

Ari Pekkarinen

Muovikomposiittien lujitekankaiden muotoutuvuuden tutkimus

Opinnäytetyö
Materiaalitekniikka

Huhtikuu 2014




MAMK

University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

	Opinnäytetyön päivämäärä 14.1.2014 - 28.4.2014	
Tekijä(t) Ari Pekkarinen	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Materiaalitekniikka	
Nimeke Komposiittien muotoutuvuuden tutkimus		
Tiivistelmä Työn tarkoituksena oli tehdä selvitys muovikomposiittien muotoutuvuuden tutkimisesta Mikkelin ammattikorkeakoululle. Tavoitteena oli tutkia muotoutuvuutta yleisesti ja esitellä sekä ottaa käyttöön muotoutuvuuden tutkimiseen käytettävä simulointiohjelmisto. Simuloinnin tulosten verifiointia varten on tarpeen suunnitella ja käyttöönottaa testimuotti. Työssä esitellään komposiittien muodonmuutokseen liittyvät tutkimuskaalat ja niiden kautta kinemaattisen ja mekaanisen mallin teorioiden periaatteet. Lankojen puristuvuuden ja lujitteiden tasomuodonmuutoksen simulointia vastaava fyysinen testausmenetelmä käydään läpi. Työ keskittyy yhden lujitekerroksen käyttäytymisen tutkimiseen muodonmuutoksen alaisena. Komposiitin muodonmuutos jaetaan yksittäisiin mekanismeihin, joiden vaikutusta lujitteessa tutkitaan simulointiohjelmistolla (Wisetex). Muotoutuvuuden takana oleviin teorioihin tutustuttiin. Lujitekankaan muotoutuvuutta rajoittavat päätekijät selvisivät. Simulointi otettiin käyttöön ja sillä tehtiin esimerkkiteitä. Tasomuodonmuutoksen testaamiseen tarkoitettu työkalu suunniteltiin. Ohjelmistopolku lujitteiden FEM-analyysejä varten esiteltiin. Koska tässä työssä keskitytään vain muotoutuvuuden simulointiin ja mallinnukseen, lisätutkimukset ja testit ovat tarpeellisia tulosten todentamiseksi.		
Asiasanat (avainsanat) Lujitemuovikomposiitti, Muodonmuutos, Langan puristuvuus.		
Sivumäärä 45+17	Kieli Suomi	URN
Huomautus (huomautukset liitteistä)		
Ohjaavan opettajan nimi Kari Dufva	Opinnäytetyön toimeksiantaja MAMK Oy	

DESCRIPTION

		Date of the bachelor's thesis 14.1.2014 - 28.4.2014
Author(s) Ari Pekkarinen	Degree programme and option Material Engineering	
Name of the bachelor's thesis Study of deformability about the fiber reinforced composites		
Abstract <p>A purpose of this thesis was to explore the studying methods which are used for analysing the deformation of fibre reinforced composites. The study was commissioned by Mikkeli University of Applied Sciences. The target was to study the basic theory of deformation and take the deformation's simulation software into operation. A test mold must be engineered for verifying the results which are given by simulation software.</p> <p>The basics of mechanical and kinematic models theories were described through levels which were used for scaling the range of study. A theory for compression of the yarns was presented with inplane deformation mechanisms. This study was restricted to examine deformations which take place in one layer of reinforcements. Inplane mechanisms (shear and axial strain) were simulated in wisetex software</p> <p>The basic theories behind deformation were explored. The main mechanisms of deformation and factors which limited the deformation were cleared out. The simulation software was taken into the operation. The example processes were carried out with the software and a test tool for the picture frame test was engineered. The program path for FEM-analysis of the reinforcements was shown. Because the results of this study were based on simulation, the extra studies and tests are required.</p>		
Subject headings, (keywords) Deformability about the fibre reinforced plastics, Compression of the yarns, Inplane shear		
Pages 45+17	Language Finnish	URN
Remarks, notes on appendices		
Tutor Kari Dufva	Bachelor's thesis assigned by Mikkeli University of Applied Sciences	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	LUJITEMUOVIKOMPOSIITTI.....	2
2.1	Kuidut	2
2.2	Lujitteet.....	4
2.3	Matriisimuovit	7
2.3.1	Kertamuovihartsit	10
2.3.2	Kestomuovihartsit.....	11
2.3.3	Lujitemuovipuolivalmisteet	12
2.4	Komposiittien valmistus	12
3	KOMPOSIITTIEN MUOTOUTUVUUS	15
3.1	Muotoutuvuuteen vaikuttavia tekijöitä.....	15
3.2	Muodonmuutosmekanismit	16
3.3	Muotoutuvuuden teorial.....	17
3.3.1	Fishnet pinjoint	17
3.3.2	Mekaaninen malli.....	22
3.4	Permeabiliteetti ja tilavuusjakauma	24
3.5	Tasojännitystilojen testaus.....	26
3.6	Testityökalu	28
4	WISETEX –OHJELMISTO.....	29
4.1	Ohjelmiston esittely	29
4.2	Esimerkki muotoutuvuuden tutkimisesta	31
4.2.1	Puristuksen määrittäminen	32
4.2.2	Langan kitka sekä veto- ja taivutusjäykkyydet.....	33
4.2.3	Kudokset	34
4.2.4	Tasomuodonmuutokset.....	35
4.3	Kolmiulotteisen muodonmuutoksen tutkiminen.....	36
4.3.1	Kudoksen verkotus.....	36
4.3.2	Ansys.....	37
5	TULOKSET	38
5.1	Puristus	38
5.2	Tasomuodonmuutos.....	40
5.3	FEM -analyysi	42

6	POHDINTA	43
	LÄHTEET	45

LIITTEET

- 1 Kuitujen ominaisuudet wisetexissä
- 2 Kudoksen ja lankojen ominaisuudet tasomuodonmuutoksessa
3. Ansys: FEM-mallin lujuusominaisuudet, tuennat ja siirtymät sekä voimat
4. Vetokehyyksen piirustukset
5. Kinemaattisen mallin ratkaisut

1 JOHDANTO

Tuotteiden, laitteiden ja tavaroiden kasvavat vaatimukset ovat kasvattaneet myös materiaaleille asetettavia vaatimuksia. Muovien keksiminen mullisti teollisuuden mahdollisuudet 1900-luvun alussa: muovit olivat kuitenkin yksinään liian heikkoja joihinkin käyttökohteisiin, niitä täytyi vahvistaa jollain tavalla ja tämä loi alun nykypäivän muovikomposiiteille. /1,s.13./

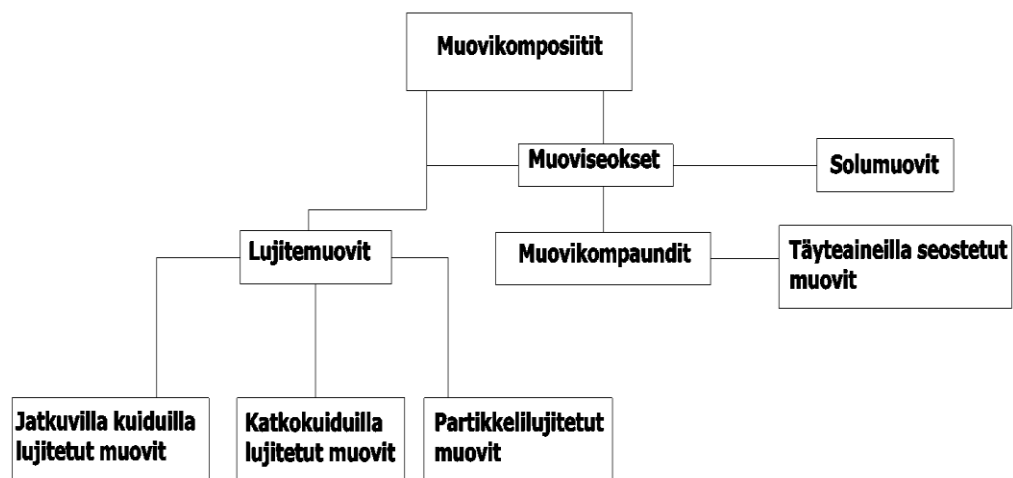
Komposiitilla tarkoitetaan kahden tai useamman aineen yhdistelmää. Aineet toimivat yhdessä, mutta eivät kuitenkaan ole lienneet toisiinsa. /1, s.17./ Komposiitti koostuu lujitteesta ja matriisista. Matriisin ts. sidosaineen funktio on sitoa lujitteet kuormaa kantaviksi. Lujitteiden tehtävä komposiitissa on yleisimmin kantaa kuormaa. /1,s.74./

Komposiiteilla saadaan yhdistettyä eri materiaalien vahvimmat ominaisuudet. Usein komposiitilla haetaan suurta lujuutta ja jäykkyyttä suhteessa pieneen tiheyteen. Materiaalin lujuusominaisuudet voidaan määrätä kuitujen suuntauksella. /1,s.13./ Muovikomposiitit sietävät korroosiota huomattavasti metalleja paremmin ja syrjäyttävät metallit monissa käyttökohteissa, kuten ilmailuteollisuudessa. lentokoneiden rungoissa. Lentokoneiden rungoissa ja muissa osissa käytetään nykyään metallien sijasta kuitulujitettuja erikoismuoveja. /9,s.1./

Muovikomposiittien käytön yleistyessä on törmätty komposiittien muotoutuvuuteen liittyviin ongelmiin, ja tämä luo tarvetta tutkia komposiittien muotoutuvuutta rajoittavia tekijöitä. Suunnitteluvaiheessa saatu tarkka tieto tietynlaisen komposiitin sopivuudesta määrätyn muotoisille pinnoille olisi tärkeä tieto ajatellen valmistusta. /8,s.31-34./

2 LUJITEMUOVIKOMPOSIITTI

Lujitemuoveja käytetään monissa käyttökohteissa. Niillä on hyvä mekaaninen ja kemiallinen kestävyys suhteessa alhaiseen hintaan. Lujitemuovi koostuu muiden komposiittien tavoin lujitteista ja muovimatriisista. Muovikomposiitit jaetaan lujitettuihin muoveihin ja muoviseoksiin (Kuva 1). Lujitetuissa komposiiteissa kuidut toimivat lujitteena. Erilaisten muovien seokset ja solumuovitkin ovat komposiittia, koska ne täyttävät komposiitin määritelmän. /5,s.17-18./



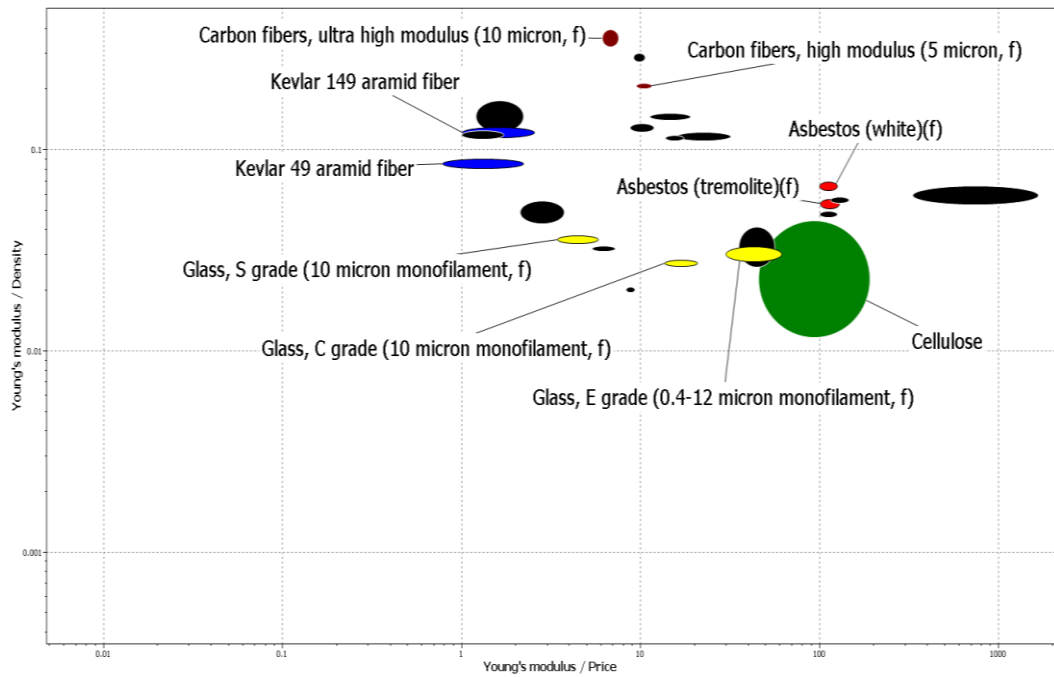
Kuva 1. Muovikomposiittien lajittelu /1/.

2.1 Kuidut

Muovikomposiiteissa käytetään lujitemateriaaleina perinteisesti lasi, hiili ja aramidikuituja /1,s.123/. Nykyään biokuitujen kuten pellavan ja selluloosan käyttö on yleistynyt (Taulukko 2).

Lasikuidun hinta suhteessa sen hyviin ominaisuuksiin tekee siitä käytetyimmän lujitemateriaalin. Kuvassa 2 on kuitumateriaaleille määritetty x -ja -yakseleille toimivuusindeksit. Indekseissä hinta sekä tiheys minimoidaan ja kimmokerroin maksimoidaan. Lasikuitua valmistetaan kolmea kaupallista päälaatua, mainitakseni E-lasin (electrical glass), jolla sähköiset ja mekaaniset sekä kemialliset ominaisuudet ovat tasavertaiset. Lasikuidun raaka-ainepitoisuudet vaikuttavat mekaanisiin ja optisiin

ominaisuuksiin sekä lämmönkestoon (Taulukko 1). Lujitekuitujen käyttöaste vuodelta 2004 kuvaa hyvin lasikuidun osuutta lujitekäytössä (Taulukko 2). /1,s.74-75./



Kuva 2. Yleiset kuitumateriaalit. Tiheys ja hinta minimoituna sekä kimmokerroin maksimoituna

Taulukko 1. Eri lasikuitutyypin raaka-ainepitoisuuksia ja ominaisuuksia /1/.

Raaka-aine	Yksikkö	Class C	Class E	Class S
SiO ₂	%	64,5	55,0	65,0
AlO ₂ Fe ₂ O ₃	%	4,0	4,5	25,0
CaO	%	13,5	21,5	-
MgO	%	3,0	0,5	10,0
Na ₂ O+K ₂ O	%	10,0	<1,0	-
B ₂ O ₃	%	5,0	7,5	-
Ominaispaino	g/cm ³	2,45	2,54	2,48
Taitekerroin	nD	1,54	1,55	1,52
Murtolujuus (Yksittäinen kuitu)	GPa	3,3	3,6	4,6
Murtolujuus (370°C)	GPa	-	2,6	4,4
Kimmomoduli	GPa	70	75	86
Lasittumislämpötila	°C	690	850	990

Taulukko 2. Lujitekuitujen käyttöaste vuodelta 2004 /1/.

Kuitu	Määrät (t)	Osuus (%)
Lasi	2 400 000	95,1
Hiili	37 000	1,5
Aramidi	40 000	1,6
HP-polyeteeni	6 000	0,2
Muut kuidut	45	0,1
Luonnonkuidut	40 000	1,6
Yhteensä	2 523 045	100

Kuidut ovat matriisissa joko partikkeli-, katko- tai jatkuvina kuituina riippuen komposiitin valmistusmenetelmästä ja käyttötarkoituksesta. Partikkeli- ja katkokuituja (lyhyet kuidut) käytetään erikseen tai yhdessä jatkuvien kuitujen kanssa. Kuiduista jatkojalostetaan tekstiilimattoja, kankaita tai erimuotoisia kudoksia, jotka ovat varsinaisia lujitteita. /1,s.123-132./

Lyhyet kuidut ovat yleisimmin käytetty lujitemuoto muovikomposiiteissa, joissa ne ovat yleensä hakkeen muodossa (Kuva 6) /7,s.317/. Hakkeen pituus vaihtelee yleensä 1-100 mm:n. Alle yhden millimetrin mittaiset hakkeet nostavat kustannuksia valmistusteknisistä syistä. Lyhyitä kuituja tehdään myös jauhamalla, näin kuiduille saadaan jopa 200-300 µm keskimitta. Keskimittan hajonta riippuu kuidun materiaaliominaisuuksista. /1,s.123-124./

2.2 Lujitteet

Kuiduista tehdään lankoja. Langoista kudotaan edelleen lujitekankaita ja tekstiilejä sekä erilaisia kudoksia. Langat ovat kuitukimppuja. Kuidut ovat langoissa suoraksi vedettynä vierekkäin tai kierteellä. S-langassa kuidut kiertyvät myötäpäivään ja Z-langassa vastapäivään. /1,s.123-132./

Jatkuvista kuiduista valmistettavista tuotteista mainitsen roving-langan. Rovinki tehdään niputtamalla useita suoraksi vedettyjä jatkuvia kuituja kimpuksi. Langoissa ja kankaissa oleva tex-luku kuvaa (Kaava 1), paljonko yksi kilometri lankaa painaa grammoissa. Rovinki on lankakimppu, jonka tex-luku ≥ 300 . /1,s.125-127./

$$\text{tex} = a * d^2 * N \quad (1)$$

Jossa, a (lujitteen vakio) = $\frac{\pi}{4} * \rho * 10^{-3}$

d = kuidun paksuus μm

ρ = tiheys $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

N = kuitujen lukumäärä

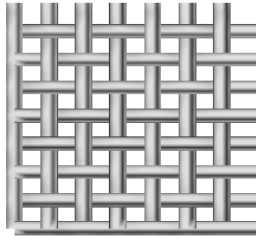
Lujitteen sisältäessä kahta tai kolmea kuitutyyppiä on kyseessä hybridilujite. Näistä muodoista on olemassa lukuisia variaatioita riippuen käyttökohteesta. /1,s.123-132./

Lujitematot valmistetaan koneellisesti lujitelangoista kutomalla tai tikkaamalla /1,s.123-132/. Riippumatta kuitumateriaalista jatkuvat kuidut (langat) voivat olla kudottuna kankaaksi toistensa sitomana tai ne voidaan tikata yhteen erillisellä tikkauslangalla. /1,s.123-132./

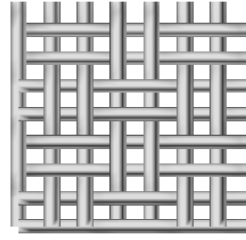
Yleinen sidostyyppi kudotuilla kaksiaksiaalisilla kankailla on palttinasidos (Kuva 3). Palttinasidoksessa kuitulangat on punottu toistensa lomitse suuntiin 0° , 90° /1/. Kuitusuunnista käytetään termejä, (Kuva 4). Kudottuja kankaita tehdään myös 3- ja 4-aksiaalisina /1,s.123-132./

Tikkaamalla valmistetut kankaan eroavat kudotuista niin, että niissä kuitulankojen sitomiseen käytetään erillistä tikkauslangaa. Tikkaamalla valmistettu kangas sisältää aina vähintään kaksi kerrosta, jotka koostuvat haluttuihin suuntiin kulkevista langoista. Useita kerroksia sisältäviä kankaita kutsutaan multi-aksiaalisiksi kankaiksi. /1,s-123-132./ (Kuva 5).

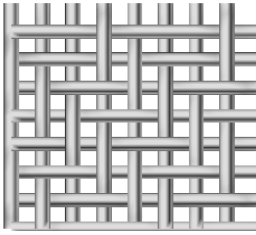
Palttinasidos(Plain)



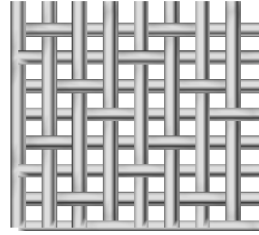
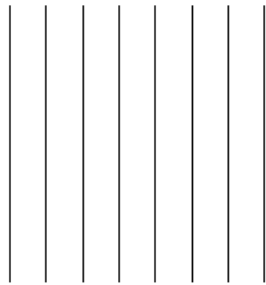
Panamasidos



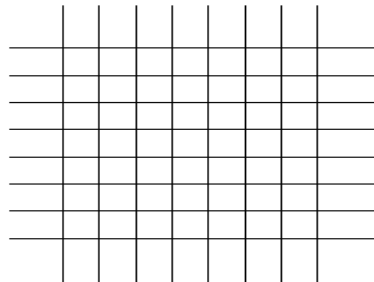
Toimikassidos(Twill)



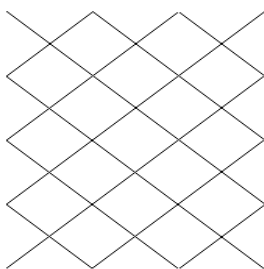
Satiinisidos

**Kuva 3. Kudottujen kankaiden sidostyyppit**

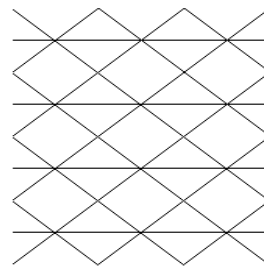
Uni-axial



Bi-axial

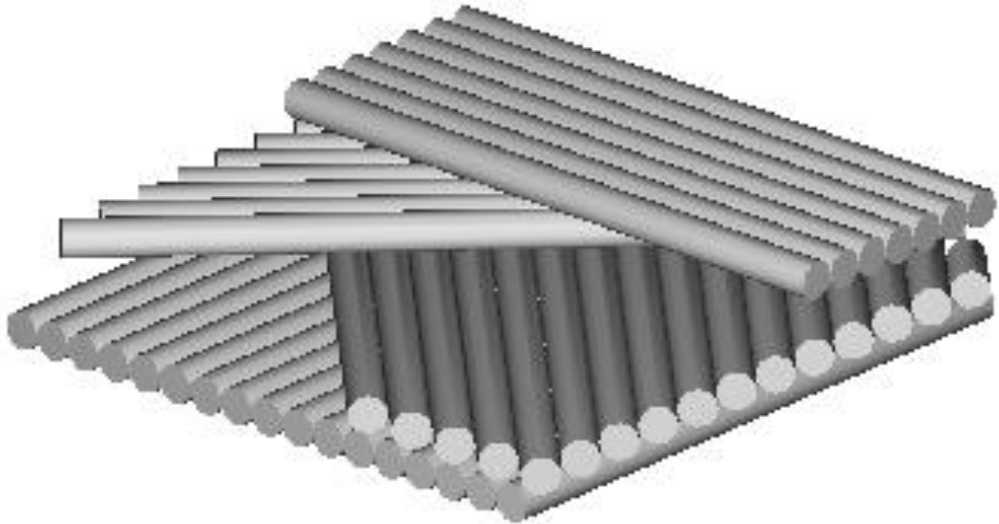


Double-bias

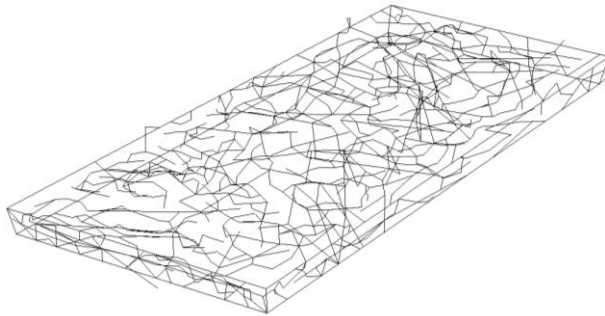


tri-axial

Kuva 4. Lankasuunnat. Double Bias, jossa kuidut ovat suunnissa $+45^{\circ}/-45^{\circ}$



Kuva 5. Multiakksiaalisen tekstiililujitteen malli

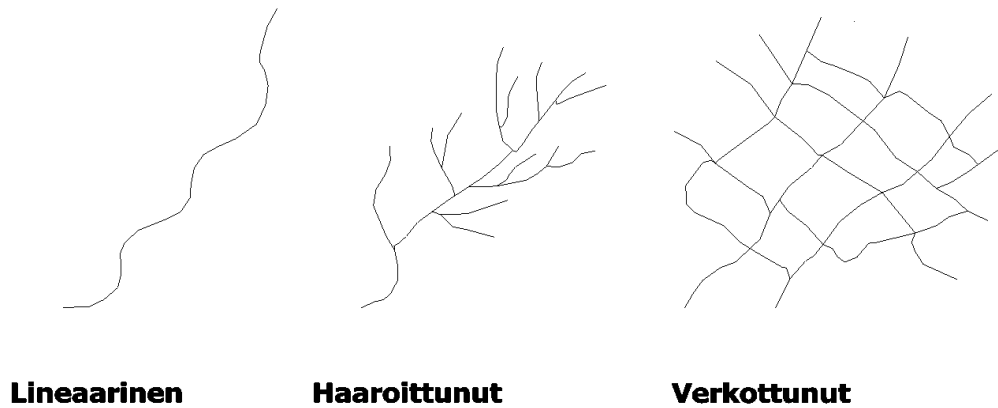


Kuva 6. Katkokuiduista valmistetun lujitematon pelkistetty esitys

2.3 Matriisimuovit

Muovit koostuvat polymeereistä. Polymeeri–sana tulee kreikasta ja tarkoittaa ”monta osaa” suomeksi. Kuten muissakin materiaaleissa polymeerien rakenne ja koostumus vaikuttavat sen ominaisuuksiin. Polymeeri on suurimolekyylinen aine, joka tehdään yhdistämällä synteettisesti rakenneyksiköitä. /6,s.3; 5,s.18./ Valmistusreaktiot ovat polykondensaatio ja polyadditio. Ensimmäisessä reaktiossa reagoivat molekyylit (monomeerit) luovuttavat reaktiossa pois yhden yksinkertaisen molekyylin kuten (H_2O). Toisessa reaktiossa ei synny sivutuotteita. /5,s.24./ Polymeeriketjut ovat molekyylilyh-

disteitä, jotka ovat lineaarisia, haaroittuneita tai 3-ulotteisesti verkottuneita /5,s.18; 6,s.3-4/. Kuvassa 7 on havainnollistettu eri molekyyliyhdisteiden muodostumista.



Kuva 7. Pelkistetty esitys polymeeriketjuista /6/.

Polymeerin tyyppi nimetään sen rakenneyksiköiden koostumusten mukaan. Jos polymeeriketjut koostuvat monomeereista A ja B, on kyseessä kopolymeeri. Homopolymeeri taas koostuu samankaltaisista monomeereista /6,s.3-11/.

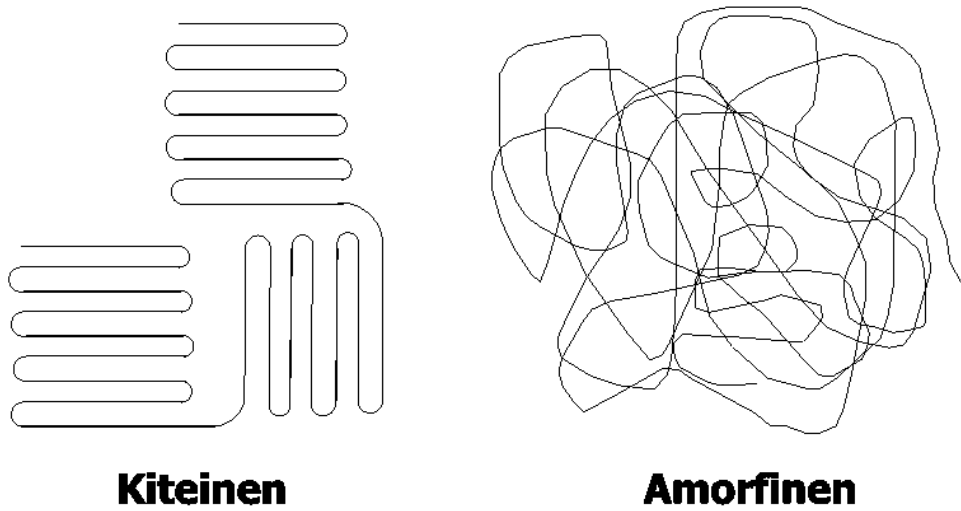
Polymeerien ominaisuudet, kuten viskositeetti, ovat riippuvaisia niiden moolimassasta /5,s.33-34; 6,s.11/. Polymeerin moolimassan määrää polymeroitumisaste (DP degree of polymerisation), joka edelleen määräytyy siitä, kuinka monesta monomeeristä yksi ketju koko polymeerissä koostuu. Tämä kerroin vaihtelee 2...40000. Korkean tiheyden polymeereillä on luonnollisesti korkea polymeroitumisaste. /6,s.11; 5,s.28./

Polymeerin koostuessa valtavasta määrästä molekyyliyhdisteitä niiden koko vaihtelee. Täten yksittäisten molekyyliyhdisteiden molekyylimassojen (M_0) välillä on jonkin verran hajontaa. Tämä epäjatkuvuus voidaan ottaa huomioon laskemalla polymeerille tilastollinen lukukeskimääräinen moolimassa. /6,s.12-13./ ja painokeskimääräinen moolimassa /5,s.28-29/.

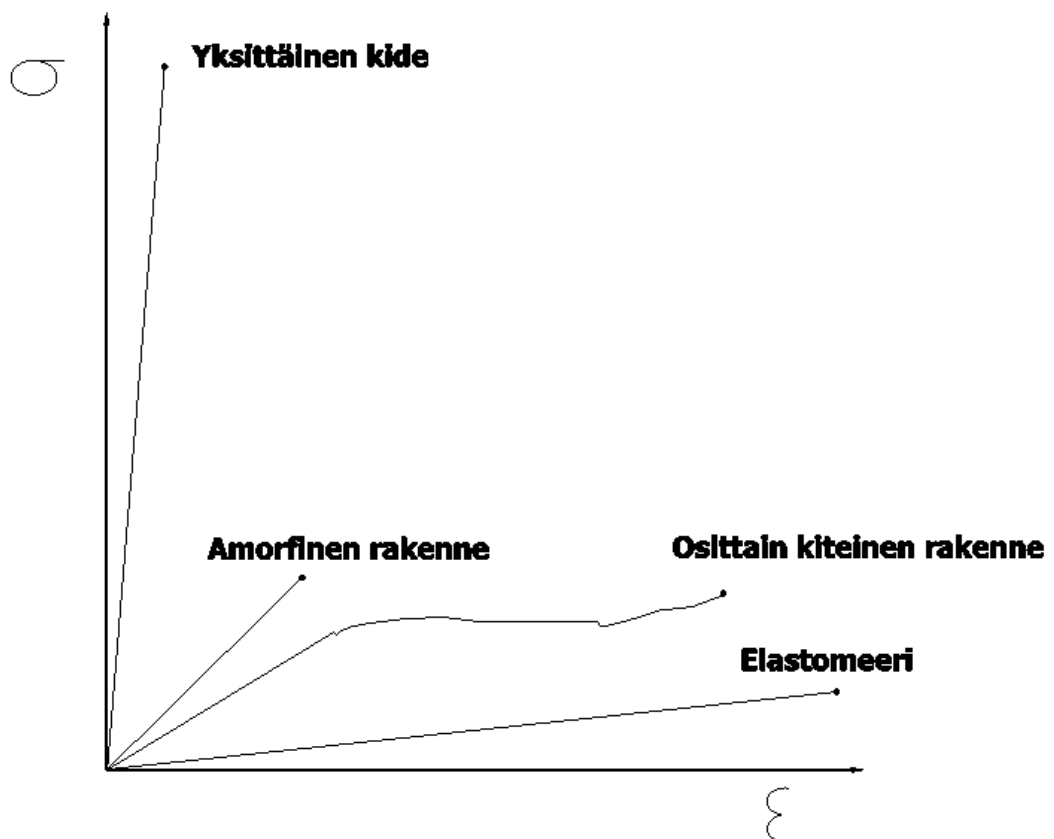
Luku- ja painokeskimääräisten moolimassojen suhde $\frac{\overline{M}_w}{\overline{M}_n}$ on polydispersiteetti-indeksi, joka kertoo moolimassajakauman leveyden. Indeksien suuruus vaihtelee välillä 1,5...20. /6,s.12/. Indeksien suuruudesta voidaan päätellä, kuinka paljon polymeerin molekyyliyhdisteiden koot eroavat toisistaan (Heterogeenisyysindeksi) /6,s.11-12/.

Polymeerit ovat mikrorakenteeltaan joko amorfisia tai osittain kiteisiä (Kuva 8) Osittain kiteisillä muoveilla kiteisyysaste vaihtelee. 5...95 %. Kiteinen rakenne on järjes-

täytynyt ja amorfinen epäjärjestynyt. /5,s.26-27./ Kiteisyysaste vaikuttaa fysikaalisiin ominaisuuksiin, joista mainitakseni murtumiskäyttäytymisen (Kuva 9) /6,s.241,394/.



Kuva 8. Polymeerin ketjujen järjestymisen kiteisissä ja amorfisissa rakenteissa /6/.



Kuva 9. Eri kiteisyysasteen omaavien polymeerien jännitys - venymä kuvaajat /6/.

Amorfiset polymeerit ovat lasimaisia aineita, jotka ovat jähmettyneitä suuren viskositeetin nesteitä. Amorfisen aineen ylittäessä lasittumislämpötilan T_g sen viskositeetti laskee jyrkästi (Kuva10). Amorfisten muovien maksimi käyttölämpötila on hieman alle lasittumislämpötilan. /6,s.290-293./

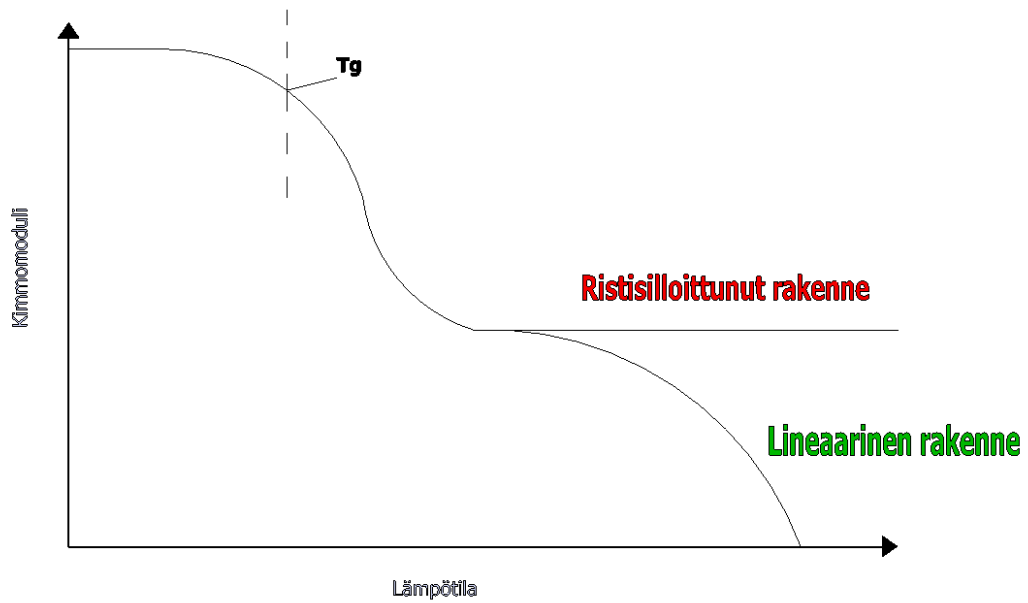
Osittain kiteisille muoveille maksimi käyttölämpötila määräytyy kiteiden sulamisesta. Kiteiden sulaessa ne käyttäytyvät nesteen tavoin. Kiteiden sulamiseen vaikuttaa niiden fyysisen koon lisäksi polymeerin moolimassa, molekyyliketjujen haaroittuneisuus ja muovin kiteytymislämpötila T_c . Näistä syistä osittain kiteisen muovin sulaminen tapahtuu laajalla lämpötila-alueella, josta muoville määritetään sulamislämpötila T_m . /6,s.285-290./

Muovit jaetaan muovattavuutensa perusteella kahteen pääryhmään kerta- ja kesto-muoveihin /1,s.18/.

2.3.1 Kertamuovihartsit

Kertamuovihartsien valmistuksessa monomeerit saadaan ketjuuntumaan katalyyttiaineella pieni moolimassaisiksi molekyyleiksi /1,s.35/. Kertamuovihartsit on tällöin huoneenlämpötilassakin juoksevaa. Hartsin kovettuminen käynnistetään siihen lisättävällä koveteaineella. Koveteaine saa molekyyliketjut luomaan sidokset toistensa välille (verkottuminen). Kertamuovien polymeeriketjut ovat ”ristisilloittuneet” keskenään. Kertamuovit silloitetaan aina vasta lopputuotetta valmistettaessa, jolloin reaktiiviset molekyyliketjut muodostavat kovalenttiset sidokset toistensa välille. /1,s.35-42./

Kovettuja kertamuoveja ei voi muovata uudelleen. Molekyyliketjujen verkottuneet sidokset (kovalenttiset) ovat niin voimakkaat, ettei muovi sula lämmön vaikutuksesta vaan ristisidokset hajoavat lämpötilan kohoamisen myötä ts. materiaali syttyy tuleen tai hajoaa. /6,s.10-11./ Lämpötilan vaikutus eri sidostyyppien polymeerien kimmomoduuleihin, (Kuva 10). Ristisidokset kantavat vielä kuormaa samassa lämpötilassa, kun pelkät lineaariset ketjut omaavat polymeerit ovat jo sulan muodossa. /6,s.344-345./



Kuva10. Kimmomoduli lämpötilan funktiona /6/.

Kertamuovihartsien ominaisuuksia säädellään seosaineilla, näitä ominaisuuksia voi olla mm. lujuus, iskunkestävyys ja paloturvallisuus (Taulukko 3).

Taulukko 3. Kertamuovien ominaisuuksia /1/.

Kertamuovi	Murtolujuus (MPa)	Lämmönkesto (C°)	Paloturvallisuus	Kemiallinen kestävyys	Muottikutistuma	Hinta
Polyesteri	50-70	120-180	Huono	Hyvä	Suuri	Halpa
Epoksi	50-70	120-180	Huono	Hyvä	Pieni	Kallis
Fenoli	<50	180-300	Hyvä	Hyvä	Pieni	Kallis
Polyuretaani	>70	<120	Huono	Erinomainen	Pieni	Halpa
Polyamidi	>70	180-300	Hyvä	Hyvä	Pieni	Kallis

2.3.2 Kestomuovihartsit

Kestomuoveissa molekyyliketjut eivät ole verkottuneita vaan ketjut ovat lineaarisia tai haaroittuneita, ja niiden välillä vaikuttaa heikko sekundäärisidos. /6,s.10-11; 1,s.18/.

Kestomuovit ovat osittain kiteisiä tai amorfisia, uudelleen muovattavia polymeerejä. Kestomuoveja käytetään enimmäkseen lujittamattomina. Toisin kuin kertamuovit, kestomuovit ovat aina valmiita polymeerejä, kun ne jäähtyvät niiden valmistuksen jälkeen. Lujitettaessa kestomuoveja ne täytyy ensiksi saattaa sulaan tilaan, jonka jälkeen lujitteet voidaan kastella. Kertamuovihartsien viskositeetti on paljon pienempi verrattuna sulaan kestomuoviin ja tämä vaikeuttaa kestomuovikomposiittien valmistusta. Suuren viskositeetin vuoksi kestomuovit injektoidaan lujitteisiin korkealla paineella ja korotetussa lämpötilassa. /1,s.53./

2.3.3 Lujitemuovipuolivalmisteet

Termiä käytetään muovaamattomasta lujitekuidut ja matriisiaineen omaavasta materiaalista. Sana tulee englannista pre-impregnated (esi-imeytetty). Valmisteet ovat levymäisiä (SMC) tai taikinamaisia (BMC) kerta- tai kestomuovimassoja, jotka sisältävät lujitteet. /1,s.136-146./

2.4 Komposiittien valmistus

Muovikomposiittien valmistusmenetelmät jaetaan neljään pääryhmään, joihin yksittäiset menetelmät lukeutuvat riippuen tavasta, jolla lujitteet impregnoidaan. Tuotteen muoto, materiaalit ja tuotteelle asetetut vaatimukset ovat tekijöitä, joilla valitaan valmistusmenetelmä. /1,s.153./ Riippumatta valmistusmenetelmästä kannattaa lujitteiden muotoutuvuus ottaa huomioon komposiitista valmistettavan tuotteen suunnittelussa, koska muodonmuutosta tapahtuu langoissa ja kudoksessa kaikissa valmistusmenetelmissä /11/. Valmistusmenetelmiä ovat:

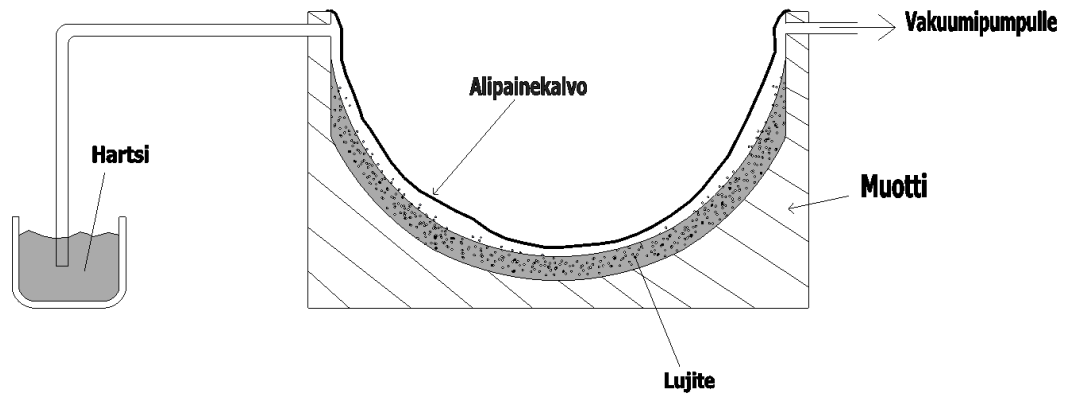
- Laminointimenetelmät
- Puristusmenetelmät
- Injektiomenetelmät
- Suulakemenetelmät

Laminoinnissa lujitteet kastellaan avonaisessa muotissa, joko käsin tai koneellisesti. Esimerkki koneellisesta menetelmästä on kuitukelaus, jossa lujitteet kastellaan altaassa ja sen jälkeen kelataan pyörivän, muodoltaan pyörähdyssymmetrisen muotin ympärille. Käsin tehtävä avolaminointi on yleinen menetelmä alhaisten kustannustensa vuoksi. Siinä lujitteet kyllästetään telaamalla (märkälaminointi). Puolivalmisteiden laminointia kutsutaan kuivalaminoinniksi ja telaamalla tehtävää märkälaminoinniksi. /1,s.153-154,162./ Laminointimenetelmissä käytetään kertamuoviharsteja /1,s.154/.

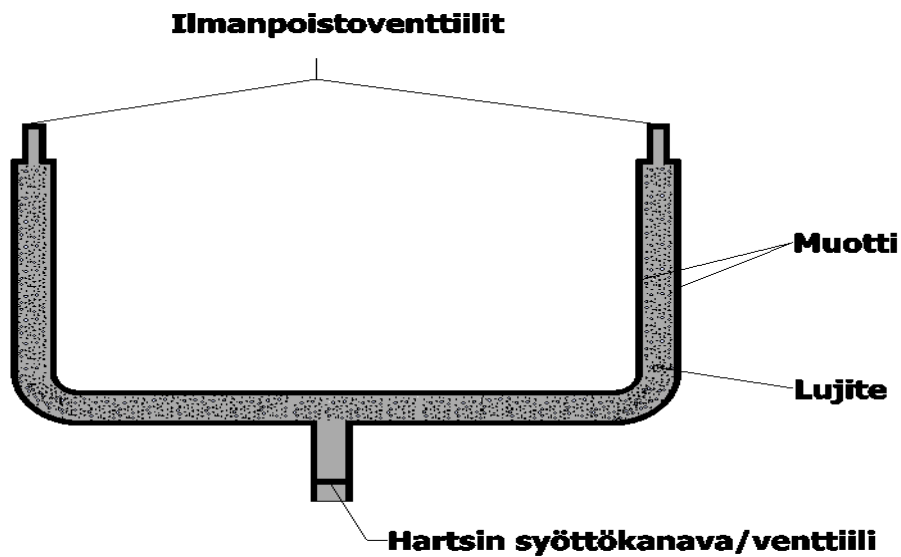
Kun lujitteille annetaan muoto puristamalla ne muottipintaa vasten, on tällöin luonnollisesti kyse puristusmenetelmästä. /1,s.154/. Puristusmenetelmät jaetaan siirto- ja ahtopuristukseen. Siirtopuristuksessa muotti on kiinni ja hartsi tuodaan muottiin paineen avulla siirtosylinterin kautta. Ahtomenetelmässä lujitteet ja hartsi ovat ensiksi avoimessa muotissa ja niille annetaan muoto painamalla muotin urospää kiinni. /1,s.180./ Puristusmenetelmissä käytetään kerta- ja kestopuovia sekä lujitemuovipuolivalmisteita /1,s.154,180-183/.

Muutamia raaka-aineiden käyttömenetelmiä mainitakseni: Siirtopuristuksessa kestopuovi sulatetaan siirtosylinterissä, josta se painetaan muottiin. SMC-levy(t) esilämmitetään ja puristetaan ahtopuristuksessa muotoonsa sekä kovetetaan jälkipuristuksessa. Kertamuovilla kyllästetyt lujitteet muotoillaan kylmällä puristimella ja hartsi kovetetaan lämpötilaa korottamalla jälkipuristuksessa. /1,s.154; 180-182./

Injektiomenetelmissä hartsi tuodaan muotteihin ali- tai ylipaineella. Alipaineinjektiossa kertamuovihartsi imetään muottipinnan ja alipainesäkin (-kalvon) välissä olevien lujitteiden läpi (Kuva 11) Alipaine vetää kalvon tiukasti kiinni lujitteisiin, joten se toimii muotin yläpintana. /1,s.154./ Esimerkki ylipainetta hyödyntävästä menetelmästä on RTM-menetelmä (Resin Transfer Moulding), missä kertamuovihartsi impregnoidaan lujitteisiin paineella. Ilmapatja hartsin edellä poistuu suljetusta muotista ilmanpoisto-/hartsin ylivuotoventtiileistä, (Kuva 12). RTM:ssä käytetään yleensä kevyttä metallimuottia. /7,s.52-53./ Injektiomenetelmillä tehdään usein vaativan geometrian omaavia osia, joten muotoutuvuuteen liittyviin ongelmiin törmätään usein /8,s.5-6/.



Kuva 11. Kaaviokuva alipaineinjektiosta /7,s.52-53/.



Kuva 12. Kaaviokuva paineinjektiolaitteistosta /7,s.52-53/.

Pultruusio on *suulakemenetelmä* /1,s.154,186/. Pultruusiolla valmistetaan putkia ja erilaisia profiileja. Jatkuvat lujitteet kastellaan ensiksi hartsilla ja vedetään sen jälkeen halutun muotoisen lämmitetyn suulakkeen läpi. Profiili muotoutuu suulakkeessa, jossa liika hartsia poistuu ja jäljellä oleva hartsia esikovettuu. Profiilin täytyy omata jäykkyys suulakkeen jälkeen, jotta se säilyttää muotonsa vedossa. Pultruusiossa vetonopeutta säädelään hartsin kovettumisen mukaan ja menetelmällä voidaan saavuttaa n.1m/min. vetonopeuksia. /7,s.78-79./ Langat muovautuvat (puristuvat) voimakkaasti, kun lujitetta vedetään suulakkeen läpi, joten lankojen paksuus pienenee alkuperäiseen nähden huomattavasti.

3 KOMPOSIITTIEN MUOTOUTUVUUS

Lujitemuoviteollisuudessa on usein ongelmana lujitteiden muotoiltavuus. Erilaiset lujitemuodot tuovat haasteita erityisesti, kun halutaan tehdä jatkuvilla kuiduilla lujitetusta komposiitista pienen kaarevuussäteen omaavia kaksoiskaarevia pintoja.

Kun kyse on jatkuvista kuiduista koostuvasta kankaasta, niin lujitteita ei yleensä voi asettaa kokonaisuutena mattona pallopinnalle. Kudosten ja itse kuitujen muodonmuutoskyky eivät riitä. Paperiarkkiakaan ei voi muotoilla kuvuksi ilman, että se lommahtaa miltään kohdalta. /8,s.26-31./

Lujitekankaan lommahdus ja lankojen kiertymiset aiheuttavat ongelmia lopputuotteissa. Kankaan muodonmuutoskyvyn ylittyessä siihen tulee erilaisia vikoja, kuten ruttuja, repeämiä ja kudosten sekä tikkausten hajoamisia. /8,s.26-31./

3.1 Muotoutuvuuteen vaikuttavia tekijöitä

Muotoutuvuuden tutkimuksen mittakaavat voidaan jakaa seuraavanlaisesti tutkittavien kohteiden tai ilmiöiden mukaan /9,s.231-232/.

-Mikro-skaala

Kuitujen väliset tekijät. Tutkitaan kuitujen välisiä tapahtumia langassa. Kuitujen muoto vaikuttaa langan käyttäytymiseen muodonmuutoksessa. Puhtaasti sylinterin muotoiset kuidun liikkuvat helpommin toistensa suhteen kuin kulmikkaat kuidut. /9,s.231-232/.

-Meso-skaala

Kankaiden lankojen väliset tekijät. Lujitetta tutkitaan niin, että langat ovat pienin osa tutkittavassa kokonaisuudessa /9,s.231-232/.

-Makro-skaala

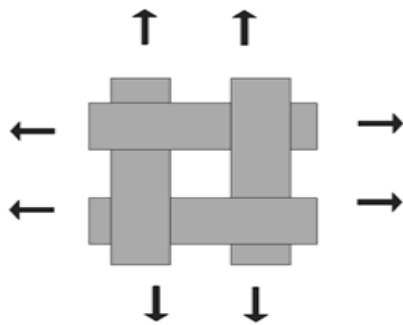
Komposiittiosan muotoutuvuutta käsitellään enemmän kokonaisuutena, komposiitti mallinnetaan yhdeksi materiaaliksi, jossa kuitujen, lujitteiden ja matriisin muotoutuvuustekijät yhdistyvät /9,s.231-232/.

Lankojen tilavuuden jakauma on tärkeä käsite muotoutuvuuden tutkimisessa. Lankojen tilavuus kuvaa langan poikkileikkauksen muotoa ja kertoo siten, kuinka kuidut jakautuvat langan poikkileikkaukseen nähden /11,s.154-165/.

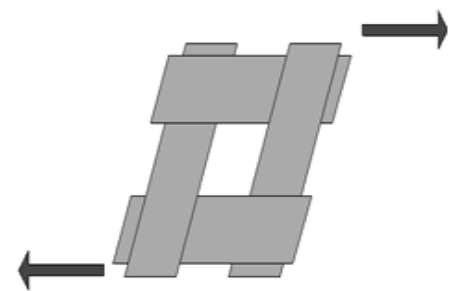
Lankojen suuntautuneisuus kankaassa, kankaan paksuus ja lankojen tilavuuden jakauma vaikuttavat eniten lujitteen muodonmuutoskykyyn. Yksikertaisella tikkaamattomalla kudoksella on enemmän vapausasteita, jotka mahdollistavat kankaan mukautumista, kuin monikerroksisella multiakksiaalikankaalla. /8,s.31./

3.2 Muodonmuutosmekanismit

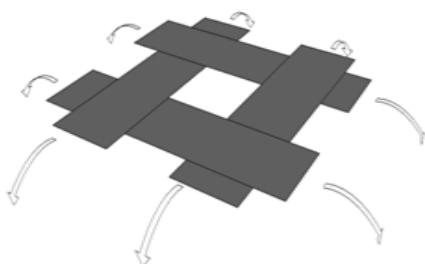
Kangas joutuu kaksoiskaarevalla pinnalla monimutkaisten muodonmuutosten alaiseksi. Kankaan kääntyessä tasosta kuvuksi sen täytyy mukautua avaruudellisesti kaikkiin suuntiin, tähän tuo vielä lisänsä lujitteiden anisotrooppinen käyttäytyminen. /10,s.303./ Tämä moniulotteinen ongelma voidaan pilkkoa pienemmiksi osiksi, joita kutsutaan muodonmuutosmekanismeiksi. Kuvissa 13-16 on esitetty yhden kerroksen päämekanismit. /8,s.11-14./Lujitteen muodonmuutoskyky kaksoiskaareville pinnoille on paljon riippuvainen tasoleikkauksesta (Kuva 14) /10,s.303-304./ Lankojen joutues-
sa muodonmuutoksessa vedon alaisiksi, ne kuroutuvat. Kerroksen puristuvuus-ilmiö (Kuva 16) tulee esille erityisesti paine-avusteisia valmistusmenetelmiä käyttäessä. Kerroksen puristus on täten myös erittäin olennainen mekanismi muotoutuvuutta ajatellen. /9./



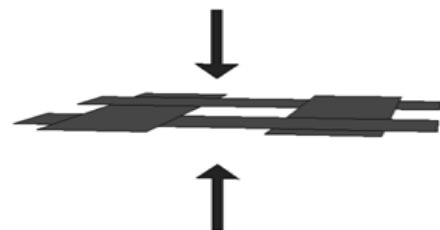
Kuva 13. Veto tasossa



Kuva 14. Leikkaus tasossa

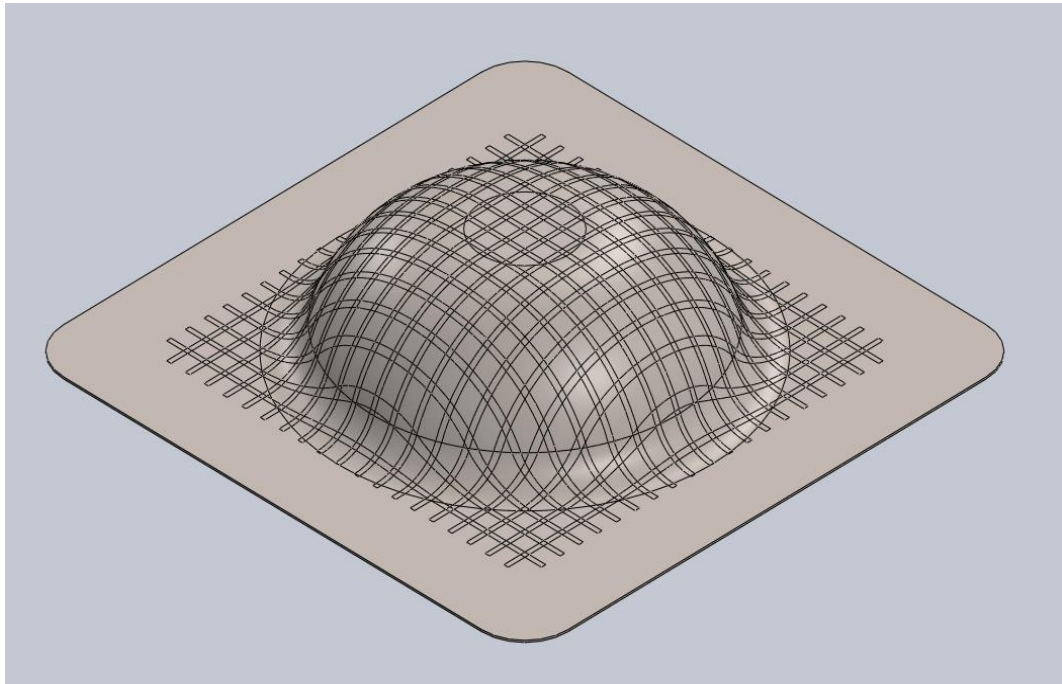


Kuva 15. Kerroksen taivutus



Kuva 16. Kerroksen puristus

Kuvan 17 verkko on venytetty projektiomenetelmällä muottipinnalle, joten ”langat” venyvät luonnottomasti. Oikea plain-kudos käyttäytyy kuitenkin hyvin samankaltaisesti /10,s.304/. Projektion muodostamasta kuvasta on nähtävissä ensimmäiset kolme muodonmuutosmekanismia. Muotin laella vallitsee vetojännitys tasossa. Mentäessä verkon keskeltä nurkkiin päin alkaa näkyä leikkaus tasossa. Kohtisuoraan verkon sijujen suunnassa muotin kaareutuessa verkko on taivutuksen alaisena.



Kuva 17. Lujite projisoituna muottipinnalle

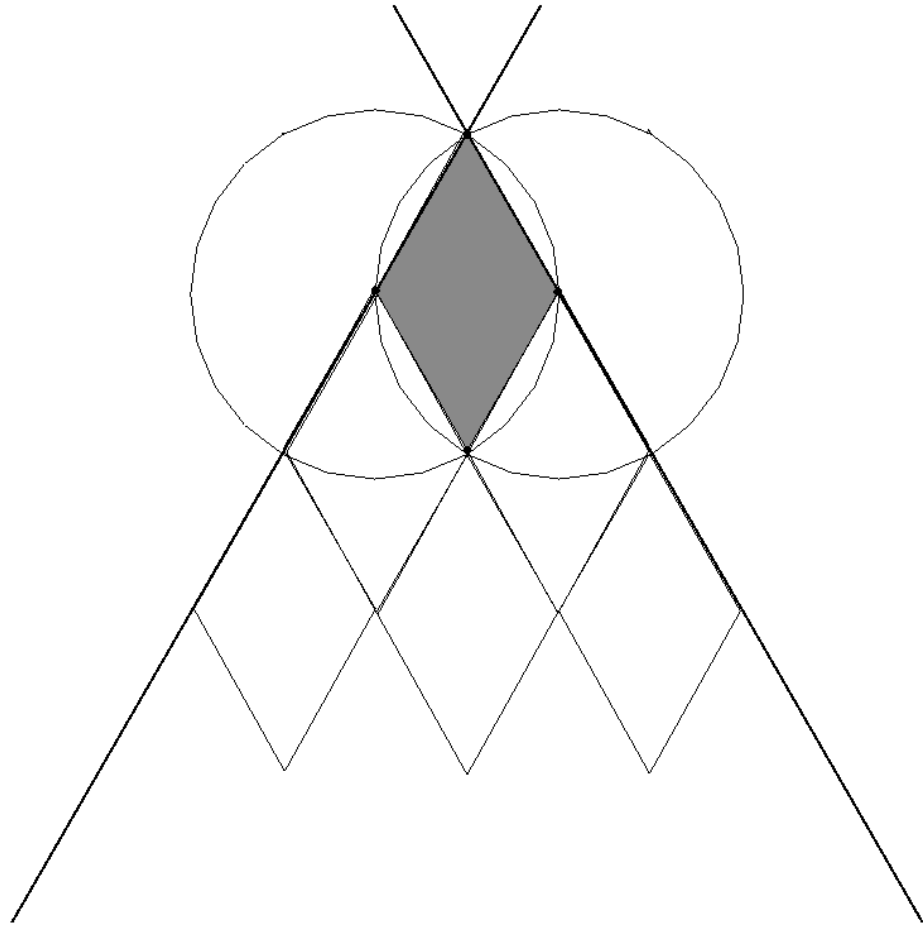
3.3 Muotoutuvuuden teorit

3.3.1 Fishnet pinjoint

Perinteinen malli kankaiden muotoutuvuuden tutkimiseen on fishnet pin-joint (Saranoitu verkko) -teoria. Perinteisissä malleissa käytetään kinemaattisia laskentamalleja, jotka ennustavat leikkauskulmia lankojen välillä. Puhtaasti kinemaattiset mallit eivät kuitenkaan pysty ennustamaan muodonmuutokseen tarvittavia voimia, koska ne mitaavat pelkkää liikettä, ilman massoja ja kitkaa. /8,s.23./

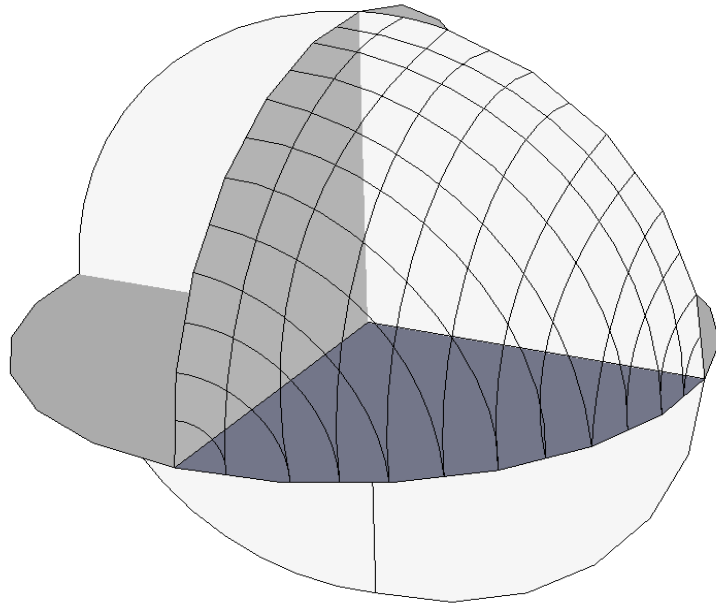
Kuvan 17 *projektiosta* saadaan käsitys siitä, kuinka 0° , 90° suuntiin kudottu kangas venyy, kun se asetetaan kaksoiskaarevalle pinnalle /10,s.304/. Pin-joint -malli perustuu oletukselle, että ” langat eivät veny eivätkä liu`u toistensa suhteen”, lankojen ris-

teyskohdat ovat ”saranoitu” /8,s.23/. Kuvan 18 kaksi ympyrää ovat vierekkäin niin, että toisen keskipiste on toisen kehällä. Ympyröiden leikkauspisteet ja keskiöt rajaavat harmaan kuvion /11,s.176-178/.

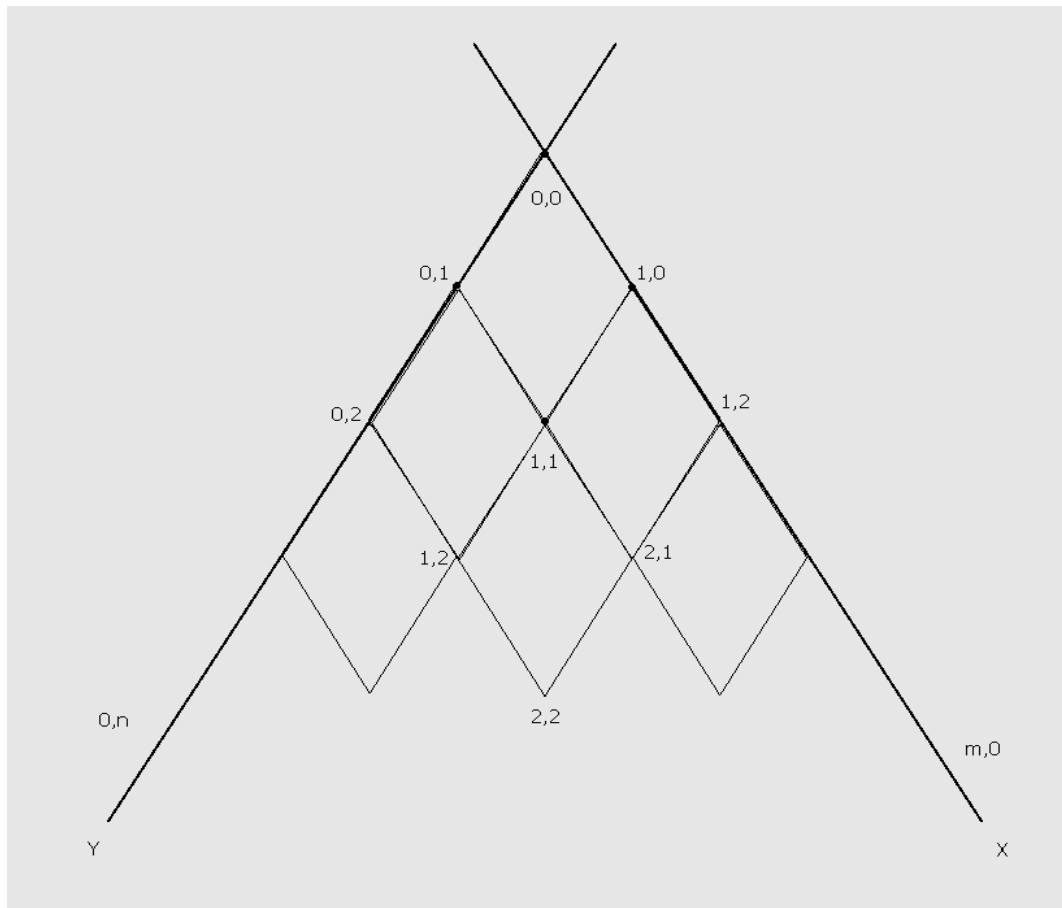


Kuva 18. Fishnet pinjoint /11,s.176-178/

Tarkastelemalla samaa kolmiulotteisesti voidaan nähdä, että edellisen kuvan lihavoidut mustat viivat kuvaavat verkon reunojen kiinnittymispisteitä (Kuva 19) Lankojen risteyskohdat ovat solmupisteitä /11,s.176-179/.



Kuva 19. Verkko 1/4 puolipallon pinnalla



Kuva 20. Taivutetun verkon xy-osoitteet /12,s.1154/.

Osoitteita kuvataan indikaattoreilla (m,n) , (Kuva 20). Kunkin kuvion kärkipisteiden (m,n) koordinaatit määräytyvät niitä ympäröivien pisteiden koordinaateista. Pisteiden koordinaatteja kutsutaan osoitteiksi. Pisteiden $2,2$ sijainti määräytyy esimerkiksi pistei-

den 1,2 ja 2,1 sijainneista. /12,s.1154./ Puhtaalle pallopinnalle levitetyn verkon koor-
dinaatit voidaan laskea pallon yhtälöiden avulla. Lasketaan esimerkki: pisteen 1,1
koordinaattien laskenta, kun säde ja ympäröivien pisteiden (0,1 ja 1,0) xy-koordinaatit
tiedetään /11,s.176-179./

Pallon säde $R = 10$ mm

Verkon sivun mitta $S = 3$ mm

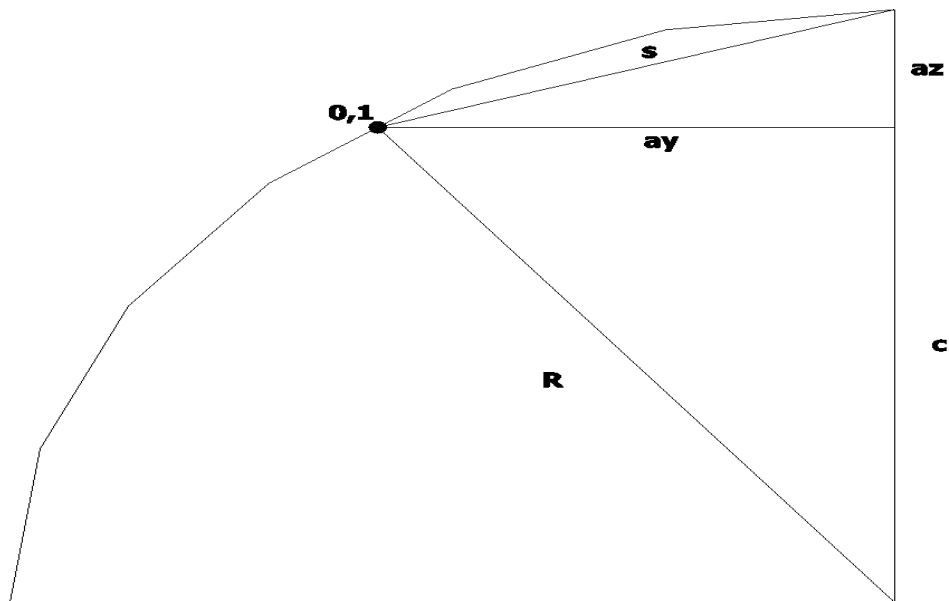
Yhtälöissä 2 ja 3 esitetty sijainnit x ja y suunnissa. Muuttujat x, y , ja z ovat määritettä-
vän pisteen 1,1 koordinaatit. Muuttujat a_x, a_y ja a_z ovat pisteen 0,1 koordinaatit. Yh-
tälö 4 on pallon yhtälö.

Pisteen 1,1 koordinaatit voidaan laskea yhtälöistä 2-4, kun pisteiden 0,1 ja 1,0 paikat S
tiedetään, koska kyseessä 1/4 pallon puolikas $S_m = S_n$ /11,s.178-179./

$$(x - a_x)^2 + (y - a_y)^2 + (z - a_z)^2 = S_m^2 \quad (2)$$

$$(x - b_x)^2 + (y - b_y)^2 + (z - b_z)^2 = S_n^2 \quad (3)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \quad (4)$$



Kuva 21. Pisteen 0,1 etäisyydet

Ratkaistaan ensin pisteen 0,1 koordinaatit, kun kyseisen pisteen tiedetään sijaitsevan 1/4 pallon puolikkaan reunaviivalla.

$$b_y = 0$$

$$b_x = a_y$$

$$b_z = a_z$$

Ratkaistaan a_y , a_z ja c , jotka on esitetty kuvassa 21 muodostamalla yhtälöistä 5-7 koostuva yhtälöryhmä.

$$\begin{cases} R^2 - a_y^2 = c^2 & (5) \\ S^2 - a_y^2 = a_z^2 & (6) \\ c + a_z = R & (7) \end{cases}$$

Ratkaisemalla yhtälöryhmä saadaan pisteiden 0,1 ja 1,0 koordinaatit. Ratkaisut on esitetty liitteessä 5.

$$a_z = \frac{9}{20}$$

$$c = 10 - \frac{9}{20} = \frac{191}{20}$$

$$a_y = \sqrt{9 - \left(\frac{9}{20}\right)^2} = \sqrt{\frac{3519}{400}}$$

Sijoittamalla pisteiden 0,1 ja 1,0 koordinaatit yhtälöihin 2-4 ja huomioidaan

$S_m = S_n$ saadaan yhtälöt 2-4 seuraavaan muotoon.

$$\begin{cases} \left(x - \sqrt{\frac{3519}{400}}\right)^2 + (y - 0)^2 + \left(z - \frac{9}{20}\right)^2 = 9 & (8) \\ (x - 0)^2 + \left(y - \sqrt{\frac{3519}{400}}\right)^2 + \left(z - \frac{9}{20}\right)^2 = 9 & (9) \\ x^2 + y^2 + z^2 = 100 & (10) \end{cases}$$

Ratkaistaan mathcad-ohjelmalla pisteen 1,1 (x,y,z) koordinaatit yhtälöistä 8-10. Ratkaisu vaatii alkuarvaukset. Ratkaisu on esitetty liitteessä 5.

Mathcadilla ratkaistut koordinaatit pisteelle 1,1:

$$x = 2,999$$

$$y = 2,999$$

$$z = 0.537$$

Pisteen 1,1 avulla voidaan nyt määrittää pisteiden 1,2 ja 2,1 koordinaatit, kun ensiksi lasketaan koordinaatit niitä vastaaville reunapisteille (m,n), kuten edellä tehtiin pisteille 0,1 ja 1,0.

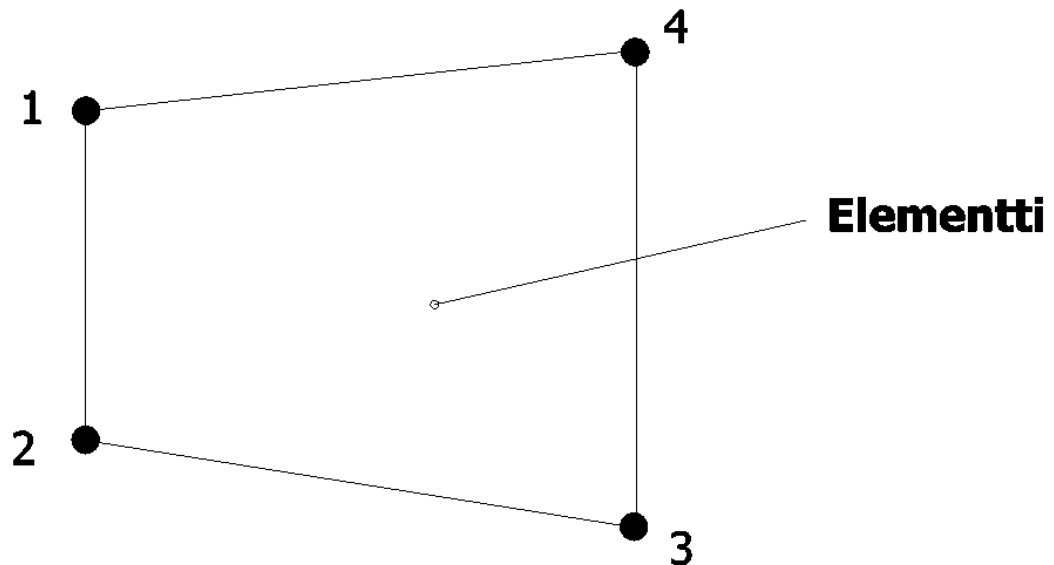
Tällä tavoin voidaan laskea ”verkon silmien” reunapisteiden sijainteja pallopinnalla. Kehittyneitä kinemaattiseen malliin perustuvia laskentaohjelmia on saatavilla kaupallisina, kuten PATRAN P3 Laminate Modeller, jolla voidaan simuloida ”verkon” asetumista halutulle muottipinnalle. Vaikka kinemaattiset ohjelmat eivät huomioi kaikkea muodonmuutokseen liittyvää mekaniikkaa, voidaan niillä kuitenkin tehdä alustava tarkastelu lujitteen muotoutumisesta. Simulaatiosta nähdään hyvin ongelmakohdat, kun suurin sallittu leikkauskulma tiedetään. /11,s.173-176./

3.3.2 Mekaaninen malli

Mekaanisten mallien etuna verrattuna kinemaattisiin on se, että ne huomioivat muodonmuutosmekanismit ja lujitteen muodonmuutosta rajoittavat tekijät. Niillä voidaan tutkia/mitata voimaa, jolla lujite vastustaa muodonmuutosta. /8,s.25,59./

Mekaaniset mallit perustuvat elementtimenetelmään. Elementtimenetelmässä tutkittava kappale jaetaan alueisiin ts. elementteihin (verkottaminen). Tämä mahdollistaa kuormitettavan kappaleen yksityiskohtaisen tarkastelun. Elementtien nurkkapisteen ovat solmupisteitä, joiden siirtymiä voimien x vaikutuksista lasketaan. /14,s.13-15./ Elementit ovat 1, 2- tai 3-ulotteisia /14,s.235/. Jokaiseen käyttötarkoitukseen valitaan oma elementtityyppi, kirjallisuudessa muotoutuvuuden tutkimiseen on käytetty kuorielementtejä /8,s.25/. Elementeillä voidaan kattaa kaikenmuotoisia pintoja ja tila-

vuuksia. Kuvassa 22 on esitetty nelisolmuinen elementti, jolla voidaan kuvata mikä tahansa geometrinen pinta. /14,s.235-236/.



Kuva 22. 2-ulotteinen elementti ja sen solmupisteet

-Lankojen puristuvuuden mallinnus

Ahlström Oy:n kehitysjohtaja Rainer Bergströmin mukaan kuitujen järjestyksellä (kierteisyydellä) langassa on suuri merkitys langan puristuvuuteen.

Lankoja, joissa kuidut ovat epäjärjestyksessä, on mallinnettu kirjallisuudessa palkkiteorian mukaisesti, eli yhteisenä materiaalina. Roving-langassa suoraksi vedetyt kuidut ovat vierekkäin, joten ne pääsevät liukumaan toistensa suhteen. Tästä seuraa, että roving puristuu helposti kasaan. Energian säilymisen periaatteeseen perustuvalla tietokone sovelluksella (wisetex) voidaan ratkaista lankojen puristuvuutta, kun niille on määrätty rakenne /9,s.232./ Energiaperiaate mahdollistaa elementtimenetelmien soveluksen erityisiin kohteisiin /14,s.24-25, 161-163/.

-Lineaarisuus ja epälineaarisuus

Lineaarisesti käyttäytyvillä materiaaleilla ns. Hooken aineilla, muodonmuutos on suoraan verrannollinen muutoksen aiheuttamaan voimaan. Jännitys-venymä -kuvaaja on siis lineaarinen, kun taas joillakin materiaaleilla, kuten tekstiililujitetuilla komposii-

teilla, muodonmuutokseen tarvittava voima käyttäytyy epälineaarisesti. /15,s.143-145./

Mekaanisella mallilla on mahdollista tutkia muotoutuvuutta makro-skaalassa. Jotta makro-skaalan muodonmuutosta mittaava malli komposiitista vastaisi todellisuutta, sen tulee ottaa huomioon komposiitin ja lankojen epälineaarinen käytös muodonmuutoksen alaisuudessa sekä huomioida samaan aikaan lankojen kinematiikka muodonmuutoksen aikana. Tämä on laskennallisesti haastavaa. /8,s.25./

-Jatkuvuus ja epäjatkuvuus

Kirjallisuudesta löytyy kolme tapaa muodonmuutoksen tutkimiseen mekaanisella mallilla. Ensimmäinen on diskreetti malli, jossa tutkittava malli pilkotaan pienempiin osiin, jotka omaavat erilaiset materiaaliominaisuudet. Jatkuvässä mallissa lujitekankaasta mallinnetaan yhtenäisenä materiaalina, joka noudattaa tekstiililujitetun komposiitin käyttäytymistä. Semi-diskreetti -malli on näiden kahden yhdistelmä /8,s.25-26./

Mallintamalla lujitekankaasta tai koko komposiitista yhtenäinen materiaali on mallissa mahdollista käyttää ohjelmistoista löytyviä standardielementtityyppejä, kuten kuorielementtejä /8,s.25/.

3.4 Permeabiliteetti ja tilavuusjakauma

Permeabiliteetti

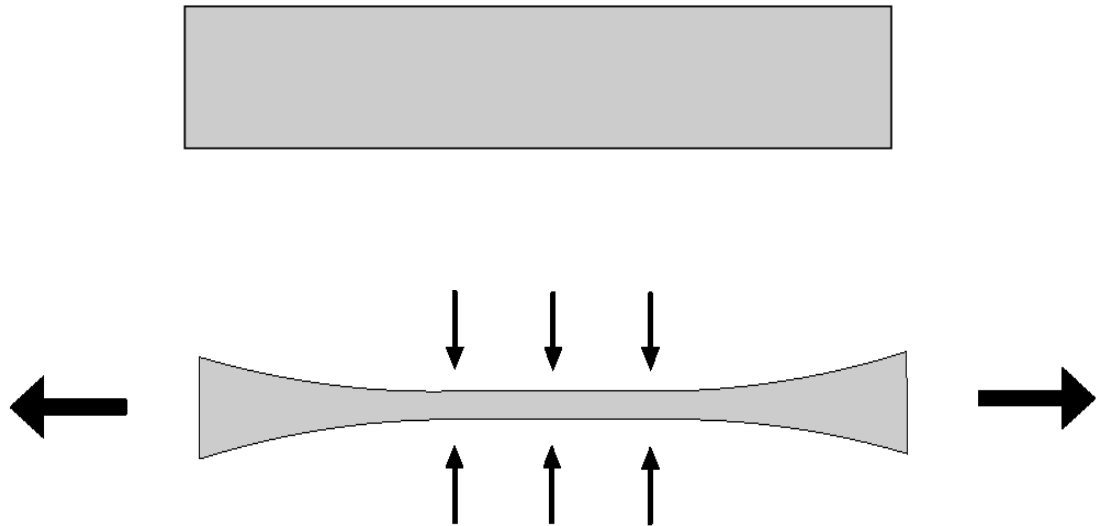
Permeabiliteetillä tarkoitetaan komposiittien tapauksessa lujitteiden hartsin virtaukselle aiheuttamaa vastusta eli virtausvastusta. Sen tutkiminen liittyy vahvasti lujitteiden muotoutumiseen, koska virtausvastus riippuu lankojen tilavuusjakaumasta ja huokoisuudesta. Lujitteen puristuneisuudella on suuri merkitys permeabiliteettiin. /11,s.192-194./ Lujitteen permeabiliteetti voidaan laskea Darcyn laista kaavan 12 mukaan, jos hartsin viskositeetti, systeemin paine-ero ja lujitteen poikkipinta-ala sekä pituus tunnetaan /11,s.40./

$$Q = - \frac{kA}{u} \frac{\Delta p}{\Delta l} \quad (12)$$

Jossa Q on virtausnopeus, k permeabiliteetti, u viskositeetti, Δp hartsin syöttö- ja ilmanpoisto kanavien paine-ero (Kuva 12), Δl lujitteen pituus hartsin virtaussuunnassa ja A lujitteen poikkileikkauksen ala kohtisuoraan hartsin virtaussuuntaan nähden. /11,s.38,40./

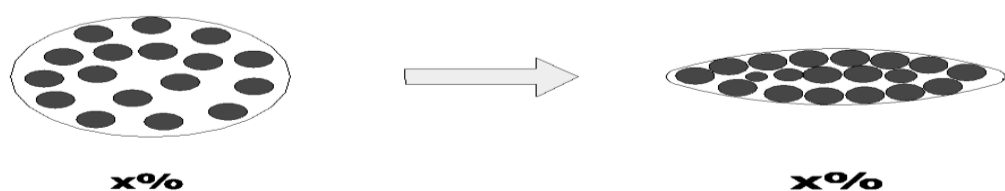
Tilavuusjakauma

Lankojen puristuminen aiheutuu niiden kuroutumisesta vetojännityksessä tai niihin kohtisuoraan kohdistuvasta paineesta. Kuvassa 23 kuvataan alkuperäisen langan- ja kuroutuneen langan geometria. Vetojännitys aiheuttaa puristuksen kohtisuoraan langan pintaan nähden. /9,s.231./



Kuva 23. Langan geometria kuvattuna sivusuunnasta sen kuroutuessa

Tilavuusjakauma kertoo lujitteen tai langan kuitujen jakauman ($V_{f\%}$) eli lankojen puristuneisuuden. Alkuperäisessä tilassa kuormittamattoman langan tilavuus on $x\%$, kuormittaessa jakauma kasvaa kuormituksen mukana maksimiarvoonsa x . (Kuva 24.) Maksiarvon saavuttanut lanka kantaa kuormaa /11,s.230./ Kuitujen järjestys langassa vaikuttaa paljon siihen, kuinka paljon lanka puristuu. Kierteinen lanka ei puristu yhtä paljoa kuin roving-lanka.



Kuva 24. Alkuperäisen ja puristuksen alaisena olevan langan poikkileikkaus

Lujitekankaalle voidaan laskea kuitujen tilavuusjakauma kaavasta 13, jossa (V_f^L) on kuitujen tilavuusjakauma lujitteessa prosentteina. m_s lujitteen massa, n kerrosten lukumäärä. δ kerroksen paksuus ja ρ on kuitujen tiheys /9,s.233/.

$$V_f^L = \frac{m_s n}{\delta \rho} \quad (13)$$

Kuitujen jakauma (V_f) langan poikkileikkauksessa lasketaan kaavasta 14, jossa N_f on kuitujen lukumäärä langassa, A_f yhden kuidun poikkileikkauksen pinta-ala ja S langan poikkileikkauksen ala /13,s.37/. Kaava 13 on siis tarkoitettu kokonaisen lujitekankaan ja kaava 14 yksittäisen langan tilavuusjakauman laskemiseen.

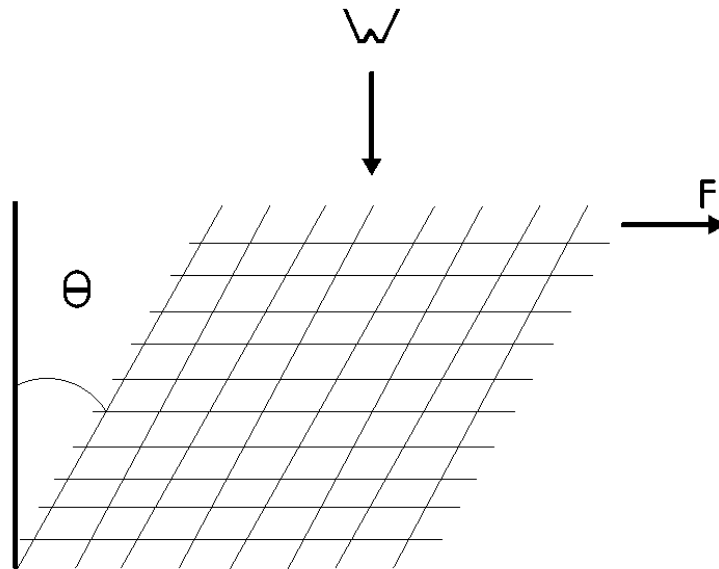
$$V_f = \frac{N_f A_f}{S} \quad (14)$$

3.5 Tasojännitystilojen testaus

Lujitteen ollessa kuormitettuna 2-ulotteisen tason suunnissa, on kyseessä *tasojännitystila*. Muodonmuutos muuttaa lankojen orientaatiota eli järjestystä toistensa suhteen. Perusmekanismien (leikkaus ja veto) testaaminen kertoo paljon kankaan muotoutuvuuden rajoista. /11,s.173-175./

Leikkaustesti

Leikkaustestissä neliön muotoinen näyte kiinnitetään vastakkaisilta sivuilta, toiset vastakkaiset sivut ovat vapaana, jotta kangas pääsee leikkautumaan. Testissä mitataan leikkaavaa voimaa (F), näytteen pituutta kohtisuoraan leikkaussuuntaan nähden (W) ja leikkauskulmaa (θ). Leikkausjäykkyys (Es) lasketaan kaavasta 15. /11,s.223-224./ Testi tehdään vetokoneeseen kiinnitettävällä kehyksellä. Leikkauskulma voidaan mitata kehyksestä. /11,s.222./



Kuva 25. Leikkaus tasossa /11,s.222/.

$$E_S = \frac{\Delta F S}{\Delta \theta} \frac{1}{W} \quad (15)$$

Langat alkavat rypistyä tai kiertyä ja kankaan punos menettää rakenteensa leikkauskulman kasvaessa riittävän suureksi. Rypistymisen aiheuttama lukkiutumiskulma voidaan tulkita punoksesta silmämääräisesti vedon aikana tai voimasiirtymäkuvaajasta. Lankojen katsotaan lukkiutuneen, kun kuvaaja lähestyy ääretöntä. /11,s.165,222-223./

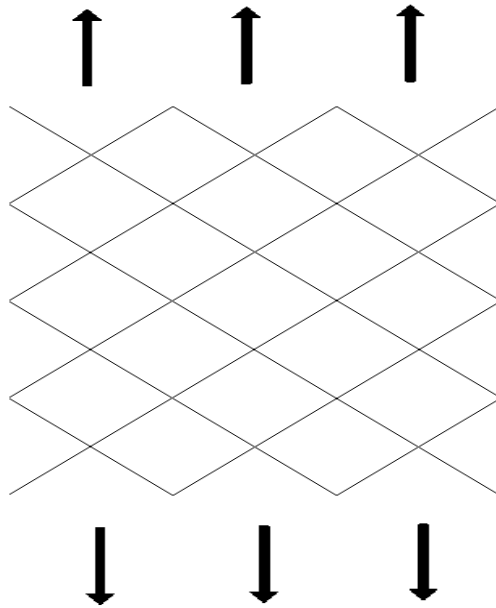
Koska lankojen puristuvuus ja kankaan tyyppi vaikuttavat olennaisesti lukkiutumiskulman suuruuteen, on tarkkuuden kasvattamiseksi kaavaan 15 lisätty tilavuusjakauma (V_f), kuitujen kimmokerroin (E_f) sekä kankaan paksuus (h). Tarkennettu leikkausjäykkyys on esitetty kaavassa 16. Leikkausjäykkyys antaa tietoa erilaisten kankaiden suhteellisesta muotoutuvuudesta. Leikkausjäännityksen yksikkö on 1/rad. /11,s.175,224-225./

$$E_S^* = \frac{\Delta F S}{\Delta \theta} \frac{1}{W h V_f E_f} \quad (16)$$

Vetotesti

Kankaita voidaan testata yksinkertaisemmin vetämällä näytettä tasossa haluttuun suuntaan. Kuvassa 26 on esitetty kankaan yksiakiaalinen kuormitus. Vetotestissä

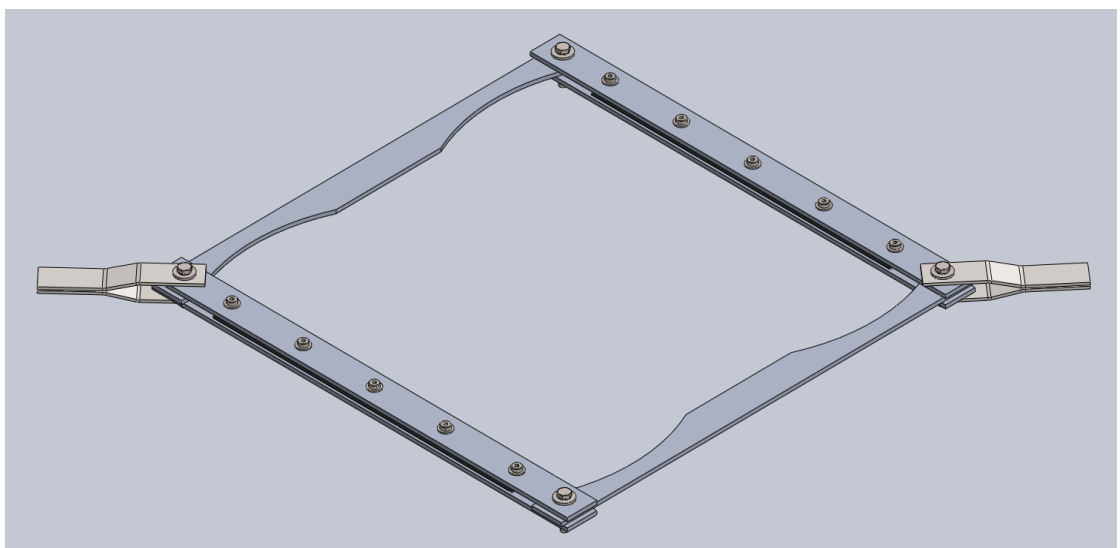
tarkkaillaan kankaan venymää voiman funktiona. Mittaustulos esitetään viivakuormana suhteellisen venymän (%) funktiona. /11,s.225-226./



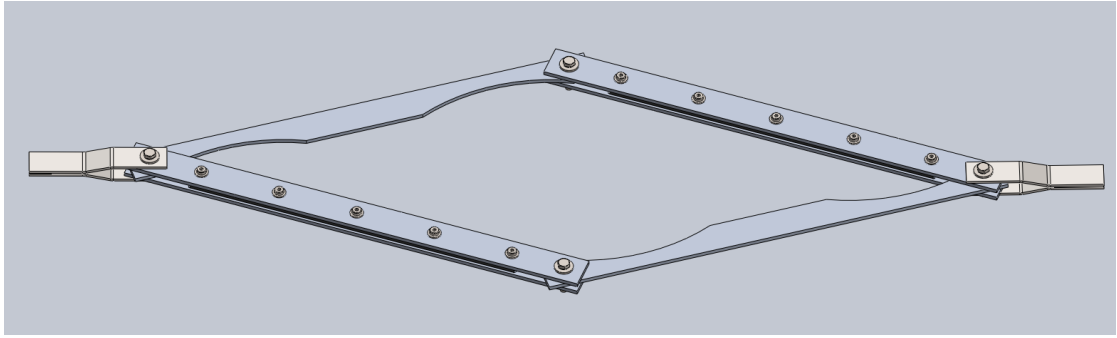
Kuva 26. Kankaan aksiaalinen vetokuormitus /11,s.225-226/.

3.6 Testityökalu

Työssä suunniteltiin leikkauskuormituksen tutkimiseen tarvittava vetokehys, joka kiinnitetään vetokoneeseen päädyissä olevista vetolevyistä. Lujite kiinnitetään vetokehukseen kappaleen 4.4 leikkaustestin kuvauksen mukaisesti. Kehys leikkautuu vedettäessä (Kuva 28).



Kuva 27. Testityökalu



Kuva28. Testityökalu vedon alaisena

Kehyksen oma vastus vedossa on minimoitu laakeroinneilla, jotta kankaan leikkausvoimat saataisiin mitattua testissä mahdollisimman tarkasti. Piirustukset on esitetty liitteessä 4. Tukilevyihin on tehty kaarevat lovet, jotta levyt eivät ota kiinni työkalun muihin osiin leikkauskulman ollessa suuri. Vetokehukseen tulee asentaa lisäksi antureita, jotka tallentavat kappaleessa 3.5 esitettyjä mittaussuureita testin aikana.

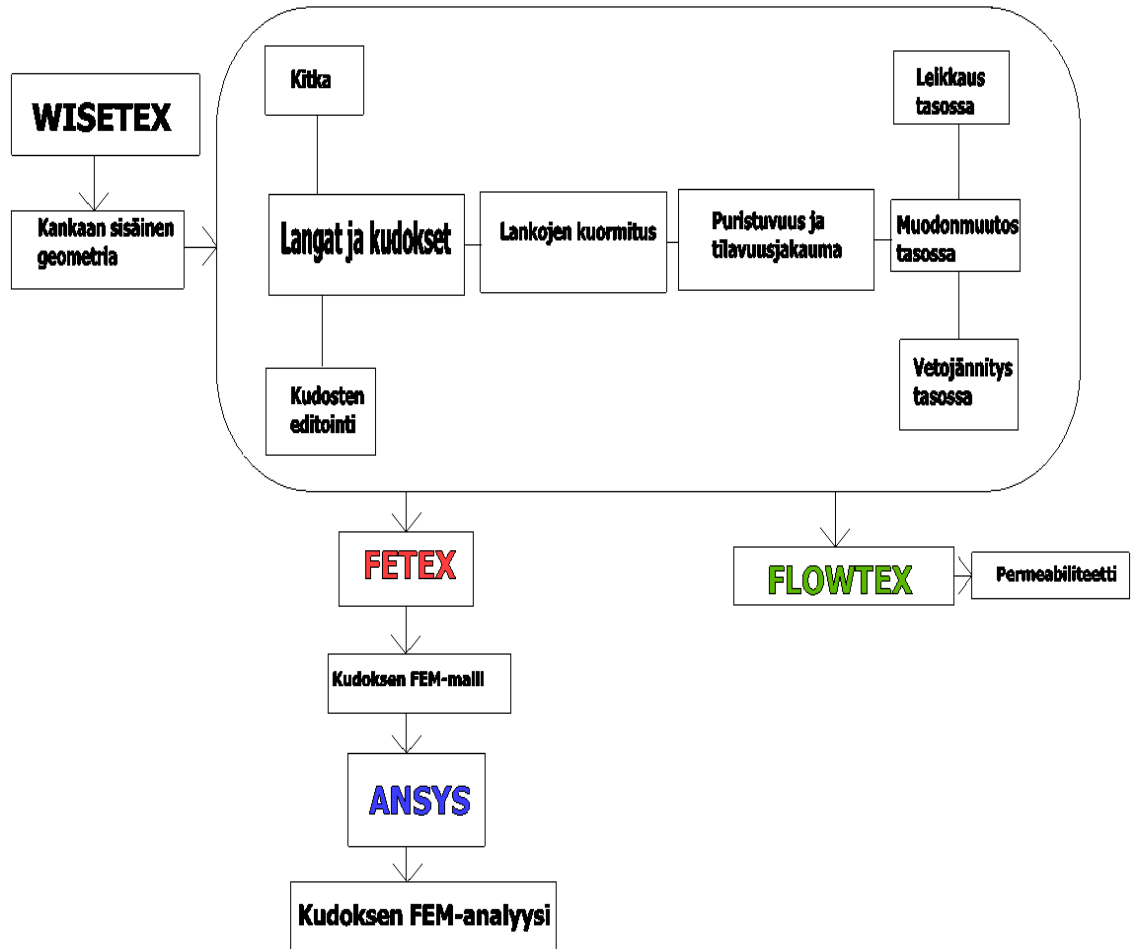
4 WISETEX –OHJELMISTO

4.1 Ohjelmiston esittely

Wisetex on Leuvenin yliopiston MTM-laitoksen kehittämä ohjelmisto, joka perustuu komposiittien muodonmuutokseen liittyviin tutkimuksiin /8/. Ohjelmisto sisältää pääohjelman (Wisetex) ja eri käyttötarkoituksiin olevia moduuleita, kuten ohjelmistot FEtex ja Flowtex. /13,s.1-12./

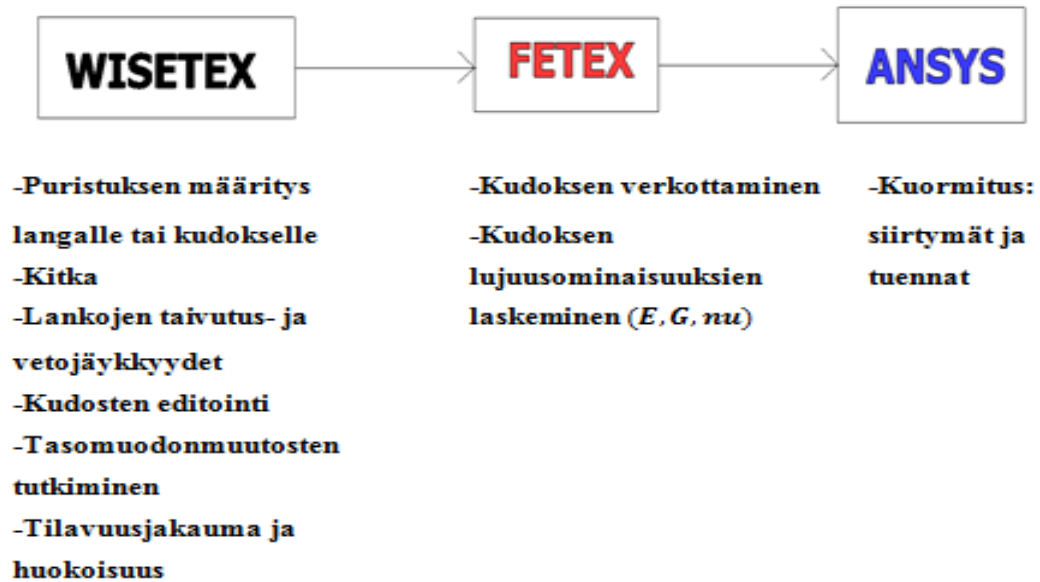
Pääohjelmalla luodaan kankaiden, kudosten ja tikattujen mattojen malleja. Wisetexillä voidaan tutkia eri tekijöiden (kuitujen ominaisuuksien, langan kuormituksen ja tasomuodonmuutosten) vaikutusta kankaiden sisäiseen geometriaan. Kuitujen ominaisuudet (mekaaniset/geometriset) ja lankojen geometria (tilavuusjakauma/puristuvuus) sekä kierteisyys voidaan määrittää. /13./ Ohjelmalla voidaan siis tutkia kankaan käyttäytymistä tasossa tapahtuvissa mekanismeissa (puristus, leikkaus ja vetojännitys). /13,s.11./

Kaaviossa 1 on esitetty runko, josta muotoutuvuuden tutkiminen simulointiohjelmistoilla rakentuu /13/.



Kaavio 1. Ohjelmistorunko

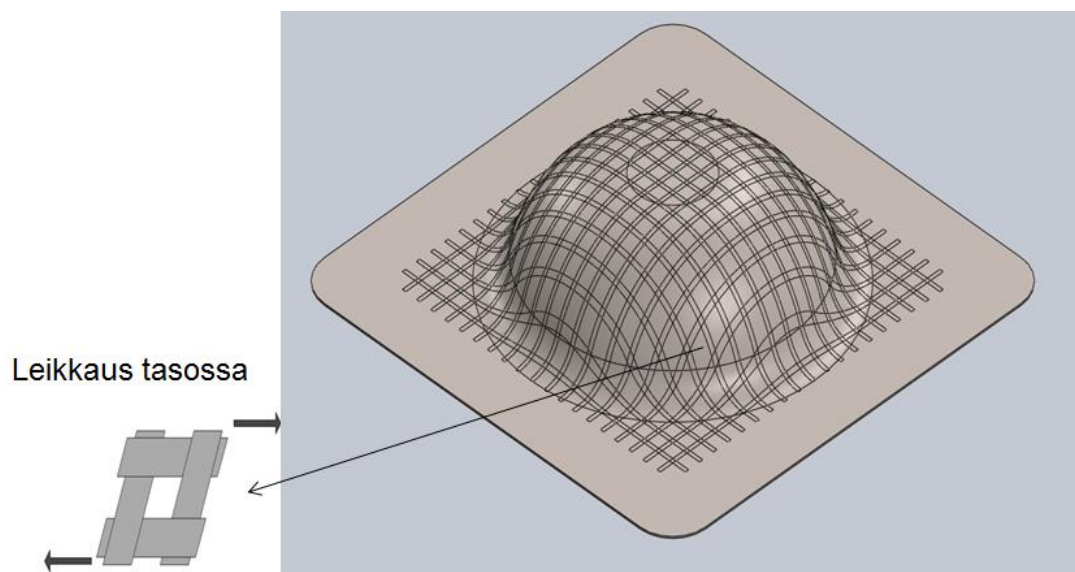
Kaaviossa 2 on eritelty tutkimuksen vaiheet kunkin moduulin kohdalla. Kangas ”esi-jännitetään” wisetexissä jatkotutkimuksia varten. Ansysella voidaan antaa kudokselle siirtymät muottipinnan geometrian mukaisesti. Tulokseksi saadaan siirtymiä vastaavat voimat ja jännitykset kudoksessa.



Kaavio 2. Moduuleissa tutkittavat asiat

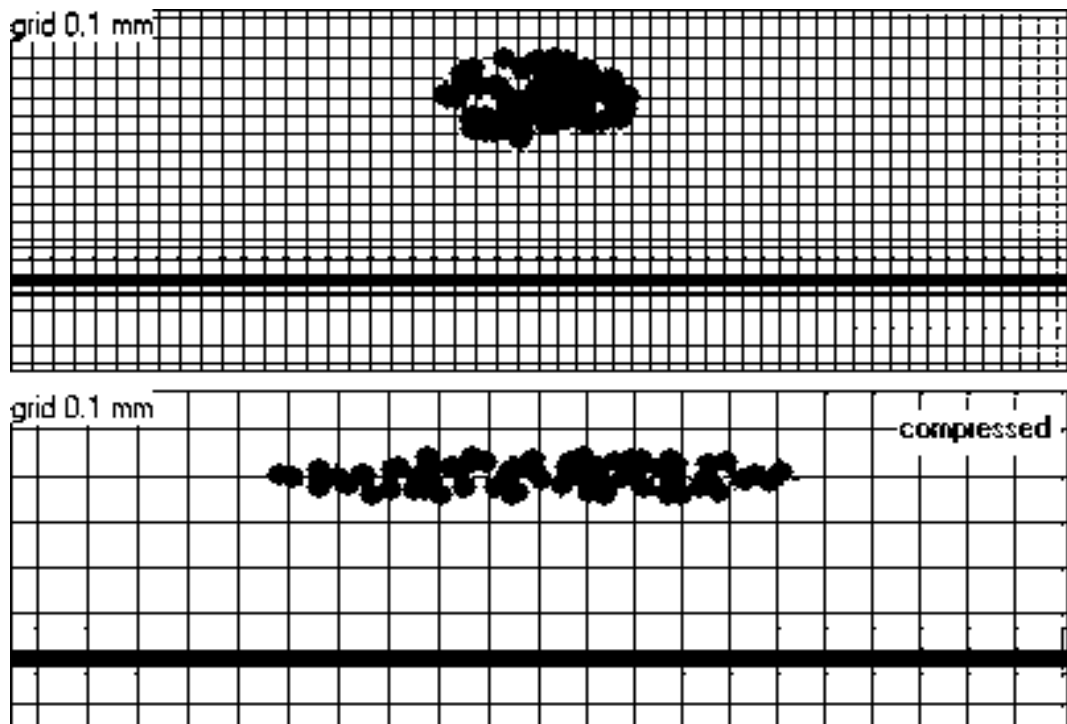
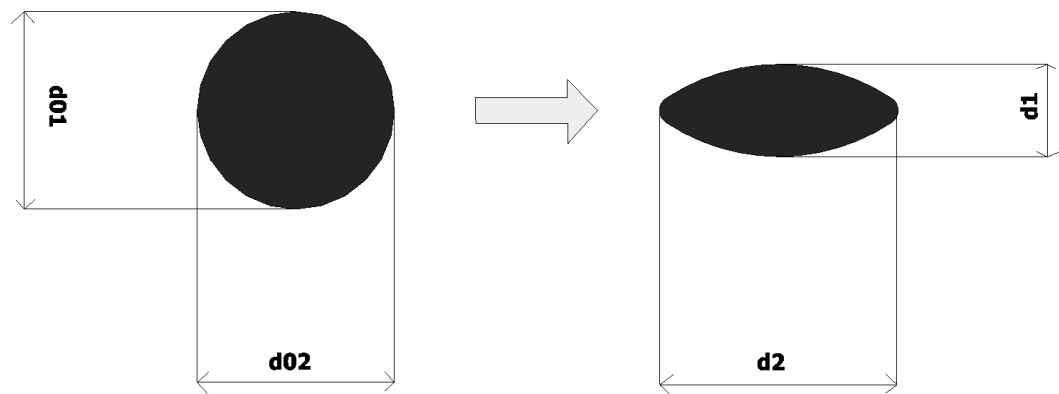
4.2 Esimerkki muotoutuvuuden tutkimisesta

Käydään läpi kuvitteellinen prosessi: Otetaan kuvan 29 muottipinnan leikkausmekanismiin kohdalta kudosityksikkö ja tutkitaan sen tasomuodonmuutos wisetexissä. Tämän jälkeen kudoksesta luokitellaan ja sille lasketaan lujuusominaisuudet fetexissä ja viedään ansyskseen, jossa kudokselle määrätään siirtymät muottipinnan kaarevuussäteen mukaisesti. Tulokseksi saadaan arvio kankaan vastuksesta muodonmuutoksessa kyseisellä pinnalla.



4.2.1 Puristuksen määrittäminen

Lujitteen mallinnus alkaa kuitujen ja langan ominaisuuksien määrittämisellä (kuvat 1 ja 2 liite 1). Määritetään langalle puristuskuorma, joka voidaan antaa lineaarisena tai epälineaarisenä. Voima syötetään poikkileikkausten suhteiden ($d1/d01$) funktiona. Poikkileikkaussuhteet kuvaavat puristetun langan pysty- ja vaakahalkaisijoiden suhdetta puristamattoman langan alkuperäisiin halkaisijoihin. /13,s.39-41./ Puristamaton ja puristettu lanka, puristuneisuutta tarkastellaan visuaalisesti langan poikkileikkauksesta (Kuva 30) /13,s.24-26/. Langan poikkileikkausten suhteet kuormituksen funktiona ovat nähtävissä tuloksissa.



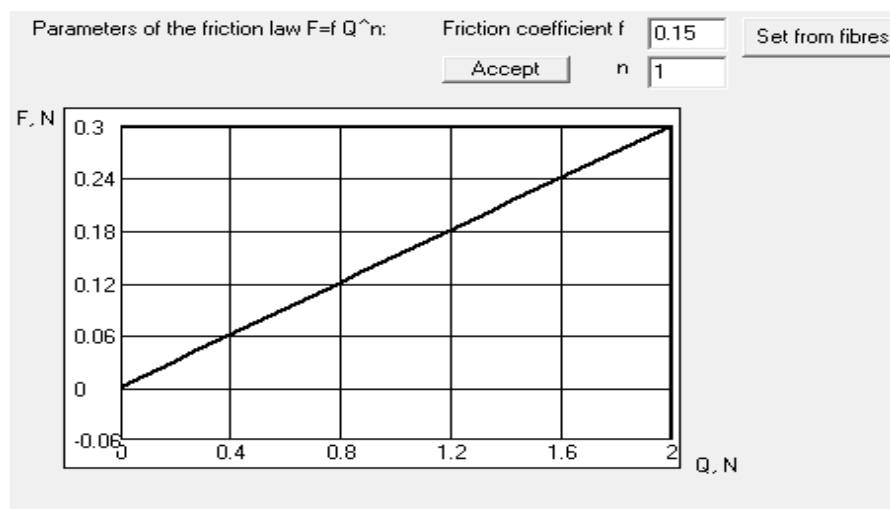
Kuva 30. Kokoon puristumattoman -ja puristetun langan poikkileikkaus

Määrätään kuitujen geometriset ja mekaaniset ominaisuudet poikittais- ja pituussuunnissa. (Kuva 1, liite 1) näkyy muiden ominaisuuksien lisäksi puristumattoman- ja puristetun langan tilavuusjakaumat (V_f ja max compression V_f) sekä kuitujen lukumäärä N . /13,s.31./

Valmiita kudoksia ja kankaita voidaan puristaa antamalla niille kuorma (t) suhteellisen venymän funktiona. /13,s.70-73/. Suurimman tilavuusjakauman saavuttaneen kudoksen huokoisuus (P-%) on tärkeä tieto etenkin injektio menetelmissä, koska lujitteet joutuvat niissä tasossakin puristuksen ja leikkauksen alaisiksi /11,s.191-193/.

4.2.2 Langan kitka sekä veto- ja taivutusjäykkyydet

Kitkavoima (F) määräytyy langalle sen kitkakertoimesta (f) ja puristavasta kuormasta (Q). Kyseiselle kuormalle voidaan antaa potenssi (n) riippuen käytettävästä kitkalaisesta. Tavallisessa tapauksessa $n=1$ eli $F = fQ$. /13,s.47./ Kitkanvoima F kasvaa täten lineaarisesti lankaan kohdistuvan kuorman Q funktiona (Kuvakaappaus alla).



Kuvakaappaus wisetexistä: 610 tex -lasikuitulangan kitkavoima siihen kohdistuvan kuorman funktiona

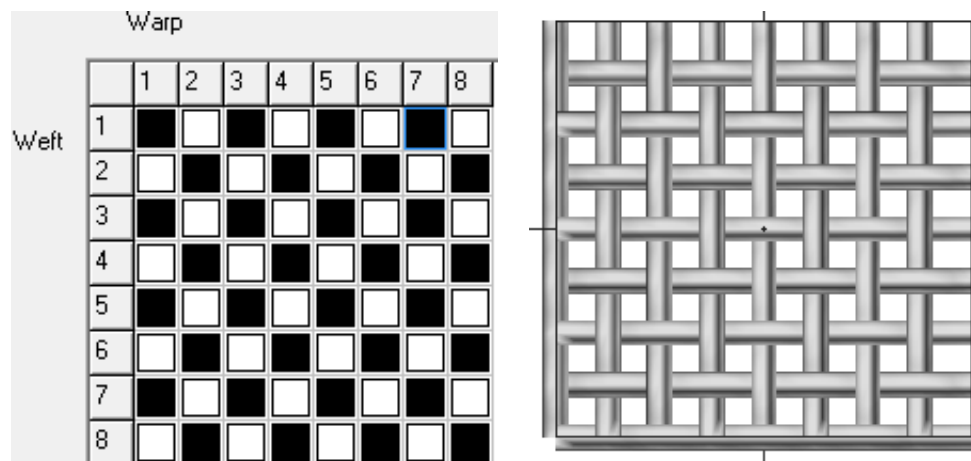
Lankojen välisen kitkakertoimen suuruus vaikuttaa erityisesti kappaleessa 3.5 kuvatun lukkiutumiskulman suuruuteen, koska lankoihin kohdistuva kitkavoima kudoksessa kasvaa muodonmuutoksen kasvun lisäämän kuormituksen myötä /8/.

Langan kitkakerroin f voidaan asettaa samaksi, kuin kuitujen välinen kitkakerroin, joka on tässä tapauksessa asetettu nolaksi (liite1, kuva 1). Työssä käytetylle 610 tex langalle on kuitenkin määritetty kitkakerroin f kokeellisesti, joka näkyy edellisessä kuvakaappauksessa (friction coefficient = 0.15).

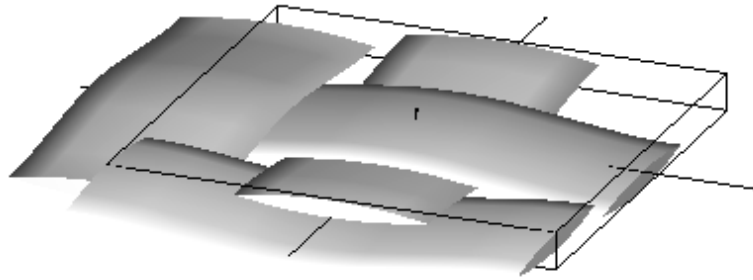
Langalle voidaan määrätä veto- ja taivutusjäykkyydet, jotka edelleen vaikuttavat siihen, kuinka lanka asettuu (taipuu) ja puristuu kudoksessa /13,s.40-47/.

4.2.3 Kudokset

Kun lankojen ominaisuudet on määrätty, siirrytään tekemään kudosta. Kudoksia tehdään editorilla, jolla määrätään kudokselle kude- (weft) ja loimilangat (warp) sekä kerrosten lukumäärä. Punontajärjestystä voidaan editoida graafisesti tai editointimatriisilla. Kuvassa 31 mustat ruudut kuvaavat päältä kulkevia -ja valkoiset alta meneviä lankoja. /13,s.51-59./ Tikkaamalla valmistetuille kankaille on oma editori, josta mainitakseni kerrosten aksiaalisuuden ja tikkauksen määritykset /13,s.97-108/.



Kuva 31. Tasavaltaisen sidoksen editointi (Plain)

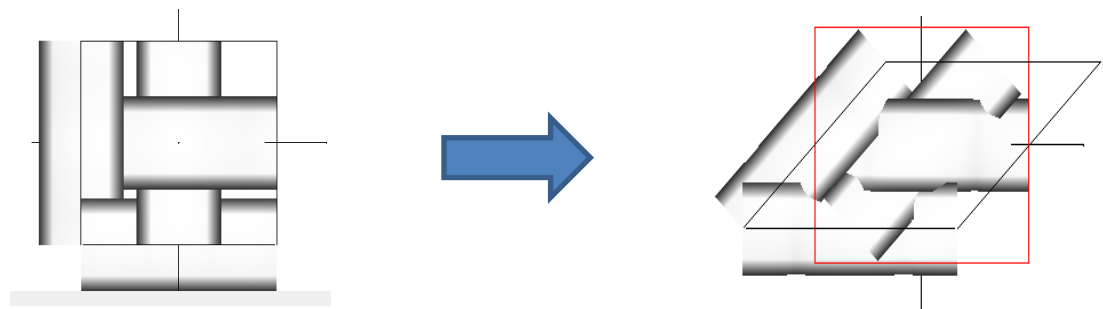


Kuva 32. Kudosyksikkö

Kudoksen geometrian ollessa määrättyinä langoille määrätään etäisyydet kude- ja loimisuunnissa (välykset). Ohjelmalla voidaan tarkastaa, minkä suuruisella lankojen jaolla kudos on mahdollinen eli, jos kuormittamaton kudos on liian tiukka, se ei ole mahdollinen /13,s.22-29,65./ Välys on myös tärkeä tieto lujitteen permeabiliteettia ajatellen.

4.2.4 Tasomuodonmuutokset

Jännityksiä ja leikkausta tasossa mallinnetaan antamalla kudokselle suhteelliset venymät XY-suunnissa. Leikkauskulma annetaan erikseen asteina (Kuva 33). Leikkauskulman mittauskohhta kudoksessa ilmenee kappaleessa 3.5, kokonaisen kudoksen leikkauskulma vastaa kudosyksikön leikkauskulmaa. Taulukossa 2, liitteessä 2 on nähtävissä kudoksen leikkauskulmiin tarvittavat kuormat. /13,s.73-76./



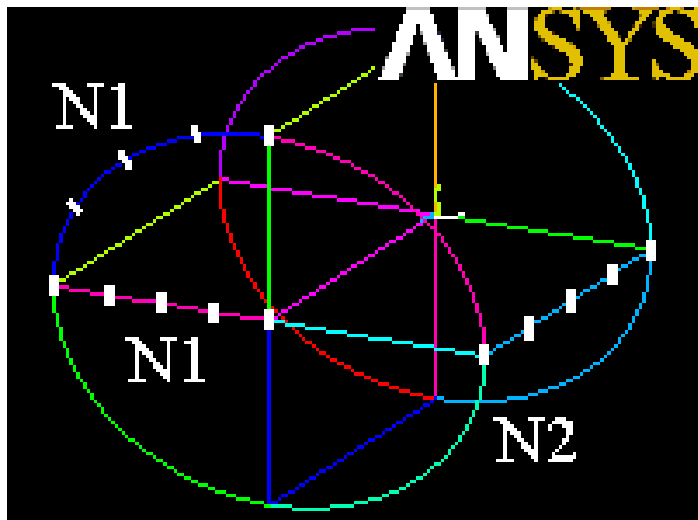
Kuva 33. Kudosyksikkö leikkauksen alaisena

Kudoksena on yksinkertainen tasavaltainen sidos (plain) ja lankana on 610 tex – lasikuitu-roving, jonka keskimääräinen tilavuusjakauma on kuormittamattomana $V_f = 57.6\%$ ja puristettuna kuormaa kantavana $V_{fmax} = 71.5\%$. (Taulukko 3, liite 2). /13,s.38./

4.3 Kolmiulotteisen muodonmuutoksen tutkiminen

4.3.1 Kudoksen verkotus

Fetextissä avataan wisetexissa esijännitetty kudos ja verkotetaan se. Verkottamisessa määritetään elementtien lukumäärä langoissa jakamalla lanka osiin (Kuva 34.). Lankojen tilavuusjakauma ja kuitujen ominaisuudet määräytyvät alkuperäisestä wisetex-mallista (Liite 2, Taulukot 3 ja 4.) Kudokselle voidaan halutessa antaa tasomuodonmuutos wisetexissä ja tutkia kyseisen kudoksen käyttäytymistä 3-ulotteisessa muodonmuutoksessa. Kudos on siis ”esijännitetty”, kun se tuodaan Fetexiin, joten malli ottaa huomioon lankojen puristuksesta aiheutuvan vastuksen.



Kuva 34. Langan verkotuksen määrittäminen Fetexissä

No.Y	Yarn	Fibre	Vf, %	E.long, GPa	E.trans, GPa	nu.lt	nu.tt	G.lt, GPa	G.tt, GPa
1	glass	glass 21 mkm	61,09	72,00	72,00	0,23	0,23	29,27	29,27
2	glass	glass 21 mkm	61,09	72,00	72,00	0,23	0,23	29,27	29,27
3	glass	glass 21 mkm	61,09	72,00	72,00	0,23	0,23	29,27	29,27
4	glass	glass 21 mkm	61,08	72,00	72,00	0,23	0,23	29,27	29,27

Kuva 35. Lankojen tilavuusjakauma ja kuitujen mekaaniset ominaisuudet

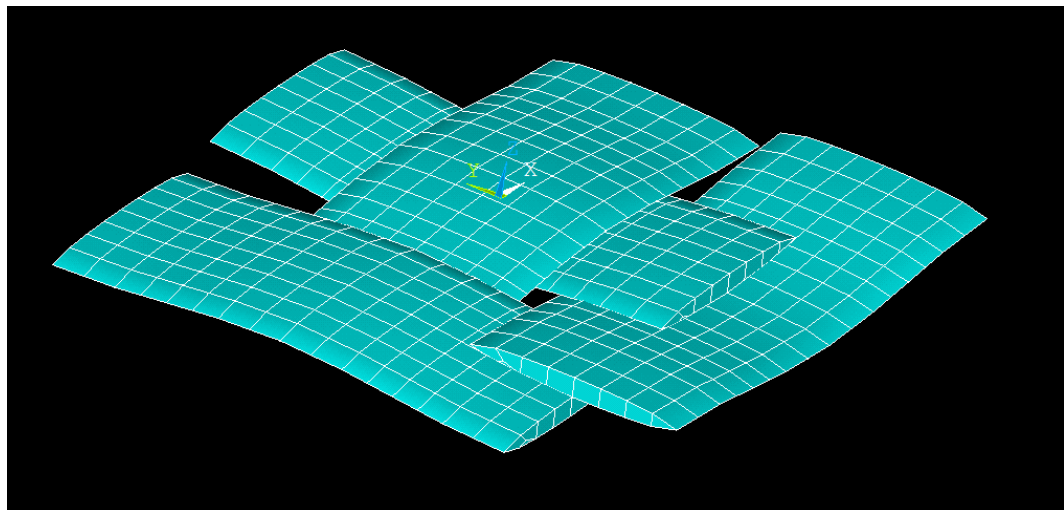
Ohjelma antaa FEM-malliin langoille mekaaniset ominaisuudet vain matriisiin kanssa. Matriisille annetaan kimmokerroin (E) sekä poissonin vakio (ν). Ohjelma laskee lankojen mekaaniset ominaisuudet niihin impregnoitun matriisin perusteella. Tässä tapauksessa on käytetty arvoja, jotka vastaavat tyypillisen polyesterimatriisin ominaisuuksia $E = 3\text{GPa}$ $\nu = 0.3$.

No.Y	Yarn	Fibre	VI,%	E.long,GPa	E.trans,GPa	nu.lt	nu.tt	G.lt,GPa	G.tt,GPa
1	glass	glass 21 mkm	61,09	45,15	11,95	0,26	0,29	4,63	4,63
2	glass	glass 21 mkm	61,09	45,15	11,95	0,26	0,29	4,63	4,63
3	glass	glass 21 mkm	61,09	45,15	11,95	0,26	0,29	4,63	4,63
4	glass	glass 21 mkm	61,08	45,15	11,95	0,26	0,29	4,63	4,63

Kuva 36. Impregnoitujen lankojen ominaisuudet

4.3.2 Ansys

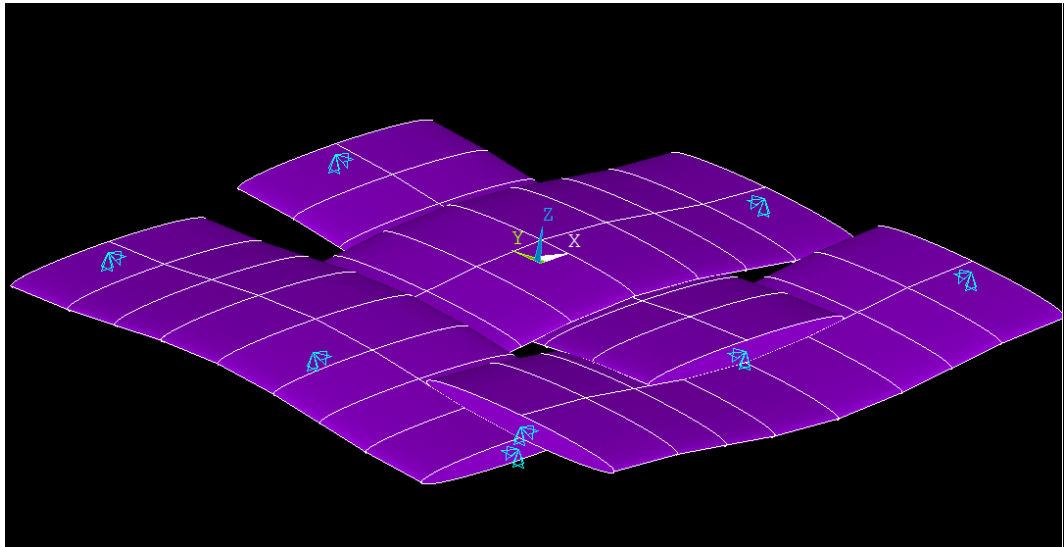
Fetexillä tehdään kudoksesta .log -tiedosto. Tiedosto luetaan ansys ”mechanical apdl” -ohjelman toiminnolla ”read input from”. Verkotettu kudosityksikkö ansyksessa (Kuva 37.) Mallin elementit ja materiaaliominaisuudet on listattuna liitteessä 3 sivuilla 1-2. Kudosityksikön elementtityypit määräytyvät automaattisesti Fetexistä.



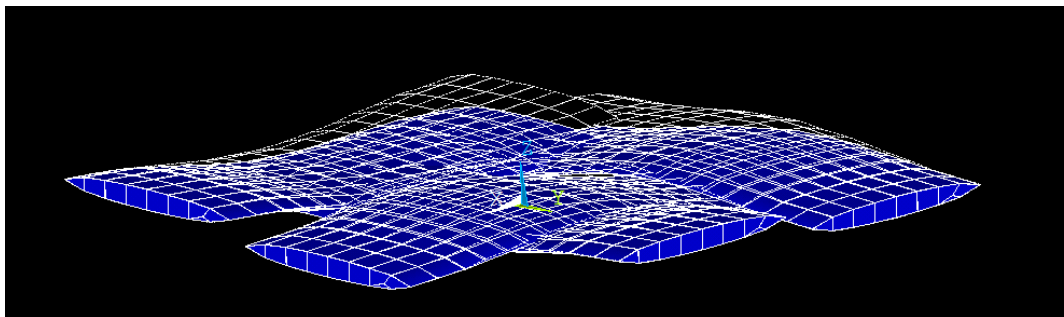
Kuva 37. Verkotettu kudos

Kudosityksikkö on tuettu ansyksessa niin, että se on 1/4 isommasta kokonaisuudesta. Kuvassa 38 näkyvät tuennat lankojen päädyissä. Lankojen takapäiden siirtymät on määrätty nolaksi ja etupäiden -0.2 mm z-suunnassa. Liitteessä 3 on listattu tuennat ja

siirtymät. Kudosyksikön ”etupää” painuu alaspäin samankaltaisesti kuin kokonaisen kudoksen keskikohta. Alkuperäinen kudoksen muoto näkyy ”haamuviivoina” (Kuva 39.)



Kuva 38. Tuennat ja siirtymät

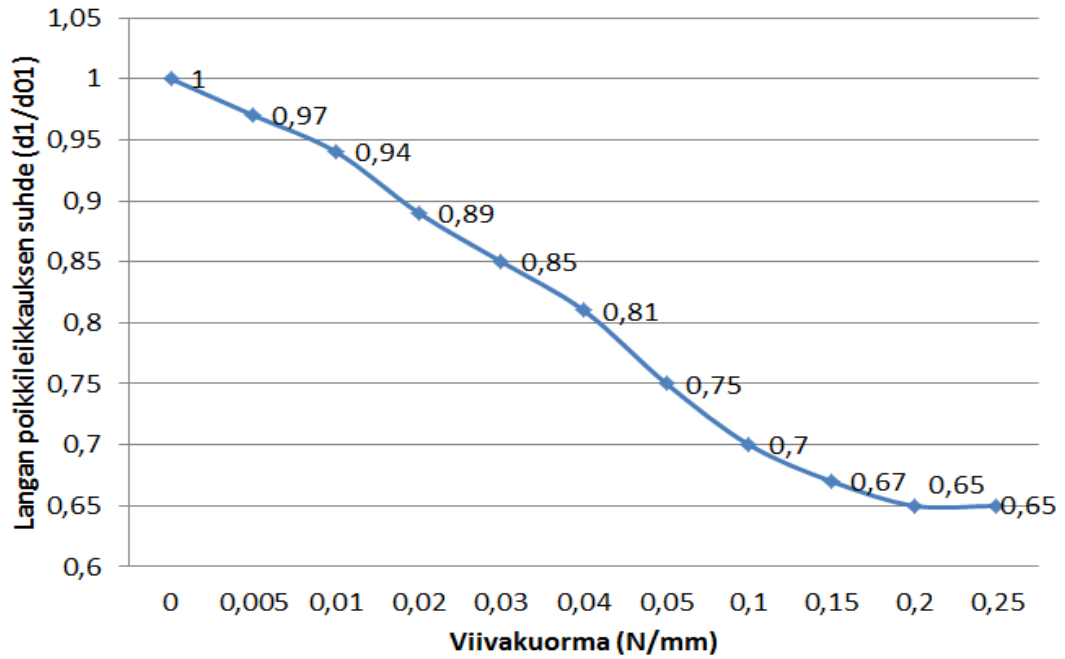


Kuva 39. FEM-mallin muodonmuutos kuormituksessa

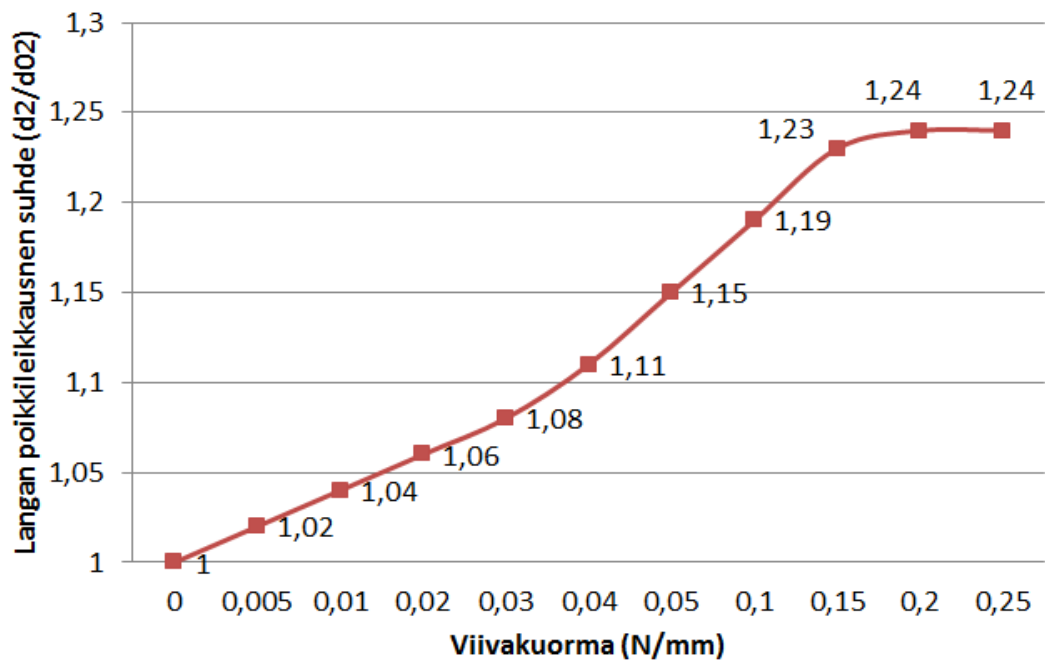
5 TULOKSET

5.1 Puristus

Lasikuitulanka 610 tex saavuttaa maksimi tilavuusjakaumansa 0,65 puristussuhteella vertikaalisuunnassa kuorman ollessa 0,2 N/mm (Kuva 40). Vaakatason maksimi puristussuhde kyseisellä kuormalla on 1,24 (Kuva 41).



Kuva 40. Langan vertikaalinen puristussuhde kuormituksen funktiona

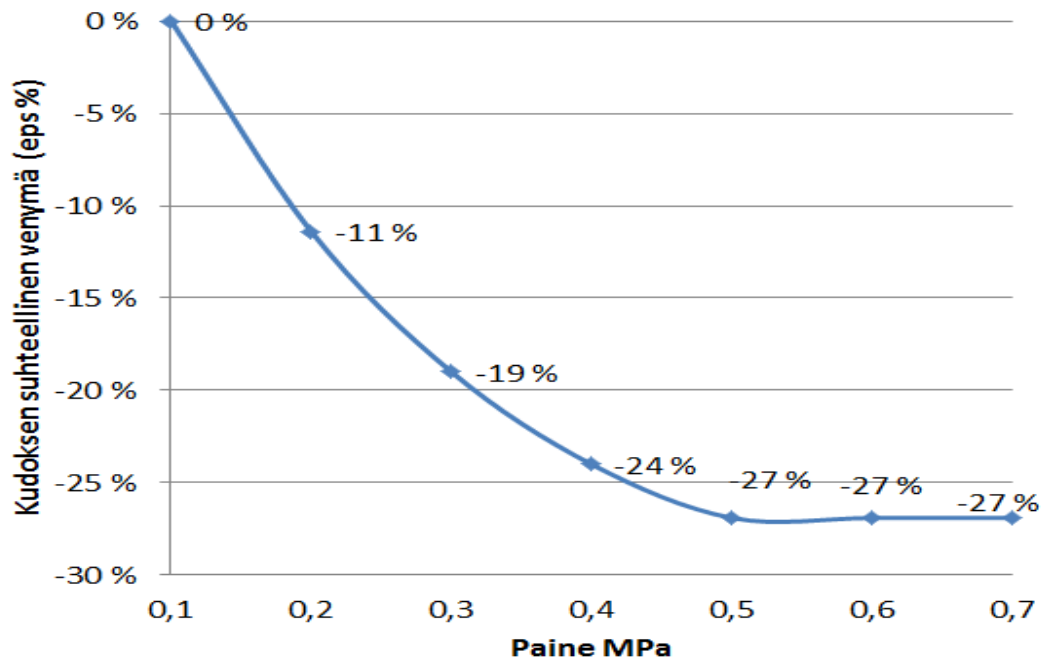


Kuva 41. Langan vaakatason puristussuhde kuormituksen funktiona

Kudos puristuksen alaisena (Kuva 42), paine MPa kasvaa eksponentissa johtuen lankojen puristuvuuteen liittyvästä hystereesistä ts. aineen muodonmuutosta vastustava voima kasvaa potenssissa suhteessa siirtymään. Kyseessä on siis epälineaarinen materiaali /16/. Kudos saavuttaa maksimi tilavuusjakaumansa 27 % suhteellisella venymäl-

lä (Kuva 42). Kudos ei enää puristu maksimi venymän saavutettuaan lisää, ja lasikuitulanka alkaa tällöin vastata materiaaliominaisuuksiltaan yhtenäistä materiaalia.

Kudoksen paksuus, huokoisuus ja venymä sekä tilavuusjakauma kunkin paineen kohdalla (Liite 2, taulukko 1).



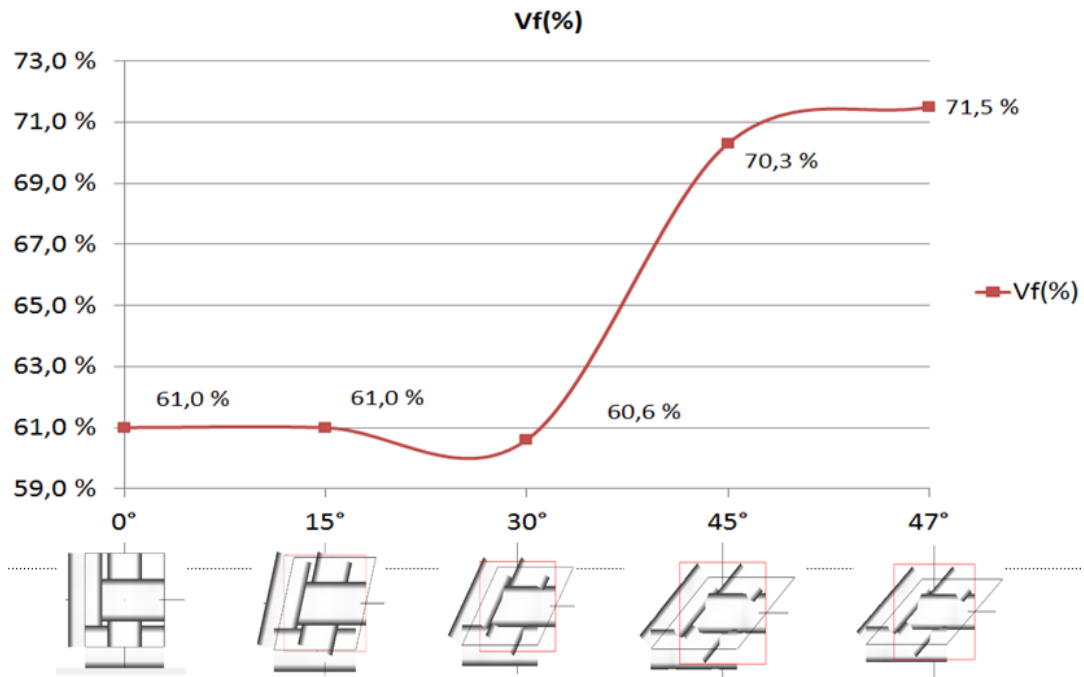
Kuva 42. Kudosyksikön suhteellinen venymä siihen kohdistuvan paineen funktiona

5.2 Tasomuodonmuutos

Lankojen tilavuusjakauma alkaa lähestyä maksimia (71,5 %), kun leikkauskulmaa kasvatetaan 0° - 45° asti, arvot nähtävissä liitteessä 2, taulukot 3-7. Maksimileikkauskulman jälkeen langat eivät luonnollisesti puristu ja kankaan mukautuminen muodonmuutokseen vaikeutuu. Langat alkavat liukua toistensa suhteen, kunnes ne saavuttavat lukkiutumiskulman. Jos muodonmuutos jatkuu lankojen lukkiutumisen jälkeen, menettävät langat muotonsa, kun ne alkavat kiertyä akselinsa ympäri ja kudos alkaa ”rypistyä”.

Langan keskimääräinen tilavuusjakauma kasvaa prosessoitaessa (kudottaessa) ts, Jakauma kasvaa kudoksessa vallitsevien jännitysten aiheuttamien kuormitusten (veto, taivutus) alaisena. Ohjelma laskee mm. tilavuusjakauman ja huokoisuuden valmiille kuormittamattomalle kudokselle ja erikseen siinä oleville langoille /13./ (Liite 2, tau-

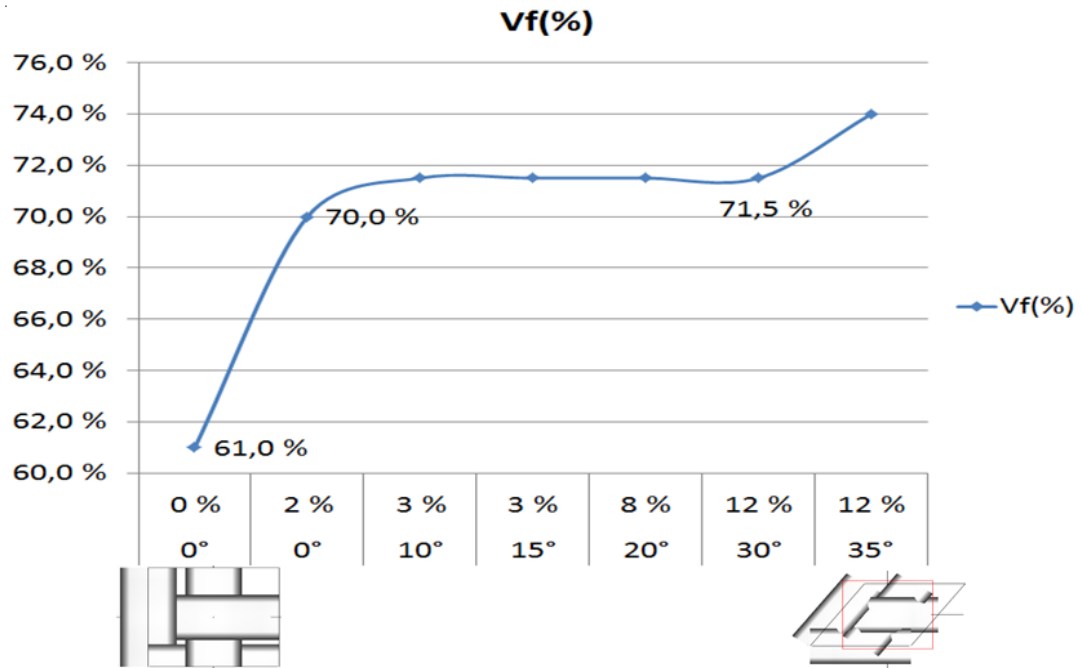
lukko 3.) Kuvassa 43 on esitetty yhden langan tilavuusjakauma kudokseen kohdistuvan leikkauskuormituksen funktiona. Langan tilavuusjakauma on kuormittamattomassa kudoksessa 61%. Langan maksimi tilavuusjakauma on 71,5% (Kuva 1, liite 1.), joka saavutetaan leikkauskulman ollessa $>45^\circ$ (Kuva 43).



Kuva 13. Langan tilavuusjakauma leikkauskulman funktiona

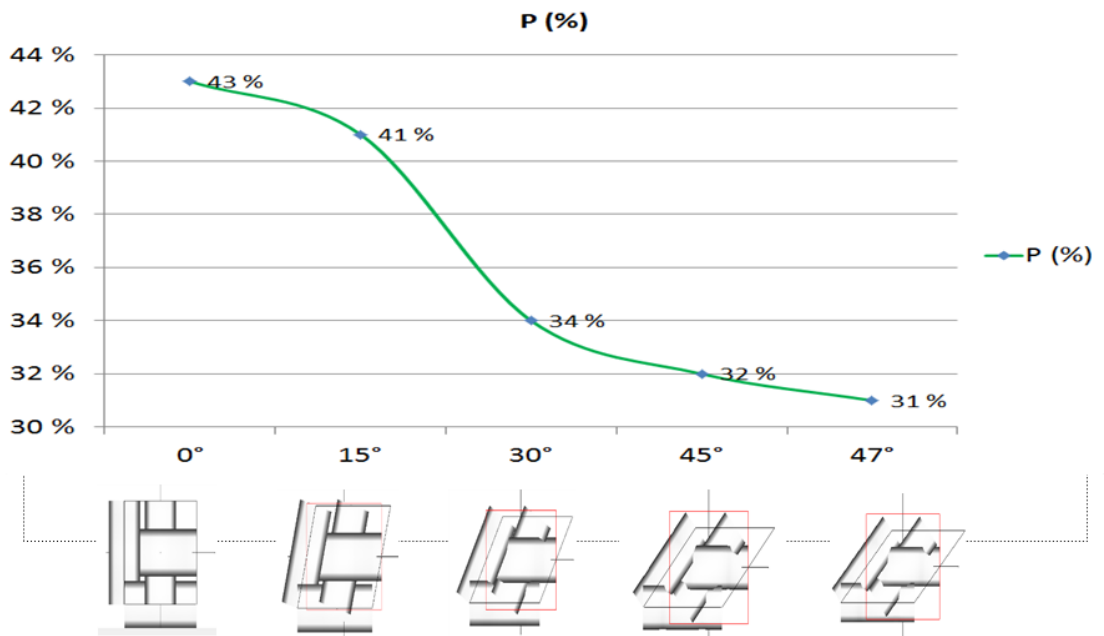
Kuvasta 43 nähdään myös milloin mitattu lanka on vedon alaisena ja milloin se on vaakapuristuksen alaisena. Tilavuusjakauma laskee 15° ja 30° leikkauskulmien välillä, lanka on tällöin puristuksen alaisena vaakatasossa.

Yhdistetyssä veto/leikkaus kuormituksessa (Kuva 44) maksitilavuusjakauma 71,5 % lähestyy jo 2 % venymillä xy-suunnissa. Tilavuusjakauma säilyy vakiona (71,5%) 30° leikkauskulmaan ja 12 % venymään asti, jonka jälkeen jakauma kasvaa yli maksimin. Tämä johtuu siitä, että langat eivät enää liu'u toistensa suhteen. Kappaleessa 4.2.2 kuvatus kitkavoiman F kasvaessa riittävän suureksi, langat lukkiutuvat ja alkavat kiertä/rypistyä sekä menettävät muotonsa. Kyseessä on siis lankojen lukkiutumisen aiheuttama muodonmuutos ($\Theta 30^\circ$ ja $\epsilon_{xy} 12\%$). Kuormitukset ja lankojen geometriat on nähtävissä liitteen 2, taulukoissa 8-13.



Kuva 44. Langan tilavuusjakauma yhdistetyn kuormituksen funktiona (leikkaus/veto)

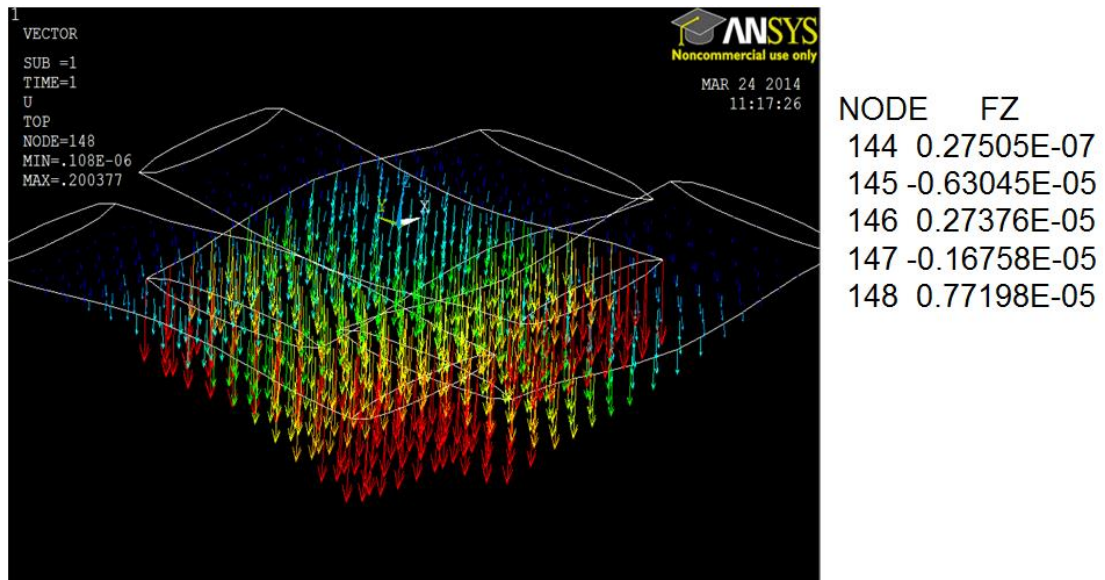
Kuvassa 45 näkyy, kuinka muodonmuutos vaikuttaa kudoksen huokoisuuteen. Huokoisuus laskee lankojen puristuksen kasvun myötä. Huokoisuus P on maksimitilavuusjakaumalla 31 %. Kudoksen huokoisuus ja tilavuusjakaumat (Liite 2, kuvat 14-18.)



Kuva 45. Huokoisuus leikkauskulman funktiona

5.3 FEM -analyysi

Vektoritulostuksesta on nähtävissä voimat. Siirtymiin tarvittavien voimien suuruutta voidaan tarkastella eri kohdissa kudosta, kuten solmupisteen 148 voiman z-komponentti (Kuva 46.). Liitteen 3 sivulla 4 on listattu suurimpien voimien z-komponentit eri solmupisteiden kohdilla.



Kuva 46. Lankojen solmupisteissä vaikuttavien voimien Z-komponentit

6 POHDINTA

Komposiittien muotoutuvuuden ottaminen huomioon muottien suunnittelussa pohjautuu monesti puhtaasti kokemukseen eri kangastyypin sopivuudesta erilaisten muottien geometriaan. Puhuttaessa komposiiteista muotoutuvuus on käsitteenä erittäin laaja. Se käsittää kuitujen, lankojen ja lujitteiden sekä matriisin yhdistyneen mekaniikan muodonmuutoksessa. Kokonaisen komposiitin mekaniikkaa ja kinetiikkaa mittaavan ohjelmiston käyttö ja tulkitseminen vaatii laajaa perehtymistä alan kirjallisuuteen. Tämän vuoksi ongelmaa tarkastellaan monesti yritys/erehdys -menetelmällä eli kokeilemalla eri kankaiden sopivuutta fyysisesti halutulle muottipinnalle.

Muodonmuutoksen tutkimisessa ei kuitenkaan ole kyse pelkästään kankaan muovaamisesta muottiin. Kudosten ja kankaiden valmistuksen kannalta on tärkeää tietää kuinka tietynlainen lanka puristuu ja muovautuu sitä prosessoidessa. Kuten jo aiemmin on mainittu, kangas ja langat täytyy ”esijännittää” ennen kolmiulotteisen muodonmuutoksen mittaamista. Täten lankojen puristuvuuden tutkiminen ja kankaan muodonmuutosten mittaaminen tasossa luovat pohjan makro-skaalan mallille.

Kudosten ja lankojen huokoisuutta unohtamatta, on kankaan huokoisuutta hyvä tutkia simuloimalla kankaalle muottipinnan määräämä muodonmuutos. Täten lujitteelle voidaan laskea permeabiliteetti muodonmuutoksen alaisena ja matriisin injektoinnin onnistuvuutta voidaan arvioida sen virtausnopeuden kautta. Tästä on hyötyä etenkin isojen komposiittiosien valmistuksessa, sillä matriisin läpimenoaikaa on vaikea arvioida tietämättä lujitteen permeabiliteettia. Muotoutuvuus ei siis ole pelkästään lujitteita koskeva ongelma, koska lujitteiden muodonmuutos vaikuttaa matriisin virtausnopeuteen komposiittien valmistuksessa.

Työssä päästiin tavoitteeseen simulointiohjelmiston käyttöönoton ja testityökalun suunnittelun osalta. Työssä oli käytössä ohjelmiston (wisetex) demoversio, jolla ei voi tallentaa töitä, tämä rajoitti tutkimusta huomattavasti. Ohjelma ei laske muodonmuutoksille arvoja, jos siinä olevien esimerkkikudosten ominaisuuksia muutetaan. Esimerkiksi kudostyyppin tai kuitujen välisen kitkakertoimen suuruuden vaikutusta muodonmuutokseen ei voitu tutkia ja tämän vuoksi käytetyn wisetex-mallin kuitujen välinen kitkakerroin oli nolla (Liite 1, Kuva 1). Tallennusmahdollisuuden puuttumisen takia tasomuodonmuutosta tutkittiin vain yhdellä kudostyyppillä. Muotoutuvuuden teorian tärkeimmät perusteet, kuten muodonmuutosmekanismit ja lankojen puristuvuus kuitenkin selvisivät työssä.

FEM-mallille saatiin määritettyä reunaehdot ja kudosta kuormitettiin. Mallin langat eivät tunnista toisiaan. Lankojen kosketuspinnat pitäisi määrittää jotenkin todellisuutta vastaaviksi. Kosketuspintoja lankojen välillä on mallinnettu kirjallisuudessa jousilla. Tähän ei kuitenkaan jäänyt enää aikaa.

Työn teoriapainotteisuuden ja aiheen laajuuden takia lisätutkimukset ovat tarpeellisia. Aihetta ei ole juurikaan tutkittu Suomessa, mutta englanninkielistä lähdeaineistoa löytyy paljon. Testimenetelmät tulisi ottaa käyttöön, jotta niiden tuloksia voisi verrata simuloinnin tuloksiin.

LÄHTEET

1. Saarela & Kumppanit. KOMPOSIITTIRAKENTEET. Helsinki: Hakapaino Oy. 2003.
2. Haufler. Multiaxial fabrics. Www-dokumentti.
<http://www.haufler.com/multiaxial.html>
Päivitetty:27.08.2013 Viitattu: 22.1.2014
3. Boatcraftnsv. Reinforcements. Www-dokumentti.
<http://www.boatcraftnsw.com.au/reinforcements/index.html>
Päivitetty: 1.2.2010 Viitattu: 23.1.2014
4. Sandjay K.Mazumar. Composite manufacturing: materials, product and process. United States of America: CRC press 2002.
5. Airasmaa,Saarela & Kumppanit. MUOVIKOMPOSIITIT. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy 1991
6. R.J. Young & P.A. Lowell. *Introduction to polymers. London: Chapman & Hall 1991.
7. R.G.Weatherhead. FRP Technology. London: Applied Publishers LTD 1980.
8. Kristof Vanclooster. Forming of multilayered fabric reinforced thermoplastic composites. Leuven: University of Leuven 2009.
9. Q.T. Nguyen & Kumppanit. Composites part B. Ranska: Universities: Lyon, Havre, D'Orleans. 2012
10. P. Potluri & Kumppanit. Composites part A. Measurement of meso-scale shear deformationsfor modelling textile composites. Manchester: University of Manchester 2005.
11. C:D Rudd & Kumppanit. Liquid moulding technologies. Cambridge: Woodhead Publishing Limited 1997.
12. R.E.Robertson & Kumppanit. Composites part A. Three dimensional fiber reinforcement shapes obtainable from flat. Michigan: University of Michigan 2000.
13. S.V.Lomov. Wisetex User`s guide. Leuven: MTM Department 2013.
14. Matti.K.Hakala. Lujuusopin Elementtimenetelmä. Espoo: Libella painopalvelu Oy 1997.
15. Hautala&Peltonen. Insinöörin amk fysiikka osa 1. Saarijärvi. Offset Oy 2009.
16. S.V.Lomov & Kumppanit. Compression resistance and hysteresis of carbon fibre tows with grown carbon nanotubes. Leuven: University of Leuven 2011.

Kuitujen omin. määrittämisessä

glass 21 mkm

693 N fibres

General Mechanics Mechanical data defined

Compute

Linear density, tex Compute

Diameter, mm Compute

Density, g/cm³ Compute

Friction coefficient

average Vf, %
57.6

at max compression:
71.5

Compute

Figure 1. Kuitujen ominaisuudet ja kuitujen jakautuminen langassa Vf%

glass 21 mkm

693 N fibres

General Mechanics Mechanical data defined

Compute

Longitudinal

Young modulus, GPa

Poisson ratio Set 0.3

Shear modulus, GPa Compute

Transversal

Young modulus, GPa = longitudinal

Poisson ratio Compute

Shear modulus, GPa Compute

average Vf, %
57.6

at max compression:
71.5

Compute

Figure 2. Kuitujen lujuusominaisuudet

Tasomuodonmuutos (leikkaus)

Table 1. Kudoksen puristus: kankaan paksuudet (h), huokoisuudet (int-yarn%) ja tilavuusjakaumat eri jännityksillä.

p,MPa	eps,%	h,mm	P/int-yarn,%	Vf,%	Fabric
0.000000	0.0	0.48	42.7	35.0	n/a
0.010000	-11.4	0.43	39.3	39.5	No
0.020000	-16.7	0.40	37.5	42.0	No
0.040000	-23.1	0.37	34.7	45.5	No
0.080000	-26.9	0.35	33.2	47.9	No
0.160000	-26.9	0.35	33.2	47.9	No
0.320000	-26.9	0.35	33.2	47.9	No
0.640000	-26.9	0.35	33.2	47.9	No

Table 2. Leikkauskulmien leikkauskuormitukset (T, N/mm)

ex,%	ey,%	g,deg	Fx,N/mm	Fy,N/mm	T,N/mm
0.000	0.000	0.0	0.000E+0	0.000E+0	0.000E+0
0.000	0.000	15.0	0.000E+0	0.000E+0	2.473E-3
free	free	30.0	0.000E+0	0.000E+0	8.189E-3
free	free	45.0	0.000E+0	0.000E+0	2.587E-2
free	free	47.0	0.000E+0	0.000E+0	2.601E-2

Table 3. Lankojen geometria (kuormittamaton kudos)

	d1,mm	d2,mm	Vf,%	l,mm
warp 1	0.23	2.54	61.1	5.91
warp 2	0.23	2.54	61.1	5.91
weft 1	0.23	2.54	61.1	5.58
weft 2	0.23	2.54	61.1	5.58

Tasomuodonmuutos (leikkaus)

Table 4. Lankojen geometria 15° leikkauskulmalla

	d1,mm	d2,mm	Vf,%	l,mm
yarn 1	0.23	2.54	61.0	5.91
yarn 2	0.23	2.54	61.0	5.91
yarn 3	0.23	2.54	61.0	5.58
yarn 4	0.23	2.54	61.0	5.58

Table 5. Lankojen geometria 30° leikkauskulmalla

	d1,mm	d2,mm	Vf,%	l,mm
yarn 1	0.23	2.53	60.6	5.91
yarn 2	0.23	2.53	60.6	5.91
yarn 3	0.23	2.53	60.6	5.58
yarn 4	0.23	2.53	60.6	5.58

Table 6. Lankojen geometria 45° leikkauskulmalla

	d1,mm	d2,mm	Vf,%	l,mm
yarn 1	0.24	2.19	68.9	5.92
yarn 2	0.24	2.19	68.9	5.92
yarn 3	0.24	2.15	70.3	5.58
yarn 4	0.24	2.14	70.3	5.58

Table 7. Lankojen geometria 47° leikkauskulmalla

	d1,mm	d2,mm	Vf,%	l,mm
yarn 1	0.24	2.10	71.6	5.92
yarn 2	0.24	2.10	71.6	5.92
yarn 3	0.24	2.06	73.1	5.58
yarn 4	0.24	2.06	73.1	5.58

Tasomuodonmuutos (yhdistetty kuormitus)

Table 8. Suhteelliset venymät ja niihin tarvittavat voimat. Yhdistetty leikkaus ja vetokuormitustasossa.

ex,%	ey,%	g_deg	Fx,N/mm	Fy,N/mm	T,N/mm
0.000	0.000	0.0	0.000E+0	0.000E+0	0.000E+0
2.000	2.000	0.0	1.108E+2	1.088E+2	0.000E+0
3.000	3.000	10.0	1.722E+2	1.672E+2	1.087E+0
3.000	3.000	15.0	1.722E+2	1.672E+2	1.158E+0
8.000	8.000	20.0	4.728E+2	4.705E+2	2.967E+0
12.000	12.000	30.0	7.199E+2	7.020E+2	4.591E+0
12.000	12.000	35.0	7.199E+2	7.020E+2	4.837E+0

Table 9. Lankojen geometria 3% venymällä ja 10° leikkauskulmalla

	d1,mm	d2,mm	Vf,%	l,mm
yarn 1	0.17	2.98	71.5	6.07
yarn 2	0.17	2.98	71.5	6.07
yarn 3	0.17	2.98	71.5	5.74
yarn 4	0.17	2.98	71.5	5.74

Table 10. Lankojen geometria 3% venymällä ja 15° leikkauskulmalla

	d1,mm	d2,mm	Vf,%	l,mm
yarn 1	0.17	2.98	71.5	6.07
yarn 2	0.17	2.98	71.5	6.07
yarn 3	0.17	2.98	71.5	5.74
yarn 4	0.17	2.98	71.5	5.74

Table 11. Lankojen geometria 8% venymällä ja 20° leikkauskulmalla

	d1,mm	d2,mm	Vf,%	l,mm
yarn 1	0.17	2.98	71.5	6.36
yarn 2	0.17	2.98	71.5	6.36
yarn 3	0.17	2.98	71.5	6.02
yarn 4	0.17	2.98	71.5	6.02

Tasomuodonmuutos (yhdistetty kuormitus)

Table 12. Lankojen geometria 12% venymällä ja 30° leikkauskulmalla

	d1,mm	d2,mm	Vf,%	l,mm
yarn 1	0.17	2.98	71.5	6.60
yarn 2	0.17	2.98	71.5	6.60
yarn 3	0.17	2.98	71.5	6.24
yarn 4	0.17	2.98	71.5	6.24

Table 13. Lankojen geometria 12% venymällä ja 35° leikkauskulmalla

	d1,mm	d2,mm	Vf,%	l,mm
yarn 1	0.17	2.89	73.7	6.60
yarn 2	0.17	2.89	73.7	6.60
yarn 3	0.17	2.89	73.7	6.24
yarn 4	0.17	2.89	73.7	6.24

Table 14. Kuormittamattoman langan huokoisuus (Porosity %). Kudosyksikön mitat ja massa.

Unit cell size	5.9 x 5.6 x 0.482 mm
Areal density	428.6 g/sq.m
Porosity (inter-yarn)	42.7 %

Table 15. Huokoisuus 15° leikkauskulmalla

Angle	75.0°
Unit cell size	5.9 x 5.6 x 0.484 mm
Areal density	443.8 g/sq.m
Porosity (inter-yarn)	40.8 %

Tasomuodonmuutos (yhdistetty kuormitus)

Table 16. Huokoisuus 30° leikkauskulmalla

Angle	60.0°
Unit cell size	5.9 x 5.6 x 0.491 mm
Areal density	495.3 g/sq.m
Porosity (inter-yarn)	34.5 %

Table 17. Huokoisuus 45° leikkauskulmalla

Angle	45.0°
Unit cell size	5.9 x 5.6 x 0.503 mm
Areal density	607.0 g/sq.m
Porosity (inter-yarn)	31.7 %

Table 18. Huokoisuus 47° leikkauskulmalla

Angle	43.0°
Unit cell size	5.9 x 5.6 x 0.505 mm
Areal density	629.3 g/sq.m
Porosity (inter-yarn)	32.1 %

ANSYS: Kudoksen materiaali ominaisuuksien listaus (Kimmo, poisson ja leikkausmoduulit) x,y,z suunnissa.

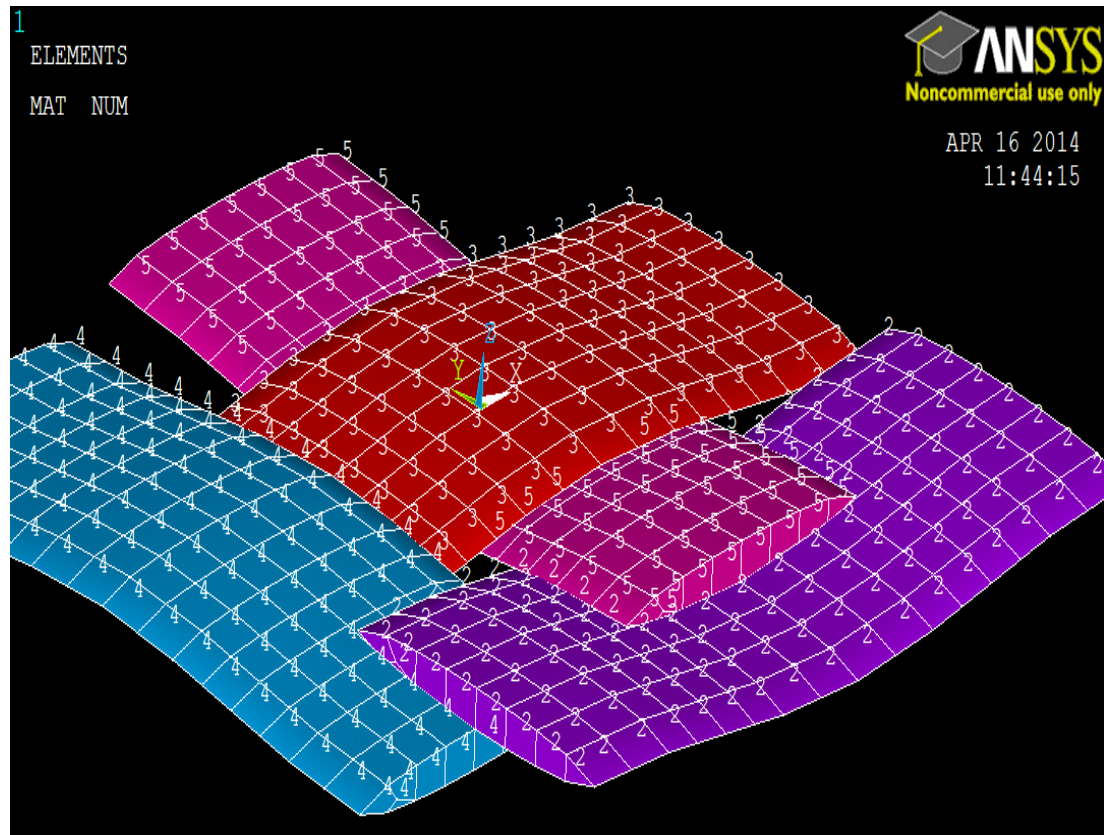


Figure 3. FEM-mallin materiaalit numeroituina

EVALUATE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIALS 1 TO 5 IN INCREMENTS OF 1

MATERIAL NUMBER = 1 EVALUATED AT TEMPERATURE OF 0.0000
 EX = 3.0000
 NUXY = 0.30000
 PRXY = 0.30000

MATERIAL NUMBER = 2 EVALUATED AT TEMPERATURE OF 0.0000
 EX = 45.100
 EY = 11.900
 EZ = 11.900
 NUXY = 0.68603E-01
 NUYZ = 0.29000
 NUXZ = 0.68603E-01
 GXY = 4.6300
 GYZ = 4.6300
 GXZ = 4.6300
 PRXY = 0.26000
 PRYZ = 0.29000
 PRXZ = 0.26000

MATERIAL NUMBER = 3 EVALUATED AT TEMPERATURE OF 0.0000

EX = 45.100
 EY = 11.900
 EZ = 11.900
 NUXY = 0.68603E-01
 NUYZ = 0.29000
 NUXZ = 0.68603E-01
 GXY = 4.6300
 GYZ = 4.6300
 GXZ = 4.6300
 PRXY = 0.26000
 PRYZ = 0.29000
 PRXZ = 0.26000

MATERIAL NUMBER = 4 EVALUATED AT TEMPERATURE OF 0.0000

EX = 45.100
 EY = 11.900
 EZ = 11.900
 NUXY = 0.68603E-01
 NUYZ = 0.29000
 NUXZ = 0.68603E-01
 GXY = 4.6300
 GYZ = 4.6300
 GXZ = 4.6300
 PRXY = 0.26000
 PRYZ = 0.29000
 PRXZ = 0.26000

MATERIAL NUMBER = 5 EVALUATED AT TEMPERATURE OF 0.0000

EX = 45.100
 EY = 11.900
 EZ = 11.900
 NUXY = 0.68603E-01
 NUYZ = 0.29000
 NUXZ = 0.68603E-01
 GXY = 4.6300
 GYZ = 4.6300
 GXZ = 4.6300
 PRXY = 0.26000
 PRYZ = 0.29000
 PRXZ = 0.26000

ANSYS: Fetexin määrämät elementtityypit

LIST ELEMENT TYPES FROM 1 TO 3 BY 1

ELEMENT TYPE	1 IS SOLID95	3-D 20-NODE STRUCTURAL SOLID
KEYOPT(1- 6)=	0 0 0	0 0 0
KEYOPT(7-12)=	0 0 0	0 0 0
KEYOPT(13-18)=	0 0 0	0 0 0

```

ELEMENT TYPE      2 IS SHELL93      8-NODE STRUCTURAL SHELL
KEYOPT( 1- 6)=   0  0  0      0  0  0
KEYOPT( 7-12)=   0  0  0      0  0  0
KEYOPT(13-18)=   0  0  0      0  0  0

```

```

ELEMENT TYPE      3 IS SOLID92      3-D 10-NODE TET STRUC. SOLID
KEYOPT( 1- 6)=   0  0  0      0  0  0
KEYOPT( 7-12)=   0  0  0      0  0  0
KEYOPT(13-18)=   0  0  0      0  0  0

```

```

CURRENT NODAL DOF SET IS UX  UY  UZ  ROTX  ROTY  ROTZ
THREE-DIMENSIONAL MODEL

```

ANSYS: Tuennat ja siirtymät (mm)

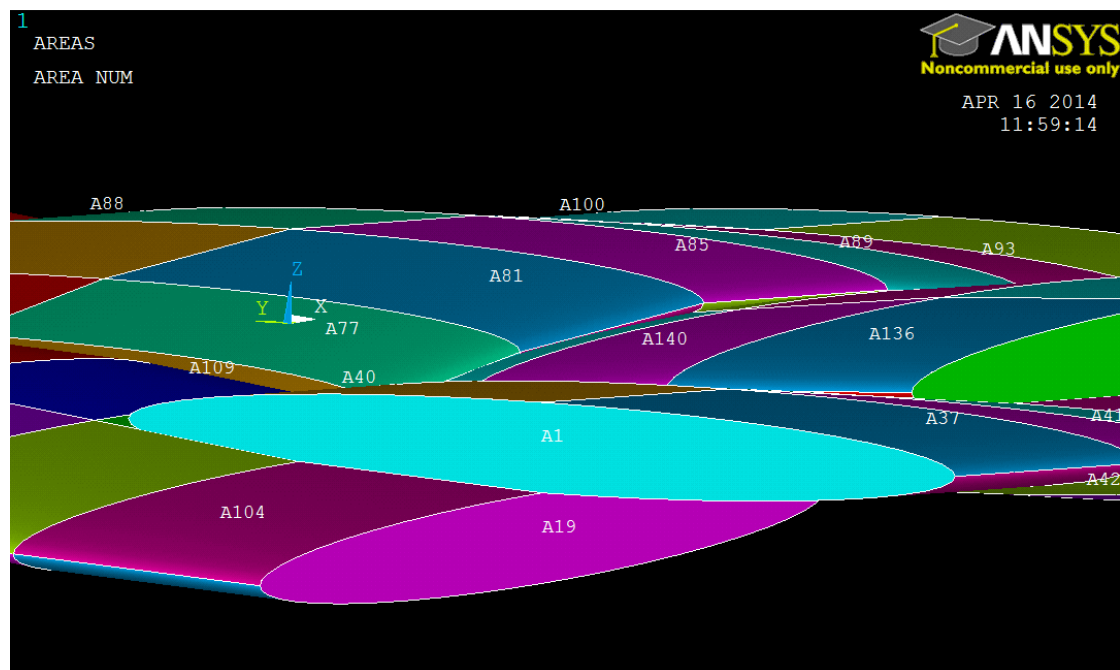


Figure 4. FEM-mallin pinta-alat tulostettuna

LIST CONSTRAINTS ON ALL SELECTED AREAS

AREA	LOAD LABEL	VALUE(S)	VALUE(S)
1	UY	0.0000	0.0000
1	UZ	-0.20000	0.0000
9	UX	0.0000	0.0000
9	UZ	0.0000	0.0000
10	UY	0.0000	0.0000
10	UZ	-0.20000	0.0000
18	UX	0.0000	0.0000
18	UZ	0.0000	0.0000
19	UX	0.0000	0.0000
19	UZ	-0.20000	0.0000

27	UY	0.0000	0.0000
27	UZ	0.0000	0.0000
28	UX	0.0000	0.0000
28	UZ	-0.20000	0.0000
36	UY	0.0000	0.0000
36	UZ	0.0000	0.0000

ANSYS: Suurimmat kudoksessa vaikuttavat voimat Fz

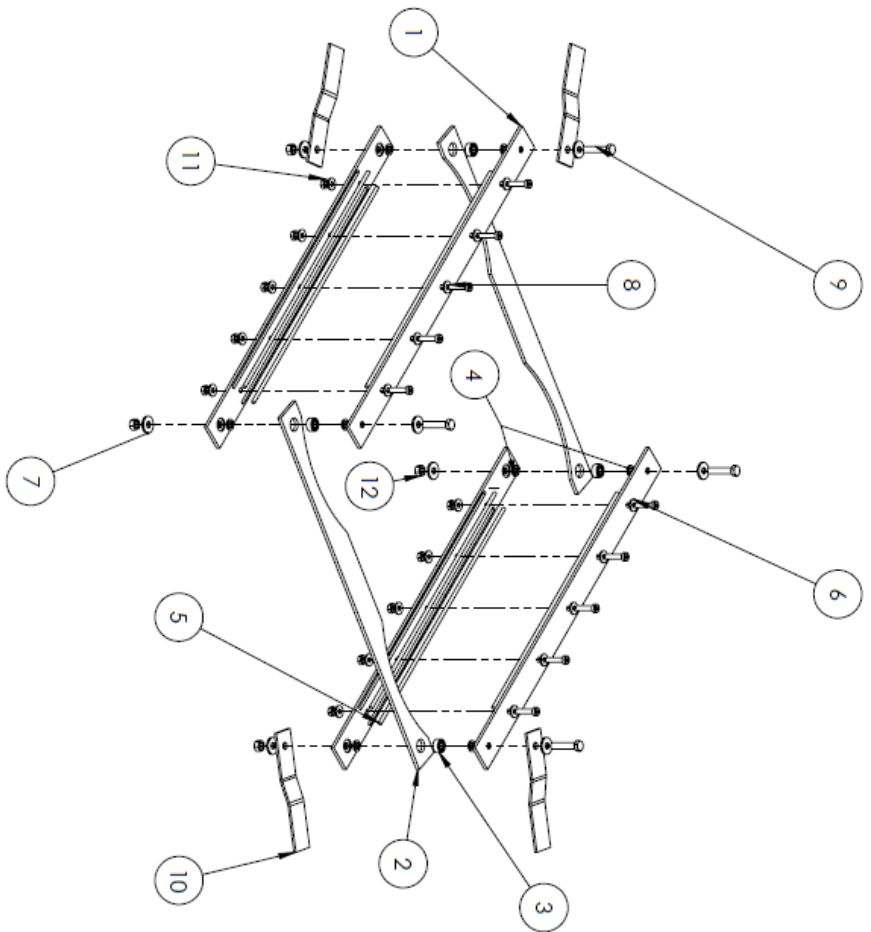
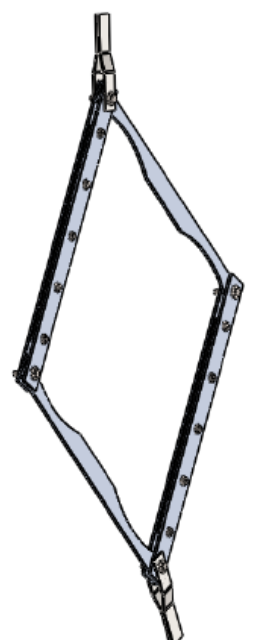
***** POST1 SUMMED TOTAL NODAL LOADS LISTING *****

LOAD STEP= 0 SUBSTEP= 1
 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

NODE	FZ
874	0.40353E-03
875	0.41622E-03
876	0.40348E-03
1860	0.40362E-03
1861	0.41618E-03
1862	0.40349E-03
2846	0.40867E-03
2847	0.42056E-03
2848	0.40854E-03
3832	0.40611E-03
3833	0.41799E-03
3834	0.40605E-03

TOTAL VALUES
 VALUE 0.49144E-02



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Latta	Latta	4
2	Latta 2	Latta	2
3	ISO 15 RBB - 385 - 10.SI.NC.10.68	Lakkeri	4
4	Washer ISO 7092 - 5	Lakkerin kannattinlevyt	8
5	Nauhattiviiste	O-rengasnauha	8
6	DIN 6903-A4	Aluslevy	20
7	ISO 10669-5.4-N	Aluslevy	8
8	DIN 7984 - M4 x 18 --- 15.9N	Pultti	10
9	ISO 4014 - M5 x 25 x 16-N	Pultti: M5 Osakierre	4
10	Vetolevy	Vetolevy	4
11	Hexagon Nut ISO 4032 - M4 - W - N	Mutteri M4	10
12	Hexagon Nut ISO 4032 - M5 - W - N	Mutteri M5	4

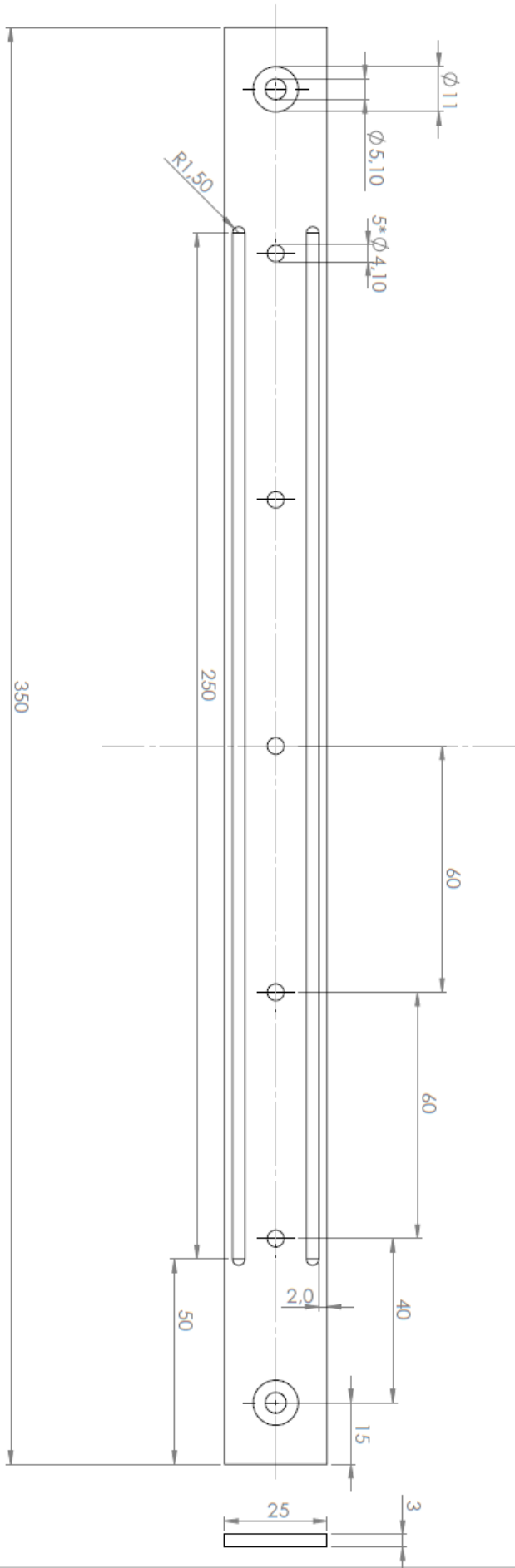
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: FRACTIONS DECIMALS ANGULARS	FRISK DO NOT SCALE DRAWING	DEBIL AND BREAK SHARP EDGES	REVISION
--	-------------------------------	-----------------------------------	----------

NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE
DRAWN: A1/Parkkinen			Vetokehyksen röijäytys
CHECKED:			
APPROVED:			
MATERIAL:			
SCALE: 1:5	WIPOR: 120173	SCALE: 1:5	

SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.

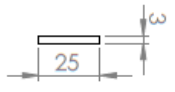
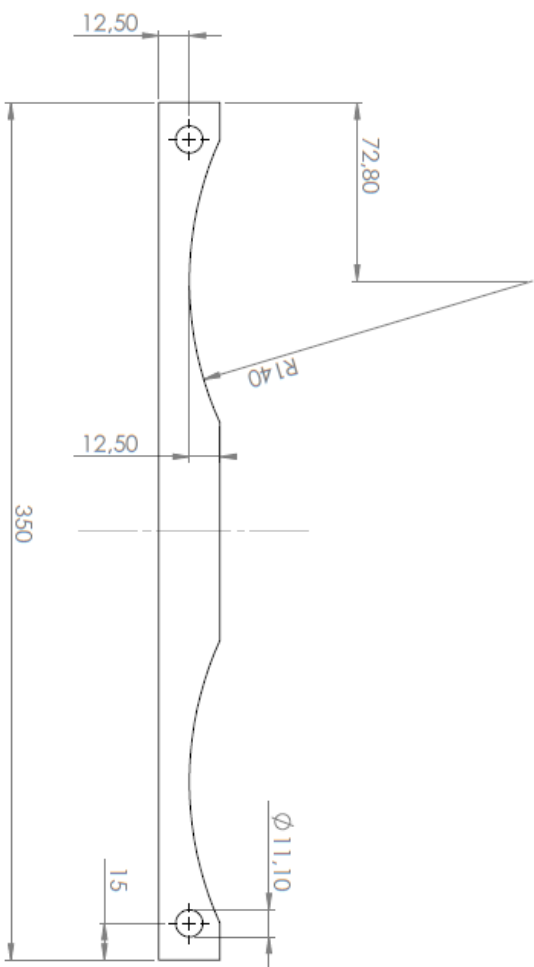
Vetokehyksen
röijäytys

A3



TUNNUS				PÄIVÄ				KOKO			
TUNNUS				PÄIVÄ				KOKO			
DRW	AI	Reinhold		4.3.2014							
CHKD											
APPVD											
WFO											
QA											
MATERIALI: 6063-T5				MATERIAALI: WISOMALIA				MATERIAALI: WISOMALIA			
DO NOT SCALE DRAWING				DO NOT SCALE DRAWING				DO NOT SCALE DRAWING			
Latta				Latta				Latta			
A3				A3				A3			

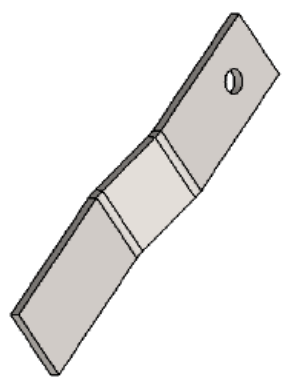
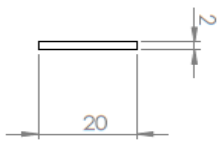
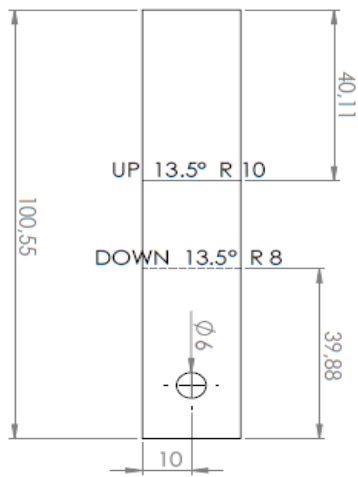
SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH	DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
SURFACE FINISH: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, ANGULAR					
NAME	SCALE	SIGNATURE	DATE	DATE	
DRAWN: Ait Puhelainen			4.3.2014		
CHECKED:					
APPROVED:					
MFG:					
QA:					
MATERIAL:					
6083-T5					
WEIGHT: 33.55					
SCALE: 1:1		TITLE:		Latta	
DWG NO.:		Latta 2		A3	
SHEET 1 OF 1					

SolidWorks Student Edition.
 For Academic Use Only.

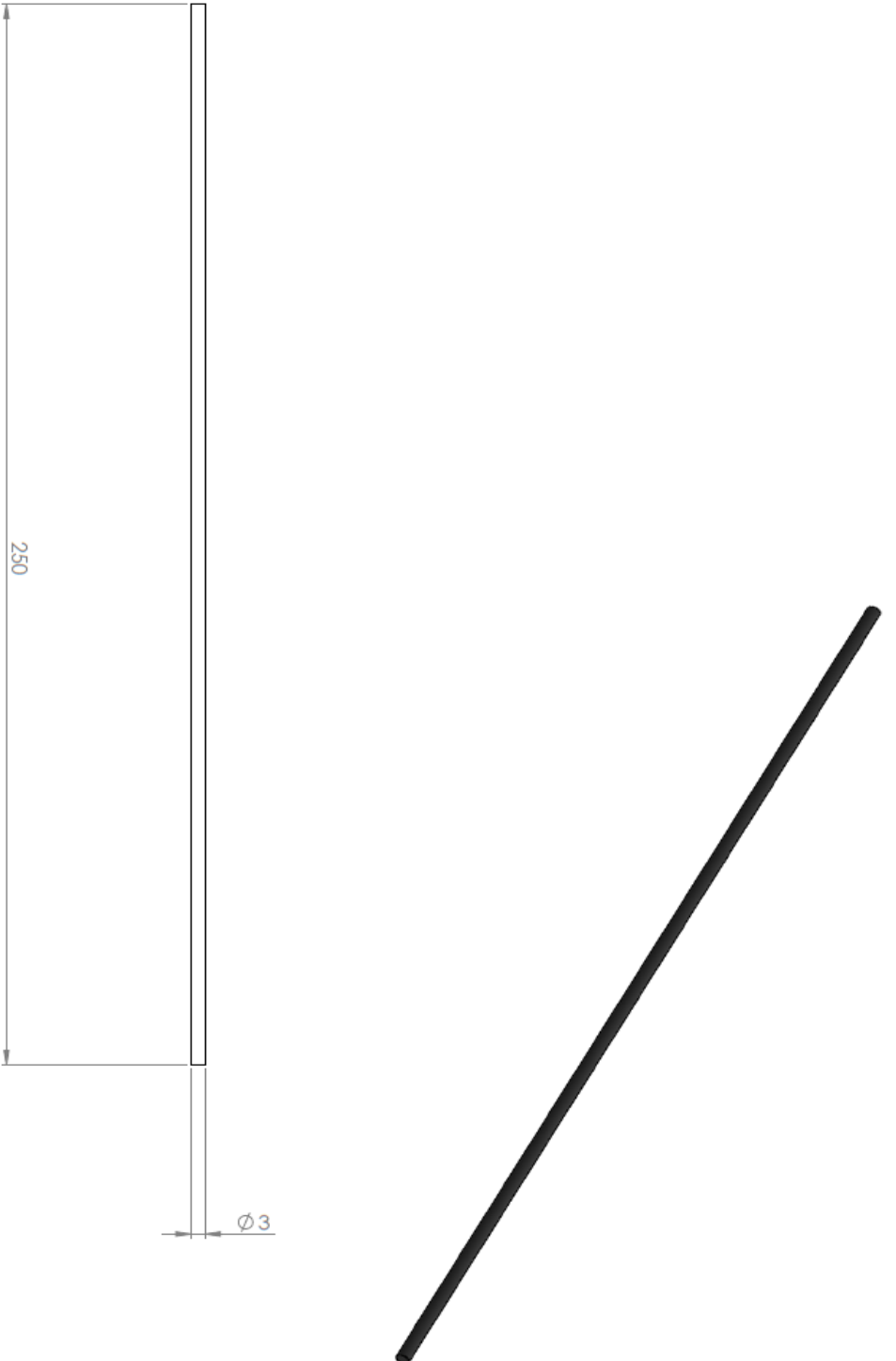
LIITE 4 (4).
Testityökalu



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: FRACTIONS DECIMALS ANGULAR		FINISH	DRILL AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	FRISON
DESIGN	NAME	SIGNATURE	DATE	Vetolevy Vetolevy A3	
DRAWN	A/Parkkinen		6.3.2014		
CHK'D					
APP'D					
MFG					
QA					
MATERIAL:					
1.0037 (S235JR)					
WEIGHT: 30.9					
SCALE: 1:1					

SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.

**LIITE 4 (5).
Testityökalu**



TULI EIT OIKENNIMISEN ERICCELO DIMENSIONI OLE IN MILLIMETRE TOLERANSSIT TOLERANSSIT MÄÄRÄT				FINISH	OSIIN JA KORJAT KORJAT	DO NOT SCALE DRAWING		REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE					
BRANN Ait Puhdistus		4.3.2014	O-rengasnauha					
CHNO								
APPROV								
MFG								
QA								
			MATERIAL:					
			Rubber					
			WESOP1127					
			SCALE: 1:2					
			SHEET 1 OF 1					

**SolidWorks Student Edition.
For Academic Use Only.**

Yhtälöiden 5-7 ratkaisut

Sijoitus yhtälöihin 5 ja 6

$$\begin{cases} 9 - a_y^2 = a_z^2 \\ 100 - a_y^2 = c^2 \end{cases}$$

Laitetaan yhtäsuuriksi

$$100 - a_y^2 - c^2 = 9 - a_y^2 - a_z^2$$

$$c^2 - a_z^2 = 91$$

Ratkaistaan c . yhtälöstä 7. $c = 10 - a_z$ ja sijoitetaan se viimeisimpään yhtälöön:

$$(10 - a_z)^2 - a_z^2 = 91$$

Ratkaistaan a_z

$$9 - 20a_z = 0$$

$$a_z = \frac{9}{20} = 0,45$$

Ratkaistaan c

$$c = 10 - \frac{9}{20} = \frac{191}{20}$$

Ratkaistaan a_y

$$a_y = \sqrt{9 - \left(\frac{9}{20}\right)^2} = \sqrt{\frac{3519}{400}}$$

Given

$$x = 3, y = 3, z = 0.6$$

$$(x - 0)^2 + \left(y - \sqrt{\frac{3519}{400}}\right)^2 + \left(z - \frac{9}{20}\right)^2 = 9$$

$$\left(x - \sqrt{\frac{3519}{400}}\right)^2 + (y - 0)^2 + \left(z - \frac{9}{20}\right)^2 = 9$$

$$x^2 + y^2 + z^2 \leq 100.01 > 99.99$$

$$\text{Find}(x, y, z) = \begin{pmatrix} 2.999 \\ 2.999 \\ 0.537 \end{pmatrix}$$