

# PERMEABILITEETIN MITTAUSMENETELMÄN KARTOITUS

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Muovitekniikan koulutusohjelma  
Opinnäytetyö  
Kevät 2007  
Karri Pöntinen

Lahden ammattikorkeakoulu  
Muovitekniikan koulutusohjelma

PÖNTINEN, KARRI:

Permeabiliteetin mittaussuomenelman kartoitus

Muovitekniikan opinnäytetyö, 34 sivua

Kevät 2007

## TIIVISTELMÄ

---

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on kartoittaa lujitteiden permeabiliteetin mittauslaitteistot ja pyrkiä löytämään kaupallisia laitteistoja kyseisen suureen mittaamiseen. Kartoittaminen tehdään hakemalla tämänhetkistä tietoa maailmalta internetistä sekä käymällä sähköposti- ja puhelinkeskusteluja lujitteiden permeabiliteetin asiantuntijoiden kanssa.

Permeabiliteetti kuvaa materiaalin nesteenläpäisykykyä. Permeabiliteetti tietoa tarvitaan simuloitaessa muotintäyttymistä valmistettaessa muovikomposiittituotteita suljetun muotinmenetelmillä. Simulointia hyväksikäyttämällä voidaan tuotteen valmistusprosessi optimoida ja täten parantaa tuotteen valmistamisen kannattavuutta.

Lujitteiden permeabiliteetin mittaamisesta on monia eri variaatioita. Mittaukset voidaan kuitenkin jakaa kahteen pääryhmään: tasonmukaisiin sekä säteen mukaisiin menetelmiin. Näistä on edelleen omia variaatioita sen mukaan, kuinka mittaukset suoritetaan. Mittaukset voidaan suorittaa esim. kuivasta tai märästä lujitteesta käyttäen joko vakioinjektiopainetta tai vakiovirtausnopeutta.

Lujitteiden permeabiliteettimittaukset ovat tunnettuja huonosta toistettavuudesta, ja eri laitosten suorittamissa mittauksissa on havaittu hajontaa. Tämä selittyy osaksi sillä, ettei mittauksiin ole standardeja. Parhailaan maailmalla suoritetaankin projekteja, joissa tutkitaan, mistä kyseinen hajonta mittaustuloksiin syntyy. Tulevaisuuden tavoitteena on standardisoida lujitteiden permeabiliteetti mittaussuomenelmä, mutta siihen kuuluu todennäköisesti vielä paljon aikaa.

Työn aikana löysin muutaman kaupallisen laitoksen, jotka rakentavat toimeksiantojen mukaan mittauslaitteistoja sekä suorittavat asiakkaille lujitteiden permeabiliteettimittauksia.

Avainsanat: lujite, permeabiliteetti, mittauslaitteisto, simulointi

Lahti University of Applied Sciences  
Faculty of Technology

PÖNTINEN, KARRI:

Equipment for Measuring Permeability

Bachelor's Thesis in Plastics Engineering, 34 pages

Spring 2007

ABSTRACT

---

The aim of this Bachelor's thesis was to find out about commercially available measuring equipment for the characterization of permeability. This study was done by searching current information from the Internet and with email and phone conversations with reinforcement permeability professionals.

Permeability describes how easily liquid flows in a porous material. The information is needed for mould filling simulations in liquid composite moulding. With the use of the simulations it is possible to optimize the manufacturing process and thus receive better profitability.

There are many different variations in measuring the permeability of reinforcements. The measurement methods can be divided into two main groups: parallel and radial techniques. These can further be divided into different variations based on how the measurements are performed. It is possible to measure unsaturated or saturated permeability either with a constant injection pressure or with a constant flow rate etc.

The permeability measurements of the reinforcements are well known of their poor repeatability and there are discrepancies in the results between different institutions. That is partly explained with the fact that permeability measurements are not standardized. At the moment there are research projects going on to explain the scatter of the results between the different institutions. The goal is to standardize the measurements in the future but that will most likely still take a while.

During this thesis I found a few institutions who build tailor-made commercially available equipments for the characterization of permeability. Those institutions also perform permeability measurements to customers.

Key words: Reinforcement, permeability, measuring equipment, simulation

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	AHLSTROM GLASSFIBRE	2
3	LUJITTEET	3
4	MUOVIKOMPOSITIT	4
5	INJEKTIONENETELMÄT	5
	5.1 Alipaineinjektio	5
	5.2 Paineinjektio (RTM)	7
	5.3 Kalvoinjektio	8
6	DARCYN LAKI JA PERMEABILITEETTI	9
7	SIMULOINTI	11
8	MITTAUSMENETELMIEN PERIAATTEET	12
	8.1 Mittausten alkuvalmistelut	13
	8.1.1 Näytteiden leikkaaminen	13
	8.1.2 Lujitteiden kokoonpuristuvuus	14
	8.2 Lineaarinen testaus	15
	8.3 Säteen mukaiset menetelmät	16
	8.3.1 Vakiopaineella testaus	17
	8.3.2 Vakiovirtausnopeudella testaus	18
9	MITTAUSMENETELMIEN ARVIOINTIA	18
10	MITTAUSMENETELMIEN KARTOITTAMINEN	20
	10.1 Sicomp	20
	10.2 Pole de Plasturgie de l'Est (PPE)	22
	10.3 Onera	23
	10.4 Plymouthin yliopisto	24
	10.5 Delawaren yliopisto, (CCM)	25
	10.6 Round- Robin tutkimus	27

10.7	Yhteyshenkilöni	28
11	NÄYTTEIDEN LÄHETTÄMINEN MITTAUKSIIN	28
12	YHTEENVETO	30
13	LÄHTEET	32

## 1 JOHDANTO

Tämän insinööriyön tarkoituksena on kartoittaa olemassa olevat vaihtoehdot permeabiliteetin mittaamiseen sekä mahdollisesti hankkia tai suunnitella mittalaitteisto kyseisen suureen mittaamiseen. Työn teettäjänä on Ahlstrom Glassfibre. Lähtökohdat työhön ovat, että työni ohjaajana toimiva tuotekehityspäällikkö Rainer Bergström on ollut mukana permeabiliteetti mittaushankkeissa v. 1998, jonka jälkeen yrityksessä ei ole seurattu, mitä permeabiliteetin mittaustekniikassa ja laittekehityksessä on tapahtunut vuosien saatossa, eikä yrityksessä ole laitteistoa varsinaisen permeabiliteetin mittaamisen, vaan käytössä on asiakkaan toiveiden mukainen menetelmä hartsin virtausominaisuuksien seuraamiseen lujitteissa.

Permeabiliteetti kuvaa materiaalin nesteenläpäisykykyä eli tässä yhteydessä lujitteen hartsinjohtokykyä. Kyseistä suuretta tarvitaan muotin täyttymissimuloinneissa valmistettaessa lujitemuovituotteita injektio menetelmillä. Simuloinnilla nähdään injektioinnissa mahdollisesti syntyvät ongelmat muotin täyttymisessä jo suunnitteluvaiheessa, ja täten vältetään kalliilta, mahdollisesti epäonnistuneilta sekä aikaa vieviltä käytännön kokeilta. Permeabiliteetti tiedolla voidaan edelleen myös kehittää lujitemateriaalia paremmin hartsia johtavaksi ja tätä kautta lyhentämään valmistuksen muottiaikaa ja täten parantamaan tuottavuutta.

Permeabiliteetti mittausteijtojen kartoittamisen suoritin sähköposti- ja puhelin keskustelujen avulla. Työssä esittelen tämänhetkisiä maailmalta löytyviä lujitteiden permeabiliteettimittausteijtoja ja laiteistoja, jotka suorittavat permeabiliteettimittauksia asiakkaiden toimeksiannoista. Työni lopuksi lähetimme kaksi lujitetta permeabiliteettimittauksiin Ranskaan sekä Ruotsiin.

## 2 AHLSTROM GLASSFIBRE

Ahlstrom on korkealaatuisten kuitumateriaalien johtava kehittäjä, valmistaja ja markkinoija. Yhtiön valmistamia kuitukankaita ja erikoispapereita käytetään monissa jokapäiväisissä tuotteissa, kuten suodattimissa, hygieniapyyhkeissä, lattiamaateriaaleissa, etiketeissä sekä teipeissä. (Ahlstrom 2006.)

Ahlstrom on perustettu vuonna 1851. Yhtiön kasvu ja kehittyminen kuituvalmistajaksi on perustunut yritysostoihin ja investointeihin sekä ympäröivän maailman muutosten seurantaan. Yhtiöllä on palveluksessa n. 5700 työntekijää yli 20 maassa kuudessa maanosassa. Vuonna 2005 Ahlstromin liikevaihto oli 1,55 miljardia euroa. Ahlstromin osake on noteraattu Helsingin Pörssissä. (Ahlstrom 2006.)

Liikevaihdon mukaan laskettuna Ahlstromin tärkeimpiä päämarkkina-alueet ovat Eurooppa (64%), Pohjois- Amerikka (22%), Aasia (9%) ja muu maailma (5%). Ahlstromin liiketoiminta raportoidaan kahtena toimialana: FiberComposites (Kuitukomposiitit) sekä Specialty Papers (Erikoispaperit). Toimialat koostuvat operatiivisesti viidestä liiketoiminta- alueesta: kuitukankaat, suodatinmateriaalit, lasikuitumateriaalit, etiketti- ja pakkauspaperit sekä tekniset paperit. FiberComposit-toimialan markkinoiden arvioidaan kasvavan vuodessa noin 6-7% ja Specialty Papers- toimialan markkinoiden noin 3-4% vuodessa. (Ahlstrom 2006.)

Ahlstromin lasikuitumateriaalit liiketoiminta-alue valmistaa lasikuitulujitteita, erikoislujitteita sekä lasihuopaa. Tuotteet valmistetaan rullatavarana pääosin Ahlstromin itse tuottamasta lasikuidusta. Tuotteita käytetään useissa eri sovelluksissa, kuten PVC- lattiamatoissa, tuulivoimaloissa ja veneteollisuudessa. (Ahlstrom 2006.)

### 3 LUJITTEET

Lujitteita käytetään muovien mekaanisten ominaisuuksien parantamiseen. Pääasiallisesti lujitteiden tehtävänä on komposiittiin kohdistuvien kuormitusten kantaminen. Lujitteet sitoo toisiinsa matriisimuovi, joka myös siirtää kuormitukset lujitteiden kannettaviksi sekä suojaa lujitteita. Muovien mekaanisia ominaisuuksia pystytään parantamaan myös täyte- ja lisäaineilla, mutta varsinaisiksi lujitteiksi lasketaan vain erityisesti tätä tarkoitusta varten valmistetut ja käsitellyt kuidut. Merkittävin lujite niin kaupallisesti kuin teollisestikin on lasikuitu, jonka osuus kaikesta lujitekäytöstä v. 2004 oli runsas 95%. Muita tärkeitä lujitteita ovat hiili- ja aramidikuidut. (Saarela, Airasmaa, Kokko, Skrifvars & Komppa 2003, 74.)

Muovikomposiittituotteiden valmistamisessa eniten käytettyjä ovat ns. tasolujitteet, joista lujitematot sekä lujitekankaat ovat yleisimpiä. Lujitematto valmistetaan katkotuista tai jatkuvista lujitekuiduista sideaineen avulla siten, että kuidut ovat suuntautuneet matontasossa satunnaisesti. Yleisesti käytettyjä nimikkeitä tuotteille ovat jatkuvakuituinen matto sekä katkokuitumatto. Toisinaan kevyttä lujitemattoa kutsutaan huovaksi. Yhdensuuntaiskangas on yksinkertaisin lujitekangas, jossa keskenään yhdensuuntaiset kuitukimput yhdistetään toisiinsa sidelangoilla. Kudos on yleisesti käytetty kangastyyppi, jossa toisiaan vastaan kohtisuorassa olevat lujitekimput- tai langat risteilevät toistensa yli ja ali. Mikäli useita kerroskankaita on yhdistetty toisiinsa neulomalla tai tikkaamalla, puhutaan kerroskankaista. Kuitujen suunnan vaihdellessa kerroksittain, kutsutaan kerroskangasta moniaksaali kankaaksi tai moniaksaali lujitteeksi. Niin sanotuissa 3D- lujitetuotteissa merkittävä osa lujitekuiduista risteilee tuotteen paksuussuunnassa. (Saarela ym. 2003, 20.)



#### 4 MUOVIKOMPOSIITIT

Komposiitti on kahden tai useamman materiaalin yhdistelmä, jossa materiaalit toimivat yhdessä, mutta eivät ole lienneet tai sulautuneet toisiinsa. Materiaaliyhdistelmän kokonaisuudeksi sitovaa ainesosaa kutsutaan matriisiksi. (Saarela ym. 2003, 17.)

Muovikomposiiteissa matriisina toimii muoviaine (kertamuovi). Lujitemuovisovelluksissa yleisesti käytettyjä kertamuoveja ovat polyesterit, epoksit ja vinyylies-terit. Näillä jokaisella on omat ominaisuutensa, mikä antaa valmistajalle mahdolli-suuden valita sopiva kertamuovi tuotteelleen. Kertamuoveja lujitetaan kuiduilla, joista tavallisimmin käytettyjä ovat lasi-, hiili- ja aramidikuidut. Kuituja on saata-vina monissa erimuodoissa käyttökohteen vaatimusten mukaisesti. (Luthy 2003.)

Muovikomposiittien nykyaikaisen käytön voidaan katsoa alkaneen 1900-luvun alussa, jolloin myönnettiin ensimmäinen fenolimuovien lujittamista koskeva pa-tentti. Muovikomposiitit saivat kaupallista arvoa kuitenkin vasta 1930-luvulla, jolloin kehitettiin polyesteri- ja epoksimuovit sekä aloitettiin lasikuitujen kaupal-linen tuotanto. (Saarela ym. 2003, 13.)

Muovikomposiitit ovat osoittautuneet käyttöhistoriansa aikana kilpailukykyisiksi vaihtoehtoiksi metalleille ja muille materiaaleille. Tärkeimpinä etuina muihin materiaaleihin verrattuna ovat suuri lujuus ja jäykkyys suhteutettuna ominaispai-noon, mahdollisuus suunnata lujuusominaisuuksia, muotoiluvapaus, mahdollisuus valmistaa suuria rakenteita yhtenä kokonaisuutena sekä muoveille tyypillinen hyvä kemiallinen kestävyys. Nykyaikana muovikomposiitteja käytetään mm. lentokone- ja veneteollisuudessa, tuulivoimaloissa, prosessiteollisuudessa, rakennusteollisuu-dessa, koneenrakennuksessa, kuljetusvälineissä sekä urheiluteollisuudessa. (Saa-rela ym. 2003, 13.)

## 5 INJEKTIONENETELMÄT

Injektionenetelmät sisältävät useita eri variaatioita. Periaatteena on, että lujitteet asetetaan muottiin ja muotti suljetaan, minkä jälkeen nestemäinen hartsi johdetaan muottiin. Kappale kovetetaan ja poistetaan muotista. Variaatioina ovat esim., kuinka hartsi johdetaan muottiin sekä kuinka lujitteet on asetettu muotin pinnalle. (Liquid composite Moulding 2001, 3.)

Valmistettaessa lujitetuotteita injektionenetelmällä on käytössä lukuisia eri laitteistoja erilaisine variaatioineen, ja tämän seurauksena saavutettu valinnanvaran mahdollisuus injektioinneissa eri sovelluksiin toimii yhtenä tärkeimpänä tekijänä injektointimenetelmien kiinnostavuuteen. Laitteistojen valmistajat pystyvät toimitamaan sopivat ja järkevät välineet niin prototyyppien valmistamiseen kuin massatuotantoonkin. Laajan laitteisto markkinoiden johdosta on tärkeää ymmärtää valmistettavan tuotteen vaatimukset ja valita laitteisto sen mukaisesti. (Rudd, Long, Kendall & Mangin 1997, 124.)

Injektointimenetelmien edut käsilaminointiin verrattaessa ovat nopeus sekä parempi toistettavuus. Lisäksi injektointiprosessit ovat suljettuja, jolloin haihtuvia aineita ei leviä työympäristöön. Lujitteiden asettelu muottiin on helpohkoa, sillä käsiteltävät lujitteet ovat kuivia. (Saarela ym. 2003, 168.)

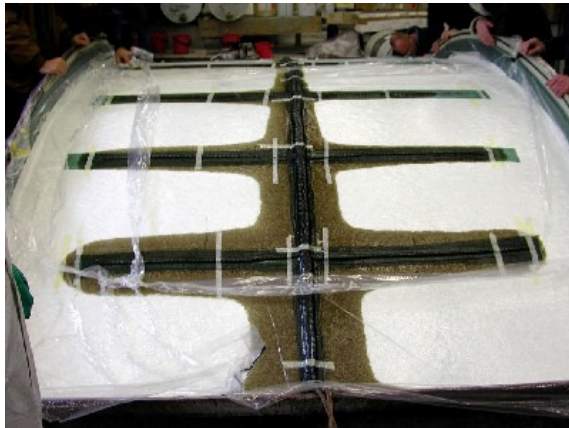
### 5.1 Alipaineinjektio

Alipaineinjektiossa tuote valmistetaan avoimella muotilla. Menetelmässä toisena muottipuoliskona toimii alipainesäkki. Hartsi johdetaan lujitteisiin alipaineen avulla. Erikoislujitteilla sekä erillisillä hartsinjohtokerroksilla voidaan edistää hartsinvirtausta. Haluttaessa muotin molemmat pinnat sileiksi tai sarjakoon ollessa riittävän suuri voidaan alipainesäkki korvata joustavalla muottipuoliskolla. (Saarela ym. 2003, 167.)

Menetelmä on yleisesti käytetty lievästi kuormitettujen rakenteiden valmistuksessa (esim. veneet ja tuulivoimaloiden lavat). Alipaineinjektio sopiikin hyvin laajoille ja yksinkertaisille kappaleille. Menetelmän etuina ovat laitteiston yksinkertaisuus ja halpa hinta. Haittapuolina menetelmä on suurelta osin käsityötä ja huonosti automatisoitavissa. (Komposiittiluennot 2004.)

Alipaineinjektio tuotteen valmistusprosessi voidaan suorittaa esim. seuraavasti:

1. Suoritetaan injektointi esivalmistelut muotille puhdistamalla muotti sekä levittämällä siihen irrotusainetta, jonka jälkeen asetetaan lujitteet muottiin.
2. Jos muotissa ei ole injektiokanavistoa, asetetaan se paikoilleen, jonka jälkeen muotti suljetaan alipainesäkillä tai joustavalla muottipuoliskolla.
3. Tarkastetaan muotin tiiveys ja injektoidaan hartsi lujitteisiin.
4. Kappaleen kovetettua irrotetaan se muotista ja tarvittaessa viimeistellään se lopullisiin mittoihin sekä tarvittaessa jälki kovetetaan.
5. Tarkastetaan kappale. (Jussila 2006.)



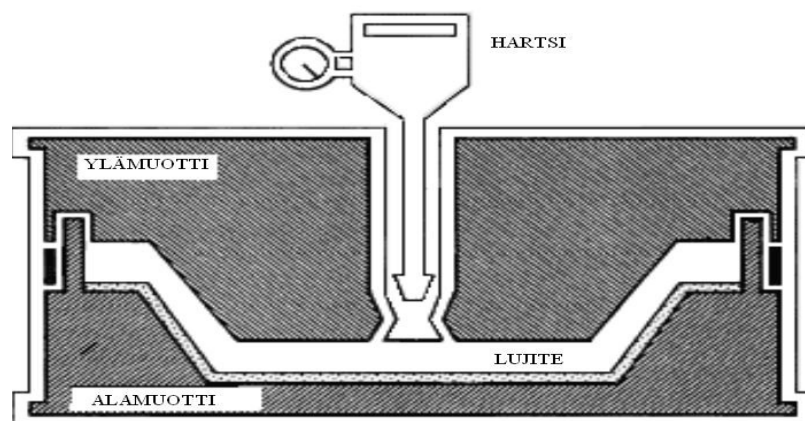
KUVIO 1. Injektio tilanteessa hartsi injektoiduu läpinäkyvässä alipainesäkillä syötökanavista lujitteisiin edeten kohti muotinreunoilla olevia imukanavia

## 5.2 Paineinjektio (RTM)

Paineinjektiossa eli RTM - menetelmässä (Resin Transfer Moulding) lujitteet asetetaan muottiin, muotti suljetaan ja hartsia injektoidaan ylipaineella muottiin. Kappale kovetetaan ja otetaan pois muotista. (Lundström 1993, 1.)

Muottimateriaaleina käytetään lujitemuovia tai metallia. Sarjakoko voi vaihdella muutamasta sadasta kymmeneen tuhanteen. Valmistettavien kappaleiden koko on useimmiten muutamista kiloista kymmeneen kiloon. (Sinex 2006.)

Valmistettaessa lujitetuotteita paineinjektiolla aikaansaadaan hyvä pinnanlaatu tuotteelle, eikä viimeistelyä juurikaan tarvita. Valmistusprosessin simulointi ja kontrollointi ovat mahdollistaneet monimutkaisten muovikomposiittikappaleiden valmistamisen. Menetelmä mahdollistaa myös korkean automaatioasteen. Haittapuolena on usein monimutkaiset ja kalliit muottisysteemit. (Luthy 2003; Komposiittiluennot 2004.)

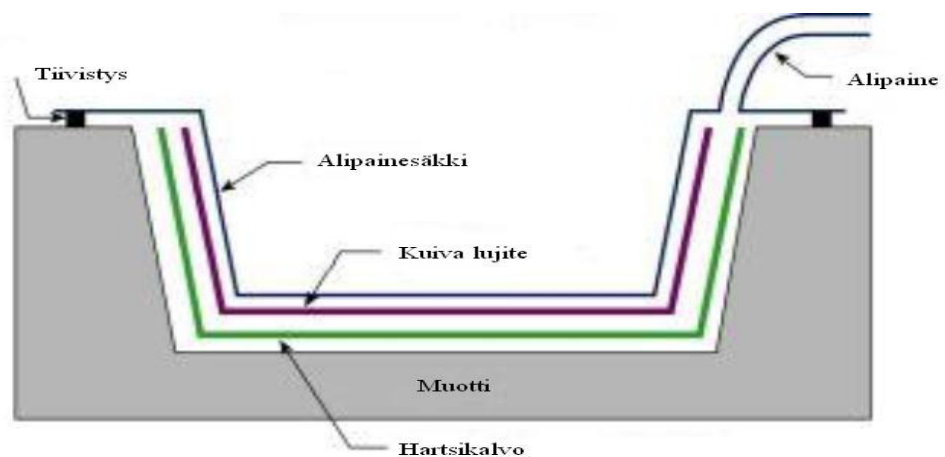


KUVIO 2. Paineinjektion periaate

### 5.3 Kalvoinjektio

Kalvoinjektioissa matriisimuovi (hartsikalvo) asetetaan muotin pinnalle yhtenä kerroksena tai kerroksittain kuivien lujitekerrosten väliin. Hartsia on puolikovassa B-tilassa ja se lämmitetään juoksevaksi, jolloin hartsia kastelee lujitteet edeten pääasiassa lujitteen paksuussuunnassa. Menetelmän etuna onkin täten erittäin lyhyt virtausmatka. (Saarela ym. 2003, 168.)

Kalvoinjektio on kehitetty erityisesti ilmailuteollisuuden tarpeisiin ja soveltuu hyvin levymäisten, korkeasti kuormitettujen rakenteiden valmistamiseen. Etuina ovat mm. edullinen muottisysteemi ja laajojen kappaleiden valmistamisen mahdollisuus. (Komposiittiluennot 2004.)



KUVIO 3. Kalvoinjektion periaate

## 6 DARCYN LAKI JA PERMEABILITEETTI

Lujitteiden permeabiliteetti on tarpeellista tietää muotin täyttymisajan ja hartsin virtauskäyttäytymisen ennustamiseksi. Permeabiliteettitieto on myös oleellista kehitettäessä korkean permeabiliteetin omaavia lujitteita, jotka mahdollistavat lujien komposiittien valmistamisen kohtuulliseen aikaan ja hintaan. (Lundström, Stenberg, Bergström, Partanen & Birkeland 1998, 1.)

Ennustamalla virtauksen käyttäytymistä, muotin täyttymisaikaa ja painejakaumaa voidaan injektointiprosessi optimoida jo suunnitteluvaiheessa tutkimalla vaihtoehtoiset syöttökanavien sijainnit ja tämän vaikutukset injektoinnin onnistumiseen. Tarkat muotin täyttymissimulaatiot perustuvat lujitteen permeabiliteettiarvoon, joka johdetaan Darcyn lain mukaan. (Rudd ym. 1997, 204.)

Simuloinnin etuina ovat mahdollisten ongelmakohtien havainnollistaminen suunnitteluvaiheessa ja täten välttää kalliit, aikaa vievät ja mahdollisesti epäonnistuneet käytännön kokeet. Lisäksi permeabiliteetti tiedolla voidaan kehittää lujitetta paremmin hartsia johtavaksi ja tätä kautta lyhentämään valmistuksen sykliä ja täten parantamaan tuottavuutta.

Permeabiliteetti on suure, joka kuvaa, kuinka neste virtaa huokoisen väliaineen läpi ja on ainoastaan riippuvainen väliaineen rakenteesta. Darcyn laki on tärkein huokoisten materiaalien virtausta koskeva laki, koska se määrittelee permeabiliteetin mitattavien suureiden avulla. (Bäcklund, Zenkert & Åström. 1997, 318.; Airaksinen 2005.)

Darcyn laki yleisessä muodossa on:

$$v = \frac{K}{\mu} p \quad (1)$$

missä  $v$  on nopeus (m/s),  $K$  permeabiliteetti ( $m^2$ ),  $\mu$  viskositeetti (Pas) ja  $p$  paine (MPa). (Lundström ym. 1998, 1.)

Darcyn lakia voidaan käyttää virtauksen kuvaamiseen huokoisessa väliaineessa, mikäli neste on Newtonilaista (kokoon puristumatonta) sekä paineen muutos on riittävän alhainen, jotta huokoinen materiaali pysyy liikkumattomana. (Lundström 1993, 3).

Yleensä lujitteiden permeabiliteetti on suunnasta riippuvainen, ja täten sillä on eri arvot eri suuntiin ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Prosesseissa pääasiallisesti luotetaan tason mukaiseen ( $x$ ,  $y$ ) virtaukseen muotin täyttymisessä ja tämän seurauksena tason mukaiset permeabiliteetit ovat tärkeimpiä. Paksuille kappaleille voi olla tarpeellista mitata permeabiliteetti myös paksuussuuntaan  $z$ . Permeabiliteetti on yleisesti määritetty kahteen tärkeimpään tason mukaiseen suuntaan sekä yhteen paksuussuuntaan. Tyypilliset lujitteiden permeabiliteetti-arvot ovat välillä  $10^{-8} m^2 - 10^{-12} m^2$ . (Rudd ym. 1997, 204-205; Raynal 2007.)

Impregnointiprosessi on periaatteessa yksinkertainen, mutta virtaus lujitteen läpi mikroskooppisella tasolla on monimutkainen. Permeabiliteettiin vaikuttaa lujitteen fysikaalinen rakenne, kuten huokosten koko, karheus, tortuositeetti (nesteiden kulkemien reittien monimutkaisuus) sekä kanavien pituus. Nämä tekijät riippuvat puolestaan kokoonpuristumisaineesta, lasikuiduntilavuudesta, kuidun rakenteesta, paksuudesta sekä lujitekerrosten suuntauksista. (Rudd ym. 1997, 205.)

## 7 SIMULOINTI

Yleisimmin käytettyjä ja parhaiten tunnettuja injektio menetelmien muotin täyttymissimulaatio- ohjelmia ovat PAM- RTM sekä Polyworx. Simulointiohjelmien tarkkuus käytännön injektio tilanteisiin verrattaessa riippuu pitkälti injektoidavan tuotteen geometriasta. Simuloitaessa yksinkertaisen geometrian omaavaa tuotetta, jolla on alhainen lujitepitoisuus, päästään todella lähelle käytännön tilannetta. Monimutkaisten tuotteiden simuloiminen on hieman hankalampaa ja simuloinnin tarkkuus voi olla n. 15-20% verrattaessa käytännössä toteutuneeseen tilanteeseen. (Laine 2007. & Raynal 2007.)

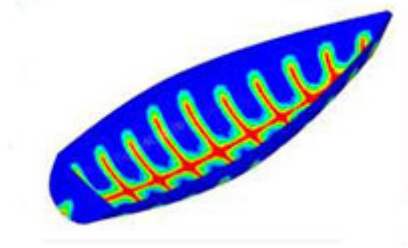
Tärkeitä simuloinneista saatavia tietoja ovat muotin täyttymisaika sekä -jakauma. Näiden mukaan on kehitetty erilaisia kaavoja. Esimerkiksi Fracchia ym. ovat kehittäneet seuraavan kaavan:

$$T = C \frac{\mu L^2 \phi}{\Delta p K} \quad (2)$$

$T$  on muotin täyttymisaika (s),  $\mu$  hartsin viskositeetti (Pas),  $L$  muotin pituus (m),  $\phi$  huokoisuus (%),  $p$  paine (MPa),  $K$  lujitteen permeabiliteetti ja  $C$  vakio, joka on riippuvainen injektio menetelmästä. (Bäcklund ym. 1997, 317-318.)

Lujitteesta simulointiohjelmiin tarvitaan tiedot mm. keskimääräisestä lujitepitoisuudesta, lujitepinon paksuudesta sekä permeabiliteeteista erisuuntiin. Permeabiliteetit voidaan arvioida pelkästään yhdestä lujitteesta, mutta tarkempien ja luotettavampien tulosten ja simulaatioiden saavuttamiseksi tulisi permeabiliteettimittaukset suorittaa koko lujitepinolle. (Holmberg 2006; Laine 2007.)





KUVIO 4. Simulointiesimerkki

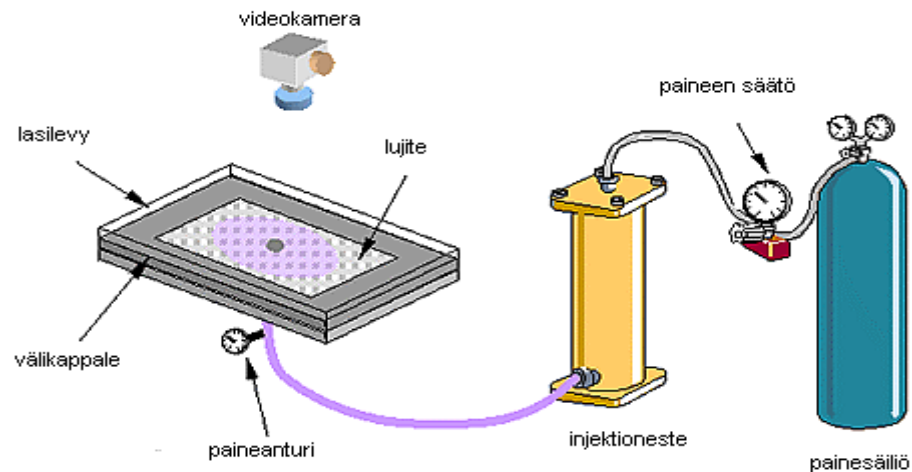
## 8 MITTAUSMENETELMIEN PERIAATTEET

Tason mukaiset lujitteiden permeabiliteettimittaukset voidaan jakaa kahteen pääryhmään; lineaariseen ja säteen mukaiseen menetelmään. Molemmista näistä on olemassa monia eri variaatioita, kuten suoritetaanko mittaukset kuivalle vai märälle lujitteelle, käytetäänkö vakiovirtausnopeutta vai painetta jne. Yleisesti käytettyjä nesteitä mittauksissa ovat mm. siirapit sekä silikoni- ja mineraaliöljyt, jotka ovat miellyttävämpiä käyttää kuin hartsit johtuen liuottimien puuttumisesta. (Lundström 1998, 2.; Rudd ym. 1997, 206.)

Lineaarisessa menetelmässä neste johdetaan lujitteeseen muotin reunasta ja neste etenee yhdensuuntaisesti kohti muotin toisessa päässä olevaa tyhjennysaukkoa. Säteen mukaisessa menetelmässä neste puolestaan johdetaan lujitteen keskelle, josta se etenee kohti reunoja. Testauslaitteiston toinen muottipuolisko on usein läpinäkyvä, jotta virtauksen etenemistä voidaan seurata visuaalisesti. Mittauslaitteistoa suunniteltaessa ja käytettäessä on oltava erittäin tarkkana, sillä potentiaaliset riskit esimerkiksi muotin haljetessa ovat erittäin vakavia. Aiheelliset varoitustenpiteet tulee varmistaa, ettei laitteistoa ole kuormitettu liiallisilla paineilla mittauksien aikana. (Rudd ym. 1997, 206.)

Mittaukset voidaan tehdä joko kuivalle tai märälle näytteelle. Kuten useimmissa injektioinneissa, kuivan lujitteen testauksessa tapahtuu impregnointia ja ilman siirtymistä kuivasta lujitteesta pois. Tämän seurauksena kyllästämättömästä lujitteesta mitattu permeabiliteetti sisältää virtauksen vastustusta neste/lujiteyhdistelmän

pintaenergiasta ja kapillaarivoimista johtuen. Märästä lujitteesta testattaessa nesteen annetaan täyttää muotti täydellisesti, jonka jälkeen virtausnopeus tai paineenmuutos ylläpidetään vakiona ennen mittausten aloittamista. Sekä lineaarista että säteen mukaista menetelmää voidaan käyttää kuivasta tai märästä lujitteesta testattaessa. Säteen mukaisilla testeillä mitataan yleensä kyllästämättömiä ja lineaarisella kyllästettyjä permeabiliteetteja. (Rudd ym. 1997, 206-207.)



KUVIO 5. Mittauksen periaate

## 8.1 Mittausten alkuvalmistelut

Ennen varsinaisten mittausten aloittamista tulee suorittaa mittausten alkuvalmistelut. Alkuvalmistelut tulee suorittaa jokaisella mittauskerralla täysin identtisesti, jotta mittauksista saatuja tuloksia voidaan luotettavasti verrata toisiinsa.

### 8.1.1 Näytteiden leikkaaminen

Lujitteiden leikkaaminen on erittäin tärkeä asia kokeen lopputulosten kannalta. Samankokoisten lujitteiden leikkaaminen voidaan varmistaa valmistamalla leikkausmuotti lujitteiden leikkausta varten. Lujitteiden leikkaamiseen on myös olemassa täysin tietokoneohjattu Gerberin leikkauslaite. Jokaisen testattavan lujitteen leikkaus tulee suorittaa samalla menetelmällä, jotta saadaan toisiinsa nähden ver-

tailukelpoiset näytteet. (Gebard & Sandlund 1994; Sicomp 2006.)

### 8.1.2 Lujitteiden kokoonpuristuvuus

Lujitteiden kokoonpuristuvuus vaihtelee eri lujitetyyppien kesken. Kuiva lujitenippu puristuu paineen vaikutuksesta tiettyyn paksuuteen, joka määrää lopputuotteen lujitepitoisuuden. Tyypillinen lopputuotteen lujitetilavuus on  $50\% \pm 5\%$ . (Siikonen, Kokko, Anttila, Laitila & Karttunen 2000, 9.)

Kokoonpuristuvuuden mittaaminen antaa tiedon lujitetilavuudesta, joka voidaan saavuttaa, mikäli muotissa vaikuttavat voimat tunnetaan. Täten mittauksella voidaan valita sopivat lujitteet annetulle lujitetilavuudelle. (Bäcklund ym.1997, 318.)

Kokoonpuristumista voidaan mitata esim. Instron 8051 laitteella, jossa lujitekerrokset asetetaan kahden levyn väliin, joiden mitat tiedetään. Tämän jälkeen mitataan lujitepinon kokoonpuristumiseen vaadittavaa voimaa levyjen välisen etäisyyden funktiona.

Lujitetilavuus  $V_f$ , saadaan kaavasta:

$$V_f = \frac{m\zeta}{tp} \quad (3)$$

jossa  $m$  on kerrosten lukumäärä,  $\zeta$  lujitteen neliöpaino ( $\text{kg/m}^2$ ),  $t$  lautasten välinen etäisyys (m) ja  $p$  kuitujen tiheys ( $\text{kg/m}^3$ ).

Kerrosten lukumäärä riippuu yksittäisen lujitteen paksuudesta, levyjen välinen etäisyys saadaan laitteelta ja lujitteen paino punnitsemalla näyte. Alkutilavuusosuus saadaan, kun molemmat levyt koskettavat lujitekerrosta. (Bäcklund ym. 1997, 319.)

## 8.2 Lineaarinen testaus

Tyypillinen lineaarisen testauksen välineistö koostuu ylä- ja alamuotista. Yleensä alamuotin materiaalina on teräs ja ylämuotin materiaalina läpinäkyvä muovi tai lasi. Muotin sisällä olevilla välikappaleilla voidaan säätää muotin pesän korkeutta. Ylämuotin päälle asennetaan teräskehys, jonka tarkoituksena on vahvistaa muotia, jotta se kestää injektoinnin vääntyilemättä. Muottipesän painetta mittaavat paineanturit, jotka on sijoitettu tasaisin välimatkoin pituussuuntaisesti muottipesään. Anturit asennetaan syvennykseen muotin pinnalle, jotta ne eivät vahingoituisi mittauksissa. Termoelementit mittaavat nesteen lämpötilaa muottipesän keskellä viskositeetin vertaamista varten. (Rudd ym. 1997, 207.)

Lineaarisen testauksen suurimpia etuja ovat testivälineistön yksinkertaisuus ja tulosten laskemisen helppous. Menetelmässä tulee kuitenkin olla tarkkana näytteen muottiin asettamisen suhteen, jotta ns. reunailmiötä ei pääse tapahtumaan. Reunailmiöllä tarkoitetaan, että neste virtaa nopeammin muotin reunoilla kuin keskellä. Tämä on mahdollista, mikäli näytteen ja muotinreunan väliin jää rako. Kyseinen ilmiö voi väärentää mittaustuloksia suuresti. Reunailmiötä voidaan tarkkailla visuaalisesti ylämuotin läpi ja kontrolloida huolellisella näytteen asetelulla sekä asianmukaisilla tiivistyksillä. (Rudd ym. 1997, 207-208.)

Linearisessa menetelmässä virtauksen oletetaan olevan vain yksisuuntaista ja täten permeabiliteetin laskemiseen voidaan käyttää Darcyn lakia seuraavasti:

$$\frac{Q}{A} = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta p}{L} \quad (4)$$

$$t = \frac{1}{2} \frac{\mu}{K} \frac{(1 - V_f)}{\Delta p} x_f^2 \quad (5)$$

$Q$  on tilavuusvirta ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $A$  muotin poikkipinta-ala ( $\text{m}^2$ ),  $K$  lujitteen permeabiliteetti ( $\text{m}^2$ ),  $\Delta p$  paineen muutos (MPa),  $L$  näytteen pituus (m),  $t$  aika mittauksen alusta (s),  $V_f$  kuitujen tilavuusosuus (%) ja  $x_f$  virtauksen asema (m).

Kaavaa (4) käytetään määristä lujitteista mitattaessa ja kaavaa (5) kuivista lujitteista mitattaessa. Näistä saatuja arvoja voidaan käyttää suoraan eri lujitteiden permeabiliteettien vertailemiseen, mikäli mittaukset on suoritettu samalla laitteistolla. (Lundström ym. 1998, 3.)

Kuivasta lujitteesta mitattaessa virtauksen etenemää seurataan visuaalisesti läpinäkyvän muotin läpi. Ylämuottiin voidaan piirtää viivat halutuun välimatkoihin ja virtauksen ylittäessä viivan, kirjataan matka sekä virtaukseen kulunut aika ylös. Virtauksen etenemää voidaan myös seurata antureiden avulla niiden ollessa riittävän tarkat rekisteröimään virtausta. Mahdollisen reunailmiön muodostumista voidaan havainnoida visuaalisesti. (Lundström ym. 1998; Rudd ym. 1997, 208.)

Määristä lujitteesta testattaessa muotti täytetään ensin nesteellä, jolloin lujitteet kyllästyvät. Kyllästyksen aikana voidaan suorittaa mittaukset myös kuivasta lujitteesta. Nesteen annetaan virrata muotissa, kunnes saavutetaan vakaa ja tasapainoinen virtaus. Muotin toisessa päässä on ulostuloventtiili, josta neste kulkeutuu pois muotista. Tilavuusvirtaa laskettaessa ulostuloventtiilin alle asetetaan punnittu kuppi, johon kerätään tietynä ajanjaksona (3-6 min) lujitteen läpi virrannut neste. Lujitteen tilavuusosuutta voidaan muunnella säätämällä välikappaleilla muottipe-  
sän korkeutta. (Lundström ym. 1998; Rudd ym. 1997, 208.)

### 8.3 Säteen mukaiset menetelmät

Säteen mukaiset menetelmät tarjoavat kaksi merkittävää etua verrattaessa lineaariseen menetelmään. Menetelmällä saadaan mitattua lujitteen permeabiliteetit yhtäaikaisesti yhdellä mittauksella. Toiseksi, koska injektointi tapahtuu keskelle lujitetta, poistuvat reunailmiön vaikutukset testauksesta. (Rudd yms. 1997, 209.)

Mittauksessa valvotaan syöttöportin painetta, nesteen lämpötilaa sekä etenevää virtausta. Keskelle lujitetta tehdään usein reikä, jotta vältetään lujitteen paikallinen puristuminen, joka johtuu injektoitavan nesteen aiheuttamasta paineesta. Ympyränmuotoinen reikä edesauttaa myös nesteen johtumisen yhtäaikaaisesti kaikkiin lujitekerroksiin. (Rudd ym. 1997, 209.)

Säteen mukaista menetelmää käytettäessä lujitteen permeabiliteetin laskeminen sisältää useita erivaiheita. Se ei kuitenkaan aiheuta laskemiseen todellisia vaikeuksia tietokonetta hyväksikäytettäessä. (Lundström ym. 1998, 4.)

### 8.3.1 Vakiopaineella testaus

Mitattaessa lujitteen permeabiliteettia vakiopaineella säteen mukaisella menetelmällä on ylämuottina usein lasi tai läpinäkyvä muovi. Ylämuottina toimiva lasi tai muovilevy on suhteellisen paksu, mutta tästä huolimatta yleensä tarvitaan lisävahvistusta, jotta muotin taipuminen pysyy hyväksyttävissä rajoissa käytettäessä realistisia injektioaineita. Ylämuottiin piirretään ympyränmuotoiset ruudukot osoittamaan virtauksen etenemää. Vaihtoehtoisesti tämä voidaan automatisoida käyttämällä videokameraa kuvaamaan virtausta. Paineanturit mittaavat paikallista painetta ja termoelementit tallentavat nesteen lämpötilaa. Menetelmää käytetään kiuvan lujitteen permeabiliteetin määrittämiseen. (Rudd ym. 1997, 209-210.)

Permeabiliteetin laskeminen vakiopainetta ja säteen mukaista menetelmää käytettäessä perustuu virtauksen etenemään ajan funktiona. Laskukaavat on kehittänyt Hirt ym. Menetelmän suurimpia haittapuolia ovat muotin taipuminen korkeilla lujitepitoisuuksilla ja injektointipaineilla. (Rudd ym. 1997, 211.)

### 8.3.2 Vakiovirtausnopeudella testaus

Permeabiliteetin määrittäminen vakiovirtausnopeudella säteen mukaisella menetelmällä perustuu muottipesän paineenmuutoksiin. Menetelmällä voidaan mitata permeabiliteetit sekä kuivalle että märälle lujitteelle. (Rudd ym. 1997, 213.)

Menetelmän suurimpana etuna on, ettei ylämuotin tarvitse olla läpinäkyvä virtauksen seuraamista varten ja täten voidaan valita ylämuotin materiaali vapaasti ja välttyä muotin taipumisen aiheuttamista vääristymistä mittaustuloksissa. Lisäksi mittaukset voidaan suorittaa realistisesti todellisilla injektioilaitteilla. (Rudd ym. 1997, 213.)

Permeabiliteetin laskeminen vakiovirtausnopeudella säteen mukaisella menetelmällä testattaessa perustuu Chickin ym. johtamiin laskukaavoihin. Kaavat voidaan sujuvasti ratkaista yksinkertaisella laskuohjelmalla niin kuivalle kuin märälle lujitteelle. Kuivan lujitteen permeabiliteetin määrittämiseen käytetään paine-aika arvoja tietyssä kohdassa virtausta, kun taas märän lujitteen permeabiliteetti johdetaan paineenmuutoksesta kahden paineanturin välillä. (Rudd ym. 1997, 213.)

## 9 MITTAUSMENETELMIEN ARVIOINTIA

Permeabiliteettimittaukset ovat tunnettuja huonosta toistettavuudestaan. Eri laitosten suorittamissa mittauksissa saman lujitteen permeabiliteeteissa on havaittu suuria eroja. Lundströmin ym. suorittama tutkimus kuitenkin osoittaa positiivisia merkkejä, että eri laitoksissa voidaan mitata samanarvoisia permeabiliteetteja. Mittauksissa oli kuitenkin käytössä sama laitteisto ja mittaustapahtuma ohjeistettiin mittausten suorittajille. (Loendersloot 2006, 105.)

Mittaustuloksisten laaja hajonta on selitettävissä mittaustekniikoiden eri variaatioista. Lujitteen permeabiliteettia voidaan mitata tasonmukaisesti sekä paksuus-suuntaisesti. Lisäksi on kehitetty muutamia laitteita, joka mittaavat nämä kaikki

suunnat samanaikaisesti yhdellä mittauksella. Permeabiliteetti voi olla mitattuna kuivasta tai märästä lujitteesta, injektiopaine ja -neste voivat vaihdella. Injektiota voidaan kontrolloida joko vakiovirtausnopeudella tai vakio injektiopaineella. (Loendersloot 2006, 105-106.)

Mittauslaitteiston tyyppi ja prosessiasetukset aiheuttavat vaihteluita mitattaviin permeabiliteetteihin. Täten on tärkeää huomioida mittauksissa käytettävän laitteiston ja mittausasetusten vaikutus permeabiliteettiin. Lujitteen permeabiliteetti on hieman merkityksetön, mikäli ei tiedetä mittausasetuksia ja tekniikkaa. Toisaalta samantyyppiselle kankaalle eri laitteistoilla mitatut permeabiliteetit ovat hyödyllisiä, jotta voidaan oppia ymmärtämään eri mittausasetusten riippuvuutta permeabiliteettiin. Permeabiliteettimittaukset ovat myös itsessään erittäin herkkiä virheille. Myös tämä aiheuttaa kirjallisuudessa todettua lujitteiden permeabiliteettien hajoa- vaisuutta. Eri mittausmenetelmistä ja mittausolosuhteista johtuen permeabiliteettimittaukset ovat suositeltavia suorittaa olosuhteissa, jotka kuvaavat mahdollisimman hyvin lopullisen tuotteen valmistusolosuhteita. (Loendersloot 2006, 106; Rudd ym. 1997, 220.)

Lineaarisella ja säteen mukaisella menetelmällä on omat hyvät ja huonot puolensa, jotka nähdään taulukosta 1.

TAULUKKO 1. Lineaarisen ja säteen mukaisen menetelmän edut ja haitat

<b>Lineaarinen</b>	<b>Säteen mukainen</b>
+ Yksinkertainen matematiikka	Yhdellä mittauksella permeabiliteetit kah- teen suuntaan
+ Yksinkertainen koe	Reunailmiön puuttuminen
- Reunailmiö	Monimutkainen matematiikka
- Permeabiliteetti vain yhteen suuntaan	Muotin taipuminen

Permeabiliteetin mittausmenetelmien yhteiseksi ongelmaksi voidaan sanoa yleisen standardimenetelmän puuttuminen, jonka seurauksena vertailu eri mittausten välillä on vaikeaa. Lisäksi lujitenäytteiden esivalmisteluissa (leikkaamisessa) tapahtuu



helposti poikkeavuuksia eri mittausten välillä, joka voi johtaa vääristymiin mittaustuloksissa.

## 10 MITTAUSMENETELMIEN KARTOITTAMINEN

Tämän insinööriyön tavoitteena on kartoittaa olemassa olevat menetelmät lujitteen permeabiliteetin mittaamiseen ja pyrkiä löytämään kaupallinen permeabiliteetin mittaustulokset. Tässä kappaleessa esittelen tämän hetkistä tilannetta maailmalta. Esittelemäni tiedot olen kerännyt maailmalta internetin, sähköpostin ja puhelinkeskustelujen avulla. Mittausmenetelmien kartoittamisen aikana huomattiin nopeasti, että lujitteen permeabiliteetin mittaamista ja siihen liittyviä ongelmia tutkitaan parhaillaan useiden eri laitosten kesken. Tavoitteena on standardisoida mittaukset.

### 10.1 Sicomp

Sicomp on ruotsalainen komposiittimateriaalien tutkimusinstituutti. Yhteyshenkilö yrityksessä oli Anders Holmberg.

Sicompin permeabiliteetin mittaustulokset perustuu lineaariseen mittaustulokseen. Laitteistossa on neljä muottipesää, joilla voidaan mitata lujitteiden permeabiliteetit neljään eri suuntaan samanaikaisesti. Tavallisin tapa käyttää laitteistoa on asettaa kolmeen muottipesään kolme eri suuntiin leikattua lujitetta ja neljänteen muottipesään laitetaan materiaali, jonka permeabiliteetti tiedetään. Tämän seurauksena nesteen viskositeettia, eikä injektioainetta tarvitse tietää, mikäli ne pysyvät vakioina mittauksen aikana. Neljänteen muottipesään voidaan myös asettaa mitattava näyte. (Lundström ym. 1998.)

Muotti on tehty teräksestä (750mm \* 500mm \* 25mm), jonka päällä ylämuottina kaksi lasilevyä (750mm \* 180mm \* 20mm). Muottipesän korkeutta voidaan säädellä muotin sisällä olevien välikappaleiden avulla. Ylämuottina toimivat lasilevyt asetetaan alamuottiin kiinni. (Lundström ym. 1998.)

Sicompin mittausmenetelmä ei hyödynnä automatiikkaa mittauksissa, ja täten koko mittaustapahtuma on mittalaitteen käyttäjän varassa. Menetelmällä voidaan mitata permeabiliteetit sekä kuivasta että märästä lujitteesta. Märästä lujitteesta mitattaessa voidaan mitata useita (yleensä kolme) lujitteen tilavuusosuuksia samasta näytteestä säätämällä muottipesän korkeutta. Nesteenä mittauksissa käytetään tavallisesti parafiiniöljyä. (Holmberg 2006.)

Laitteiston etuina ovat yksinkertaisuus ja halpa hinta. Automaation puuttumisesta mittauksessa on sekä hyötyä että haittaa. Ihminen valvoo koko mittaustapahtumaa ja voi täten havaita mahdolliset ongelmat jo mittausvaiheessa ja suorittaa tarvittavat toimenpiteet ongelman korjaamiseen, kun taas mittauksen ollessa automaattinen voi mittauksen seuraaminen jäädä hieman vähemmälle ja mahdolliset ongelmat jäävät helposti huomaamatta. Automatiikan puuttuminen kuitenkin tekee mitaamisesta työläämpää ja enemmän aikaa vievää, sillä laitteisto ei laske permeabiliteettia vaan laitteen käyttäjän tulee laskea se mittauksista saatujen tulosten perusteella. Tämä ei ole suuri ongelma käytettäessä tietokonetta laskemisessa, mutta edelleen käyttäjän tulee syöttää saadut mittaustulokset koneelle ja tässä vaiheessa voi tapahtua huolimattomuusvirheitä.

Sicompin laitteisto on kaupallinen ja yritys myös suorittaa mittauksia toimeksiantojen mukaan. Laitteiston hinta- arvio on 6000-10 000 €. Kalliimpaan hintaan sisältyy pieniä uudistuksia muottiin mm. vähentämään reunailmiön muodostumista. (Holmberg 2006.)

Kun yritys suorittaa mittaukset kahdelle eri kankaalle otetaan yksi näyte molemmista, minkä kustannukset ovat 740 €. Hinta sisältää lyhyen kuvauksen mittausmenetelmästä sekä seuraavat mittaustulokset: kuivan ja märän lujitteen permeabiliteetit neljään erisuuntaan yhdellä lujitetilavuudella sekä lisäksi märän lujitteen permeabiliteetit kahdella eri lujitetilavuudella neljään suuntaan. Haluttaessa saada tarkemmat ja luotettavimmat mittaustulokset hajonnan kera tulisi mittaukset suorittaa vähintään kolmella, mieluiten viidellä eri näytteellä samasta lujitteesta. Kolmesta näytteestä mitattaessa kustannukset ovat 1720 € ja viidestä näytteestä mitattaessa 2700 €. Näytekoko on 150mm \* 300mm. Näytteet tulee lähettää rullis-

sa, sillä Sicomp haluaa suorittaa näytteiden leikkaukset itse vähentääkseen leikkauksista mahdollisesti syntyviä vääristymiä mittaustuloksiin. (Holmberg 2006.)

## 10.2 Pole de Plasturgie de l'Est (PPE)

Pole de Plasturgie de l'Est on ranskalainen muoveihin erikoistunut tutkimuslaitos, joka tarjoaa palveluitaan alan yrityksille. (Pole de Plasturgie de l'Est 2007).

Pole de Plasturgie on kehittänyt mittauslaitteiston, joka perustuu säteen mukaiseen menetelmään. Testauksessa virtausnopeus pidetään vakiona, ja permeabiliteetti johdetaan paineenjakautumisesta muottipesän sisällä. Sen omissa mittauksissa injektionesteenä käytetään rypsiöljyä. Koko mittaustapahtuma on täysin automaattinen, ja Pole de Plasturgien itse kehittämä ohjelmisto suorittaa laskutoimitukset ja antaa permeabiliteetit. Mitattavien näytteiden paksuus voi olla ongelmitta 20mm:iin saakka. (Raynal 2006.)

Pole de Plasturgie on valmis rakentamaan kaupallisen mittauslaitteiston permeabiliteetin mittaamiseen. Hinta-arvio heidän laitteistolleen on n. 190 000 €. Hinta koostuu seuraavista kokonaisuuksista:

- täysin varusteltu muotti tiedonkeruineen ja ohjelmistoineen n. 90 000 €
- hydrauliyksikkö muotin liikkeisiin ja sulkemiseen n. 40 000 €
- ruiskutusyksikkö vakiovirtausnopeudella n. 60 000 €.

Pole de Plasturgie on kehittänyt ja rakentanut permeabiliteetti mittauslaitteiston mm. Airbussille. PPE:ltä on mahdollista saada myös virallinen tarjous koskien kyseistä mittauslaitetta. (Raynal 2007.)

Yrityksessä on mahdollista suorittaa kuivan lujitteen permeabiliteettimittauksia sekä x, y että z- suuntiin. Näytekokoo on 0,6m \* 0,6m. Yhteen mittaukseen tarvi-

taan kuusi näytettä. Mittauksissa öljy injektoidaan vakiovirtausnopeudella muotiin ja seitsemän paineanturia tallentavat paineenkehitystä. Tuloksista saadaan x ja y-permeabiliteetti-arvot yhdelle lujitetilavuudelle Darcyn lain avulla. Mittaukset toistetaan viiteen kertaan tulosten luotettavuuden varmistamiseksi. Edellä mainitun yhden mittauksen hinta on 900 €. (Raynal 2007.)

Pole de Plasturgien laitteisto vaikuttaa mielenkiintoiselta ratkaisulta johtuen sen täysiautomaattisuudesta, joka nopeuttaa ja helpottaa mittausten suorittamista. Lisäksi menetelmä simuloi realistisesti todellista injektio-tilannetta, ja täten mitatut permeabiliteetti-arvot ovat käyttökelpoisia, mikäli tiedetään lopullisen tuotteen valmistusasetusarvot. Miinuspuolena laitteistolla on sen kallis hinta.

### 10.3 Onera

Onera on ranskalainen avaruustutkimuskeskus. Sillä on oma tekniikan laitoksensa, jossa se suorittaa tutkimuksia, joita voidaan soveltaa myös muille aloille. Oneran tarkoituksena on pyrkiä auttamaan pieniä - ja keskisuuria yrityksiä mahdollisessa teknillisessä tutkimustyössä. (Onera 2007.)

Onera käyttää lujitteiden permeabiliteetin mittaamiseen itse kehittämäänsä laitteistoa, joka perustuu tason mukaiseen menetelmään. Perusteluna tason mukaisen menetelmän käyttöön on, että mittauksista saatuja tuloksia voidaan täten verrata tuloksellisesti simuloituihin permeabiliteetteihin, sillä Darcyn lain mukaan permeabiliteetti on ainoastaan riippuvainen väliaineen geometriasta, ja tämä permeabiliteetti voidaan mitata kokeellisesti määstä lujitteesta mittaamalla tietyssä ajassa näytteen läpi virranneen injektionesteen määrä tietyllä paineella. (Laine 2006.)

Oneran mittauslaitteistolla voidaan myös mitata permeabiliteetit kuivasta lujitteesta käyttäen säteen mukaista menetelmää, mutta tällöin tuloksiin vaikuttavat mm. käytettävä injektioneste, käytetäänkö vakiopainetta vai vakiovirtausnopeutta, paineen suuruus, muottimateriaali sekä kuinka painetta mitataan (Laine 2006).

Onera suorittaa kaupallisia toimeksiantoja. Permeabiliteettimittaukset ovat mahdollisia suorittaa yrityksessä. Suoritettaessa mittaukset kolmella toistolla samasta näytteestä, kahdelle eri kankaalle, kolmella eri lujitetilavuudella, kuten Sicompilla, hinta-arvio on 10 000- 15 000 €. (Laine 2006.)

Laineen mukaan Onera on valmis suunnittelemaan toimeksiannon mukaan mittalaitteiston permeabiliteetin mittaamiseen. Heillä ei ole kuitenkaan valmiutta myydä valmista laitetta vaan pelkät piirustukset, joten laitteen rakentaminen tulisi suorittaa muualla piirustusten mukaisesti. Laine korostaa, että laitteisto tulisi suunnitella vastaamaan mahdollisimman hyvin lopputuotteen valmistusprosessia ja suunnitella tämän mukaisesti.

#### 10.4 Plymouthin yliopisto

Englannissa Plymouthin yliopistossa lujitteiden permeabiliteetin mittaamenetelmiä tutkii parhaillaan jatko-opiskelija Ross Pomeroy. Hän rakentaa laitteistoa perustuen säteen mukaiseen menetelmään, jolla voidaan mitata kuivan lujitteen permeabiliteetti sekä laitteistoa perustuen tason mukaiseen menetelmään, jolla pystytään mittaamaan sekä kuivan että märän lujitteen permeabiliteetit. (Pomeroy 2006.)

Pomeroyn ainoa tämänhetkinen valmis mittauslaitteisto käyttää läpäisevänä aineena ilmaa. Koemittauksista saadut tulokset ovat olleet lupaavia ja vertailukelpoisia kirjallisuudessa ilmoitettuihin arvoihin. Menetelmän miinuksena on, ettei sillä voida mitata lujitteen permeabiliteettia kuin isotrooppisista materiaaleista, sillä paineenmuutos mitataan syöttöpisteestä ilmakehään. Mitattavaa (neste)virtausta ei siis ole, sillä ilma syrjäyttää ilmaa. (Pomeroy 2006.)

Pomeroyn tarkoituksena on tutkia eri mittausmenetelmiä. Tutkimus voi johtaa tulevaisuudessa standardimenetelmän syntyyn sekä kaupallisen laitteiston kehittämiseen, mutta siitä ei ole vielä tässä vaiheessa työtä varmuutta. Yhtenä tutki-

muksen kohteena on kehittää mittaustilasto kokoonpuristumisen mittaamiseen ja yhdistää tämä permeabiliteetti mittauksiin. (Pomeroy 2006.)

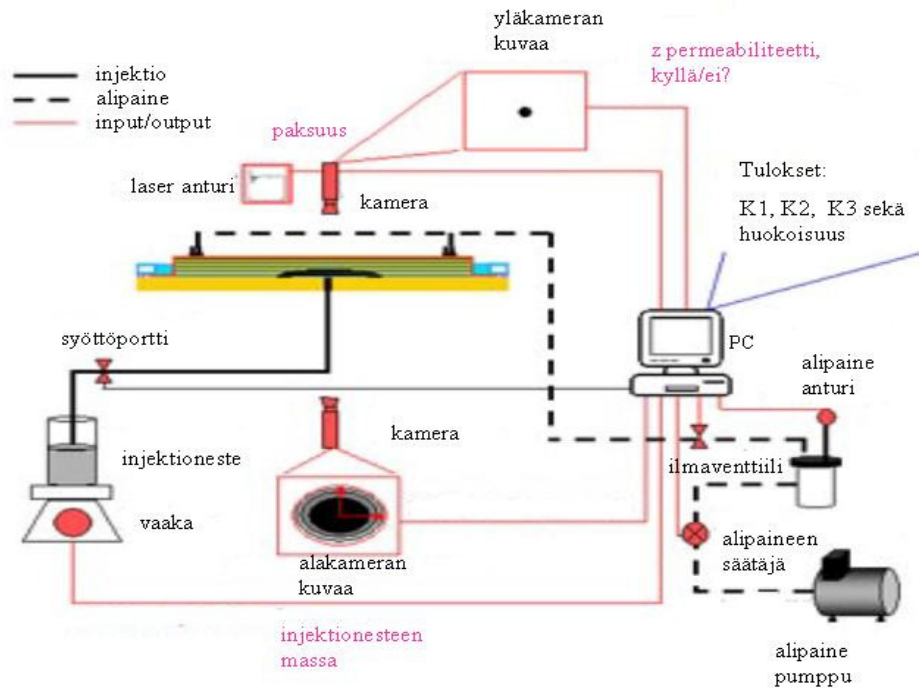
Projektin keskeneräisyydestä johtuen Plymouthin yliopistolla ei ole tällä hetkellä valmiuksia suorittaa lujitteiden permeabiliteetti mittauksia, eikä heidän laitteistonsa ole kaupallinen. Tämän insinööriyön puitteissa mittaukset olisivat olleet mahdollisia siten, että olisin itse käynyt suorittamassa mittauksia Plymouthissa Pomeroy'n rakentamalla laitteistolla. (Pomeroy 2006.)

Ongelmaksi muodostui kuitenkin matkarahoituksen järjestäminen sekä seikka, ettei Plymouthin ainoalla käyttökunnossa olevalla laitteistolla voida mitata permeabiliteetteja kuin isotrooppisista lujitteista, joka ei ole Ahlstromin intresseissä. Kokonaisuudessaan Pomeroy'n suorittama tutkimustyö vaikuttaa mielenkiintoiselta projektilta.

#### 10.5 Delawaren yliopisto, (CCM)

Yhdysvalloissa Delawaren yliopistossa toimii komposiitti tutkimuskeskus CCM (Center for Composte Materials), jonka tavoitteena on kehittää injektio menetelmien prosessoitavuutta ja tätä kautta parantaa injektio menetelmillä valmistettujen tuotteiden laatua sekä alentaa valmistuskustannuksia. (CCM 2006).

CCM on kehittänyt täysin automaattisen lujitteiden permeabiliteetti mittauslaitteen, Permstatin. Permstatilla pystytään mittaamaan samanaikaisesti yhdellä mittauksella permeabiliteetit kaikkiin kolmeen suuntaan x, y ja z. Permeabiliteettien laskeminen perustuu mittauksista tallennettavaan tietoon virtauksen asemasta tietynä ajanhetkenä vakio paineella testattaessa. Menetelmä simuloi VARTM (alipaineavusteinen paineinjektio) tekniikkaa. Injektionesteinä käytetään siirappia tai hartsia. (CCM 2006).



KUVIO 6. Permstatin toiminta

Menetelmä perustuu säteen mukaiseen menetelmään, ja injektointi suoritetaan keskelle alamuottia. Tietokone saa tiedot injektoidun nesteen massasta, injektioaineesta, lujitteeseen muodostuvasta säteestä tietyin aikavälein sekä lujitteen paksuudesta. Näiden tietojen perusteella ohjelma laskee tason mukaisen permeabiliteetin sekä näytteen huokoisuuden. Paksuussuuntaisen permeabiliteetin laskemiseen käytetään yläkameralta saatavaa tietoa, josta nähdään injektionesteen eteneminen paksuussuunnassa.

Menetelmän suurimpina etuina ovat automaation seurauksena mittausten suorittamisen helppous sekä nopeus verrattaessa vanhempiin manuaalisesti suoritettaviin mittauslaitteistoihin, jotka eivät ole täysin automaattisia. Lisäksi Permstatilla mitattaessa koneen käyttäjällä ei ole vaikutusta saatuihin mittaustuloksiin tai permeabiliteetin laskemiseen, sillä laite suorittaa ne automaattisesti, ja virheherkkyys permeabiliteettien laskemisesta poistuu. Plussaa on myös se, että kaikki mitatut permeabiliteetit tallentuvat tietokoneen muistiin.

Menetelmän haittapuoleksi voidaan toisaalta myös sanoa sen täysi automaattisuus, sillä ohjelmistoon mahdollisesti ilmaantuvia ongelmia voi olla vaikea havaita,

etenkin, jos koneenkäyttäjä luottaa sokeasti mittauslaitteeseen ja siitä saataviin tuloksiin. Toinen mahdollinen ongelma laitteistossa voi olla säteen mukaisille menetelmille tyypillinen muotin taipuminen paineen seurauksena. Muottimateriaalina laitteistossa käytetään PMMA- muoviovia. Miinukseksi voidaan myös sanoa seikka, että menetelmä on kehitetty erityisesti alipaineavusteista paineinjektiota (VARTM) varten, ja täten laitteistolla saatavia permeabiliteetti arvoja ei välttämättä kannata/voida käyttää suoraan muiden valmistusmenetelmien muotin täyttymissimuloinneissa.

Permstat ei ole kaupallinen mittauslaitteisto. Laitteistoa voidaan kuitenkin käyttää yhteistyössä yritysten projekteissa. Tämän opinnäytetyön aikatauluun mittauksen suorittaminen ei kuitenkaan onnistunut. (Heider 2006.)

#### 10.6 Round- Robin tutkimus

Parhaillaan on käynnissä round robin tutkimus lujitteiden permeabiliteetin mittaamisesta. Projektissa ovat mukana maailmanlaajuisesti alan tärkeimpiä tutkijoita, kuten Patrick de Luca (ESI- group, Ranska), Francous Trochu (Polytechnique Montreal, Kanada), Stepan Lomov (Katholieke Universiteit Leuven, Belgia) sekä Staffan Lundström (Luleå Tekniska Universitet, Ruotsi). Yrityksistä mukana projektissa ovat mm. tässä työssä mainitut Onera ja Sicomp. (Holmberg 2006; Laine 2006.)

Tutkimuksessa ihmiset ympäri maailmaa tekevät kokeellisia testauksia samoista lujitteista sekä toiset ihmiset suorittavat numeerista permeabiliteetin ennustamista samasta lujitteesta, jonka toimittajana on Hexcel. Tutkimuksen tavoitteena on pyrkiä ymmärtämään syitä eroihin, joita edelleen syntyy eri ryhmien suorittaessa kokeellisia mittauksia samasta materiaalista. (Laine 2006.)

Kyseinen tutkimus kuuluu osana tulevaisuudessa tapahtuvaan permeabiliteetin mittauksen standardoimiseen. Standardin syntymiseen kuluu kuitenkin todennäköisesti vielä vuosia. Standardin sisältö voi mahdollisesti valmistua vuoden tai kahden sisällä, mutta virallisesti standardi otettaisiin käyttöön kolmen viiva viiden vuoden kuluessa. (Holmberg 2006. & Laine 2007.)



## 10.7 Yhteyshenkilöni

Taulukossa 2 lueteltuna tässä opinnäytetyössä toimineet yhteyshenkilöt yhteystietoineen sekä heidän edustamansa laitokset.

TAULUKKO 2. Yhteyshenkilöt

Nimi	Laitos	Puhelinnumero	Sähköpostiosoite
Dirk Heider	CCM, USA	+1 3 028 318 898	heider@udel.edu
Anders Holmberg	SICOMP, Ruotsi	+46 (911) 744 08	anders.holmberg@sicomp.se
Bertrand Laine	Onera, Ranska	+33 (0)1 46 73 45 76	Bertrand.Laine@onera.fr
Aurelien Philippe	PPE, Ranska	+33 (0)3 87 92 93 94	a.philippe@ppe.asso.fr
Ross Pomeroy	Plymouthin yliopisto	+44 (0)1752 232617	ross.pomeroy@plymouth.ac.uk
Jerome Raynal	PPE, Ranska	+33 (0)3 87 92 93 94	j.raynal@ppe.asso.fr

## 11 NÄYTTEIDEN LÄHETTÄMINEN MITTAUKSIIN

Ahlstrom hyväksyi saamani Sicompin ja Pole de Plasturgien tarjoukset lujitteiden permeabiliteetti mittauksista, ja lähetimme kyseisiin laitoksiin testattaviksi kaksi eri lujitetta. Molempien lujitteiden kuidut ovat 0° ja 90° asteen kulmissa toisiinsa. Näytteiden tuotekoodit ja neliöpainot ovat: 42301/M225 (1075 g/m<sup>2</sup>) sekä 42024L/M50 (gm/m<sup>2</sup>).

Sicompin tarvitsema juoksumetrimäärä mittausta kohti riippuu lujitteen neliöpainosta. Lujiterullan leveyden ollessa 1,27 metriä tuli lujitetta 42031/M225 lähettää 8 metriä seuraavan laskutoimituksen mukaisesti. Neliöpainolle 1075 g/m<sup>2</sup> Sicomp tarvitsee seitsemän näytettä yhtä mittausta kohden, ja mittaukset toistetaan kolmesti, joten yhteensä tarvitaan 21 näytettä.. Yhden näytteen koko on 150mm \* 300mm, ja mittaukset suoritetaan lujitteeseen suuntiin 0°, 90°, +45°, -45°, joten lujitetta tarvitaan seuraavasti (lujitteiden reunat leikataan -> hukkaa).

0° näytteille: Leveyssuuntaan 7 näytettä ( $\frac{1,27m}{0,15m} = 8,46$ ) ja pituussuuntaan  $3 * 0,3m = 0,9m$ .

90° näytteille: Leveyssuuntaan 3 näytettä ( $\frac{1,27m}{0,3m} = 4,2$ ) ja pituussuuntaan  $7 * 0,15m = 1,05m \approx 1,1m$ .

$\pm 45^\circ$  näytteille: Leveyssuuntaan 4 näytettä ja pituussuuntaan  $6 * \frac{(0,15m + 0,3m)}{\sqrt{2}} = 1,9m * 2 = 3,8m$ .

Sicomp halusi 30% ylimääräistä materiaalia mahdollisten mittauksissa ilmenevien ongelmien varalle, joten yhteensä lähetettävä määrä lujitetta 42031/M225 on:  $(0,9m + 1,1m + 3,8m) * 3 = 7,54m \approx 8$  juoksumetriä.

Edellä mainitulla periaatteella laskettuna lujitetta 42024L/M50 lähetettiin 14 juoksumetriä lujiterullan leveyden ollessa 0,63m sekä lujitteen neliöpainon 1250 gm/m<sup>2</sup>, jolloin yhteen mittaukseen tarvitaan kuusi näytettä. Mittaus toistetaan kolmeen kertaan, joten yhteensä näytteitä tarvitaan 18 kappaletta. Kapeamman lujiterullan 90° näytteitä saadaan leveyssuuntaan juuri ja juuri kaksi kappaletta, ja tässä on riski, mikäli näytteet repeävät leikattaessa, jonka seurauksena mittaustulokset voivat vääristyä.

Pole de Plasturgie tarvitsee yhteen mittaukseen kuusi näytettä riippumatta lujitteen neliöpainosta. PPE suorittaa yhdessä testissä mittaukset viidesti, joten yhtä testiä varten tarvitaan 30 näytettä. Yhden näytteen koko on 0,6m \* 0,6m. Lujitetta 42031/M225 (rullan leveys 1,27m) tuli näin lähettää 12 juoksumetriä. Lujitetta 42024L/M50 (rullan leveys 0,63m) lähetettiin täten 24 juoksumetriä.

## 12 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kartoittaa lujitteiden permeabiliteetin mittauslaitteistot ja pyrkiä löytämään kaupallisia laitteistoja mahdollista hankintaa varten. Työn aikana ilmeni, ettei useita kaupallisia mittaustaitteistoja permeabiliteetin mittaamiseen ole tarjolla, vaan eri laitokset ovat itse kehittäneet ja rakentaneet laitteistonsa, joita he käyttävät omista tutkimuksissaan. Kolme alan tutkimuslaitosta oli yhteistyöhaluisia rakentamaan ja myymään lujitteiden permeabiliteetti mittaustaitteiston. Kyseiset laitokset ovat Sicomp Ruotsista sekä ranskalaiset Pole de Plasturgie ja Onera.

Sicompin laitteisto on yksinkertainen ja halpa ratkaisu, joka oli jo entuudestaan tuttu Ahlstromille eikä täten tuonut uutta tietoa aiheesta yritykselle. Sen sijaan Pole de Plasturgien sekä yhdysvaltalaisen Delawaren yliopiston laitteistot ovat uusia laitteistoja Ahlstrom Glassfibrelle. Delawaren laitteisto ei tosin ole kaupallinen. Edellä mainittujen laitosten lisäksi ranskalainen Onera on valmis suunnittelemaan mittalaitteen. Sicompin ja PPE:n tarjoamat laitteet ovat lähes vastakohtia toisilleen, Sicompin yksinkertaisesta tekniikasta PPE:n korkean luokan tekniikkaan. Hintahaarukkakin laitteistolla on todella suuri Sicompin 6000:sta eurosta PPE:n 190 000 euroon.

Laitteistojen erilaisuudesta johtuen on mittauksista saatavia tuloksia vaikea vertailla keskenään, joka onkin ongelmana koko permeabiliteettimittauksissa. Tämän seurauksena permeabiliteettimittausten suorittaminen on kiinnostava aihe alan asiantuntijoiden kesken, ja aihetta tutkitaan parhaillaankin useiden eri laitosten välisessä yhteistyöprojektissa, jonka tavoitteena on standardisoida mittaukset.

Tulevaisuudessa onkin mielenkiintoista seurata, miten lujitteiden permeabiliteetin mittaaminen tulee kehittymään ja syntykö mittauksille kenties viimein oma standardi. Mahdollisen standardin syntyessä on myös kiinnostavaa, tuleeko alalle enemmän mittalaitteiden valmistajia, sillä tällä hetkellä varsinaisia laitteen valmistajia ei löydy kuin muutamia tilauksesta.

Tämä työ osoittaa, että lujitteiden permeabiliteetti mittausten toteuttamisessa on paljon eroavaisuuksia eri laitosten kesken sekä sen, ettei valmiiden mittalaitteistojen valmistajia tällä hetkellä juurikaan löydy. Alalla tehdään kuitenkin aiheesta paljon tutkimustyötä.

## 13 LÄHTEET

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. 2003. Komposiittirakenteet. Muoviyhdistys ry, Helsinki.

Rudd, C., Long, A., Kendall, K. & Mangin, C. 1997. Liquid moulding technologies. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.

Liquid Compostite Moulding. 2001. Esite. Ahlstrom Mikkeli.

Jussila, J. Alipaineinjektio [on-line]. 6.10.2006. [viitattu 30.10.2006] Saatavissa: <http://www.api.hut.fi/Frame/otsikkoframe2.htm>

Lundström, S. 1993. Permeability and Void Formation in RTM. Licentiate thesis. Luleå University of Technology

Sinex. RTM (Resin Transfer Moulding) [on-line]. [viitattu] 30.10.2006. Saatavissa: [http://www.sinex.fi/manufact\\_03.htm](http://www.sinex.fi/manufact_03.htm)

Luthy, T. 2003. Three- Dimensional Permeability Measurements based on Direct Current and Ultrasound Monitoring Techniques. [on-line]. [viitattu 01.11.2006]. Saatavissa:<http://e-collection.ethbib.ethz.ch/ecol-pool/diss/fulltext/eth15050.pdf>

Komposiittiluennot. [on-line]. 14.12.2004. [viitattu 08.11.2006]. Saatavissa: [http://72.14.205.104/search?q=cache:zDH2MG8Z1ZUJ:pd.me.tut.fi/kurssit/2401000/Komposiittikoulutus-Patria\\_OT.pdf+rtm+edut&hl=fi&gl=fi&ct=clnk&cd=1&client=firefox-a](http://72.14.205.104/search?q=cache:zDH2MG8Z1ZUJ:pd.me.tut.fi/kurssit/2401000/Komposiittikoulutus-Patria_OT.pdf+rtm+edut&hl=fi&gl=fi&ct=clnk&cd=1&client=firefox-a)

Lundström, S., Stenberg, R., Bergström, R., Partanen, H. & Birkeland, P. 1998. In- Plane permeability measurements: A nordic round-robin study.

Airaksinen, T. 2005. Permeabiliteetti simulointeja hila- Boltzmann menetelmällä. [online]. [viitattu 16.11.2006]. Saatavissa:  
<http://people.jyu.fi/~tuma/home/files/docs/permeabiliteetti.pdf#search=%22permeabiliteetti%22>

Bäcklund, J., Zenkert, D. & Åström, B.T. 1997. Composites and Sandwich Structures. Chameleon Press Ltd. Lontoo, Englanti.

Gebart, R., Sandlund, E. 1994. A new method for the measurement of in-plane permeability in fabrics for RTM.

Siikonen, J., Kokko, J., Anttila, E., Laitila, J., Karttunen, M. 2000. ALPAINEINJEKTIOOTEKNIikka. [online]. [viitattu 21.11.2006]. Saatavissa:  
<http://www.api.hut.fi/Dokumentit/KSI-LOPPURAPORTTIfinal2.pdf>

Loendersloot, R. 2006. The Structure – Permeability Relation of Textile Reinforcements. [online]. [viitattu 29.11.2006]. Saatavissa:  
<http://doc.utwente.nl/55931>

SICOMP. [online]. [viitattu 5.12.2006]. Saatavissa:  
<http://www.sicomp.se/resources.htm>

Holmberg, A. SICOMP AB, Fibervägen 2, PL 271, 94126 Piteå, Ruotsi. Sähköpostikeskustelut.

Pomeroy, R. Jatko- opiskelija. Plymouthin yliopisto, Tekniikan laitos, Iso-Britannia. Sähköpostikeskustelut.

CCM. [online]. [viitattu 18.12.2006]. Saatavissa:  
<http://www.ccm.udel.edu/Research/AMIPCindex.html>

Heider, D. Tekniikan apulaisjohtaja. Delawaren yliopisto, CCM. Yhdysvallat. Puhelinkeskustelu.

Ahlstrom. [online]. [viitattu 03.01.2007]. Saatavissa:

<http://www.ahlstrom.fi/index.asp?id=2D701719569B49FC8B04AA306EF98C59&data=1,00308B787886459385F296A5AFD4FA74,DA2408BBD3F14F85AA5E27C55BAAC984&tabletarget=&laytmp=ahlstrom06-front>

Onera. [online]. [viitattu 05.01.2007]. Saatavissa: <http://www.onera.fr/onera-business/technology-transfer.php>

Laine, B. Onera, tieto- ja mittauskeskus, 29 avenue de la Division Leclerc, F92320 Chatillon, Ranska. Sähköposti- ja puhelinkeskustelut.

Pole de Plasturgie. [online]. [viitattu 08.01.2007]. Saatavissa: <http://www.poleplasturgie.net/>

Raynal, J. Projektipäällikkö, Pole de Plasturgie, Ranska. Sähköposti- ja puhelinkeskustelut.

Netcomposites. [online]. [viitattu 20.01.2007]. Saatavissa: <http://www.netcomposites.com/education.asp?sequence=64>

Northwestern University. [online]. [viitattu 20.01.2007]. Saatavissa: [http://www.ipc.northwestern.edu/projects/material\\_c.html](http://www.ipc.northwestern.edu/projects/material_c.html)