,6
6	19	32,6
5	16,5	25,6
4	15,5	18,8
3	16,8	11,7
2	21,5	4,7
1	28,6	0
Lasttrinn 3	Last: 0,825 kN	Høyde: 35,8
	24,5	35,8
6	20,1	32,6

5	15,6	25,6
4	14,1	18,8
3	14,9	11,7
2	18,5	4,7
1	25,9	0
Lasttrinn 4	Last: 2,12 kN	Høyde: 32,8
	23	32,8
6	22,3	32,6
5	14,9	25,6
4	12,4	18,8
3	12,2	11,7
2	15,5	4,7
1	23,5	0
Lasttrinn 5	Last:4,1 kN	Høyde: 30
	23	30
5	13,8	25,4
4	10,5	18,7
3	9,8	11,6
2	12,3	4,7
1	23,5	0
Lasttrinn 6	Last: 7,75 kN	Høyde: 26,1
	23	26,1
	18,5	27,6
5	13,9	25,4
4	8,8	18,7
3	7,4	11,6
2	8,8	4,7
1	12,5	0
	18,5	-2,8
	23,5	0
Lasttrinn 7	Last: 0 kN (avlasting)	Høyde: 32,1
	19,7	30,3
5	14,4	25,4
4	11,4	18,7
3	10,9	11,6
2	13,7	4,7
1	23,5	0

Areal av kontaktflate:

	Lengde	Dybde
Lasttrinn 1	0	0
Lasttrinn 2	30	19,6
Lasttrinn 3	30	27
Lasttrinn 4	30	30
Lasttrinn 5	30	30
Lasttrinn 6	30	30
Lasttrinn 7	0	0

Strekk i duken. Avstand mellom to punkter målt langs midten, vertikalt (cm):

Punkt	Lasttrinn						
	1	2	3	4	5	6	7
4	9,5	9,7	10,1				
3	9,5	9,8	10,1	10,5	11,1	12	10,4
2	9,6	9,6	10	10,4	11	11.8	10,7
1	9,4	9,6	9,9	10,4	11,2	12,2	10,8
Plate-plate	37	38,5	41	44	46,9	51,4	45,2

Merknad:

Forsøk 6

Innfylling av lag nr.	Vekt lettklinker (kg)	Avstand til øvre del av rør før komprimering (cm)	Avstand til øvre del av rør etter komprimering (cm)	Høyde
1	5,062	85	85	14,1
2	5,246	68,5	72	27,1
3	5,052	59	58,5	40,6
4	5,106	43,5	46	53,1
5	4,893	31	32	67,1
6	4,844	20	21	78,1
7	5,671	5	5,5	93,6
Total:	35,874			93,6

Omkrets før fylling: 130,4 cm

Tverrsnittsareal før fylling: 1353,8 cm²

	Etter fylling, Bunn (cm)	Etter fylling, Midt	Etter fylling, Topp
Omkrets	138,8	137	137,5
Tverrsnittsareal (beregnet)	1533,9	1494,3	1505,3

Volum: 0,141 m³

Densitet: 254,3 kg/m³

Avstand Bjelke-Belastningsplate: 19,7 cm

Avstand Bjelke-Bunnplate: 21,2 cm

Innmålingspunkt	Avstand punkt-bjelke X:	Y
Lasttrinn 1	Last: 0 kN	Høyde: 41,7
Topp:	34,7	41,7
7	25,8	40,4
6	17,9	32,6
5	15,5	25,6
4	14,5	18,8
3	16,2	11,7
2	21,7	4,7
1	32	0
Lasttrinn 2	Last: 0,42 kN	Høyde: 38,6
	25,5	38,6
6	18,3	32,6
5	14,6	25,6
4	13,1	18,8
3	14,4	11,7
2	19,4	4,7
1	29	0
Lasttrinn 3	Last: 0,875 kN	Høyde: 35,7
	23	35,7
6	18,4	32,6

5	13,8	25,6
4	11,9	18,8
3	12,4	11,7
2	16,5	4,7
1	24,6	0
Lasttrinn 4	Last: 2,12 kN	Høyde: 32,7
	20,1	32,7
6	20,3	32,6
5	12,9	25,6
4	10,1	18,8
3	10,4	11,7
2	13,6	4,7
1	21,4	0
Lasttrinn 5	Last: 4,5 kN	Høyde: 30
	20,4	30
5	12,1	25,6
4	8,3	18,8
3	7,8	11,7
2	10,6	4,7
1	21,4	0
Lasttrinn 6	Last: 7,6 kN	Høyde: 26,3
	20,4	26,3
	16,5	27,4
5	12,3	25,6
4	6,8	18,8
3	5,6	11,7
2	7,4	4,7
1	12,1	0
	17,9	-2,2
	21,4	0
Lasttrinn 7	Last: 0 kN (avlasting)	Høyde: 32,6
	27	32,6
5	12,1	25,6
4	9,5	18,8
3	9,2	11,7
2	12,4	4,7
1	21,4	0

Areal av kontaktflate:

	Lengde	Dybde
Lasttrinn 1	0	0
Lasttrinn 2	30	15,6
Lasttrinn 3	30	24,2
Lasttrinn 4	30	30
Lasttrinn 5	30	30
Lasttrinn 6	30	30
Lasttrinn 7	0	0

Strekk i duken. Avstand mellom to punkter målt langs midten, vertikalt (cm):

Punkt	Lasttrinn						
	1	2	3	4	5	6	7
4	9,6	9,6	10,1	10,5	11,5	12	10,5
3	9,6	9,8	10,1	10,5	11,1	11,5	10,8
2	9,6	9,7	10	10,5	11,2	11,7	11
1	9,4	9,8	10,1				
Plate-plate	36	36,8	39,2	42,3	45,6	48,4	44

Merknad:

Deler av siste innfylling er gjenbruk av materiale brukt i tidligere forsøk.