

Rainanmuodostuksen suotautumismekanismit

Pro gradu -tutkielma

Jyväskylän yliopisto

Fysiikan laitos

Soveltava fysiikka

1.11.2007

Atte Marttinen

Abstract

In the paper industry, filtration theory has been applied to such processes as pulping and refining as a method of evaluating pulp processing, dewatering and mat formation in the forming section of a papermachine, and filter cake formation on the surface of paper during coating dewatering.

The viscous resistance coefficients were documented for several furnish types. The resistance of a standard, glass beads, was measured using the drainage a high speed drainage apparatus was developed to document constant differential apparatus. The measured drainage resistance values were consistent with theoretical glass bead drainage resistance. Several newsprint and woodfree headbox suspensions were examined. The drainage apparatus was able to document the viscous resistance coefficient throughout the sheet forming process, even at low basis weight, high drainage velocity conditions. For a given furnish, viscous resistance coefficient increased with increasing fine particle content in the formed mat.

Drainage velocity was found to affect the fine particle retention coefficient and therefore the viscous resistance coefficient. The fine particle retention coefficient decreased as the drainage velocity increased. The viscous resistance coefficient decreased as the drainage velocity increased. Fine particles retained in the mat contributed to increasing the viscous resistance coefficient. Inertial contributions to the drainage resistance were negligible compared to the changing nature of the drainage resistance with increasing basis weight.

The model was compared to outward roll drainage obtained from a pilot papermachine experiment. Good agreement was found between predicted and measured values. It is therefore concluded that the resistance data obtained from the laboratory apparatus is not only capable of predicting drainage trends, but can also be used as a predictive tool for estimating drainage volumes on a papermachine.

Alkusanat

Olen työskennellyt Metso Paperin formeriosan suunnittelussa eri tehtävissä vuodesta 1984 lähtien. Olen opiskellut Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksella paperinvalmistukseen liittyviä kursseja, joita voin hyödyntää formeriosan suunnittelussa. Lopputyön aihe rainanmuodostuksen suotautumismekanismit liittyvät suoraan paperikoneen formeriosan vedenpoiston mitoitukseen.

Kiitän ohjaajaani professori Jussi Timosta perusteellisesta vedenpoistomekanismien läpikäymisestä. Kiitän FL Pekka Pakarista minulle sopivasta lopputyön aiheesta. Metso Paperin tietopalvelusta sain alan kirjallisuutta ja tarvittavia lähdetietoja. Kiitän myös vaimoani lopputyön ulkoasusta sekä tekstinkäsittelyn neuvoista.

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

ΔP	vedenpoistopaine	$\text{dyn/cm}^2 = 0,1 \text{ N/m}^2$
L	virtausta vastustavan ainekerroksen paksuus	cm
v	vedenpoistonopeus	cm/s
k	Darcyn vakio eli permeabiliteettivakio	$\text{cm}^3/\text{s/g}$
k_1	materiaalikohtainen kerroin	dimensioton
S_v	kuitujen ominaispinta-ala	cm^2/cm^3
a	viskoottinen vastuskerroin	$\text{g/cm}^3\text{s}$
b	massan inertiaasta riippuva vastuskerroin	g/cm^4
k_2	materiaalikohtainen kerroin	dimensioton
A	pinta-ala	cm^2
J	Hydraulinen gradientti	dimensioton
ρ_p	rainan keskimääräinen partikkeleiden tiheys	g/cm^3
C_s	rainan sakeus	g/cm^3
dV/dt	vuoto	cm^3/s
ΔP_T	kokonaispainehäviö	$\text{dyn/cm}^2 = 0,1 \text{ N/m}^2$
W	kiintoaineen massa sulpuissa	g
R_m	suotautumisvastus viirassa	cm^{-1}
\mathfrak{R}	retentio	dimensioton
a_w	viskoottinen vastuskerroin viirasta	$\text{g/cm}^3\text{s}$
b_w	inertiaasta riippuva vastuskerroin viirasta	g/cm^4
ΔP_W	painehäviö viirasta	$\text{dyn/cm}^2 = 0,1 \text{ N/m}^2$
ΔP_m	painehäviö massasta	$\text{dyn/cm}^2 = 0,1 \text{ N/m}^2$
ΔP_{VIS}	viskoottinen painehäviö	$\text{dyn/cm}^2 = 0,1 \text{ N/m}^2$
ΔP_{INR}	inertinen painehäviö	$\text{dyn/cm}^2 = 0,1 \text{ N/m}^2$
T	tortuositeetti	dimensioton
F	voima	N
D	leikkausnopeus	1/s

c	etäisyys	m
r	säde	m
m	massa	kg
a	kiihtyvyys	m/s ²
w	nopeus	m/s
Re	Reynoldsin luku	dimensioton

Kreikkalaiset symbolit

α	ominaissuotautumisvastus	cm/g
ϵ	aukko-osuus rainassa (huokoisuus)	dimensioton
φ	suspension tiheys	g/cm ³
$\delta\phi$	kulma	asteita
μ	suotautuvan nesteen dynaaminen viskositeetti	g/cm·s
Φ	huokoisuus	dimensioton
ω	kulmataajuus	rad/s
μ	suotautuvan nesteen dynaaminen viskositeetti	g/cm·s

Lyhenteet

LWC	kevyesti päällystetty aikakausilehtipaperi
CSF	Canadian standard freeness, jauhautumisaste
SR	Shoppler-Riegler slowness, jauhautumisaste
DDJ	dynamic drainage jar, massan suotautuvuuden mittauslaitetta
RDT	rapid drainage tester, mittauslaite massan suotautumista tutkittaessa
LWCRS	light weight coated raw stock, massalaatu
TMP	termo - mekaaninen massa
GW	mekaaninen hierre
SGW	mekaaninen massa hierretty kivellä
FL	flow loop, mittauslaite suotautuvuudelle
Mesh	silmää + lankaa/tuuma

Johdanto

Tämä työ sai alkunsa tarpeesta selvittää yritysoston kautta tullutta tutkimusraporttia. Metso Paper liitti 90-luvun loppupuolella paperikonevalmistaja Beloitin huoltoliiketoiminnan omaan liiketoimintaansa. Samalla saatiin käyttöön Beloitin koekoneella ajettua tutkimus- ja kehitystietoa. Tätä tietoa halutaan myös hyödyntää ja tämän työn tarkoitus on ottaa selvää kahdesta tutkimuksesta: V.J. Wildfong, J.M. Genco, J.A. Shads, D.W. Bousfield, Filtration Mechanics of Sheet Forming, Part I: Aparatus for Determination of Constant-Pressure Filtration Resistance [1] and Part II: Influence of Fine Material and Compression [2].

Kehityshankkeen tavoitteena oli ollut suunnitella mittauslaite, jolla pystyttäisiin paremmin ennustamaan vedenpoistotapahtumaa muodostusosalla erilaisilla massoilla. Käytettävissä oli Beloitin koekone numero kolme, horisontaalinen tela-lista - kitaformerit.

Testauslaitetta oli lähdetty kehittämään tutustumalla ensin suotautumisen perusteoriaan. Teoriaosuus lähtee Darcyn peruslaista ja etenee Kozeny-Carman - yhtälöiden kautta Forchheimerin kaavaan turbulentille virtaukselle. Ehkä suurempi huomio kiinnitettiin erilaisten vedenpoistomittauslaitteiden kehitykseen. Kehityksen kautta päästiin aikaisempien testilaitteiden puutteisiin, kuten retention muuttumiseen ajan mukana ja kokemusperäisten mittojen käyttämiseen. Lähtökohdaksi suunnitteluun otettiin teolliset toimintaparametrit. Niiden piti kattaa tärkeimmät paperilaadut: sanomalehti- hieno- ja LWC- paperi. Tässä apuna oli Beloitin tutkimuslaitoksen käytettävissä oleva koeajotulokset erilaisille massoille. Itse testauslaitteen toiminta ja rakenne selvitettiin, jonka jälkeen lähdettiin tutkimaan laitteen sopivuutta virtausmittauksiin.

Kokeellinen proseduuri käsitti massan karakterisoinnin, koelaitteiden valmistelun, antureiden kalibroinnin ja suodatinosan karakterisoinnin. Koetuloksista laskettiin suotautumisvastus. Tämän jälkeen tehtiin suotautumisvastuskoe erilaisella testilaitteella, nimeltään Flow Loop-laite, kolmella eri alipainetasolla ja havupuumassalla. Myös perälaatikkonäytteet testattiin sanomalehti - ja hienopaperille, molemmilla kahdella eri massakoostumukselle. Lisäksi käytiin läpi vertailumielessä aikaisempia vastaavia tutkimuksia.

Tässä vaiheessa huomattiin, että hienoainepitoisuudella oli vaikutusta viskoottiseen vastuskertoimeen. Tämän vuoksi määritettiin hienoaine-, tuhka- ja kuituhienoaineretenttiokertoimen vaihtelu neliöpainon funktiona. Myös alipaineen vaikutus paperin z-suuntaiseen kokonaishienoaineretentioon määritettiin. Lisäksi tutkittiin vedenpoistonopeuden vaikutusta kokonaisretentioon.

Tämän jälkeen ajettiin vastaavuusmittaukset Beloitin koekoneella kolmella eri massalla. Vertailu tehtiin suotautumisvastuskäyrillä suhteessa koekoneen vedenpoistokokeisiin.

Opiskelijan näkökulmasta katsottuna valmiin tutkimustiedon analysointi on hyvin opettavaista. Lisäksi tämäntyyppistä laitteen kehittämiseen johtavaa tietoa ei ole paljon opiskelijalle saatavissa. Puutteena voisi pitää sitä, ettei laitteen käytännön sovellutuksia mainita. Mittaustiedot ovat hienosti taulukoitu ja suotautumisvastuksen Matlab-pohjainen ohjelma on kirjoitettu, mutta ohjelman käytöstä ei ole esimerkkejä. Parasta osaa tutkimuksessa olivat virtausnopeuskokeet erilaisilla massoilla ja hienoainepitoisuuksilla sekä neliöpainoilla. Tiedon hyödyntäminen voisi tapahtua jatkoselvittämällä edelleen muodostusosan vedenpoistonopeuksia tutkituilla massoilla ja vertaamalla erilaisten vedenpoistomallien tuloksia koeajotietoihin.

Päätelmissä selvitettiin Darcyn lakia ja Kozenyn yhtälöä. Lisäksi laskettiin millä virtausnopeudella ollaan turbulentsissa virtauksessa, jolloin inertiaivoimat alkavat dominoida virtausta ja Darcyn laki ei ole voimassa.

Sisällysluettelo

1 Johdanto vedenpoistoon	1
2 Teoreettiset taustat	4
2.1 Virtausmallit	4
2.1.1 Kozenyn-Carmanin malli Darcyn lakiin laminaariselle virtaukselle	5
2.1.2 Forchheimerin kaava turbulentille virtaukselle	6
2.1.3 Virtausvastukset suotautumisen aikana	7
2.1.4 Viskoottisten ja inertiaalisten vastusten analyysi Forchheimerin kaavassa	9
2.2 Retentio	11
2.2.1 Hienoaineretentio	11
2.3 Katsaus vedenpoistomittaukseen testilaitteilla	12
2.3.1 Laborioriotestilaitteet	12
2.3.2 Rajoitukset aikaisemmilla testilaitteilla	14
3 Vedenpoistolaitteen kehittäminen	15
3.1 Teollinen rainan muodostuminen	15
3.2 Tavalliset vedenpoistoparametrit	17
3.3 Mittauslaitteen kuvaus	17
4 Laitteen virtausmittaukset	21
4.1 Virtausvastuksen mittauslaite	21
4.2 Lasinen kiintopeti ja sen tulokset	23
4.2.1 Lasipalloilla pakatun huokoisen pedin teoria	23
4.2.2 FL-laitteen tulokset lasipedille	24
4.3 Teoreettisen ja kokeellisen vastusarvon vertaaminen	25
4.3.1 Viiran vastus	26
4.3.2 Massa-alustan suotautumisvastus	28
4.3.3 Kahden tukiviiran vastus	28
4.3.4 Havupuumassan vastus	29
5 RDT-mittaukset	30
5.1 Lasipedin vastuksen mittaaminen	30
6 Kokeellisten menetelmien kuvaaminen	33
6.1 Tietojen kerääminen	33
6.1.1 Kuituspension analysointi	34
6.1.2 Suspension karakterisointi	34
6.1.3 Kokeen valmistelu ja laitteiden kalibrointi	35
6.1.4 Suotautuvan kakun ominaisuudet	35

6.2 Tietojenkäsittely	35
6.2.1 Viskoottisen ominaisvastuksen laskeminen	35
6.2.2 Mittauslaitteen kalibrointi	35
6.2.3 Viskoottisen ominaisvastuksen laskeminen	37
6.2.4 Viskoottisen ja inertiaalisen ominaisvastuksen laskeminen	39
6.3 Tilastoanalyysi	40
7 Kokeelliset tulokset	41
7.1 Havupuumassan suotautumisvastusten vertaaminen	41
7.2 Viskoottinen virtausvastusarvo hienopaperille ja sanomalehdelle	45
7.3 Lopullinen neliöpainon merkitys hienopaperin vastuksella	49
7.4 Vastusarvon vertaaminen teoriaan	51
7.5 Hienoaineen vaikutus viskoottiseen vastuskertoimeen	53
7.6 Neliöpainon vaikutus hienoaineretentiossa	59
7.6.1 Lisäretention määrittäminen	59
7.6.2 Hienoaineretentio kertoimen vaihtelu neliöpainon funktiona	60
7.7 Aukkojen tukkeutumisen yhteys hienoaineen ja rainan rakenteen välillä	62
7.8 Vedenpoistonopeuden vaikutus hienopaperin suotautumisvastukseen	69
7.8.1 Hienopaperi nro 1	70
7.8.2 Sanomalehtipaperi nro 2	74
8 Virtausvastuksen mittaaminen koekoneella	76
8.1 Koekone esittely	76
8.2 Massojen ominaisuudet	77
8.3 Vedenpoistomittaus tulokset koekoneelta	77
9 Yhteenveto ja päätelmät	82
9.1 Vedenpoistomekanismit	82
9.2 Darcyn laki	84
9.3 Kozenyn-Carmanin yhtälö	86
9.4 Kuidut ja hienoaines	90
9.5 Viskositeetti	92
9.6 Turbulentti virtaus	93
9.6.1 Kitkallisen virtauksen π -malli	94
9.6.2 Virtaus suurilla Reynoldsin luvuilla	95
9.7 Vedenpoiston mallintaminen ja kokonpuristunut raina	98

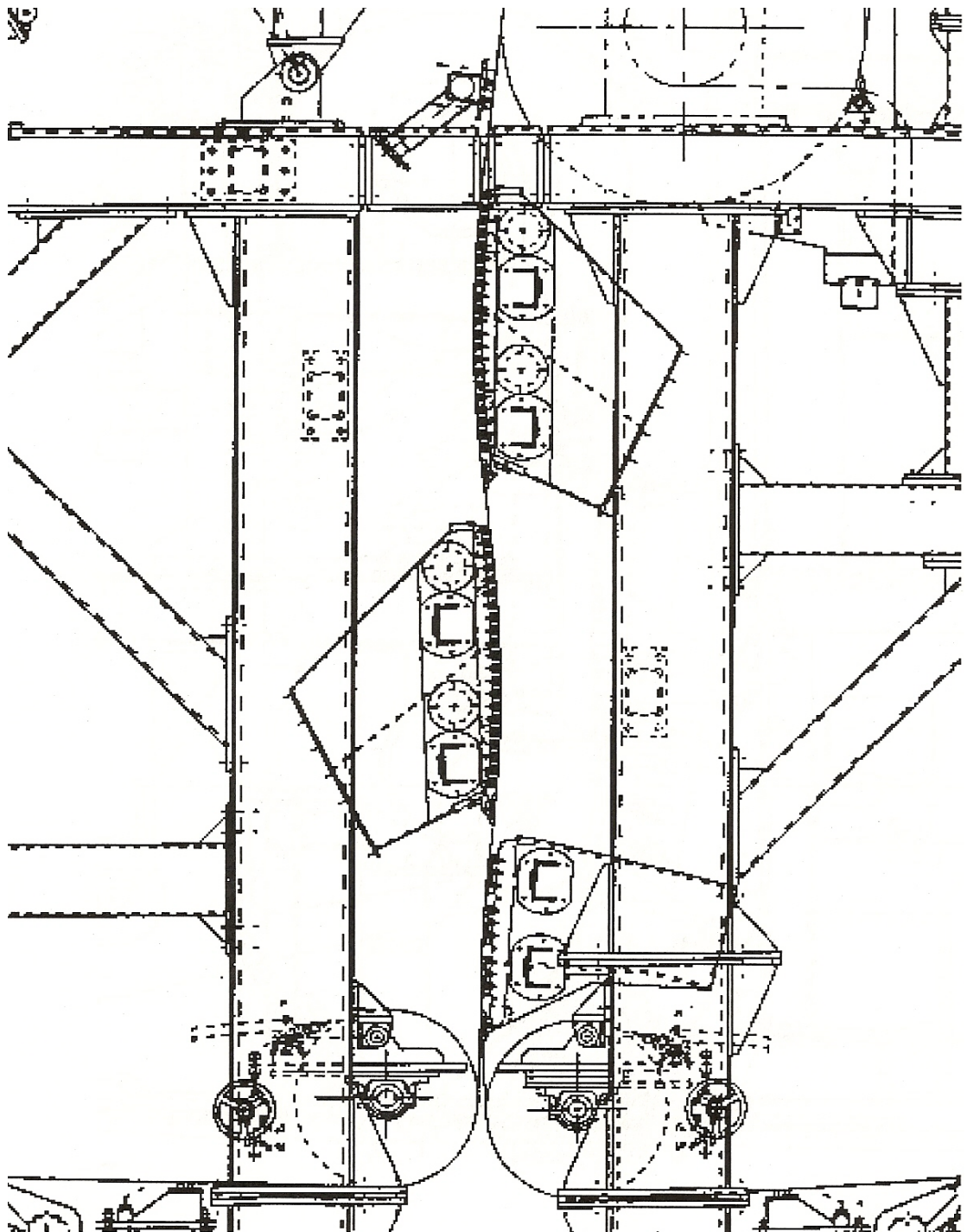
1 Johdanto vedenpoistoon

Virtausmekaniikka huokoisen väliaineen läpi on laajalti käsitelty alue monissa tutkimuksissa ja teknisissä sovellutuksissa. Ilmiö on tärkeä öljyteollisuudessa, jätevesien käsittelyssä, maaperän lietteiden käsittelyssä, ympäristönsuojelussa ja teollisissa suotautumistapahtumissa. Tämä työ käsittelee virtaussovellutusta huokoisessa aineessa ja pyrkii selvittämään yhtä teollista suotautumistapahtumaa.

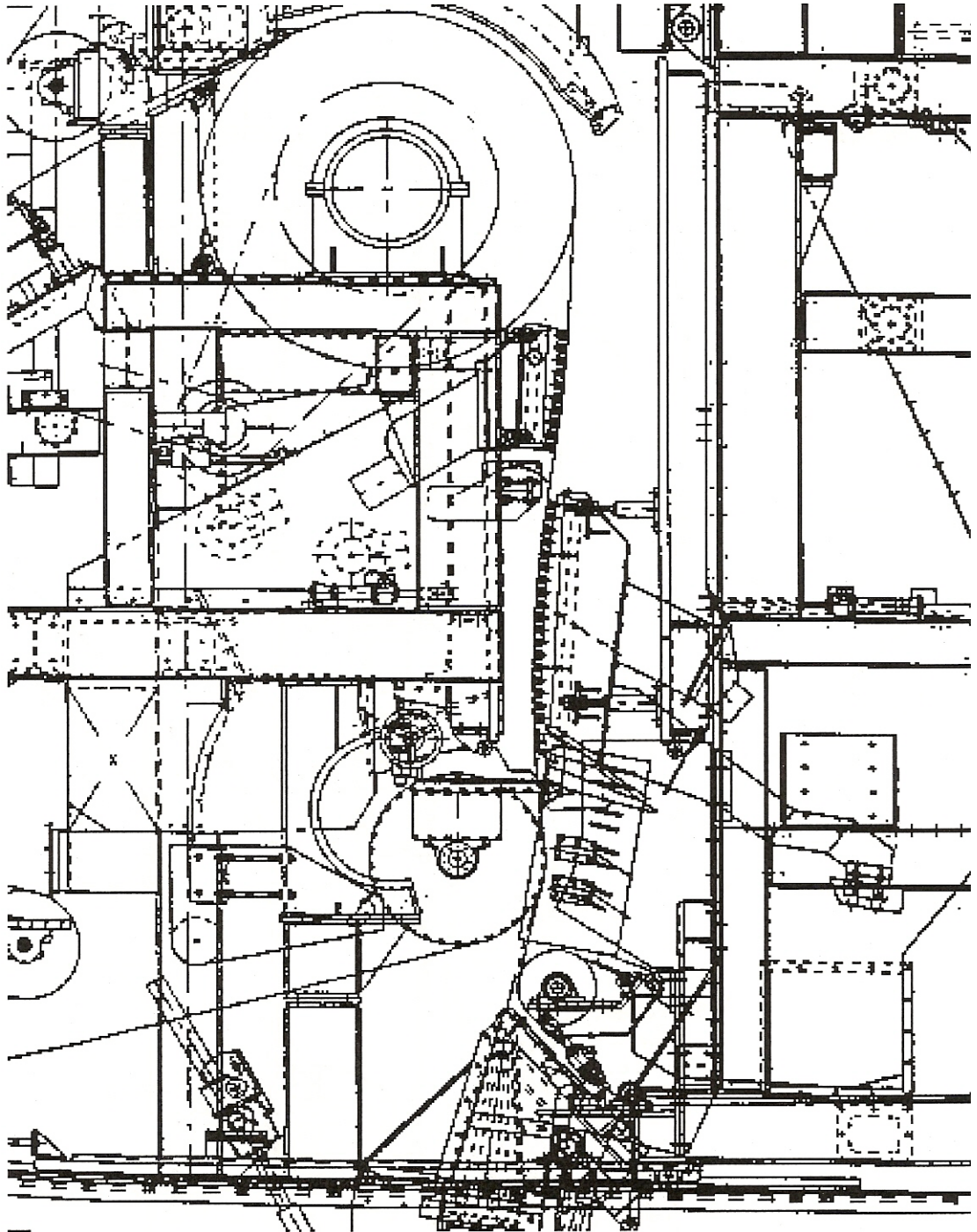
Suotautuminen on mekaanisen fysiikan erotteluprosessi, missä kiinteäpartikkelinen suspensio nesteessä siirretään huokoisesta väliaineesta, joka pidättelee partikkeleita, perustuen niiden kokoon tai sähköisiin varauksiin. Teollisia suotautumisprosesseja on paljon. Paperitehtailla suotautumisen teoria käsittää massan valmistuksen, menetelmät arvioida massaprosessia, vedenpoiston rainasta ja päällystysfilmin muodostumisen paperirainan pintaan päällystysasemalla.

Rainan muodostuminen on pohjimmiltaan vedenpoistoa kuitususpensiosta. Vedenpoiston seurauksena muodostuu kuituverkko. Kaksoiskitaformereilla matalasakeuksinen kuitususpensiosuihku pakotetaan kahden huokoisen ja liikkuvan jännitetyn viiran väliin. Suspension liikkua suurella nopeudella muodostustelan ja rintatelan väliseen kitaan, kohdistuu siihen paine telapeiton, kaavinterän tai telasegmentin alueella. Lisääntyvä paine viirojen välissä saa veden puristumaan ulos suspensiosta. Viirat läpäisevät vettä ja joitakin kuituja, kun taas osa kuiduista muodostaa kuituverkon viirojen väliin.

Kaksi tunnettua kitaformerimallia on näytetty kuvissa 1-1 ja 1-2, vertikaalinen lista-kitaformerin ja vertikaalinen tela/lista-kitaformerin. Kitaformereiden matemaattisia vedenpoistomalleja ovat esittäneet Zhao ja Kerekes, 1995 [3], Green ja Kerekes, 1996 [4], Zahrai ja Bark, 1995 [5] ja Turnbull, 1996 [6]. Yhtälöt käsittävät listavedenpoiston, voimatasapainoyhtälöt ylä- ja alaviiran ympäristössä sekä jatkuvuus- ja liikemääräyhtälöt nesteen virratessa kidassa viirojen läpi. Jälkimmäiset yhtälöt käsittelevät permeabiliteettia ja virtausvastusta.



Kuva 1-1. Vertikaalinen lista- kitaformeri



Kuva 1-2. Vertikaalinen tela-/lista-kitaformeri

Tyypillisesti vedenpoistoa suspensiosta on mitattu kokemuseräisillä testeillä, kuten Canadian Standard Freeness (CSF), Shoppler-Riegler Slowness (SR) tai TAPPI Draining Time. Nämä testit ovat nopeita ja helppoja käyttää, mutta ovat myös riippuvaisia mittausolosuhteista. Vedenpoistotesteillä voidaan saada vertailutuloksia muihin testeihin nähden, mutta tulosta ei voida yhdistää massan ominaisuuksiin vedenpoistotapahtumassa oikealla koneella. Selvästi on tarve vedenpoistotesteihin, jotka

tapahtuvat paperintekijöiden raaka-aineilla itse paperikoneella. Monia erilaisia vedenpoistomittauslaitteita on kehitetty ja monella niistä on jokin erityinen sovellutus massan ominaisuuksien tutkimisessa prosessin aikana. Mutta vain harvat pystyvät ennustamaan massan käyttäytymisen paperikoneella. Ideaalisen testilaitteen tulisi jatkuvasti mitata rainan vedenpoistovastusta sen muodostumisen aikana. Työn tarkoitus on tutkia virtausmekanismeja liittyen suotautumiseen kuitususpensiossa ja kehittää testeriä kuvaamaan vedenpoistoa massasta. Jatkuvasti muuttuva rainan pinta voidaan tallettaa ajan funktiona ja laskea rainan vedenpoisto soveltaen kuhunkin kohtaan sopivaa virtausvastusta. Vedenpoistoprosessin edetessä suspension ominaisuudet muuttuvat vaikuttaen kerrostuneeseen kuiturakenteeseen. Rainan rakenteella on merkitystä lopputuotteen ominaisuuksiin ja siksi vedenpoisto on huomattavan kiinnostava ja tärkeä asia.

2 Teoreettiset taustat

Kuitususpension vedenpoistoon liittyvä kirjallisuus voidaan jakaa kahteen luokkaan, teoreettisiin taustoihin, jotka keskittyvät kuvaamaan vedenpoistoprosessia, ja kokeelliseen osaan koetuloksineen.

Rainan muodostumisen aikana huokoista kerrosta muodostuu jatkuvasti kuitujen suotautuessa kasvavaksi kerrokseksi. Vedenpoistoprosessin edetessä nesteen täytyy läpäistä huokoinen kuitumatto. Kirjallisuudessa Ingmanson *et al* [7],[8] selvittivät vedenpoistokykyä sovittamalla nesteen virtausvastuksen huokoisen materiaalin läpi tapahtuvaan vedenpoistoon.

2.1 Virtausmallit

Kaksi yleistä mallia on esitetty paineen muuttumiselle nesteen virratessa huokoisen aineen läpi. Yksi lähestymistapa on käyttää hyväksi Kozenyn-Carmanin muotoa Darcyn laista ominaisvirtausvastukselle, joka voidaan laskea ainoastaan laminaariselle virtausvastukselle. Turbulenttiselle virtaukselle sovelletaan Forcheimerin yhtälöä, jota käytetään usein laskettaessa jatkuvaa virtausvastusta nesteen virratessa turbulenttisissa olosuhteissa [9]. Laminaariselle virtaukselle käytetään Kozenyn-Carmanin versiota Darcyn laista.

2.1.1 Kozenyn-Carmanin malli Darcyn lakiin laminaariselle virtaukselle

Laminaariselle virtaukselle huokoisen väliaineen läpi voidaan kirjoittaa Darcyn laki muodossa

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{v}{k}, \quad (2-1)$$

jossa

ΔP = vedenpoistopaine [$\text{dyn/cm}^2 = 0,1 \text{ N/m}^2$]

L = virtausta vastustavan ainekerroksen paksuus [cm]

k = Darcyn vakio eli permeabiliteettivakio [$\text{cm}^3\text{s/g}$]

$v = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt}$ vedenpoistonopeus [cm/s]

V = tilavuus [cm^3]

A = pinta-ala [cm^2].

Darcyn lain mukaan vedenpoistopaine on suoraan verrannollinen vedenpoistonopeuteen. Laboratoriossa tehtävät suotautuvuusmittaukset (CSF ja SR) eivät vastaa todellista suotautumistilannetta muodostusosalla. Vedenpoistoelementtien aiheuttamat painepulssit vaikuttavat suotautumistilanteeseen. Massasulpun ominaisuudet vaikuttavat myös huomattavan paljon suotutumistilanteeseen.

Darcy teki mittaustuloksiin perustuvan yhtälönsä 1856. Darcyn vakio eli permeabiliteettivakio perustui moniin kokeisiin erimuotoisilla virtausta vastustavilla mallirakenteilla, jotka rakentuivat suorista, vierekkäisistä, peräkkäisistä tai haaroittuvista osista. Darcyn permeabiliteetti ei kuitenkaan saavuttanut laajaa hyväksyntää. Sitä vastoin Kozenyn teoria esittää huokoisen materiaalin poikkileikkauksiltaan vaihtelevin kanavien, joilla on tietty pituus. Navierin-Stokesin yhtälöstä voidaan ratkaista normaalin nesteen virtaus kanavissa, jotka kulkevat kunkin huokoisen materiaalin poikkileikkauksen läpi. Permeabiliteetti määritellään sitten verrannollisuutena asianmukaiseen hydrauliseen säteeseen (uoman veden poikkipinta-ala jaettuna ns. määrällä piirillä). Kozeny valitsi hydraulisen säteen ilmaistakseen tyhjän tilan suhdetta pintaan, joka on kosketuksissa nesteen kanssa. Olettamalla virtauksen tapahtuvan normaalin suuntaan, Kozenyn malli ei huomioi tangentiaalista suuntaa virtauksessa ja sen vuoksi ei myöskään huomioi virtauskanavan kokoonpuristumista tai laajenemista.

Laajemmin käytetty malli on Kozenyn teoria yhdistettynä Carmanin lakiin. Carman esitti, että hydraulinen säde on parasta esittää kiinteän tilavuuden suhteena avoimeen virtauspintaan. Kozenyn-Carmanin lausekkeella voidaan ilmaista Darcyn permeabiliteetti, joka on

$$k = \frac{\varepsilon^3}{k_1 \mu S_v^2 (1 - \varepsilon)^2} \cdot \quad (2-2)$$

Kozenyn-Carmanin muoto Darcyn laista on siten

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{k_1 \mu S_v^2 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} v, \quad (2-3)$$

jossa

k_1 = dimensioton materiaalikohtainen vakio Kozenyn vakio

μ = suotautuvan nesteen dynaaminen viskositeetti [g/cm·s]

ε = aukko-osuus rainassa (huokoisuus)

S_v = kuitujen ominaispinta-ala [cm²/cm³].

Kozenyn-Carmanin yhtälö on erikoistapaus Darcyn laista ja näyttää paineen alenemisen rainan aukko-osuuden ja kuidun ominaispinta-alan avulla, kuten Carman määritteli. Lisäksi otetaan huomioon nesteen ominaisuudet kuten viskositeetti [9].

2.1.2 Forchheimerin kaava turbulentialle virtaukselle

Darcyn yhtälöiden avulla ei voida ilmaista virtausyhtälöitä kovin tarkasti. Se ei ota huomioon nesteen inertiaa (hitausvoimia). Forchheimer [10] totesi, että Darcyn lakia piti muuttaa suurilla virtausnopeuksilla, ja otti mukaan toisen asteen termin ja muodosti yhtälön, jolloin

$$\frac{\Delta P}{L} = av + bv^2, \quad (2-4)$$

jossa

a = viskoottinen vastuskerroin (*viscous resistance by the coefficient*) [g/cm³s]

b = massan inertiaasta riippuva vastuskerroin (*inertial resistance term*) [g/cm⁴].

Viskoottinen vastuskerroin a on Darcyn permeabiliteetin k käänteisarvo, jonka Irmay [11] esitti muodossa

$$a = k_1 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} S_v^2 \mu, \quad (2-5)$$

ja b on inertiaalinen vastuskerroin, joka voidaan esittää muodossa

$$b = k_2 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} S_v \varphi, \quad (2-6)$$

jossa $k_2 = 0,1\sqrt{k_1}$ on materiaalikohtainen kerroin ja φ [g/cm³] on suspension tiheys.

Alhaisilla virtausnopeuksilla viskoottinen termi vallitsee, mutta virtausnopeuden kasvaessa neliöllinen termi tulee merkittäväksi ja dominoi turbulentsissa olosuhteissa.

Forchheimerin malli ei kuitenkaan ota huomioon kutistumista, laajentumista tai rainan epälineaarisuuksia, kuten realistisessa prosessissa esiintyy. Sen vuoksi pelkästään lineaariset efektit eivät johda turbulenssiin, vaan paremminkin hitausvoimien vaikutus suspensiossa.

2.1.3 Virtausvastukset suotautumisen aikana

Kun analysoidaan virtausvastuksia suotautumisen aikana, se yleensä tehdään joko vakioaineessa tai vakionopeudessa. Vakionopeudella tapahtuvassa suotautumisessa tilavuusvirta pidetään vakiona ja paine-ero rainan poikkileikkauksella muuttuu. Vakioaineessa tapahtuva suotautuminen on taas päinvastainen tapahtuma. Yleisesti käytetty menetelmä on ilmaista hetkellinen suotautumisvastus Kozenyn-Carmanin lausekkeella [12]. Tämä työ ehdottaa uutta lähestymistapaa löytää suotautumisvastus nesteen virratessa huokoisessa aineessa, ja rakentuu Forchheimerin kaavalle.

Rainan hetkellinen virtausnopeus voidaan laskea, jos poikkileikkauksen A läpi tapahtuvan tilavuusvirran vaihtelu tiedetään:

$$v = \frac{\partial V / \partial t}{A}. \quad (2-7)$$

Olkoon rainan paksuus L , huokoisuus ε ja tiheys ρ_p . Kun vielä otetaan mukaan retentio \mathfrak{R} , jota pidetään vakiona koko suotautumisprosessin ajan, voidaan laskea rainan kiintomassatase. Koska huokoiseen väliaineeseen kertyvä neste- ja kiintoainemäärä on häviävän pieni verrattuna läpivirtaavaan nesteeseen, oletetaan että prosessi tapahtuu vakiotiheydessä.

Tällöin

$$LA(1 - \varepsilon)\rho_p = C_s \mathfrak{R}V, \quad (2-8)$$

jossa

ρ_p = rainan tiheys (keskimääräinen partikkeleiden tiheys) [g/cm³]

C_s = rainan sakeus [g/cm³].

Retentio lasketaan sulpun sakeuden ja suodoksen sakeuden suhteista. Viiraretentio (first pass retention) lasketaan perälaatikon sakeuden ja mitatun viiraveden sakeuden suhteesta siten, että

$$\mathfrak{R} = 100\% \frac{(\text{sulppu} - \text{suodos})}{\text{sulppu}}.$$

Yhdistetään yhtälöt (2-3), (2-7) ja (2-8) ja eliminoidaan v ja L siten saadaan

$$\frac{\partial V / \partial t}{A} = \frac{\Delta P}{\frac{k_1(1 - \varepsilon)S_v^2}{\rho_p \varepsilon^3} \frac{\mu C_s \mathfrak{R}V}{A}}. \quad (2-9)$$

Mikäli halutaan määrittellä erikseen kuidun muodoista riippuva ominaissuotautumisvastus, joudutaan määrittämään partikkelien pinta-ala ja tiheys ja rainan huokoisuus. Ominais-suotautumisvastus α voidaan nyt ilmaista yhtälönä

$$\alpha = \frac{k_1(1 - \varepsilon)S_v^2}{\rho_p \varepsilon^3}. \quad (2-10)$$

On huomattava, ettei ominaissuotautumisvastus ole sama kuin Darcyn permeabiliteetin käänteisarvo. Yhdistämällä kaavat (2-9) ja (2-10) saadaan yksinkertaistettu muoto

$$\frac{\partial V / \partial t}{A} = \frac{\Delta P_m}{\alpha \frac{\mu C_s \mathfrak{R}V}{A}}. \quad (2-11)$$

Määrittelemällä ominaissuotautumisvastus $R_m = \frac{\alpha C_s V \mathfrak{R}}{A}$, saadaan edelleen

$$\frac{\partial V / \partial t}{A} = \frac{\Delta P_m}{\mu R_m}. \quad (2-12)$$

Kokonaispainehäviöön ΔP_T tulee ottaa mukaan viirassa tapahtuva painehäviö ΔP_w , joten

$$\Delta P_T = \Delta P_m + \Delta P_w. \quad (2-13)$$

Liittämällä lauseke (2-11) lausekkeeseen (2-13) saadaan

$$\frac{\partial V / \partial t}{A} = \frac{-\Delta P_T}{\mu \left(\alpha \frac{W}{A} + R_m \right)}, \quad (2-14)$$

jossa

W = kiintoaineen massa sulpussa ($C_s \mathcal{R}V$) [g].

Tässä $\alpha \frac{W}{A}$ ilmaisee suotautumisvastusta rainassa. Ominaisuotautumisvastus α on rainalle ominainen kerroin läpi koko suotautumisprosessin, ja riippuu rainan sisäisistä parametreista. Kozenyn-Carmanin yhtälö voidaan nyt kirjoittaa muodossa

$$\frac{dt}{dV} = -\frac{\mu}{(-\Delta P_T)A} \left(\alpha \frac{W}{A} + R_m \right). \quad (2-15)$$

2.1.4 Viskoottisten ja inertiaalisten vastusten analyysi Forchheimerin kaavassa

Forchheimerin kaava kirjoitettiin aikaisemmin muodossa

$$\frac{\Delta P}{L} = av + bv^2. \quad (2-4)$$

Mitattu paine-ero on summa paineen muutoksesta sulppua tukevassa viirassa ja paineen muutoksesta poikki rainan, yhtälö (2-13). Paineen muutos viirassa voidaan kirjoittaa muodossa

$$\Delta P_w = a_w v + b_w v^2. \quad (2-16)$$

Eliminoimalla v ja L saadaan paineen muutos rainassa muotoon

$$\Delta P_m = \left(\frac{W}{A(1-\varepsilon)\rho_p} \right) \left[a_m \left(\frac{dV/dt}{A} \right) + b_m \left(\frac{dV/dt}{A} \right)^2 \right]. \quad (2-17)$$

Kun otetaan mukaan viirasta aiheutuva paineen muutos, saadaan yhtälö

$$\Delta P_T = \left(\frac{W}{A(1-\varepsilon)\rho_P} a_m + a_w \right) \left(\frac{dV/dt}{A} \right) + \left(\frac{W}{A(1-\varepsilon)\rho_P} b_m + b_w \right) \left(\frac{dV/dt}{A} \right)^2. \quad (2-18)$$

Tässä yhtälössä L on kiinteä nesteen virratessa viiran läpi, mutta muuttuu suotautuvassa kerroksessa. Tämä on otettava huomioon massataseen laskussa yhtälössä (2-8), jossa muuttuva L on ilmaistu rainan aukkosuhteen ja suotautuvan kiintoaineen tiheyden funktiona. Ominaisuotautumisvastuksessa tämä on otettu mukaan termissä $(1-\varepsilon)\rho_P$. Tämä näyttäisi olevan looginen tapa ilmaista virtausvastus suotautumisen aikana, jolloin rainan fysikaaliset ominaisuudet ovat sisällytetty yhteen termiin. Yhtälö (2-18) on yleinen muoto ja kykenee ilmaisemaan suotautumisprosessin sekä laminaarisessa että turbulentsissa olosuhteissa. Viirasta johtuvat vastustermit a_w ja b_w tulee arvioida useammalla kuin yhdellä paine-ero alueella.

Jos viskoottinen termi dominoi, voidaan yhtälö (2-18) kirjoittaa muodossa

$$\Delta P_T = \left(\frac{W}{A(1-\varepsilon)\rho_P} a_m + a_w \right) \left(\frac{dV/dt}{A} \right). \quad (2-19)$$

Derivaattamuoto saadaan siirtämällä dt/dV yhtälön vasemmalle puolelle:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{1}{(\Delta P_T)A} \left(\frac{W}{A(1-\varepsilon)\rho_P} a_m + a_w \right). \quad (2-20)$$

Jos inertia-termi dominoi, yhtälö (2-18) voidaan kirjoittaa muotoon

$$\Delta P_T = \left(\frac{W}{A(1-\varepsilon)\rho_P} b_m + b_w \right) \left(\frac{dV/dt}{A} \right)^2. \quad (2-21)$$

Derivaattamuoto saadaan siirtämällä $(dt/dV)^2$ yhtälön vasemmalle puolelle, jolloin

$$\left(\frac{dt}{dV} \right)^2 = \frac{1}{(\Delta P_T)A} \left(\frac{W}{A(1-\varepsilon)\rho_P} b_m + b_w \right). \quad (2-22)$$

2.2 Retentio

Retentio riippuu monista virtausprosessin parametreistä. Suspensio sisältää ison joukon erikokoisia kuituja ja muuta hienoainesta. Retentio ei ole vakio rainan muodostuksen aikana. Aluksi se on hyvin matala, koska ainoastaan suodinväliaineeseen kertyy kuituja. Ajan kuluessa kuitumatto (raina) kasvaa ja alkaa myös toimia kuituja ja hienoainesta keräävänä väliaineena. Retentioon vaikuttaa suspension kuitujen muodot, mitat, kuitujen joustavuus, orientaatio, kuituja sitovat sähkökemialliset voimat, viiraverkon geometria ja hydrodynaamiset voimat (leikkausvoimat, turbulenssi ja vedenpoisto) viira saostuva kuitumatto - rajapinnalla.

2.2.1 Hienoaineretentio

Hienoaines on mitoiltaan kaikki alle 75 µm leveät partikkelit. Alussa kaikki hienoaines kulkee läpi viirakankaan. Hienoaineksen voidaan olettaa seuraavan muuta virtausta ja mikäli se joutuu ns. sieppausradalle, jossa kuidut rainautuvat, myös osa hienoaineksesta tarttuu rainaan. Osa hienoainepartikkeleista jatkaa matkaansa virtauksen mukana törmäten toisiinsa ja kuituihin. Tällöin vander Waals - voimien vaikutuksesta ne tarttuvat toisiinsa ja muodostavat isompia partikkelikasautumia. Tavallaan ne törmäyksissä pommittavat retentoituvia kuituja ja saavat aikaan retentioitumista vastustavia ilmiöitä. Tämä törmäysilmiö saa aikaan muodostuvassa kuitumatossa pienoisturbulenssia, joka nostaa kasaantuneita raskaimpia partikkeleita kohti kuitumaton keskustaa. Retentio voi kuitenkin huonontua virtausnopeuden kasvaessa. Tällöin törmäykset voivat hajottaa kuitumattoa. Tästä seuraa myös, että hienoainesta siirtyy enemmän kuitumaton viiran puoleiseen pintaan. Pienet partikkelit voivat tällöin kasaantua ja tukkia viiran virtausaukot. Jos hienoainesta käytännössä kuitenkin on, hienoaineksen retentioituminen tapahtuu retentiokemikaalien avulla. Tyypillisiä retentioaineita ovat synteettiset polymeerit. Ne ovat pitkiä molekyyliketjuja ja muodostuvat molekyylien liittyessä yhteen. Vaikutuksen kannalta olennaisia tekijöitä ovat molekyylipaino, funktionaaliset ryhmät, varaustiheys ja kemiallinen ympäristö. Agglomerointiprosessi tarkoittaa prosessia, jossa suspendoitunut hienoaines muutetaan mekaanisesti erottuvaan muotoon. Prosessi koostuu siirtymävaiheesta ja muutosvaiheesta. Siirtymävaiheessa partikkelit pääsevät lähelle toisiaan ja flokkautuvat. Muutosvaiheen aikana tapahtuu koaguloitumista ja flokkuloitumista.

2.3 Katsaus ved enpoistomittaukseen testilaitteilla

Paperin ja kartongin tekijät tarvitsevat testilaitteita varmistamaan lopputuotteen laadun. Testauslaitteet jaetaan kahteen kategoriaan, paperiteollisuuden kontrollitestilaitteisiin, jotka ovat nopeita ja helppoja käyttää ja on usein kytketty jatkuvaan prosessin seurantaan valvomon näyttöpäätteeltä. Lisäksi on käytössä erilaisia laboratoriotestilaitteita.

Kolme yleisintä kontrollitestilaitetta ovat Canadian Standard Freeness (CSF, Tappi-standardi 227), Shoppler-Riegler (SR) ja TAPPI standard drainage time (Tappi standardi 221).

2.3.1 Laboratoriotestilaitteet

Ingmanson [8] analysoi keskimääräistä suotautumisvastusta perusmassalla ja määritteli sen sekä vakioapaineella että vakiovirtaamalla hyvin alhaisella sakeudella 0,01 %. Lisäksi virtausnopeus oli alhainen. Työtä tarkennettiin ei-laaminaarisen virtauksen puolelle Forchheimerin kaavaa käyttäen, ottamalla huomioon sekä viskoottiset että inertiaaliset voimat [14],[15],[16]. Hän tuli johtopäätökseen, että inertia tulee merkittäväksi virtausnopeuksien noustessa yli 1cm/s.

Wahlström ja O'Blenes [17] tekivät kokeita vakioapaineessa tapahtuvalla testilaitteella, joka pystyi käsittelemään korkeampia sakeuksia ja virtausmääriä. He käyttivät testeissä sakeuksia 0,3 - 0,75 %, eri jauhatustasasteita, painevaihtelua 5 - 40 kPa, massan oikeaa lämpötilaa ja formaatioaikaa, joka tarvitaan n. 60 g/m²:n neliöpainon saavuttamiseen. Formaatioaikaa verrattiin SR- aikaan samalla massalla.

Andrews ja White [18] analysoivat virtausominaisuuksia rainan muodostumisen aikana. He totesivat, että sekä viskoottinen että inertiaalinen termi olisivat mukana turbulenttisella virtauksella. He suunnittelivat vakiovirtausnopeudella tapahtuvan testilaitteen, joka ei tosin huomionnut kokoonpuristumista turbulenttisen virtauksen aikana. Paineen muutos rainassa mitattiin useilla neliöpainoalueilla 10 - 100 g/m², virtausnopeuksilla ja huopautusväliaineella. He osoittivat myös, että pieni paineen muutos tapahtuu myös viirassa, ja että kokonaispaineen muutos oli summa paineen muutoksesta rainassa ja viirassa.

Britt ja Unbehend [19],[20] kehittivät dynaamisen vedenpoistomittauslaitteen (DDJ), jossa sulppuun saatiin aikaan turbulenssi sekoittajan avulla, kun samaan aikaan neste suotautui viiran läpi alaspäin. Penniman ja Olson [21] tekivät DDJ- mittauksia mitaten kokonaisaikaa, mikä kului massasuspensiolta suotautumiseen. Aika korreloi massan lämpötilan ja z- potentiaalin kanssa.

Abson *et al.* [20] kehittivät DDJ -mittauslaitetta. Neliöpainolla 55 g/m^2 ja alipaineerolla 3,75 kPa mitattiin hienoaineretentio ja suotautumisaika. Kokeita toistettiin lisäämällä massaun erilaisia retentoitumisaineita ja kokeilemalla eri turbulenssitasoja. Britt *et al.* kehittänyt myös hilamittausmenetelmän kyseiseen laitteeseen mittaamaan formaatiota eli pienimittakaavaista neliömassan vaihtelua. He myös tutkivat sulpun sakeutta laitteessa. Testeissä saatu lopputulos vaihteli massatyypin, hienoaineen, käytetyn alipainetason, turbulenssin ja kemiallisten lisäaineiden tyyppin mukaan. Britt *et al.* kehittänyt laitetta myös niin, että sillä voitiin mitata vaihtelevia painepulseja suotautumisen alusta lähtien [23]. Tämä oli alku suotautumien simulaatiomalleille. Laitte tulosti vallitsevan alipaineen ajan funktiona. Poistuvan veden tilavuusvirta mitattiin samoin kuin hienoainepitoisuus. Tutkittiin myös laitteen käyttöä painovoiman avulla tapahtuvassa suotautumisessa ilman, että raina muodostuu. Tämä on myöhemmin liitetty osaksi painepulssien suotautumisen aikaista tutkimusta, esim. foililistojen painepulssien tapahtuessa. Hienoaineretentio mitattiin muutamilla lisäaineilla pulsaatiosuotautumisen aikana.

Springer ja Piers [24] käyttivät Brittin laitetta ja muunsivat sitä lisäämällä kuusi elektronia mittaamaan suotautumisaikaa ja tilavuusvirtaa. Sakeuksilla 0,1 - 0,5 %, alipaine-eroilla 11,8 - 32,2 kPa, ja eri turbulenssitasoilla ja lämpötiloilla tutkittiin ominaissuotautumisvastusta muutamalla massakoostumuksella. SFR - tuloksia verrattiin CSF:n tuloksiin. Myöhemmin tehtiin kokeita ilmattomalla massalla lisäämällä hiutaloitumisainetta ja erityyppisiä täyteaineita massan sekaan [25].

Vuonna 1994 Springer *et al.* [26] hyödynsivät laitteistoa simulaatiomallissaan mittaamalla SFR:tä ja virtauspotentiaalia on-line -mittauksena. Mittauksessa jännite-ero virtausputkessa vastaa tilavuusvirtaa ulostulossa. Samalla tutkittiin erilaisten massan jauhatusteiden ja goakulointiaineiden vaikutusta ominaisvirtausvastukseen ja virtauspotentiaaliin.

Gess [27] osoitti, että erilaisille massoille voidaan vedenpoiston ajatella tapahtuvan vedenpoistomallien mukaan. Vakio-tilavuusvirtamittauksessa määritettiin erilaisille massoille suotautuminen ajan funktiona. Muodostusvyöhyke koostui kolmesta kerroksesta. Ensimmäinen kerros (web forming zone) käsittää tasoviiran suspension vesirajaan saakka. Toinen kerros (compacting zone) käsittää rainan vesirajasta kuivaraajaan. Kolmannessa kerroksessa jäljellä oleva vapaa vesi siirtyy viiraan. Eri kerrokset tunnistettiin vaihtamalla tyhjötasoja ajan funktiona. Kerroksessa yksi kuluva aika oli suhteessa massan jauhatusteeseen, retentioainemäärään ja sen sekoittumisaikaan sekä sulpun sakeuteen. Sayegh ja Gonzalez (1996) tutkivat suotautumista useilla eri massatyypeillä.

Ramarao *at al.* [28],[29] tutkivat painovoimaista suspension suotautumista ja ottivat selvää z-suuntaisesta hienoaineretentiosta isoilla neliöpainoilla. Massan permeabiliteetti ja puristuvuus olivat sopusoinnussa olemassa olevan teorian kanssa. Virtausnopeus mitattiin ultraäänellä.

Mantar ja Genco [13] tutkivat vakiopaineessa tapahtuvaa suotautumista erilaisilla sulpuilla. Hetkellinen virtausnopeus määritettiin suotautuvasta tilavuusvirrasta. Tilavuusvirta mitattiin jännite-erona suodoksessa. Neliöpainon, sakeuden ja jauhatusteiden vaikutukset tutkittiin eri suotautumisvastuksilla.

2.3.2 Rajoitukset aikaisemmillä testilaitteilla

Monet aikaisemmat pyrkimykset luonnehtia vedenpoistotapahtumaa laboratoriotestien perusteella ovat kuitenkin rajoitetusti onnistuneet ennustamaan vedenpoistotapahtumaa paperikoneolosuhteissa. Suurin osa koelaitteista käyttää kokemusperäisiä mittoja tai ottaa huomioon ainoastaan viskoottisen virtauksen. Toinen rajoitus on neliöpainon mittauksen puuttuminen turbulenttisen virtauksen aikana. Suotautuva tilavuusvirta ja neliöpaino voivat merkittävästi vaikuttaa retentioon, mikä vallitsee annetulla rainan aukkosuhteella ja vastaavalla vastusarvolla. Vastusarvo ilmoitetaan usein keskiarvona. Virtausvastus muuttuu jatkuvasti riippuen suotautumisen vaiheesta. Monet laitteet käyttävät myös vakiosuotautumisarvoa, joka sallii poikkeavan paine-eron, mikä vaikeuttaa vastusarvon tulkintaa. Yksikään aikaisempi laite ei ole ottanut huomioon retention muuttumista ajan mukana. Retentio on aluksi alhainen, koska ainoastaan viira pysäyttää kuituja, mutta se muuttuu kuitumaton kasvaessa ja pienentäessä vapaita

vedenvirtausaukkoja. Lisäksi on mainittava, että laboratorio-olosuhteet ovat tyystin erilaiset kuin tehdasolosuhteet paperikoneella.

3 Vedenpoistolaitteen kehittäminen

Selvästi on tarvetta vedenpoistolaitteelle, jolla poistetaan aikaisempia rajoituksia vedenpoistomittauksista. Tämän työn päämäärä on suunnitella kyseinen laite. Ennen varsinaisen työn alkamista on kuitenkin tärkeää analysoida olennaiset laitteen säädettävyyteen liittyvät asiat. Vedenpoistossa tärkeimpiä säätöparametreja ovat sulpun sakeus, rainan lopullinen neliöpaino ja vedenpoiston tilavuusvirta. Nämä säätöparametrit ohjaavat laitteen mitoittamista yhtä hyvin kuin aikaikkuna, missä ilmiöt tapahtuvat.

3.1 Teollinen rainan muodostuminen

Perälaatikon sakeus ja tavoiteltu neliöpaino määrittelevät tarvittavan massasuspension pinta-alayksikköä kohti. Toimintaikkunassa neliöpaino ja perälaatikon sakeus edustavat laajaa valikoimaa toimintaparametreja erilaisilla paperi- ja kartonkilaaduilla. Lähdettäessä suunnittelemaan koelaitetta pitää lähtökohdaksi ottaa samat parametrit kuin teollisuudessa. Toimintaparametrien tulee olla valittu niin, että ne kattavat tärkeimmät paperilaadut: sanomalehtipaperi, hienopaperi ja LWCRS (Light weight coated raw stock). Liitteissä 1, 2 ja 3 on annettu toiminta kuvaukset eri paperilaaduille. Beloit Corporationin Rocktonin tutkimuslaboratorion aineistoa on käytetty, mikäli paperitehtaan tietoja ei ole ollut käytettävissä. Valitut toimintaparametrit on listattu taulukossa 3.1-1. Massasulpun paksuus perustuu taulukossa annettuun retentioarvoon ja muille retentioarvoille tulee paksuus arvioida uudestaan.

Taulukko 3.1-1. Teolliset toimintaolosuhteet ja vastaavat sulpun paksuudet

LAJI	NELIÖ- PAINO [g/m ²]	PERÄLAA- TIKON SAKEUS %	RETENTIO- ARVO	SULPUN PAKSUUS MIN [mm]	SULPUN PAKSUUS MAX [mm]
Sanomalehti	42-49	0,8-1,0	0,50	6,4	12,0
LWCRS	34-53	0,7-0,9	0,60	6,3	12,7
Hienopaperi	55-80	0,55-1,0	0,75	7,3	19,3

Sanomalehti on valmistettu happamissa olosuhteissa sisältäen TMP:tä (Thermo mechanical Pulp), mekaanista hioketta, uusiomassaa ja pienen määrän puolivalkaistua havupuusellua. Täyteaineita tai retentioaineita käytetään sanomalehdellä harvoin. Yleisimmät neliöpainot ovat sanomalehdellä 42 - 49 g/m². Perälaatikon sakeus on 0,8 - 1,3 %, riippuen muodostusosasta. Maksimi ja minimi sulpun paksuudelle koelaitteessa ovat kullakin lajilla tarpeellinen suunnittelun lähtökohta. Sanomalehdellä sulpun paksuuden minimi esiintyy neliöpainolla 42 g/m² ja perälaatikon sakeudella 1,3 %. Vastaava paksuus näillä arvoilla on noin 3,2 mm. Maksimaalinen paksuus esiintyy neliöpainolla 49 g/m² ja sakeudella 0,8 %, ja on arviolta 6,0 mm.

LWCRS-laadut ovat massakoostumukseltaan noin 50 % valkaistua pitkäkuituista havupuusellua ja 50 % TMP:tä, CTMP:tä, GW:tä tai PGW:tä. Niitä valmistetaan sekä happamassa että alkaalisessa ympäristössä ja ne sisältävät pieniä määriä täyteaineita (5 - 10 %) ja retentioaineita. Tyypilliset neliöpainot ovat 34 - 53 g/m² ja perälaatikon sakeus 0,7 - 0,9 %. Minimaalinen sulpun paksuus neliöpainolla 34 g/m² ja sakeudella 0,9 % on arviolta 3,8 mm. Maksimaalinen paksuus 7,6 mm saavutetaan neliöpainolla 53 g/m² ja 0,7 %:n sakeudella.

Puuvapaa hienopaperi on massakoostumukseltaan täysin valkaistua kemiallista massaa. Tyypillisesti se koostuu 75 %:sta lyhytkuituista koivusellua ja 25 %:sta pitkäkuituista havupuusellua. Neliöpainoalue on 55 - 80 g/m² ja perälaatikon sakeus on 0,55 - 1,0 %. Hienopaperi valmistetaan alkalisissa olosuhteissa suhteellisen isolla täyteainepitoisuudella (20 % tuhkaa), ja lisäksi käytetään erilaisia retentioainejärjestelmiä riippuen siitä kuinka saavutetaan paras viiraretentio. Minimaalinen sulpun paksuus 5,5 mm tulee neliöpainolla 55 g/m² ja sakeudella 1,0 %. Vastaavasti maksimi, 14,5 mm, saadaan neliöpainolla 80 g/m² ja sakeudella 0,55 %.

Teollisessa paperinvalmistuksessa retentioon vaikuttavat monet tekijät. Hienopapereilla on korkein retentio yleensä 65 - 80 %. Retentioaineita käytetäänkin yleisesti hienopapereita valmistettaessa. Sanomalehdellä retentio on alhainen (45 - 55 %), eikä retentioaineita yleensä käytetä. LWCRS sisältää vähemmän hienoaainesta kuin sanomalehti ja yleensä käytetään pieniä määriä retentioaineita. LWCRS:n retentio on korkeampi kuin sanomalehden, mutta pienempi kuin hienopaperin (55 - 65 %).

3.2 Tavalliset vedenpoistoparametrit

Vallitseva vedenpoistonopeus on myös merkittävä tekijä suotautumistapahtumassa. Vedenpoistonopeus riippuu käytettävästä massasta ja muodostusosan geometriasta. Keskimääräiset vedenpoistonopeudet arvioitiin Beloitin Roctonin tutkimuslaitoksen koekoneella. Koekoneajon aikana poistunut vesitilavuus mitattiin patomittauksella kanavasta. Keskimääräiset vedenpoistonopeudet on annettu taulukossa 3.2-1.

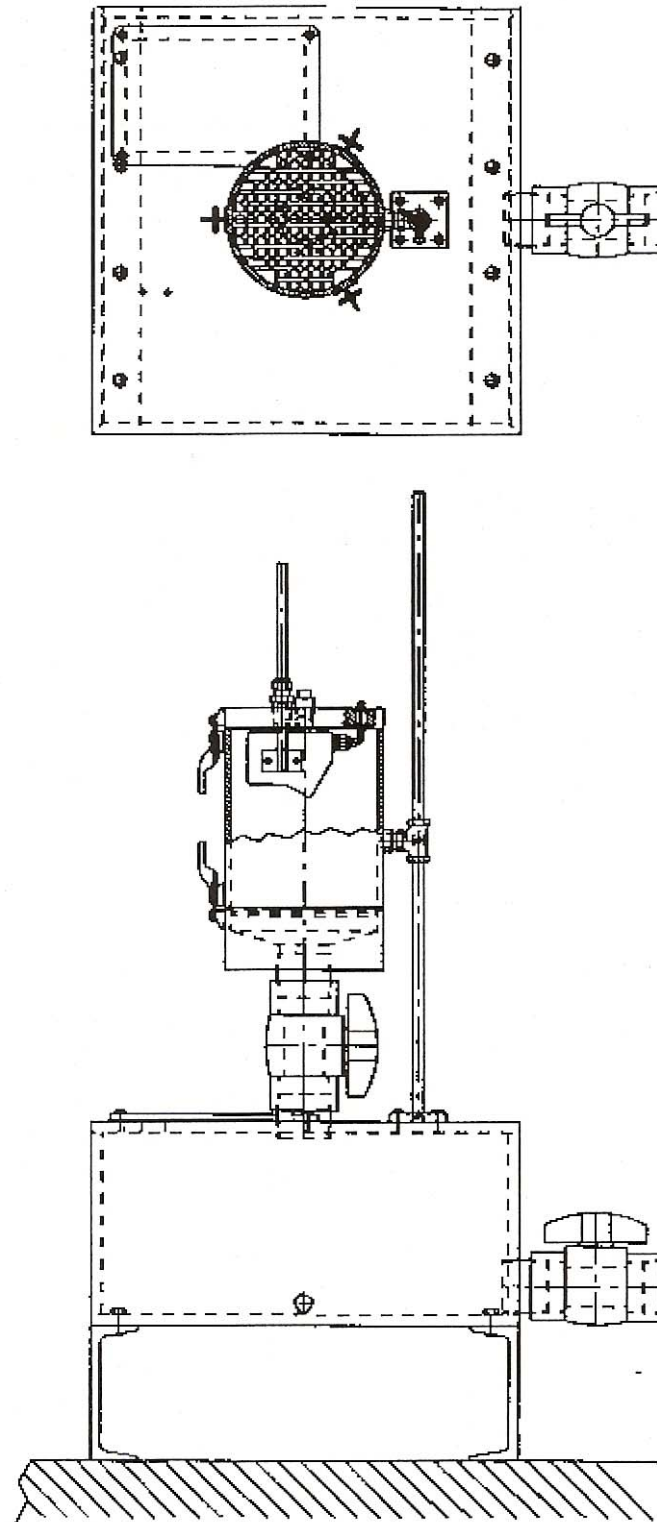
Taulukko 3.2-1. Arvioidut keskimääräiset vedenpoistonopeudet

LAJI	FORMERI	NELIÖ- PAINO [g/m ²]	FREENES (CSF) [ml]	VEDENPOISTO- NOPEUS [cm/s]
Sanomalehti	Lista	44	80	8,6
LWCRS	Lista	36	110	8,4
LWCRS	Tela/Lista	36	115	15,8
Hienopaperi	Lista	80	450	10,6

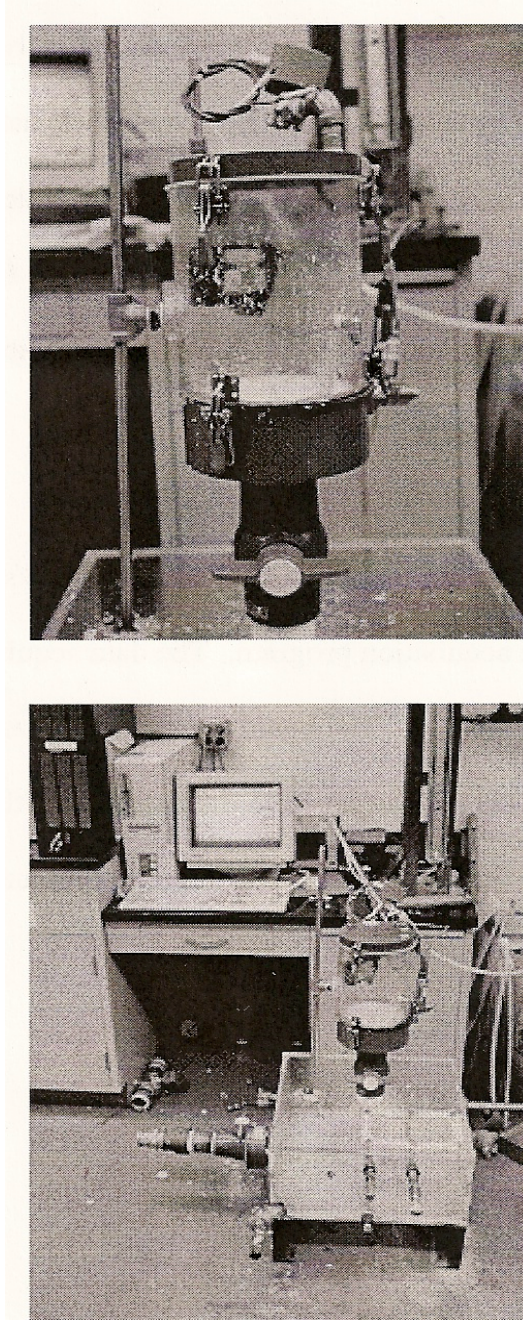
3.3 Mittauslaitteen kuvaus

Vedenpoistomittauslaite on suunniteltu toimimaan tuotanto-olosuhteissa paperikoneella. Se kykenee reaaliaikaisesti mittaamaan poistuvan veden määrää ja keräämään mittaustuloksia talteen säännöllisellä taajuudella. Se pystyy jopa analysoimaan kuitumaton paksuuden turbulenttisella virtauksella. Kaaviokuva laitteesta on kuvassa 3.3-1. Testilaitte on varustettu suodatinkankaalla, jonka tarkoitus on tukea päälle kerääntyvää suotautuvaa kuitumattoa. Ylempi kammio koostuu koneistetusta PVC-putkesta, jonka pohjalla on suodatinosa. Valetun akryyliputken pituus on 203,2 mm (8 in) ja sisähalkaisija 177,8 mm (7 in) 6,35 mm:n (.25 in) seinämällä. Kolme suodatinmattoa on kiinnitetty yhteen putkisangoilla. Silikonitiivisteet ovat kunkin suodatinmaton välissä takaamassa tyhjötason pysymisen. Alipaine tehdään alipainepumpulla. Putki on varustettu myös alipainemittariliitännällä. Kolmiomainen sulpun paksuudenmittausanturi sijaitsee ylempässä kammiossa ja mittaa kuitumaton paksuutta reaaliaikaisesti suotautumisprosessin ajan. Valokuva laitteesta on kuvassa 3.3-2.

Kolmiomainen anturi lähettää ulos laserpalkin ja keilaa mitattavan kohteen pinnan. Kohteen pinta heijastaa laservaloa joka palaa anturille. Jokainen siirtymä pinnalla heijastuu ja näkyy muutoksena heijastumakulmassa anturilla, joka rekisteröi muutoksen erilaisena ulostulojännitteenä. Tämä jännite kalibroidaan vastaamaan muutosta suotautumisprosessissa. Kolmioanturin lineaarinen ulottuvuus on 30 mm ja tarkkuus 30 μm . Ulostulojännite on 0 - 10 V yli 30 mm toiminta-alueen. Kun virtaustaso ylemmässä kammiossa laskee, ulostulojännite nousee. Mittarin taajuus voi vaihdella välillä 1-100 kHz. Sulpun kulkiessa ylemmästä kammioista kohti pesää se joutuu läpäisemään kaksi tuuman palloventtiiliä, joissa vallitsee vakiopaine. Ylempi kammioiden on kiinnitetty alempaan säiliöön akryyliputkella. Koko systeemi seisoo lattiaan kiinnitettynä. Molemmat kolmioanturit on kytketty tietokoneeseen. Tiedonkeräämiseen käytetään analogista syöttöpiiriä 16 bitin sisäänmenolla. Piiri toimii 0 - 10 V:n sisäänmenojännitteellä ja sisäisellä taajuudella 1 kHz. Ohjelma tulostaa tiedot näytteenottoajasta, tilavuusvirrasta ja paineesta. Kukin kolme tietoa voidaan ottaa 0,001 sekunnin välein.



Kuva 3.3-1. Kaaviokuva RDT-koelaitteesta (Rapid Drainage Tester)



Kuva 3.3-2. Valokuva RDT-koelaitteesta laboratoriossa

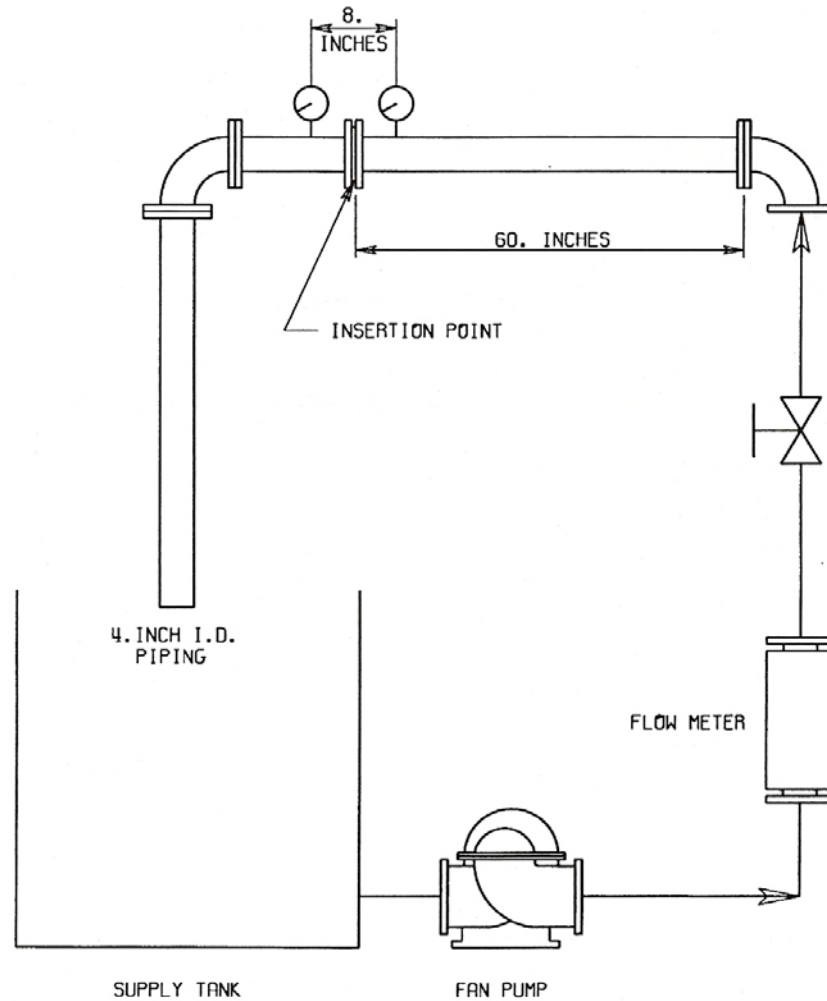
4 Laitteen virtausmittaukset

Käytettävän viiran vastuskerroin tarvitaan määritettäessä tarkasti kuitumaton vastusta. Viiran aiheuttaman vastuksen analysoiminen samanaikaisesti nopealla vedenpoistotestilaitteella voisi olla vaikeaa, jos viira ei aiheuttaisi isoa vedenpoistovastusta suhteessa kuitumattoon. Vastuksen mittaaminen hyvin nopean tapahtuman aikana olisi vaikeaa, eikä tarkkoja mittauspisteitä saataisi.

Vedenpoistovastus huokoisen materiaalin läpi voidaan mitata paine-erona materiaalin ylä- ja alapinnalta vakiovirtausnopeudella. Jos paine-ero on mitattu muutamilla virtaustilavuuksilla, se voidaan tulostaa virtausnopeuden funktiona. Mikäli tulos on lineaarinen, viskoottiset voimat noudattavat Darcyn lakia, ja viskoottinen vastuskerroin a voidaan ratkaista yhtälöstä (2-4) laittamalla inertiakerroin b nolllaksi. Jos käyrä ei ole lineaarinen, tulee inertiakerroin b ottaa huomioon. Tätä menetelmää tulee käyttää myös määritettäessä viiran vastuskerrointa.

4.1 Virtausvastuksen mittauslaite

Kokeet tehtiin kiertovesipiirissä, joka koostui 379 litran (100 gallonaa) tankista ja halkaisijaltaan 101,6 mm:n (4 in) putkilinjasta. Kaavio on esitetty kuvassa 4.1-1. Pumpun tilavuusmittari on kalibroitu tilavuusvirrasta kerättyyn tietoon. Mitattava osa liitetään putkilinjan kehykseen laippojen väliin. Painemittarit on sijoitettu laippojen molemmin puolin riittävän lähelle mitattavaa laitetta. Teoreettinen vastuskerroin voidaan nyt määrittää vähentämällä kehyksen aiheuttama paineen pudotus vastaavasta viiran aiheuttamasta pudotuksesta.



Kuva 4.1-1. Paine-eron mittauslaite huokoiselle aineelle

Paine-ero mitattiin tyhjällä kehyksellä eri virtaustilavuuksilla. Mittausten perusteella laskettiin Forchheimerin kaavalla

$$\frac{\Delta P}{L} = av + bv^2 \quad (2-4)$$

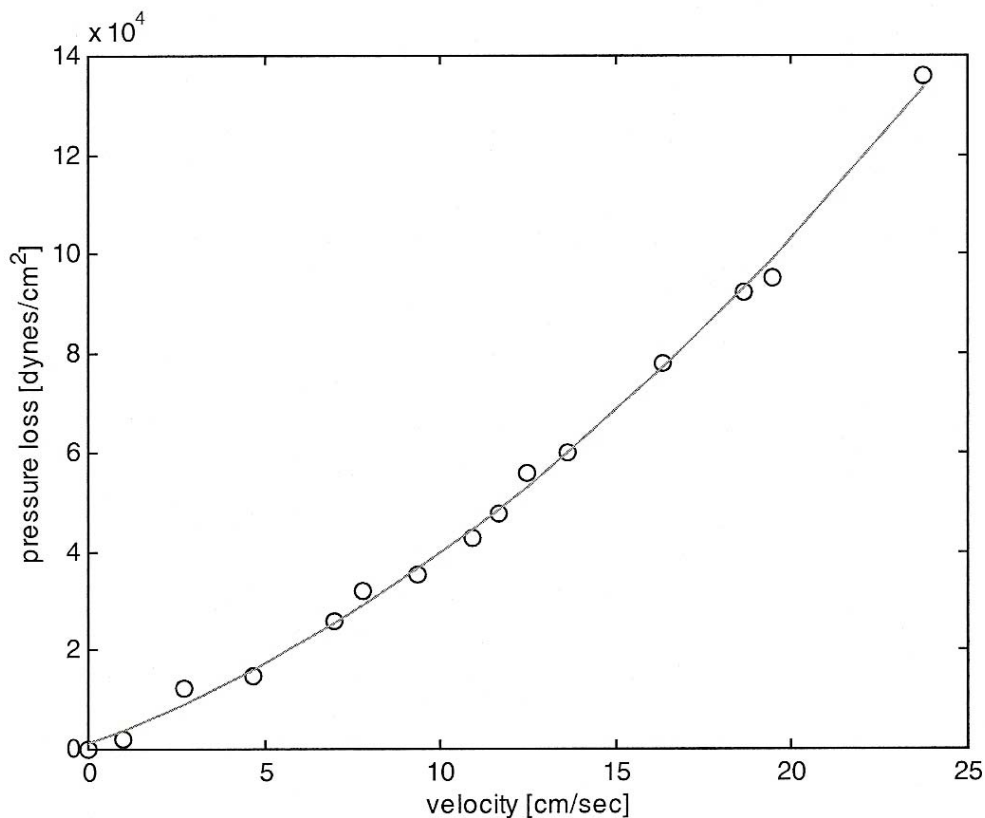
vastuskertoimet a ja b .

Viiran paksuus on vakio. Vastuskertoimet a ja b voidaan merkitä alaindeksillä (o) , jolloin

$$\Delta P = (La)v + (Lb)v^2 \quad (4-1)$$

$$\Delta P = a_o v + b_o v^2. \quad (4-2)$$

Kuvassa 4.1-2 näytetään painehäviö virtausnopeuden funktiona tyhjälle kehykselle. Tuloksena saadaan viskoottinen vastuskerroin $a \approx 1574 \text{ g/cm}^2$ ja inertinen vastuskerroin $b \approx 61 \text{ g/cm}^3$.



Kuva 4.1-2. Painehäviö virtausnopeuden funktiona tyhjälle kehykselle

4.2 Lasinen kiintopeti ja sen tulokset

Lasi on valittu kiintopedin materiaaliksi, koska se ei ole kokoonpuristuvaa. Lisäksi ominaisuudet kuten pakkaustiheys ja avoin pinta-ala tiedetään tarkasti.

4.2.1 Lasipalloilla pakatun huokoisen pedin teoria

Kiintopeti voidaan pakata lasipalloista useilla eri geometrioilla, jokaisella erilainen aukkosuhde. Hrubisek (1941) laski yksityiskohtaiset aukkosuhteet eri pallogeometrioille, joista yksi pallo koskettaa neljää muuta. Kaksi periaatteellista Hrubiskin tulosta ovat seuraavat:

1. Samanmuotoisilla pakkauksilla pedin aukkosuhde on riippuvainen pallojen halkaisijasta.
2. Aukkosuhde vaihtelee pintakeskeisesti pakatun (face-centered) rakenteen 0,26:sta aina 0,87:ään.

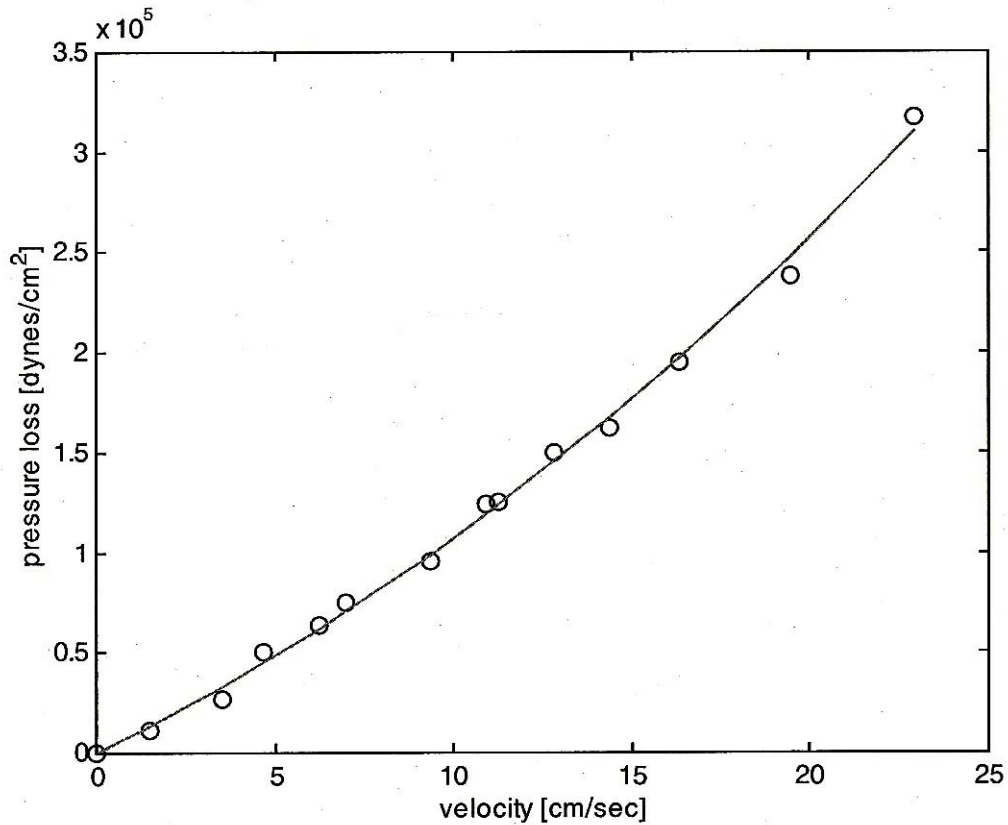
Normaalien mallien mukaiset aukkosuhteet (Le Poutre, 1995) on annettu taulukossa 4.2-1.

Taulukko 4.2-1. Pakattujen pallojen aukkosuhteet eri pakkausgeometrioilla

AUKKOSUHDE	PAKKAUSGEOMETRIA
0,25	pintakeskinen
0,35	random
0,45	kuutiollinen

4.2.2 FL-laitteen tulokset lasipedille

Virtauskokeella tutkittiin painehäviö 1cm:n paksuiselle pedille, joka koostui 0,735 mm:n halkaisijaisista lasipalloista. Lasipallon halkaisijan keskiarvo mitattiin mikroskoopilla 45:stä eri lasipallosta. Lasipallot aseteltiin kehukseen ja kehys asetettiin laippojen väliin. Virtausnopeus vaihteli välillä 0,02 - 0,25 cm/s. Painehäviö virtausnopeuden funktiona on esitetty kuvassa 4.2-1. Kokeen ajan kiintopeti on vakiovoiman alainen, johtuen veden virtauksesta sen läpi. Sen vuoksi on oletettavissa, että voimat voivat saada aikaan lasipallojen uudelleenjärjestymistä ja siten aukkosuhde saattaa vaihdella. Siksi kiintopeti täytetään siten, ettei mitään uudelleenjärjestäytymistä pääse tapahtumaan virtausmittauksen aikana. Aukkosuhteen määrittämiseksi tehtiin useita kokeita ja tulokseksi saatiin 0,28.



Kuva 4.2-1. Painehäviökäyrä 1 cm:n paksuiselle lasikuulapedille (735 μm)

4.3 Teoreettisen ja kokeellisen vastusarvon vertaaminen

Viskoottinen ja inertiaalinen vastuskerroin on määritettävissä polynomi sovituksella painehäviökäyrästä. Teoreettisesti viskoottinen vastuskerroin voidaan laskea kaavan (2-5) mukaan siten, että

$$a = k_1 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} S_v^2 \mu. \quad (2-5)$$

Vastaavasti inertiaakerroin perustuu kaavaan (2-6). Materiaalikohtainen kerroin $k_2 = 0,1\sqrt{k_1}$ saadaan kaavasta

$$b = k_2 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} S_v \varphi, \quad (2-6)$$

jossa φ on suspension tiheys.

Pallopinnalle ominaispinta-ala perustuu pallojen halkaisijaan [13],

$$S_v = \frac{6}{\text{halkaisija}}. \quad (4-3)$$

Viskoottisen ja inertiaalisen vastuskertoimen teoreettiset ja mitatut arvot on annettu taulukossa 4.3-1. Lisäksi siinä ilmoitetaan niiden välinen poikkeama prosentteina.

Taulukko 4.3-1. Teoreettisen ja kokeellisen vastusarvon vertaaminen

VASTUS	TEOREETTINEN	KOKEELLINEN	POIKKEAMA %
Viskoottinen [g/cm ² s]	6548	8570	31
Inertiaalinen [g/cm ³]	656	214	67

Teoreettiselle ja kokeelliselle kokonaispainehäviölle on annettu taulukossa 4.3-2. Teoreettinen inertiaatermi on selvästi suurempi kuin kokeellinen inertiaatermi. Ero niiden välillä kasvaa virtausnopeuden kasvaessa.

Taulukko 4.3-2. Kokonaispaineen vertaaminen virtausnopeuden funktiona

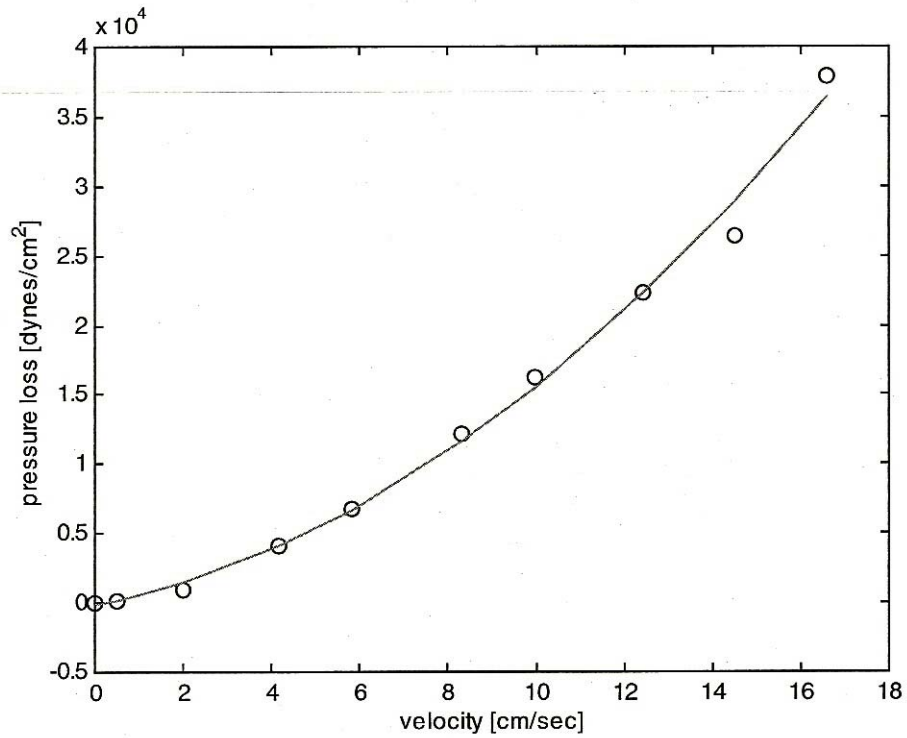
VIRTAUSNOPEUS [cm/s]	TEOREETTINEN PAINEHÄVIÖ [Pa]	KOKEELLINEN PAINEHÄVIÖ [Pa]	%
5	4914	4820	2
10	13108	10710	18
20	39336	25700	35

4.3.1 Viiran vastus

Tarkoissa mittauksissa tulee viiran oma vastus ottaa huomioon. Kokonaispainehäviö muodostuu kaavan (2-13) mukaan viiran ja kuitumaton painehäviöiden summasta,

$$\Delta P_T = \Delta P_m + \Delta P_w . \quad (2-13)$$

Koetulokset viiralle nro 1175, jonka ilmaläpäisy on 8374 m³/m²h (530 cfm), on annettu kuvassa 4.3-1. Viskoottiselle vastuskertoimelle on saatu a₀= 625 g/cm²s ja inertiaavastuskerroin on b₀= 95 g/cm³.



Kuva 4.3-1. Painehäviökäyrä viiralle nro 1175

Suhteelliset vastusten osuudet eri virtausnopeuksilla on taulukossa 4.3-3. Huomataan, että laminaarisella virtauksella viskoottinen termi dominoi, kun taas turbulenttisella virtauksella inertiatermi on dominoiva. Siirtymävirtauksen aikana molemmat termit ovat merkittäviä. Viskoottinen painehäviö on viskoottinen vastuskerroin kertaa virtausnopeus. Vastaavasti inertiasta johtuva painehäviö on inertiavastuskerroin kertaa virtausnopeuden neliö:

$$\Delta P_{TOT} = \Delta P_{VIS} + \Delta P_{INERT} \quad (4-5)$$

$$\Delta P_{VIS} = (aL)v \quad (4-6)$$

$$\Delta P_{INERT} = (bL)v^2. \quad (4-7)$$

Taulukko 4.3-3. Viskoottisen ja inertiaalisen termin suhteellinen osuus viiralle nro1175

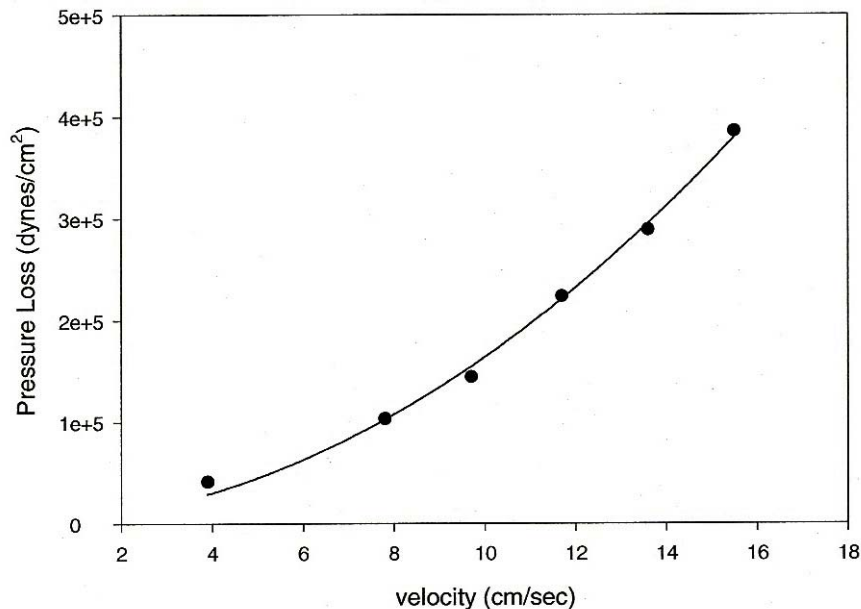
VIRTAUS- NOPEUS [CM/S]	VISKOOTTINEN PAINEHÄVIÖ [PA]	INERTINEN PAINEHÄVIÖ [PA]	% VISKOOTTINEN	% INERTINEN
5	310	238	57	43
10	620	950	40	60
20	1240	3800	25	75

4.3.2 Massa-alustan suotautumisvastus

Massakakku muodostettiin RDT:ssä (rapid drainage tester) ja sijoitettiin FL:ään (flow loop) sulpun virtausvastuksen ja sen viskoottisen ja inertiaalisen osuuden määrittämiseksi. Tukirakenne koostuu molemmin puolin massakakkua olevista viiroista, jotka on kiinnitetty laippojen väliin.

4.3.3 Kahden tukiviiran vastus

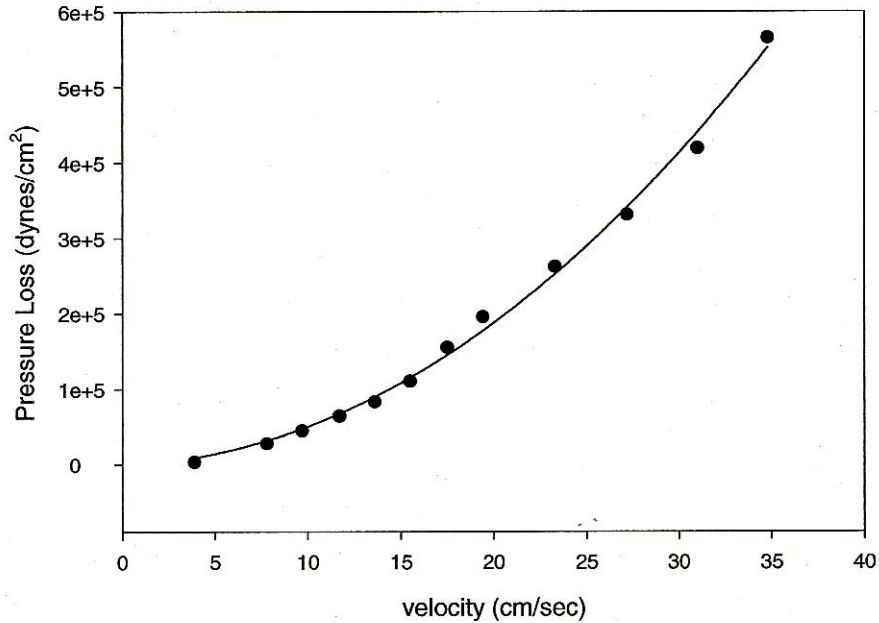
Ennen kuin massakakun vastuksen mittausta on selvitettävä kahden tukiviiran vastus. kahden viiran viskoottiseksi termiksi mitattiin $a_0 = 638 \text{ g/cm}^2\text{s}$ ja inertiaaliseksi $b_0 = 437 \text{ g/cm}^3$. Viirojen asemat tulee merkitä, jotta ne voidaan palauttaa samaan asentoon eri mittauksissa. Vastusmittauksen tulokset on annettu kuvassa 4.3-2.



Kuva 4.3-2. Painehäviö kahdelle tukiviiralle

4.3.4 Havupuumassa vastus

Neliöpainoltaan 35 g/m^2 :n havupuumassa tuotettiin RTD:llä $0,5 \%$:n sakeuteen $5,226 \text{ kPa}$:n (21 in vesipatsasta) alipaineessa. Tämä massakakku sijoitettiin FL:iin kahden viiran väliin viskoottisen ja inertiaalisen vastuksen määrittystä varten. Viskoottiseksi vastuskertoimeksi saatiin $0,91 \times 10^5 \text{ g/cm}^2\text{s}$, kun taas inertiaalinen vastuskerroin oli $0,73 \times 10^5 \text{ g/cm}^3$. Painehäviökäyrä on esitetty kuvassa 4.3-3.



Kuva 4.3-3. Painehäviökäyrä havupuunäytteelle 35 g/m^2 :n

Viskoottisen- ja inertiaalisen painehäviön suhteellinen vaikutus on annettu taulukossa 4.3-4. Arvot on laskettu samalla menetelmällä kuin luvussa 4.3. Näyttäisi siltä, että inertiatermi on vallitseva näillä virtausnopeuksilla. Painehäviökäyrän mittaaminen vaati aikaa muutaman minuutin. Kokoonpuristumisen vaikutusta ei tutkittu, koska aika oli lyhyt.

Taulukko 4.3-4. Viskoottisen- ja inertiaalisen painehäviön suhteellinen osuus

VIRTAUS- NOPEUS [CM/S]	VISKOOTTINEN PAINEHÄVIÖ [PA]	INERTIAALI- NEN PAINEHÄVIÖ [PA]	% VISKOOT- TINEN	% INERTI- AALINEN	KOKONAIS- PAINE- HÄVIÖ [PA]
5	1145	4788	19	81	5933
10	2290	19150	11	89	21440
20	4589	76600	6	94	81180

5 RDT-mittaukset

Teoreettinen viskoottinen vastuskerroin lasketaan kaavasta

$$a = k_1 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} S_v^2 \mu. \quad (2-5)$$

Seuraavat fysikaaliset ominaisuudet tulee tietää: sulpun viskositeetti, kuidun ominaispinta-ala ja aukko-osuus (huokoisuus). Materiaalivakio k_1 on 4,17, eli lasikuulat on pakattu random- muotoon [12]. Kuidun ominaispinta-ala lasketaan kaavan (4-4) mukaan.

5.1 Lasipedin vaistuksen mittaaminen

Vedenpoistolaite on suunniteltu tallettamaan kuitususpension vedenpoistosuureet, joita tyypillisesti käytetään myös tuotantokoneilla. Sakeutta ja lopullista neliöpainoa tarkastellaan samassa virtaussuunnassa kuin tuotantolaitoksella, vaikka itse vedenpoisto tapahtuu hyvin nopeasti. Tarkka anturi mittaa tulokset prosessista. Yksi kompromissi tehtiin ja se liittyi anturin takaisinkytkentäviiveeseen. Ongelma ei ole sulpun virtauksessa, vaan lasipedin ominaisuus on, että se nopeuttaa suotautumisprosessia, ja tarkat mittaukset vaikeutuvat anturin toimintarajan ylittyessä.

Mittauksissa käytetään eri halkaisijan omaavista lasikuulista tehtyjä lasikuulapetejä. anturin raja-arvot ylittyvät. Suspensio suotautui liian nopeasti, ja anturin raja-arvot ylittyivät. Sen vuoksi sulppuun sekoitetaan glyserolia, jotta päästään tavoiteltuun mittaustarkkuuteen. Silti alkuvedenpoisto on liian nopeaa, koska harvoin lasikuulapeti kasvattaa alussa suotautumisvastusta. Tämän vuoksi alkuvedenpoistoa ei huomioitu. Neljä muuttujaa vaikuttaa suotautumisnopeuteen: käytetty paine, lasikuulien halkaisija, lasipedin paksuus ja suspension viskositeetti. Useita erilaisia vaihtoehtoisia sovelluksia lasipedin paksuudesta tutkittiin anturin toimintarajoissa useilla eri viskositeetin ja paineen arvoilla. Tavoite oli mitata eri kombinaatioita, joilla saadaan riittävän pitkä vedenpoistoaika, jotta mittaustarkkuus olisi hyvä. Toinen tarkoitus oli löytää yksinkertaisin vaihtoehto koesarjaan.

Vedenpoistokoe 1cm:n pedin läpi 1100 μm :n ja 735 μm :n lasikuulilla tehtiin 0,498 kPa:n (2 in H_2O) alipaineella. Nämä kaksi erillistä petiä tuottivat hyvin dokumentoidun vedenpoistokäyrän ilman, että tarvittiin glyserolia tai lisäsuodinpapereita. Tämä paperi meni kasaan ja murtui, aiheuttaen virheellisen

tuloksen. Samalla pedillä suoritettiin useita mittauksia eri vedenpoistonopeuksilla. Tämän jälkeen laskettiin inertiattermin vaikutus. Suurimmilla vedenpoistonopeuksilla tulokset hajosivat huomattavasti, eivätkä olleet toistettavia. Tämän vuoksi mitattuja vastusarvoja verrattiin teoreettiseen viskoottisen termin arvoon. Lasikuulapetien lasikuulien halkaisijat tarkistettiin kokeiden jälkeen Nikon mikroskoopilla. Taulukossa 5.1-1 on lasikuulien halkaisijoiden minimi, maksimi ja keskiarvo molemmille pedille.

Taulukko 5.1-1. Mikroskooppimittauksen tulokset lasipedeille

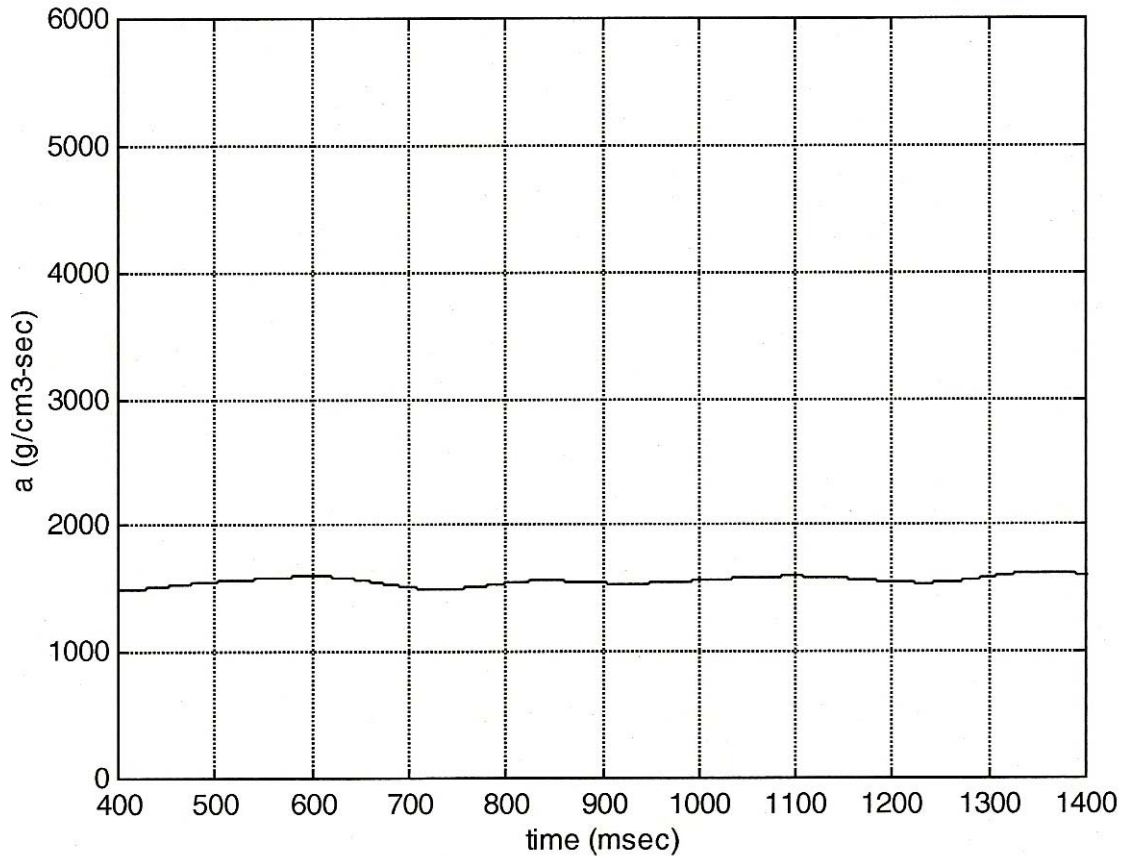
PETI	NIMELLINEN HALKAISIJA [mm]	KÄYTETTY HALKAISIJA [mm]			
		Keskiarvo	Min	Max	Mediaani
Nro #1	1000	1113	1024	1248	1104
Nro #2	500	735	672	816	736

Veden lämpötila mitattiin, jotta pystyttiin arvioimaan viskositeetti. Aukkosuhde tarkistettiin petrimaljalla veden syrjäytystilavuudesta 1,5 cm:in lasikuulapedillä. Ominaispinta-ala arvioitiin lasikuulien halkaisijoiden perusteella. Lopullinen listaus mittauksista ja arvioituista vakioista on taulukossa 5.1-2. Näihin arvoihin perustuen, teoreettiseksi viskoottisen vastuskertoimen arvoksi saatiin $1135 \text{ g/cm}^2\text{s}$.

Taulukko 5.1-2. Teoreettisen vastuskertoimen määrittäminen (peti nro 1)

TYYPPI	KUVAUS	ARVO
Mittausvakiot	Veden lämpötila	18 C°
	Lasikuulien halkaisija	1110 μm
	Aukkosuhde	0,36
Arvioidut vakiot	Veden viskositeetti	0,00106 kg/ms
	Kuitujen ominaispinta-ala	5,405 m ⁻¹
	Muototekijä	4,17
Laskettu arvo	Viskoottinen vastustermi (aL)	1700 g/cm ² s

Vedenpoistokoe tehtiin 250 ml:n vesimäärällä 1cm:n lasikuulapedin ja tukiviirojen läpi. Pedin vastuksen arvo on näytetty kuvassa 5.2-1. Pedin viskoottiseksi vastukseksi saatiin $1500 \text{ g/cm}^2\text{s}$.



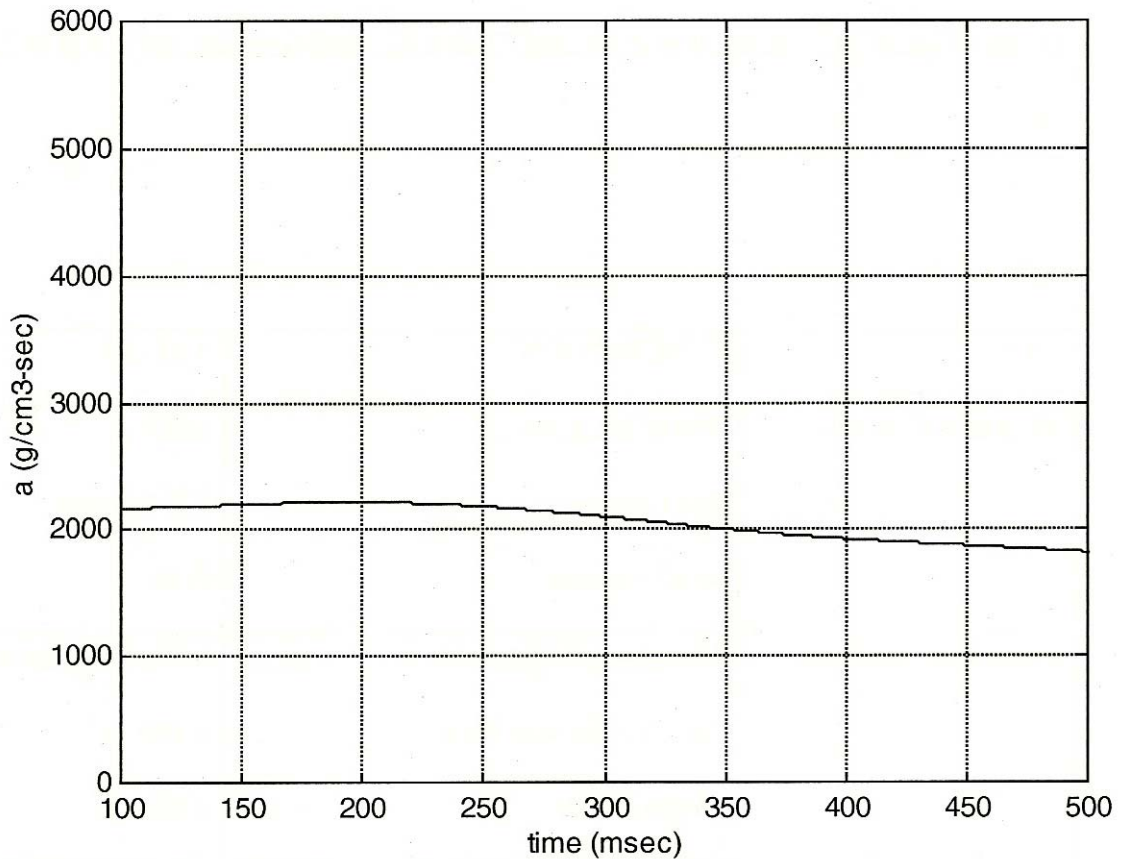
Kuva 5.1-1. Viskoottinen vastuskerroin 1 cm:n lasikuulapedille nro 1

Samat testit tehtiin pedille nro 2. Yhden senttimetrin peti koostui 735 μm halkaisijan omaavista lasikuulista. Vakiot on annettu taulukossa 5.1-3.

Taulukko 5.1-3. Teoreettisen vastuskertoimen määrittäminen (peti nro 2)

TYYPPI	KUVAUS	ARVO
Mittausvakiot	Veden lämpötila Lasikuulien halkaisija Aukkosuhde	18 C° 735 μm 0,36
Arvioidut vakiot	Veden viskositeetti Kuitujen ominaispinta-ala Muototekijä	0,00106 kg/ms 8,160 m^{-1} 4,17
Laskettu arvo	Viskoottinen vastustermi (aL)	2580 $\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$

Vastaavasti mitatut arvot on esitetty kuvassa 5.1-2. Arvo heilahtelee enemmän kuin 1113 μm :n pedillä, mutta on kuitenkin suhteellisen vakaa, noin 2100 $\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$.



Kuva 5.1-2. Viskoottinen vastus 1 cm:n lasikuulapedille nro 2

Taulukossa 5.1-4 on verrattu teoreettisia ja mitattuja vastusten arvoja näillä kahdella pedillä. Arvoja voidaan pitää hyväksyttävänä molemmilla pedillä.

Taulukko 5.1-4. Teoreettisten ja mitattujen viskoottisten vastusten vertaaminen

PETI - TYYPPI	TEOREETTINEN VSKOOTTINEN VASTUS [g/cm ² s]	MITATTU KESKIMÄÄRÄINEN VSKOOTTINEN VASTUS [g/cm ² s]	ERO %
Peti Nro #1	1700	1500	12
Peti Nro #2	2580	2100	19

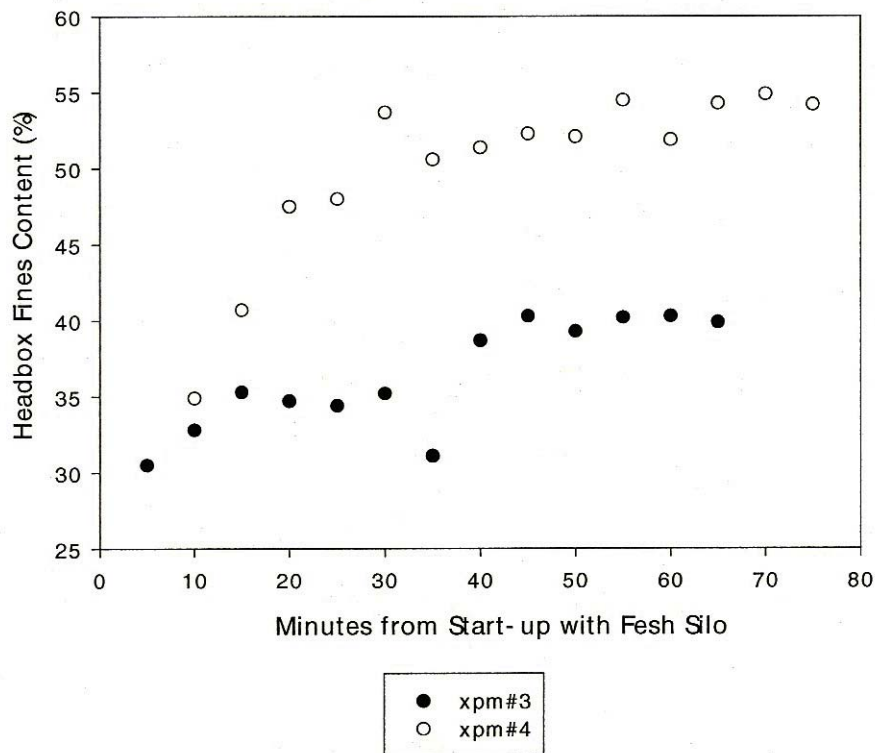
6 Kokeellisten menetelmien kuvaaminen

6.1 Tietojen kerääminen

Esitetty kokeellinen proseduuri käsittää massan karakterisoinnin, koelaitteiden valmistelun, antureiden kalibroinnin ja alustan suodatinosan karakterisoinnin.

6.1.1 Kuitususpension analysointi

Massa saatiin Beloitin Rocktonin tutkimuslaitoksen tiloista. Sekä perälaatikko - että reunanauhanäytteet ovat koneilta Pm3 ja Pm4. Kuumallakin koneella on omat lyhyet kierrot ja massatornit. Reunanauhanäyte otettiin suoraan sekoitussäiliöstä. Perälaatikkonäytteet otettiin sopivan ajan jälkeen koneen käynnistämisestä, jotta prosessi pääsi tasapainoon. Mikäli koeajo aloitettaisiin siten, että massasäiliöt olisi täytetty puhtaalla vedellä, menisi prosessivaihteluiden tasaantumiseen jonkin aikaa. Riippuen perälaatikon virtaamasta massa säiliössä vaihtuu 3-4 minuutin välein. Jotta taataan näytteiden tasapainoisuus, otettiin perälaatikkonäytteet viiden minuutin välein koneen käynnistymisestä. Tätä järjestelyä noudatettiin molemmilla koneilla. Hienoainepitoisuus mitattiin kuvan 6.1-1 mukaisen ajan jälkeen.



Kuva 6.1-1. Koekoneen perälaatikon kuitususpension tasaantuminen

6.1.2 Suspension karakterisointi

Ennen varsinaista koetta selvitettiin sulpun ominaisuudet: kuitutyppi, freenes, Britt hienoainekoostumus, tuhkapitoisuus ja sakeus. Freenes mitattiin Tappi - standardin T-227 mukaan. Hienoainekoostumus mitattiin seulamenetelmällä Tappi - standardin T-261 mukaan. Hienoaineen koostumus määrättiin mittaamalla materiaalin määrä, joka läpäisi 200 mesh - seulan turbulentsissa olosuhteissa. Kuidunpituus tutkittiin Kajaani

analysaattorilla. Tämä laite pumppaa kuidut läpi kapillaariputken, jossa kuidun pituuden mittausta tapahtuu. Sulpun sakeus määritettiin ennen kokeen suorittamista.

6.1.3 Kokeen valmistelu ja laitteiden kalibrointi

Koe aloitettiin kuitususpension ominaisuuksien selvittämisen jälkeen. Alemman kammion käsiventtiili suljettiin ja kuitususpensio kaadettiin varovasti ylempään kammioon. Kuitususpensio ei saa läpäistä suodatinosaa ennen kuin alemman kammion käsiventtiili avataan. Koe alkaa käsiventtiilin aukaisemisen jälkeen. Laite mittaa virtaustilavuuden ja sakeuden koko suotautumisprosessin ajan. Mittausanturin konvertoitiin tilavuusvirraksi. Jokaisen testin jälkeen jännitteen aikariippuvuus tarkastettiin, jotta taattiin, ettei anturi ollut liikkunut testin aikana. Kuitususpension lähtötilavuus mitattiin huolellisesti ja verrattiin kalibrointikäyrän antamaan tietoon.

6.1.4 Suotautuvan kakun ominaisuudet

Suotautettu kakku siirretään seulalta koelaitteeseen, jossa sen neliöpaino ja sakeus analysoidaan. Vallitseva retentio arvioidaan mittaamalla suodoksen sakeus. Viimeksi mitattiin hienoaineksen määrä suodoksesta ja kakusta.

6.2 Tietojenkäsittely

RDA:n tietoa tarvitaan muodostuneen kakun ominaisvastuksen laskemiseen. Tietoihin sovelletaan Darcyn lakia laminaarisella virtausalueella ja Forcheimerin yhtälöä oltaessa turbulenttisella alueella. Työmenetelmä on kehitetty, jotta saadusta tiedosta voidaan arvioida suotautumisprosessia tuotantoympäristössä.

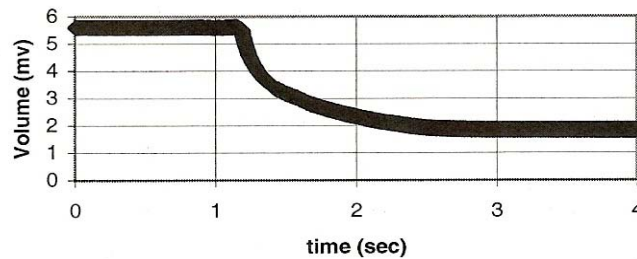
6.2.1 Viskoottisen ominaisvastuksen laskeminen

Paljas laitteen antama ulostulotieto ei välttämättä ole heti käyttökelpoista. Ulostulotieto sisältää tilavuusvirran ajan funktiona ja poikki radan toteutuvan paine-eron ajan funktiona. Ulostulotieto oli muutettu käytettyyn muotoon ennen analysoinnin alkamista. Tuloksen kalibroinnin jälkeen ne vielä tarkistettiin ennen vastuksen laskemista.

6.2.2 Mittauslaitteen kalibrointi

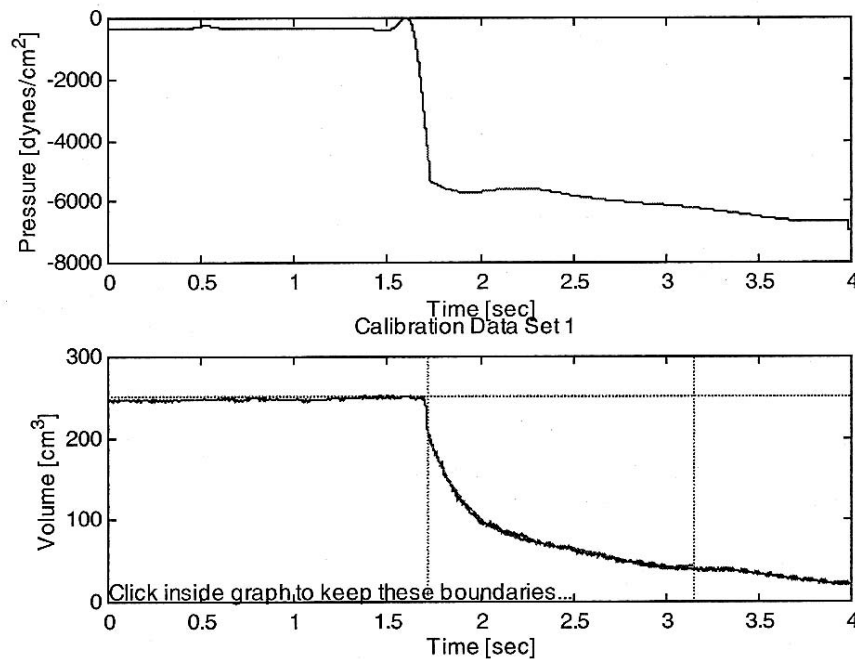
Esimerkkikäyrä on näytetty kuvassa 6.2-1. Tyhjä säiliö vastaa arvoa 1,6 mV. Alkuperäinen sulpputilavuus oli myös tarkkaan mitattu ennen kokeen alkamista. Paljas

jännitetieto tulostettiin jokaisella ajolla ja tarkistettiin, että runko, sylinteri ja anturinkiinnitin ovat aina samoissa paikoissa toisiinsa nähden ajojen aikana.



Kuva 6.2-1. Näytteen tilavuusvirta millivolteina ajan funktiona

Anturit on ohjelmoitu keräämään mittaustietoa määrättyllä taajuudella. Jännite- ja paineanturit keräävät sitä jo ennen varsinaisen ajon alkamista ja lopettavat sen vasta jonkin ajan jälkeen ajon loputtua. Tällä tavalla taataan, että kaikki tieto saadaan talteen suotaumiskokeissa. Alkuperäisestä tiedosta saadaan suotaumisen aikainen nopeus ja paine. Käsiventtiilin aukeamiseen ja kammion täyttämiseen sulpulla oli liitetty tietty aikavakio. Esimerkkikäyrät ovat esitetty kuvassa 6.2-2. Vertailu tilavuus on sisällytetty lopulliseen kokonaisvedenpoistoon. Vaakasuoraviiva alemmassa kuvassa esittää vertailutilavuutta, kun taas kaksi pystysuoraa viivaa näyttävät tiedonanalysointialueen.



Kuva 6.2-2. Taajuuden analysointi painehäviö - ja tilavuusvirtakäyristä

6.2.3 Viskoottisen ominaisvastuksen laskeminen

Viskoottinen ominaisvastus lasketaan kaavasta

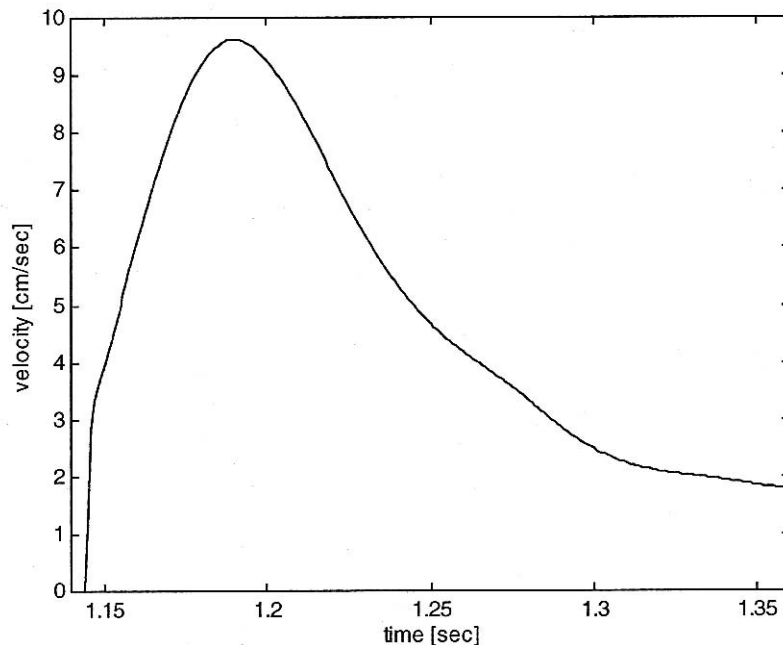
$$a(t) = \frac{\Delta P_{AVE} - \Delta P_W - \rho g h(t)}{L(t)v(t)}. \quad (6-1)$$

Paine-ero kuitumaton poikki mitattiin jatkuvasti suotautumisprosessin aikana. Viiran aiheuttama vastus, suspension paksuuden muuttuminen ja virtausnopeus sisältyvät tarkasteluun, vaikka suspension paksuus ei ole merkittävä. Kuitumaton paksuus $L(t)$ lasketaan kaavasta

$$L(t) = \frac{C_s R V(t)}{A(1 - \varepsilon)\rho_p}, \quad (6-2)$$

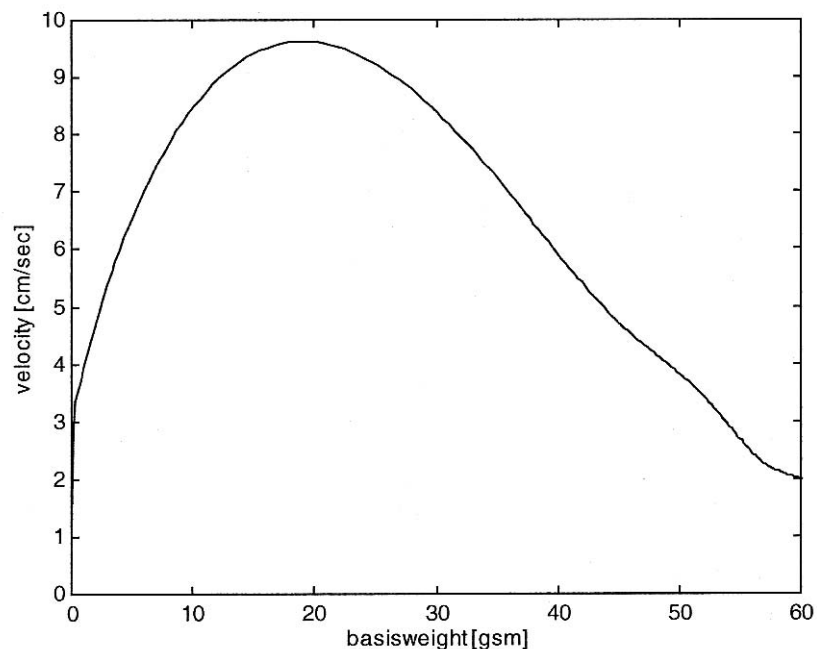
käyttäen kokonaistilavuutta ajan funktiona, $V(t)$, 100 %:n retentiota ja aukkosuhdetta $\varepsilon = 0,88$. Aukkosuhde perustuu aikaisempiin RDA:lla tehtyihin tutkimuksiin kokoonpuristuvalla kuitususpensiolla [16]. Sulpun sakeus mitattiin aikaisemmin.

Virtausnopeus laskettiin tilavuusvirrasta käyttäen keskiarvomenetelmää derivaattaa arvioitaessa. Tyypillinen virtauskäyrä on näytetty kuvassa 6.2-3. Sulpun suotautumisnopeus alkaa nolasta ja kiihtyy maksiminopeuteen. Sen jälkeen virtausnopeus laskee, kun kuitumatto alkaa muodostua virtausta vastustavaksi tekijäksi.



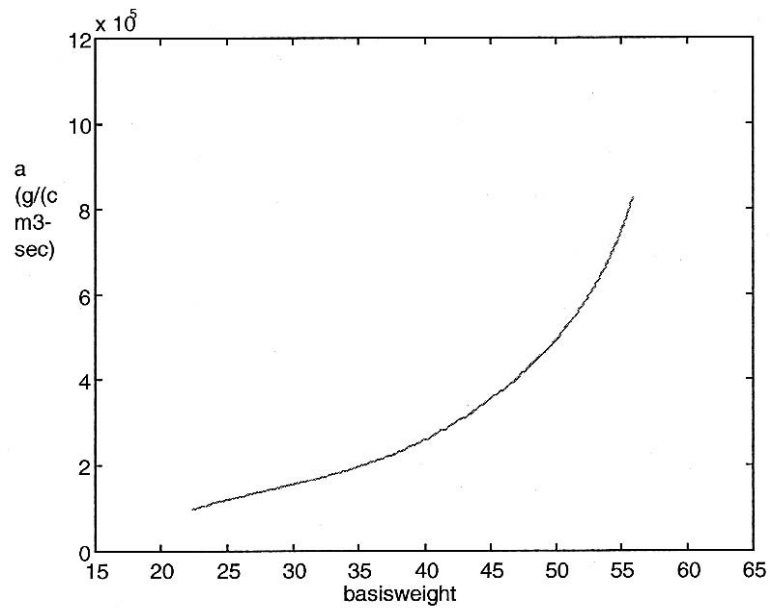
Kuva 6.2-3. Tyypillinen virtauskäyrä

Huippunopeuden jälkeen suotautuminen tapahtuu vakiopaineessa. Kuitumaton kiintoainepitoisuus vaihtelee välillä 10 - 12 %:ia. Retentio arvioitiin vakioksi ja vastaa 100 %:ia, mutta hienoainesretentio vaihtelee. Oletus on silti hyvä arvio, koska hienoainesmateriaali jätetään huomioimatta kuitumaton paksuudessa. Hienoaines voi kuitenkin tukkia viiran aukkoja ja näin vaikuttaa aukkosuhteeseen. Koska neliöpaino laskettiin suotautuneesta tilavuusvirrasta, suurin osa kuitumatosta muodostui nopean vedenpoistojakson aikana. Virtausnopeus neliöpainon funktiona on esitetty kuvassa 6.2-4. Suurin prosentuaalinen osuus neliöpainosta muodostuu nopean vedenpoiston aikana. Vain pieni osa massasta on retentoitunut alhaisen vedenpoiston aikana.



Kuva 6.2-4. Tyypillinen virtauskäyrä neliöpainon funktiona

Käyrä kuvassa 6.2-5 esittää viskoottista ominaisvastusta neliöpainon funktiona. Viskoottinen ominaisvastus ei ole vakio. Inertiaalisen termi ei nosta vastusarvoa, koska kasvavan ominaisvastuksen alue ilmenee matalan vedenpoiston alueella. Sen vuoksi epälineaarisuuden täytyy johtua ilmiöistä suotautumisen aikana, eikä inertiaalisista ilmiöistä johtuvasta lisääntyvästä vastuksesta turbulentsisessa vedenpoistossa. Tämä voidaan verifioida käyttämällä Forcheimerin kaavaa ja laskemalla vastuskerroin turbulentsisen vedenpoiston oletuksella.



Kuva 6.2-5. Viskoottinen vastuskerroin suotautuneen neliöpainon funktiona

6.2.4 Viskoottisen ja inertiaalisen ominaisvastuksen laskeminen

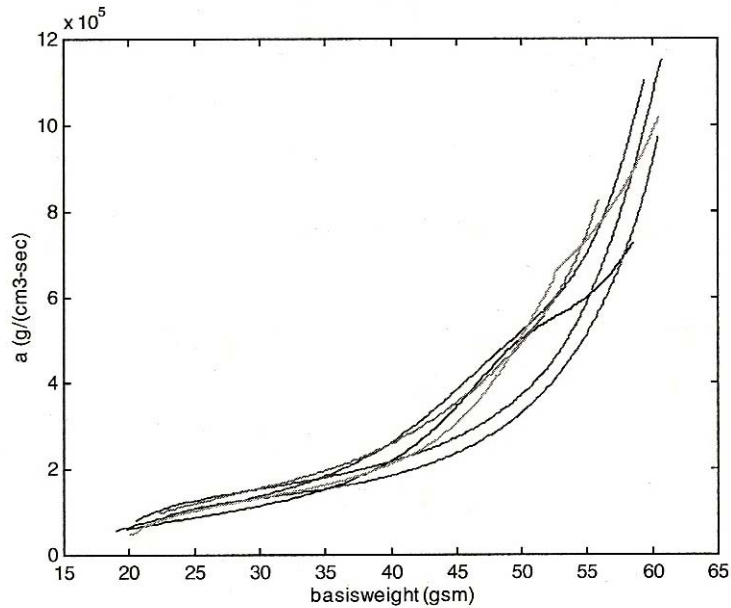
Laskentaohjelma kirjoitettiin Matlabin 5.0 - versiolla. Vastus laskettiin kaavasta

$$\frac{\Delta P_{AVE} - \Delta P_w - \rho g h(t)}{L(t)v(t)} = av(t) + bv(t)^2. \quad (6-3)$$

Ratkaisua ei voida laskea piste pisteeltä, kuten viskoottisella ominaisvastuksella, koska lausekkeessa on kaksi tuntematonta. Tyypillinen tieto koostuu noin 1000 tietopisteestä. Kukin setti jaettiin intervaleihin kuitumaton laskettuun paksuuteen perustuen. Kuitumaton paksuus laskettiin samalla tapaa kuin viskoottinen ominaisvastus. Kukin intervalli käsitti 5 - 30 tietopistettä. Jokaisella tietopisteellä on vastaava paine-ero, kuitumaton paksuus ja vedenpoistonopeus. Intervalleissa tietopisteet eroavat selvästi edellisistä tietopisteistä, joten kuitumaton voidaan olettaa rakentuvan peräkkäisistä jaksoista. Jos intervalli koostuu 10 pisteestä, 10 yhtälöä kahdelle tuntemattomalle voidaan ratkaista pienimmän neliöjuuren menetelmällä. Tämä lähestymistapa toimii ainoastaan, kun kertoimet ovat vakioita. Valitettavasti todettiin, että viskoottinen vastuskerroin ei ollut vakio. Tämä lähestymistapa ei siten ole hyväksyttävissä systeemissä jossa on muuttuva viskoottinen ominaisvastus. Eikä sitä voida myöskään hyväksyä tuotantokoneiden simulointiin.

6.3 Tilastoanalyysi

Tilastollinen analyysi tarkentaa vastusarvon arviota käytettäessä ainoastaan viskoottista osuutta perusvirtauskaavoissa siihen asti, kun ne ovat voimassa. Jokaisella eri massatyypillä tehdään kuusi ajokertaa. Esimerkkikäyrät ovat esitetty kuvassa 6.3-1. Piste pisteeltä tehtävä analysointi ei ole mahdollista.

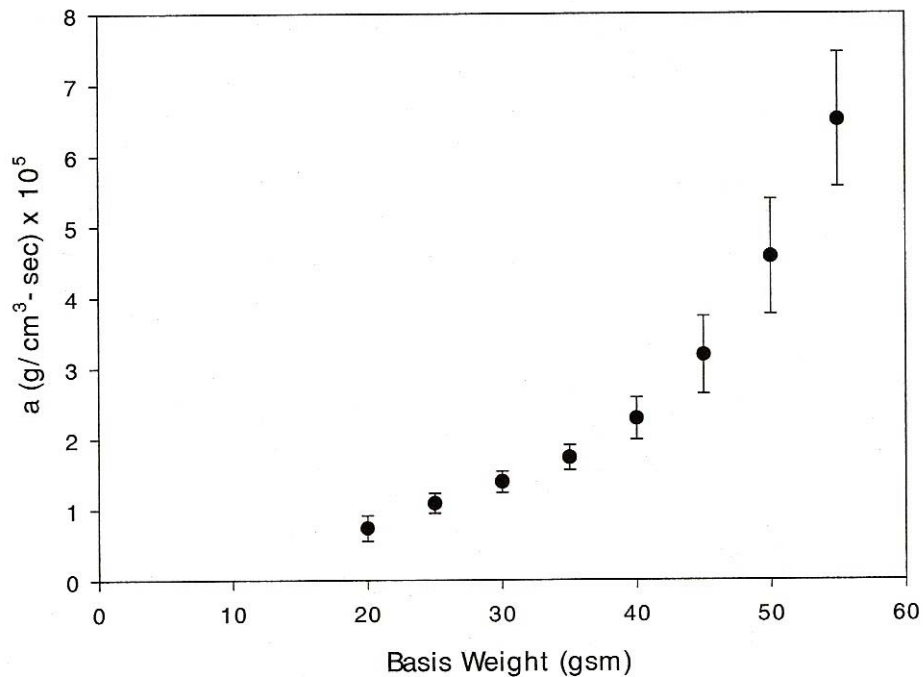


Kuva 6.3-1. Esimerkkitulokset tilastoanalyysistä viskoottiselle vastuskertoimelle

MATLAB-ohjelma analysoi dataa $5 \text{ g}/\text{m}^2$ intervallilla. Keskimääräinen neliöpaino voidaan laskea. Tämä sallii tarkan vedenpoistoprosessin kuvaamisen annetuissa olosuhteissa. Esimerkki tilastollisesta analyysistä on näytetty taulukossa 6.3-1 ja kuvassa 6.3-2.

Taulukko 6.3-1. Esimerkki viskoottisesta ominaisvastuksesta neliöpainon funktiona

NELIÖPAINO [g/m^2]	KESKIARVO VSKOOTTINEN VASTUSKERROIN a [$\text{g}/\text{cm}^3 \cdot \text{s} \cdot 10^5$]	STANDARDI RATKAISU [$\text{g}/\text{cm}^3 \cdot \text{s} \cdot 10^5$]	%
20	0,74	0,18	24
25	1,09	0,14	13
30	1,39	0,15	11
35	1,73	0,18	10
40	2,28	0,30	13
45	3,18	0,55	17
50	4,57	0,81	18
55	6,50	0,95	15



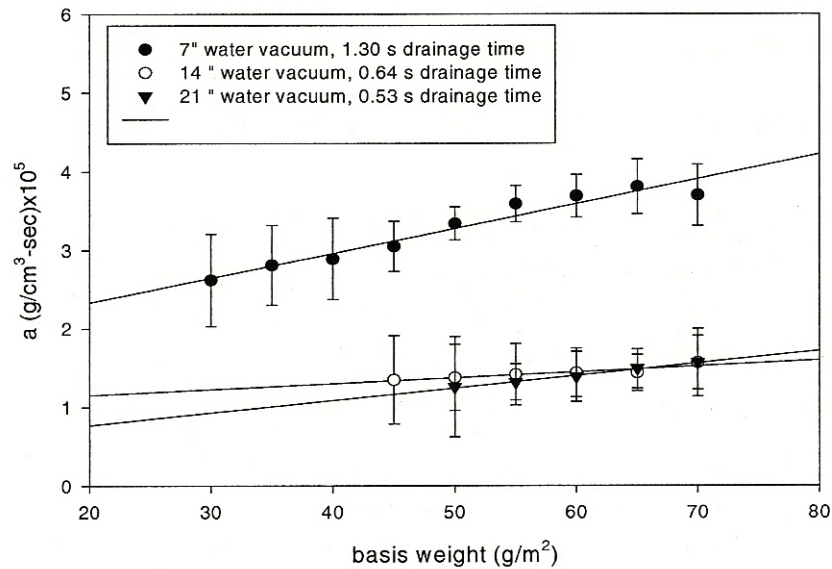
Kuva 6.3-2. Esimerkki viskoottisesta vastuskertoimesta neliöpainon funktiona

7 Kokeelliset tulokset

7.1 Havupuumassan suotautumisvastusten vertaaminen

Testatun havupuumassan sakeus oli 0,5 % ja neliöpaino 30 g/m². Vertailu tehtiin kolmella eri alipainetasolla. Näitä verrataan FL-mittauksen vastusarvoihin. Viskoottiset ominaisvastuksen arvot on annettu taulukossa 7.1-1 ja kuvassa 7.1-1. Alin alipainetaso tuottaa korkeimman suotautumisvastuksen, kun taas 3,484 kPa:n (14 in H₂O) ja 5,225 kPa:n (21 in H₂O) vedenpoisto-ominaisuudet ovat lähes samanlaiset, mutta 3,484 kPa:n alipaineella näyttäisi toteutuvan korkeampi vastusarvo. Formaatio oli hyvä kakulla, jolla käytettiin pienintä alipainetta. Pidempi suotautumisaika sallii sulpun kuitujen liikkumisen alueella, jolla oli alhainen neliöpaino ja alhainen virtausvastus, ns. ”itsekorjaantumisefekti”. Nopean suotautumisen tuloksena saadaan avoimempi raina, koska kuidut suotautuvat nopeasti ja kiinnittyvät ilman uudelleenjärjestäytymistä. Tämä saa aikaan alemman virtausvastuksen. Esimerkki siitä, kuinka kuitumaton rakenne vaikuttaa alkuvedenpoistossa, on nähtävissä tasoviiraosalla, kun vaihdellaan suihkuviirasuhdetta. Suihku-viirasuhteen muuttuessa muuttuvat myös leikkausvoimat radassa, mikä aiheuttaa erilaisen formaation. Huonolla formaatiolla märkäräja siirtyy kohti

perälaatikkoa, johtuen alenneesta virtausvastuksesta ja epähomogeenisesta rainasta. Regressiosuorat on näytetty kuvassa 7.1-1.



Kuva 7.1-1. Viskoottinen vastuskerroin havupuumassalle kolmella eri alipaineella

Suoran kulmakerroin esittää kuvassa 7.1-1 vastuksen muutoksen itseisarvoa, jonka ajateltiin johtuvan kuitujen puristumisesta. Matalilla alipaineilla on suurin kulmakerroin. Vedenpoisto-aika on tällä matalan alipaineen suoralla noin 2,5 -kertainen verrattuna kahteen muuhun suoraan. Kuitumaton puristuminen on aikariippuvainen ilmiö, ja mitä suurempi puristusefekti on, sitä pidempi altistumisaika on, kunnes tasapaino saavutetaan. Regressiosuoria käytettiin 35 g/m²:n neliöpainolla 3,484 kPa:n (14 in H₂O) ja 5,225 kPa:n (21 in H₂O) alipainetasoilla. Viskoottinen vastus muuttui neliöpainoalueella 35 - 70 g/m². Oletettavasti tämä muutos johtui kuitumaton puristumisesta. Taulukossa 7.1-2 on esitetty mittaustiedot. Korkein prosentuaalinen muutos oli koeajon suurimmalla alipainetasolla.

Taulukko 7.1-1. Viskoottisen vastuskertoimen arvo havupuumassalla kolmelle eri alipaineelle

Neliöpaino [g/m ²]	Havupuumassa 1,742 kPa:n alipaine (7 in H ₂ O)			Havupuumassa 3,484 kPa:n alipaine (14 in H ₂ O)		
	Keskiarvo viskoottinen kerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	Std	%	Keskiarvo viskoottinen kerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	Std	%
30	2,62	0,59	23			
35	2,81	0,51	18			
40	2,89	0,52	18			
45	3,05	0,32	10	1,35	0,56	41
50	3,34	0,21	6	1,38	0,42	30
55	3,59	0,23	6	1,42	0,39	27
60	3,69	0,27	7	1,44	0,31	22
65	3,81	0,35	9	1,44	0,23	16
70	3,70	0,39	11	1,57	0,34	22
Neliöpaino [g/m ²]	Havupuumassa 1,742 kPa alipaine					
	Keskiarvo viskoottinen kerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	Std	%			
30						
35						
40						
45						
50	1,24	0,64	52			
55	1,32	0,23	17			
60	1,39	0,32	23			
65	1,49	0,25	17			
70	1,57	0,43	27			

Taulukko 7.1-2. Puristuvuus havupuumassalla kolmelle alipainetasolle

Alipaine- taso [kPa]	Suurin virtaus- nopeus [cm/s]	Altistus- aika [s]	Viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵] (35 g/m ²)	Viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵] (70 g/m ²)	Muutos [g/cm ³ s x10 ⁵]	%
1,742	8,1	1,3	2,81	3,70	+0,89	+24
3,484	12,2	0,64	1,28	1,57	+0,29	+19
5,226	15,0	0,53	1,01	1,57	+0,56	+41

Vastuskertoimia verrataan vielä eri koemenetelmillä taulukossa 7.1-3. FL-menetelmällä mitattiin 35 g/m²:n havupuumassasta tehty kakku RDT-laitteella 5,226 kPa:n alipaineella (menetelmä on käyty läpi luvussa 4). FL:ssa vedenpoistonopeus vaihteli

välillä 0 - 16 cm/s. Testin valmistuminen otti aikaa muutaman minuutin, mikä oli riittävä aika puristusefektin aikaansaamiseen.

Taulukko 7.1-3. Eri työmenetelmillä saatujen vastusten vertaaminen

Mittaus menetelmä	Viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	Inertiaalinen vastuskerroin b [g/cm ⁴]
FL (Flow Loop)	0,91	0,73
RDT (Rapid Drainage tester)	1,01	N/A

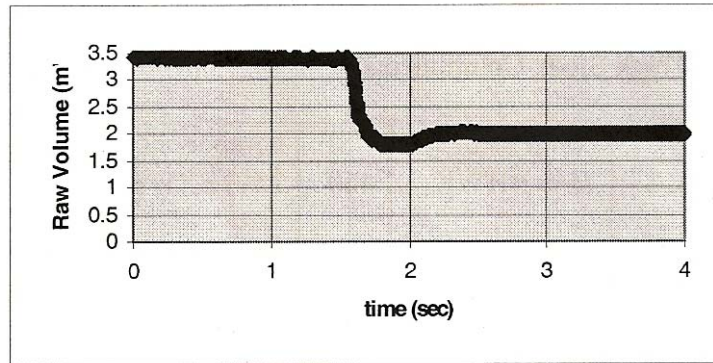
Kun verrataan viskoottista vastusta vastukseen, joka sisältää sekä viskoottisen että inertiaalisen vastuksen, on hyödyllistä verrata kokonaispaine-eroa suurilla virtausnopeuksilla. Viskoottiseen- ja inertiaaliseen vastukseen liittyvä paine-ero ja kokonaispaine-ero on näytetty taulukossa 7.1-4. Muutamalle virtausnopeudelle kokonaispaine-erojen suhde RDT:FL on myös näytetty.

Taulukko 7.1-4. RTD- ja FL- testilaitteiden antaman kokonaispaine-eron vertaaminen havupuumassalle ja kolmelle eri virtausnopeudelle

Virtausnopeus [cm/s]	Viskoottinen painehäviö aLv [Pa]	Inertinen painehäviö bLv [Pa]	Kokonaispainehäviö [Pa]	Kokonaispaine-eron vertaaminen RDT:FL
5 Visk. ja inert.	1138	4562	5700	0,22
5 Visk.	1265		1265	
10 Visk. ja inert.	2275	18250	20525	0,13
10 Visk.	2530		2530	
20 Visk. ja inert.	4550	73000	775500	0,07
20 Visk.	5060		5060	

Kuvassa 7.1-2 on näytetty epätäydellisesti kuituuntuneen paperin tilavuusvirran muuttuminen ajan funktiona 5,226 kPa:n alipaineella. Vedenpoistokäyrä näyttäisi alussa jyrkältä, mutta nopean alkuvedenpoiston jälkeen on lyhyt notko. Vedenpoistokäyrässä näkyisi olevan kaksi vaihetta. Ensin vesi vain läpäisee rainan ja sitten vesi ja ilma läpäisevät rainan. Kun suotautuva vesi liikkuu kuitumaton läpi sen aiheuttama paine saa aikaan märän rainan puristumisen, jos virtausnopeus on riittävän suuri puristamaan käytettyä massaa. Jos paine-ero on tarpeeksi suuri annetulle massalle, ilma syrjäyttää

ensin veden rainan taskuissa ja mahdollisesti tekee kanavia läpi rainan. Tämä aiheuttaa joustavan rainan laajentumisen kunnes jännitykset rainassa tasaantuvat. Tämä ilmiö esiintyy selvästi vähemmän 3,484 kPa:n alipaineella eikä alimmalla 1,42 kPa:n alipaineella laisinkaan. Tämän mukaan alimmalla alipaine- ja formaatitotasolla ei ilmataskujen läpi menisi koskaan ilmaa täysin rainan läpi.



Kuva 7.1-2. Havupuumassa tilavuusvirta (mV) 5,226 kPa:n alipaineella ajan funktiona

Näytti myös siltä, että puristuksella oli merkittävä osa havupuumassan vedenpoistossa. Puristusefektiiä ei esiintynyt muilla massoilla. Valkaistun havupuusellun kuidut ovat kyllin joustavia pidättämään virtausnopeuden kasvua ilman hienoaineksia. Muut massatyypit eivät suotautuneet yhtä nopeasti, johtuen pienemmistä puristusjännityksistä ja myös mekaanisista massakomponenteista, jotka eivät ole yhtä joustavia kuin valkaistu havupuusellu.

7.2 Viskoottinen virtausvastusarvo hienopaperille ja sanomalehdelle

Perälaatikkonäytteistä tutkittiin hienopaperia ja sanomalehteä. Hienopaperinäyte koostui 75 %:sta valkaistua lehtipuusellua ja 25 %:sta valkaistua havupuusellua. Lehtipuomassan ominaisuudet eroavat eri näytteillä. Sanomalehti oli pääasiassa TMP:tä (thermo mekanical pulp). Hienoparinäyte valmistettiin Roctonin tutkimuslaitoksella. Sanomalehtinäyte otettiin hylkypaperirullasta paperitehtaalta. Massakomponentit ja vastaavat freenesarvot on annettu taulukossa 7.2-1.

Taulukko 7.2-1. Sulpun ominaisuudet

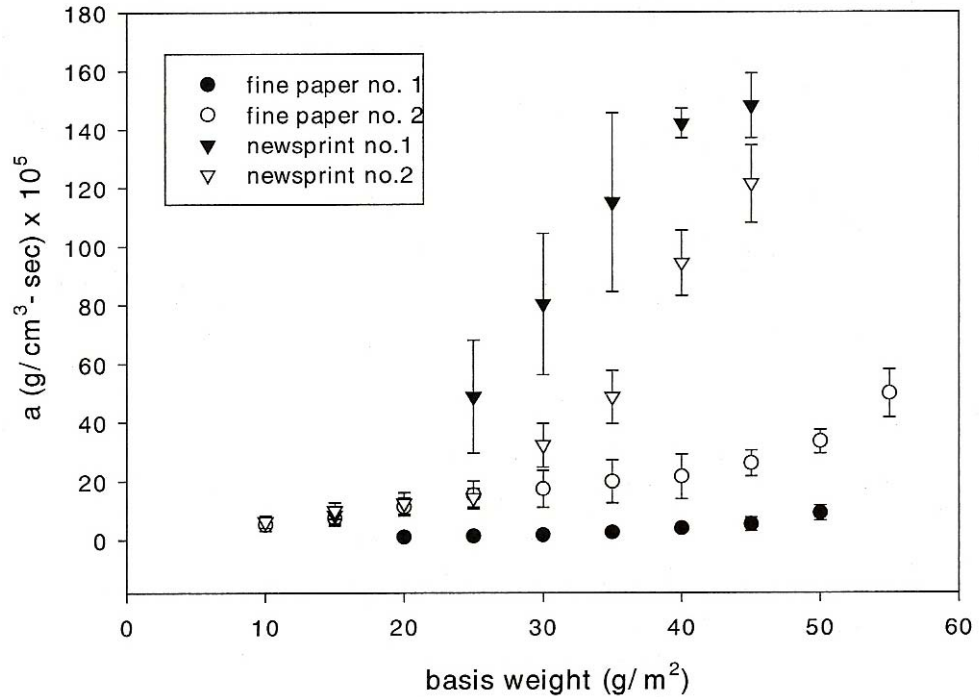
	1. KOMPO- NENTTI	CSF	2. KOMPO- NENTTI	CSF	3. KOMPO- NENTTI	CSF
Hienopaperi nro 1	75 % BHWK	450	25 % BSWK	550	5 % Kraft	640
Hienopaperi nro 2	75 % BHWK	350	25 % BSWK	450		
Sanomalehti nro 1	90% TMP	85	5 % Uusiom.	85		
Sanomalehti nro 2	81 % TMP	65	19 % Kraft	675		

Taulukon 7.2-2. näytteet on otettu koekoneelta riittävän pitkän tasaantumisaajan jälkeen.

Taulukko 7.2-2. Perälaatikkosuspensiot

	PERÄLAATI- KON SAKEUS %	HIENOAINE TASO %	TUHKA %	SULPUN CSF	PERÄLAATI- KON CSF
Hienopaperi nro 1	0,61	36	14,5	450	295
Hienopaperi nro 2	0,68	46	29	370	150
Sanomalehti nro 1	0,82	53	6,0	150	35
Sanomalehti nro 2	0,60	42	2,1	125	45

Vedenpoistovastus määritettiin neliöpainon funktiona jokaiselle neljälle näytteelle, ja tulokset on näytetty kuvassa 7.2-1 ja taulukossa 7.2-3. Sanomalehden virtausvastuksen tulokset kerättiin neliöpainoalueelta 10 - 45 g/m², kun taas hienopaperilla saavutettiin alue 10 - 55 g/m². Neliöpaino vastaa täyskuivaa olosuhdetta. Neliöpainoarvo oletetaan saavutetun 100 %:n retentiolla. Yksi otos hienopaperin vastusarvoista oli merkittävästi matalampi kuin muut. Tämä suljettiin kerätyistä tuloksista pois. Neliöpainoalueet valittiin edustamaan tyypillistä alueita kullakin laadulla. On tärkeä pitää mielessä, että kun raina muodostetaan kitaformerissa, arkit on todella tehty yksi kummallakin viiralla. Esimerkiksi 60 g/m²:in hienopaperi käsittää kaksi 30 g/m²:in arkkia, kun olettaen symmetrinen vedenpoisto. Vedenpoistovastuksen arvot neliöpainon funktiona on näytetty kuvassa 7.2-1 ja taulukossa 7.2-3. Freenes ja vastusarvot luokiteltiin näytteiden vedenpoiston alenevaan järjestykseen.



Kuva 7.2-1. Viskoottinen vastuskerroin valituille massoille neliöpainon funktiona

Kuten aikaisemmassa laskentatavassa, nämä arvot on normitettu neliöpainoilla. Sen vuoksi kokoonpuristumaton raina vakioiretentiolla ei näy vaakasuoraa viivana. Näin ei tapahtunut yhdellekään tutkitulle näytteelle. Molemmilla sanomalehtinäytteillä neliöpainot kasvoivat. Kasvu oli molemmilla näytteillä samanlaista 20 g/m²:n neliöpainoon asti. Sen jälkeen sanomalehdellä numero yksi tapahtui voimakas vedenpoistovastuksen kasvaminen. Sanomalehdellä numero kaksi havaitaan enemmän portaittaista vedenpoistovastuksen kasvamista ennen 35 g/m²:n neliöpainoa, jonka jälkeen vastus taas kasvaa nopeasti. Vastusarvo ei saavuta samaa tasoa kuin sanomalehdellä nro 1.

Taulukko 7.2-3. Viskoottinen vastuskerroin valituille paperilaaduille

Neliöpaino [g/m ²]	Hienopaperi nro 1			Hienopaperi nro 2		
	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%
10				5,1	2,0	39
15	0,9	0,36	40	7,3	2,4	33
20	1,21	0,47	39	11,2	3,2	29
25	1,62	0,70	43	15,3	4,7	31
30	2,45	0,93	38	17,3	6,3	36
35	3,85	1,16	30	19,8	7,3	37
40	5,19	2,28	44	21,5	7,6	35
45	9,0	2,61	29	26,0	4,4	17
50	16,1	4,14	26	33,4	4,0	12
55				49,8	8,2	16
Neliöpaino [g/m ²]	Sanomalehtipaperi nro 1			Sanomalehtipaperi nro 2		
	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%
10	6,1	1,9	31	6,2	2,1	34
15	8,31	2,7	32	9,9	2,8	28
20	12,3	3,7	30	12,4	3,7	30
25	48,8	19,3	40	14,3	3,2	22
30	80,3	24,0	30	32,2	7,4	23
35	115	30,6	27	48,6	9,1	19
40	142	5,1	3	94,3	11,1	12
45	148	11,0	7	121,3	13,3	11

Myös hienopaperilla neliöpainot kasvoivat, mutta ei samassa mitassa kuin sanomalehdellä. Hienopaperinäytteillä on erilaiset vastusarvot koko neliöpainoalueella. Hienopaperille nro 2 saatiin huomattavan korkea vastuksen arvo. Kummallakaan hienopaperinäytteellä ei esiinny jyrkästi kasvavaa vastusta, jollainen esiintyi molemmille sanomalehtinäytteillä.

Kummallakin suspensiotyyppillä korkeampi hienoainepitoisuus tuottaa korkeamman vastusarvon. Verrattaessa suuremman hienoainepitoisuuden omaavia näytteitä eri paperilaaduilla, eivät ne osoita välttämättä korkeampaa vastuksen arvoa. Sanomalehden nro 2 hienoainepitoisuus oli 42 % ja sillä oli suurempi vastusarvo kuin saman neliöpainon hienopaperilla nro 2, jonka hienoainepitoisuus oli 46 %. Yksi mahdollinen selitys on, että sanomalehti sisälsi ison määrän termomekaanista massaa. Termomekaanisella massalla on laaja kuitukokojakauma ja todennäköisesti alhaisempi

huokoisuus, kun kuidut saostuvat. Tämä huokoisuuden eroavaisuus voisi johtaa siihen, että hienoaines retentoituu pienemmillä neliöpainoilla sanomalehdellä kuin hienopaperilla. Tämä voi edistää huokoisuuden alenemista tukkimalla potentiaaliset vedenpoistotiet ja aiheuttaen retention kasvamisen. Hienoaines kaikilla neljällä näytteellä osoitti vastuksen kasvavan neliöpainon mukaan, mikä tapahtui selvemmin sanomalehtisuspensiolla. Lisäksi annetuilla laaduilla vastuksen kasvaminen oli selvempää suuremman hienoainespitoisuuden omaavilla suspensioilla. Hienoaines edustaa painojakaumassa materiaalia, joka voi läpäistä 76 μm :n sihdin. Sulppu voi sisältää kahdenlaista hienoainesta: hienoksi jakautuneita kuituja ja täyteaineita. Täyteainepartikkelit ovat kooltaan 1-5 μm , kun taas kuitujen hienoaines voi olla kooltaan jopa 76 μm .

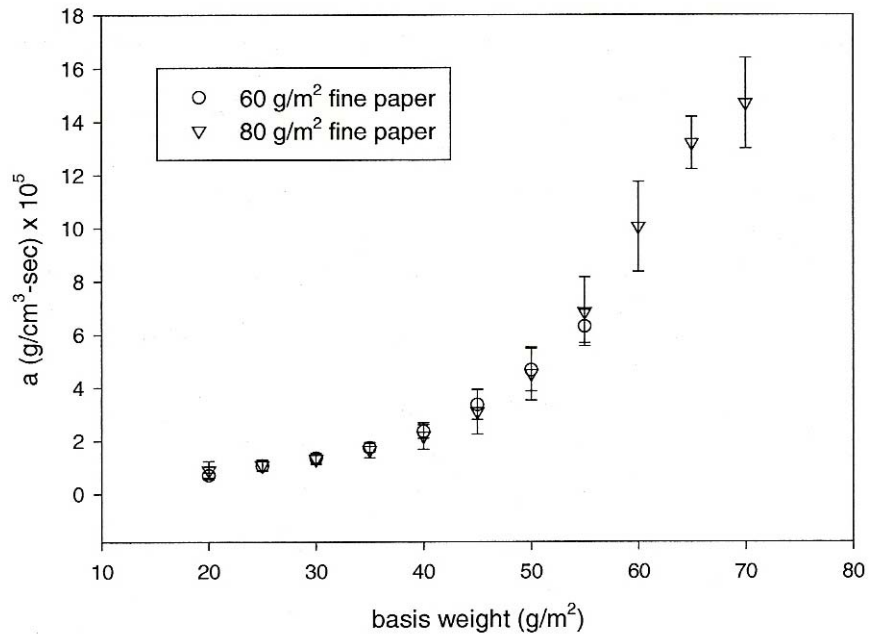
7.3 Lopullinen neliöpainon merkitys hienopaperin vastuksella

Molemmilla paperilaaduilla näytti siis siltä, että neliöpainon noustessa myös viskoottinen vastuskerroin kasvoi. Tämä vastuskertoimen kasvaminen voitaisiin lukea suurentuneen hienoainesretention ominaisuudeksi neliöpainossa tai kokoonpuristumiseksi johtuen virtausvastusten noususta. Tämä voisi olla myös seurausta virtauksen sakeutumisesta vedenpoistoprosessin loppuvaiheesta. Ennen lisäkokeita voi myös ottaa huomioon, että lisääntynyt vastus voi johtua inhimillisestä virheestä itse koelaitteessa, ja tämä mahdollisuus täytyy sulkea pois. Tarkasteltaessa tätä mahdollisuutta, hienopaperinäytteestä nro 1 tehtiin 80 g/m^2 :n rainasta vastaavanlainen näyte kuin 60 g/m^2 :n rainasta oli tehty. Taulukossa 7.3-1 ja kuvassa 7.3-1 on molempien näytteiden vastuskertoimet neliöpainon funktiona.

Taulukko 7.3-1. Lopullisen neliöpainon merkitys vastuskertoimeen

Hienopaperi	60 g/m ²			80 g/m ²		
Neliöpaino [g/m ²]	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%
20	0,70	0,10	14	0,89	0,34	38
25	1,06	0,20	19	1,09	0,20	18
30	1,36	0,19	14	1,31	0,19	15
35	1,74	0,17	10	1,65	0,29	18
40	2,35	0,26	11	2,18	0,50	23
45	3,36	0,56	16	3,10	0,85	27
60	4,67	0,80	17	4,52	1,00	22
55	6,31	0,63	10	6,86	1,30	19
60				10,05	1,70	17
65				13,20	0,98	7
70				14,70	1,70	12

Tulokset näyttävät selvästi, että molemmat näytteet tuottavat melkein samanlaisen käyrän. Voidaanko siis päätellä, että vastusarvon kasvaminen on todellista ja johtuu ilmiöistä vedenpoistoprosessissa, eikä mittaustekniikasta.



Kuva 7.3-1. Lopullisen neliöpainon vaikutus viskoottiseen vastuskertoimeen

7.4 Vastusarvon vertaaminen teoriaan

RDT:llä mitattua viskoottisen vastuksen arvoa verrattiin teorian antamaan vastusarvoon käyttäen vastaavia tietoja kuin tutkituilla näytteillä. Suurin osa aikaisemmin tehdyistä vastusarvon tutkimustiedoista oli tehty kaukana niistä olosuhteista, jotka totetuivat. Myös tutkittavissa paperilaaduissa oli eroja. Jotkut paperilaadut ja olosuhteet olivat kuitenkin tunnistettavissa samantyyppisiksi kuin RDT:llä tehdyissä kokeissa käytetyt, ja olivat siten käyttökelpoisia vertailtaessa vastusarvoja.

Mantar *at al.* [13] tutki lukuisia massoja ja laski ominaissuotautumisvastuksen suotautuvassa väliaineessa. Alin tutkittu neliöpaino oli 50 g/m². Vedenpoistonopeus oli alhainen ja retentio 100 %. Mantar mittasi ominaissuotautumisvastusta eikä viskoottista vastuskerrointa. Kaksi termiä oli mukana, mutta eri tavalla. Mantran mukaan ominaissuotautumisvastus on konvertoitu viskoottisen vastuksen kertoimeen. Mantralta otettiin konvertoitu tieto ja verrattiin viskoottisen vastuskertoimen arvoihin, jotka mitattiin RDT:llä. Ominaisuuotautumisvastustietoa konvertoitiin viskoottiseksi vastuskertoimeksi käyttämällä kahta aikaisempaa kaavaa, (2-5), jotka edustaa viskoottista termiä, ja kaavaa (2-10), joka edustaa ominaissuotautumisvastusta:

$$a = k_1 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} S_v^2 \mu \quad (2-5)$$

$$\alpha = \frac{k_1(1-\varepsilon)S_v^2}{\rho_p \varepsilon^3}. \quad (2-10)$$

Kaava (2-10) voidaan jakaa kaavalla (2-5), jolloin saadaan relaation kertoimien välille, Tämä näytetään kaavassa (7-1) ja kaavassa (7-2).

$$\frac{a}{\alpha} = \frac{(1-\varepsilon)}{\rho_p} \mu \quad (7-1)$$

$$a = \alpha \frac{(1-\varepsilon)}{\rho_p} \mu. \quad (7-2)$$

Mantarin ominaissuotautumisvastuksen tulokset [13] ja vastaavat tulokset konvertoinnin jälkeen, eli viskoottinen vastuskerroin on annettu taulukossa 7.4-1. Tässä taulukossa

ovat myös viskoottisten vastuskertoimien arvot neljälle perälaatikko - suspensiolle, jotka oli saatu aikaisemmasta kokeesta RDT:llä. Mantarin vastus tulokset termomekaaniselle massalle ovat samaa suuruusluokkaa kuin kahdelle sanomalehtinäytteelle RDT:llä saadut tulokset. Vastusarvot jauhetulle ja jauhamattomalle pohjoisen lehtipuun massalle ovat myös samaa suuruusluokkaa kuin kahdelle hienopaperinäytteelle RDT:llä saadut tulokset. Hienoaineretentiota ei ole Mantarin tutkimuksissa listattu, mutta se on mahdollisesti ollut pienempää kuin RDT:llä. Myös hienoaineiden korkea prosentuaalinen osuus oli mahdollisesti retentoitunut alhaisella virtausnopeudella ja suurella neliöpainolla. Sen vuoksi pääteltiin, että viskoottisen vastuskertoimen tulokset RDT:llä sopivat yhteen aikaisempien Mantarin samoille laaduille saamien kertoimien kanssa.

Ingmanson [16] mittasi viskoottisen vastuskertoimen synteettisillä kuiduilla. Nämä arvot ovat taulukossa 7.4-2 yhdessä havupuumassatulosten kanssa, jotka mitattiin kahdella eri alipainetasolla. Havupuukuidut muistuttavat lähimain synteettisiä kuituja. Havupuun RDT:llä mitatut viskoottiset vastuskertoimet ovat samaa suuruusluokkaa kuin synteettisten kuitujen vastusarvot, ja RDT:n arvot voidaan siksi todeta päteviksi.

Taulukko 7.4-1. Aikaisempien viskoottisten vastuskertoimien vertailu samoille paperilaaduille mitattuihin vastuskertoimiin

MASSA	SAKEUS %	NELIÖ- PAINO [g/m²]	OMINAISUOTAU- TUMISVASTUS [cm/g]	VISKOOTTINEN VASTUSKERROIN a [g/cm³s x10⁵]
NHWK unb.	0,5	50	5	50
NHWH beat.	0,7	50	5	50
NHWK beat.	0,7	50	2	20
TMP	0,7	50	22	220
Hienopaperi nro 1	0,61	50		16,1
Hienopaperi nro 2	0,68	55		49,8
Sanomalehti nro 1	0,82	45		148
Sanomalehti nro 2	0,6	45		121

Taulukko 7.4-2. Havupuun viskoottisen vastuskertoimen vertaaminen aikaisempien tutkimusten synteettisille massoille tuottamiin tuloksiin

MASSA	KERROIN k	AUKKOSUHDE E	VISKOOTTINEN VASTUSKERROIN a [g/cm ³ s x10 ⁵]
3 Den. Nylon (#)	8,05	0,9	4,60
15 Den. Nylon (#)	9,1	0,9	1,08
3 Den. Dacron (#)	9,0	0,91	6,54
SW alip. 1,742 kPa (7 in H ₂ O)			2,81
SW alip. 5,225 kPa (21 in H ₂ O)			1,01

(#) Langan halkaisija ilmaistuna 9 metrin pituisen säikeen painona grammoina (Den)

7.5 Hienoaineen vaikutus viskoottiseen vastuskertoimeen

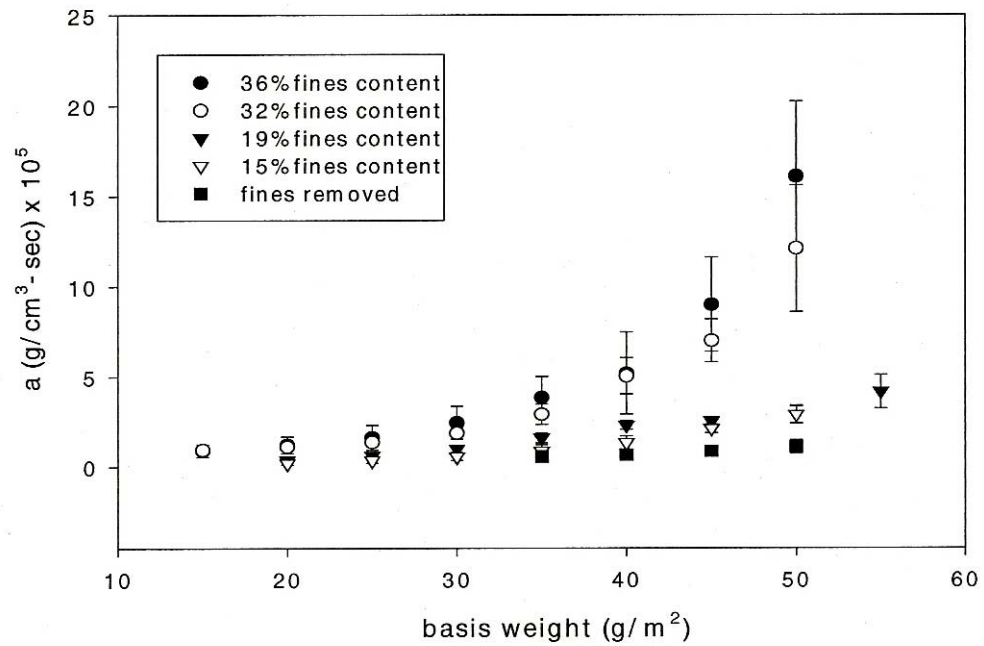
Aiemmin tutkittiin kaksi sanomalehti- ja kaksi hienopaperisuspensiota. Suotautumisvastuksen arvo kasvoi molemmilla massoilla hienoainepitoisuuden noustessa. Päätettiin tutkia hienoainepitoisuuden suhteellinen vaikutus molemmilla laaduilla.

Viisi hienopaperinäytettä tutkittiin vaihtelevilla hienoainepitoisuuksilla. Koekoneelta saatiin perälaatikko- ja sakeamassanäytteet. Jotkut perälaatikkonäytteet pidettiin testejä varten RDT:ssä. Jäännös-sakka sekoitettiin alkuperäiseen perälaatikkonäytteeseen, jotta saatiin alhaisempi hienoainepitoisuus näytteisiin. Samaa menetelmää käytettiin sakeamassanäytteisiin. Kaikki näytteet valmistettiin sakeuteuteen 0,5 % näytteiden yhdenvertaisuuden takaamiseksi. Tulokset ovat taulukossa 7.5-1 ja graafisesti kuvassa 7.5-1.

Taulukko 7.5-1 Hienoainespitoisuuden vaikutus paperinäyte nro.1:een viskoottisella vastuskertoimella

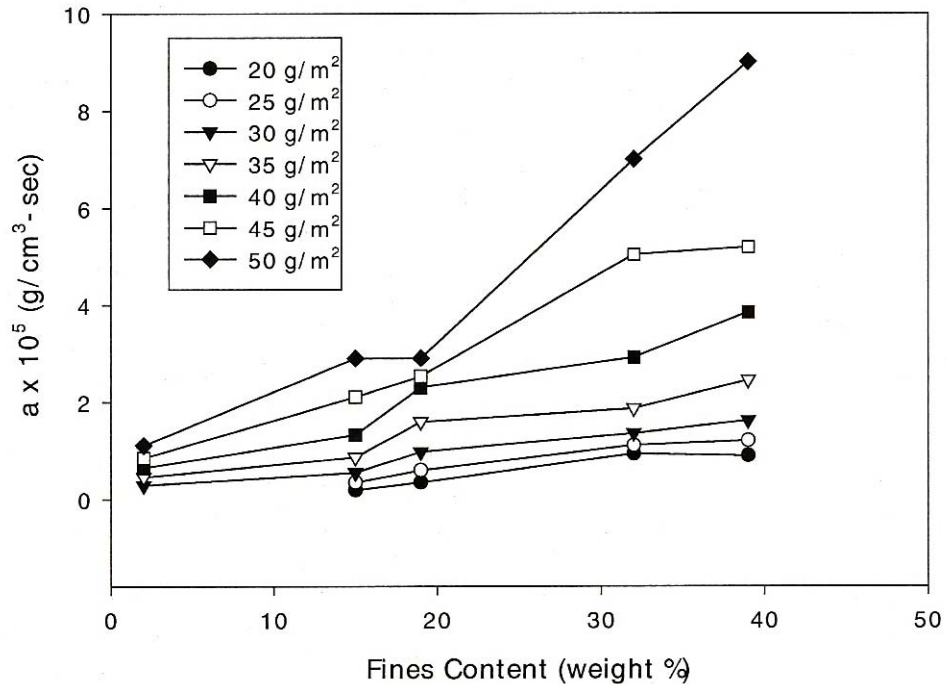
Neliöpaino [g/m ²]	Perälaatikko 36 % hienoaines			Perälaatikko 32 % hienoaines		
	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%
15	0,9	0,36	40	0,94	0,13	14
20	1,21	0,47	39	1,11	0,05	5
25	1,62	0,70	43	1,36	0,20	15
30	2,45	0,93	38	1,87	0,33	18
35	3,85	1,16	30	2,92	0,57	20
40	5,19	2,28	44	5,04	1,00	20
45	9,00	2,61	29	7,00	1,20	17
50	16,1	4,14	25	12,1	3,5	29
Neliöpaino [g/m ²]	Sakeamassa 19 % hienoaines			Sakeamassa 15 % hienoaines		
	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%
20	0,43	0,09	26	0,39	0,09	47
25	0,66	0,1	22	0,42	0,13	37
30	1,08	0,19	19	0,63	0,21	38
35	1,76	0,27	17	0,92	0,34	39
40	2,56	0,24	10	1,43	0,37	28
45	2,77	0,23	9	2,31	0,24	11
50	3,23	0,47	16	3,20	0,52	18
55	4,56	0,93	22			
Neliöpaino [g/m ²]	Perälaatikko hienoaines					
	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%			
20						
25						
30						
35	0,56	0,19	35			
40	0,65	0,08	12			
45	0,86	0,13	15			
50	1,24	0,37	33			

Hienoainepitoisuudella näyttäisi olevan vaikutusta vastuksen itseisarvoon läpi koko neliöpainoalueen. Perälaatikkonäytteellä, jolta hienoainesta siirrettiin, näytti olevan nouseva vastuskerroin neliöpainon funktiona. Kasvu oli pientä verrattaessa sitä muihin suspensioihin. Tulokset näyttivät siltä, että rainan puristumalla olisi pienempi vaikutus viskoottiseen vastuskertoimeen neliöpainon funktiona. Suurin tekijä nähtyihin tuloksiin oli mahdollisesti korkean hienoainespitoisuuden käyttäminen kokeessa.



Kuva 7.5-1. Hienoainepitoisuuden vaikutus viskoottiseen vastuskertoimeen

Vastuskertoimen suureneminen jokaisella neliöpainolla hienoainepitoisuuden funktiona on näytetty kuvassa 7.5-2. On mielenkiintoista huomata, että pienillä neliöpainoilla ja suurilla hienoainepitoisuuksilla ei näyttäisi olevan merkittävää vaikutusta alkusuotautumisvaiheessa vastuskertoimen arvoon. Tämä johtuu luultavasti alhaisesta alkuretentiosta rainan varhaisen muodostumisen aikana. Vain retentoitunut hienoaines voi vaikuttaa vastuskertoimeen. Hienoainepitoisuus ja hienoaineretenttiokerroin kasvavat neliöpainon noustessa, aiheuttaen viskoottisen vastuskertoimen kasvamisen.



Kuva 7.5-2. Hienoainepitoisuuden vaikutus viskoottiseen vastuskertoimeen hienopaperinäytteellä nro 1 eri neliöpainoilla

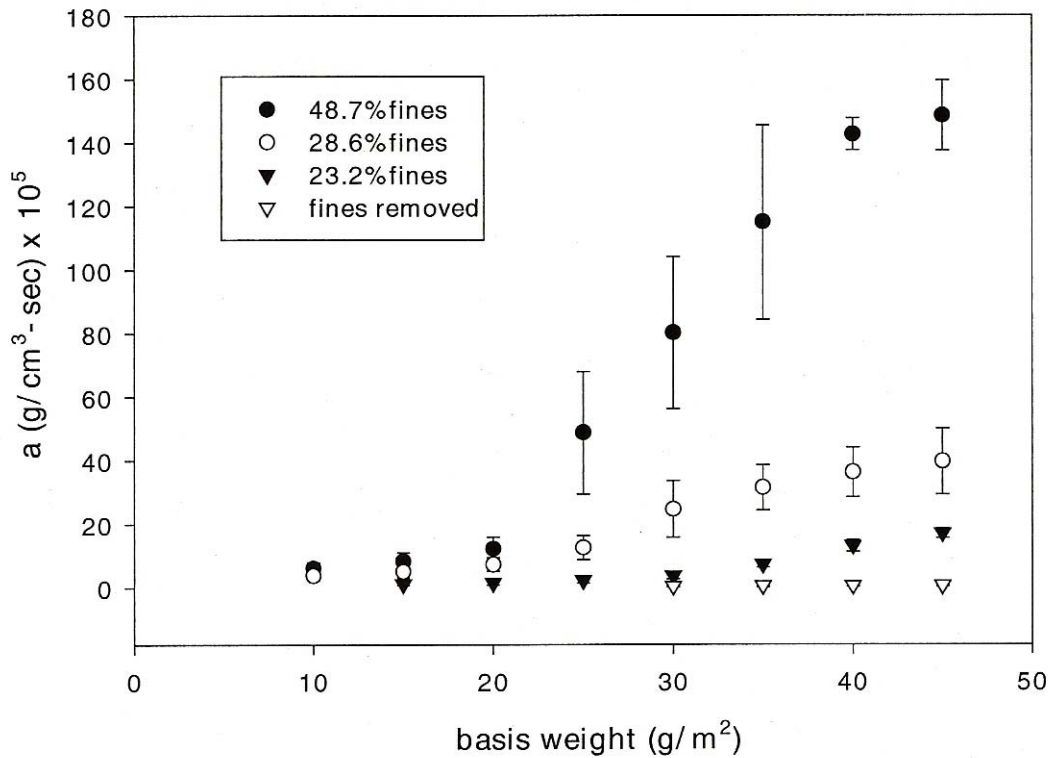
Perälaatikko- ja sakeamassanäytteet otettiin sanomalehdelle koepaperikoneen toimiessa. Samaa tekniikkaa sovellettiin hienopaperinäytteisiin. Toinen osuus kokeesta tehtiin sekoitetuilla sakeamassanäytteillä laskevin hienoainepitoisuuksin. Näytteet (49, 29, 23 ja 0) %:n hienoainepitoisuuksilla ovat valmistettuna kaikki sakeuteen 0,75 %. Viskoottisen vastuskertoimen arvot on näytetty taulukossa 7.5-2 ja kuvassa 7.5-3.

Hienopaperinäyte, joka sisältää 49 % hienoainesta, käyrä kasvaa jyrkästi 20 g/m² neliöpainon jälkeen. Vastuskerroin vähemmän hienoainesta sisältävillä näytteillä ei osoita vastaavaa kasvua. Vastuskerroin sekä 49 %, että 29 % hienoainepitoisuuksilla osoittaa kulmakertoimen tasaantumista suurilla neliöpainoilla. Myös 23 % hienoainepitoisuus osoittaa samansuuntaista käyttäytymistä, mutta lievempänä. Jos hypoteesi että hienoaines johtaa aukkojen tukkeutumiseen on oikein, retention ja vastaavan vedenpoistovastuksen pitäisi kasvaa rainan muodostuessa. Siitä seuraa loogisesti, että suurilla neliöpainoilla, jos retentio on korkea ja suhteellisen vakio, myös vastuksen tulisi olla suhteellisen vakio. Sanomalehdellä mistä hienoaines oli poistettu, näytti vastuskerroin korkeampaa arvoa kuin vastaava hienopaperinäyte alemmilla neliöpainoilla. Viskoottisen vastuskertoimen arvo riippuu selvästi massasta ja hienoainepitoisuudesta. Esimerkiksi sanomalehden vastusarvo ilman hienoainesta

kasvaa vähemmän neliöpainon funktiona kuin verrattaessa hienopaperinäytettä ilman hienoainesta.

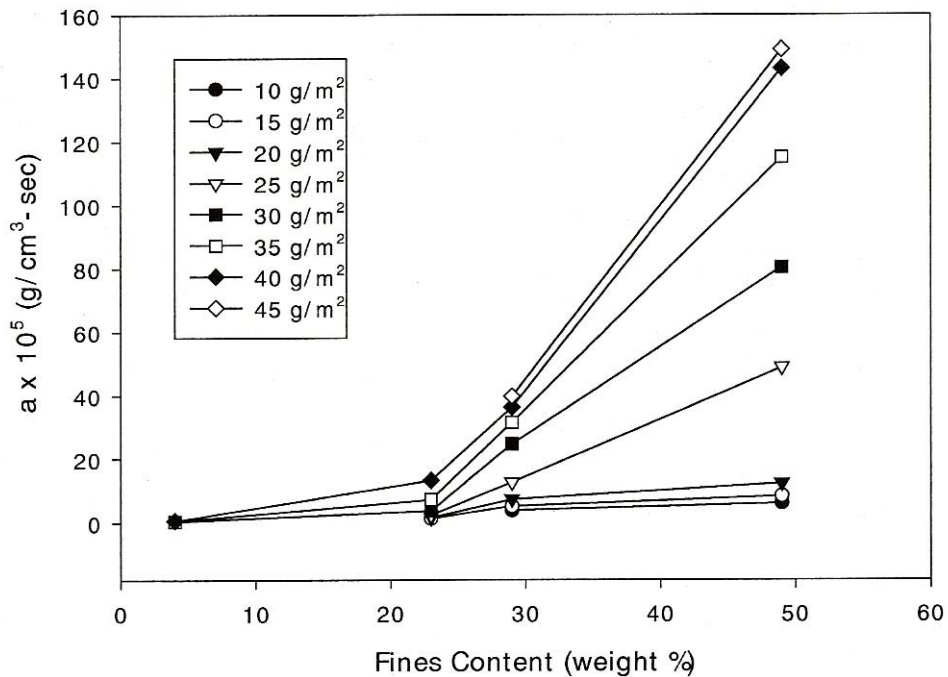
Taulukko 7.5-2. Hienoainepitoisuuden vaikutus viskoottiseen vastuskertoimeen sanomalehtinäyte nro 2:lla

Neliöpaino [g/m ²]	Perälaatikko 49 % hienoaines			Sakeamassa 29 % hienoaines		
	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%
10	6,10	1,93	32	3,80	1,37	36
15	8,31	2,73	33	5,10	1,87	37
20	12,3	3,70	30	7,30	2,09	29
25	48,8	19,30	40	12,60	3,77	30
30	80,3	24,0	30	24,70	8,91	36
35	115,0	30,60	26	31,50	7,10	23
40	142,7	5,08	4	36,30	7,81	21
45	148,6	11,0	7	39,70	10,40	26
Neliöpaino [g/m ²]	Sakeamassa 23 %:n hienoaines			Sakeamassa ei hienoainesta		
	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%	Keskiarvo viskoottinen vastuskerroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%
10						
15	1,19	0,44	37			
20	1,53	0,61	40			
25	2,34	0,84	36			
30	3,64	0,88	24	0,49	0,23	58
35	7,19	0,89	12	0,57	0,27	57
40	13,16	1,86	14	0,71	0,31	55
45	17,13	1,54	9	0,77	0,32	50



Kuva 7.5-3. Hienoainepitoisuuden vaikutus viskoottiseen vastuskertoimeen sanomalehtipaperi nro 2:lla

Viskoottisen vastuskertoimen kasvaminen jokaisella neliöpainolla hienoainepitoisuuden funktiona sanomalehtipaperille on näytetty kuvassa 7.5-4. Viskoottisen vastuskertoimen kasvaminen yhdessä hienoainepitoisuuden kanssa peräkkäin on vallitseva neliöpainon kasvaessa. Tulos on samanlainen kuin koe hienopaperilla. Poikkeavuus hienopaperilla oli, että käyrät nousivat nopeasti pienemmillä neliöpainoilla ja kertovat nopeammin kasvavasta hienoainepitoisuudesta rainassa.



Kuva 7.5-4. Hienoainepitoisuuden vaikutus viskoottiseen vastuskertoimeen sanomalehtipaperi nro 2 eri neliöpainoilla

7.6 Neliöpainon vaikutus hienoaineretentiossa

Edellisessä kappaleessa selvitettiin kuinka massan kokonaishienoainepitoisuus vaikuttaa suoutautumisvastukseen. Oletuksesta, että annetulla massalla on tunnusomainen hienoainepitoisuus, vain se osa hienoainesta mikä retentoituu rainaan, vaikuttaa suoutautumisvastukseen. Olisi siis mielenkiintoista tutkia, mikä yhteys on isolla suoutautumisvastuksella ja liittyvällä hienoaineretentiolla vaihtelevilla neliöpainoilla rainan muodostuessa.

7.6.1 Lisäretention määrittäminen

Jotta voitaisiin ratkaista vaihtelevan hienoainesretention vaikutus vastukseen, tarvittaisiin työtapaa paikallisen hienoainesretention lisäämiseen neliöpainolla. Yksi sellainen tapa esitellään tässä ja nimetään lisäsuoutautumiseksi. Näytämäärä 230 ml analysoitaisiin neljässä eri lisäosassa. Retentio määritetään ensin 65 ml:n lisäykselle. Sen jälkeen tutkitaan 130 ml:n näyte. Oletetaan, että ensimmäinen 65 ml lisäys toisessa 130 ml:n näytteessä suoutautuu samalla tapaa ehdolla, että vallitseva tyhjö tekee painekorkeudenmuutoksen merkityksettömäksi. Kokonaisretentio ja retentio ensimmäisellä 65 ml:lla tiedetään. Materiaalin tasapainoa voidaan käyttää laskettaessa toinen 65 ml:n retentio vedenpoistolisäys 130 ml kokeen aikana. Pitkäkuituretentio

oletetaan olevan 100 %. Retentoituneen hienoaineen massa annetulla lisäyksellä lasketaan pitkäkuitumassan ja kokonaisretentoituneen massan erosta. Paikallinen hienoainesretentio laskettaisiin lisäystä varten. Tätä lähestymistä voidaan soveltaa määrittettäessä seuraava lisäys. Laskelmat ovat liitteessä 4.

7.6.2 Hienoaineretentio kertoimen vaihtelu neliöpainon funktiona

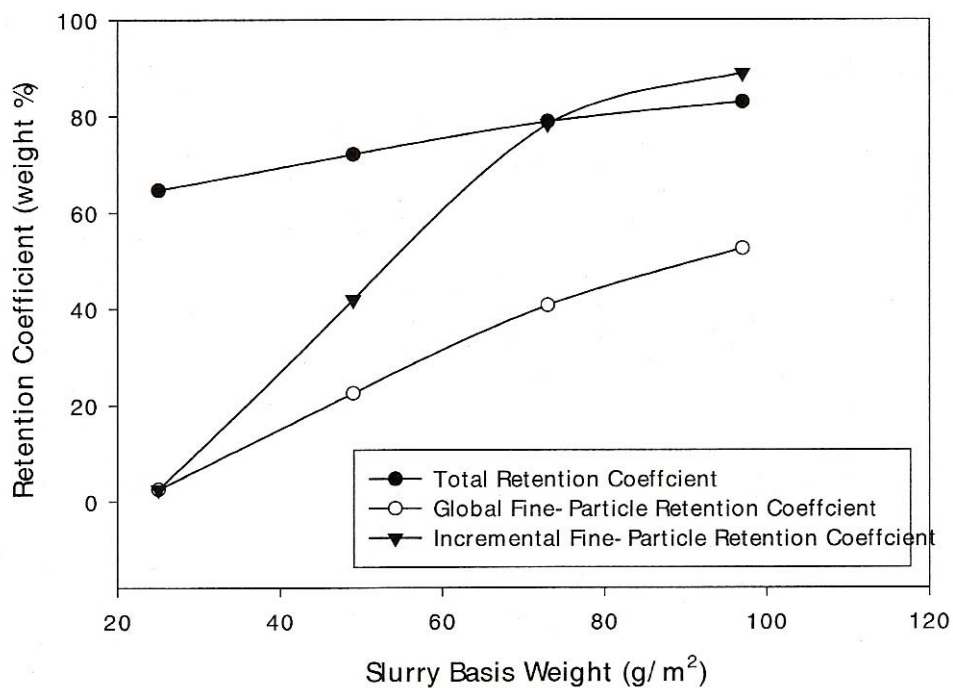
Neljä näytettä eri tilavuuksilla tutkittiin RDT:llä 5,225 kPa:n alipaineella. Tämä tehtiin hienopaperinäyte nro 1:llä tekemällä neljä ajoa eri neliöpainolla ja retentiolla. Tulokset ovat taulukossa 7.6-1. Suspension neliöpaino on neliöpaino jos retentio oli 100 %. Sulpun tilavuusvaihtelu pidettiin vakiona jokaisella lisäyksellä käsittelyn aikana. Tämä tekniikka salli retention arvioinnin mittauksesta olemassa olevalla neliöpainolla. Kullakin kokeen ajokerralla kertoimet annettiin, joko kokonais- tai lisäkertoimena. Kokonaissretentiokerroin edustaa tuloksia suotaumisesta ja formaatiosta liittyen kakkuun yleisellä neliöpainolla. Lisäys kertoimet on laskettu kokonaiskertoimista, kuten edellisessä kappaleessa kerrottiin. Pitkäkuitu- ja hienoaineretentio laskettiin mitatusta sulpusta ja suodoksen sakeudesta. Hienoainesretentio laskettiin mittaamalla hienoainetaso sulpusta ja suotautuneesta kakusta ja suodoksen sakeudesta. Retentoitunut hienoaines materiaali laskettiin vastaavaan neliöpainomuotoon.

Taulukko 7.6-1. Arvioidut retentio kertoimet hienopaperille

SULPUN NELIÖPAINO [g/m²]		25	49	73	97
Kokonais	Retentoitunut neliöpaino [g/m ²]	15,5	35,3	57,4	80,2
	Kokonaisretentio %	64,7	72,1	78,8	82,9
	Retentoitunut hienoaines [g/m ²]	0,2	4,0	10,7	18,3
	Hienoaine retentio kerroin %	2,3	22,5	40,7	52,5
Lisäys	Retentoitunut neliöpaino [g/m ²]	15,5	19,8	22,1	22,8
	Retentoitunut hienoaines [g/m ²]	0,2	3,77	6,73	7,6
	Hienoaine retentio kerroin %	2,3	41,9	78,3	88,8

Kuva 7.6-1 kuvailee puhtaasti kolmen retentio kertoimen vaihtelua. Kokonais retentiokerroin sisältää pitkäkuidun ja hienoaineen. Tämä vaihtelee rajoissa (64,7 - 82,9) %:iin. Kokonaishienoaineretentiokerroin sisältää retentoituneen hienoaineen. Kokonaishienoaineretentiokerroin vaihtelee välillä (2,3 - 52,5) %. Lisääntyvä hienoaineretentiokerroin laskettiin paikallisesta hienoaineretentiosta lisääntyvän suotautumisen aikana. Se vaihteli (2,3 - 88,8) % välillä.

Tietoja taulukossa 7.6-1 voidaan käyttää vertailtaessa retention käyttäytymistä jokaisella kasvuportaalla rainan muodostumisen aikana. Lukuarvoja voidaan myös käyttää verrattaessa vastusarvoja eri paperilaatujen välillä (luku 7.3). Hienoaineretentio näyttäisi vastaavan vastuskäyriä otaksuen 100 % retentio ja sen vuoksi neliöpaino on todellista muodostunutta rainaa yliarvioitu. Hienoaineretentio on aluksi alhainen, mutta kasvaa jyrkästi toisessa ja kolmannessa portaassa. Suurimmilla neliöpainoilla vastusarvot yhä kasvavat, mutta kulmakertoimen vaihtelun suuruusluokka on paljon pienempi kuin alkupuolella. Vastuskäyrät ovat näytetty kuvassa 7.3-1; hienopaperi nro 1 neliöpainolla 80 g/m^2 .



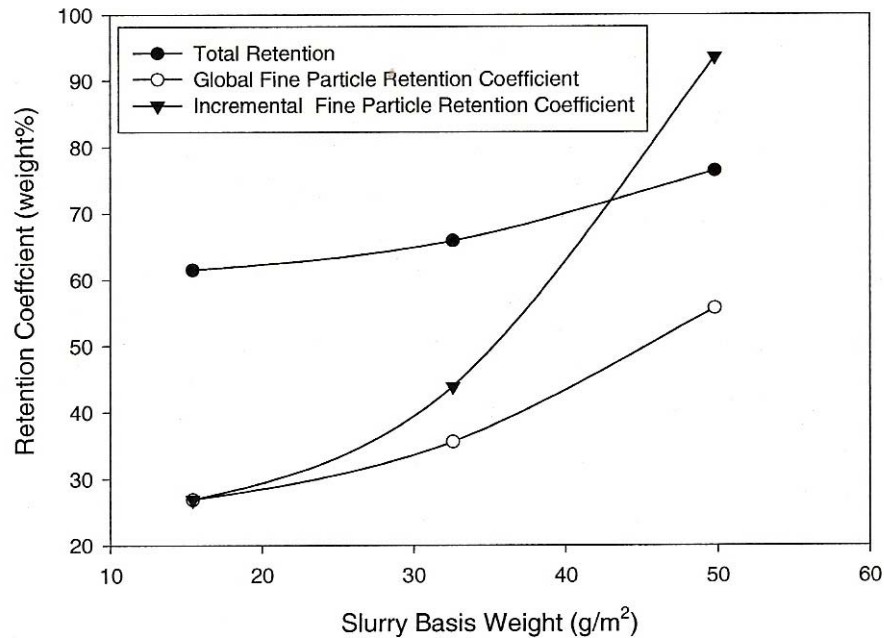
Kuva 7.6-1. Retention vaihtelu neliöpainon funktiona hienopaperi nro.1:llä

Vastuskäyrä on yhteensopiva hienoaineretentio käyrän kuva 7.5-2 kanssa. Molempien käyrien kulmakertoimet kasvavat alussa hitaasti, mutta muuttuvat jyrkemmin loppuosassa. Kolme erilaista sanomalehtipaperinäytettä tutkittiin myös erilaisilla tilavuusvirroilla. Tulokset ovat taulukossa 7.6-2. Hienoaineretentio kasvaa kunkin peräkkäisen neliöpainoportaan aikana. Suurin kasvu tapahtuu neliöpainojen ($32 - 50 \text{ g/m}^2$) välillä. Kokonaisretentio ($61,5 - 76,4$) % sanomalehdellä alkaa alempaa kuin hienopaperi nro 1. Kokonaishienoaineretentio sanomalehdellä alkaa ylempää $26,9$ % arvosta ja loppuu samalle tasolle $55,7$ %, kuin hienopaperi nro 1. Lisääntyvä hienoaineretentio alkaa paljon ylempää $26,9$ % sanomalehdellä ja lisääntyy arvoon $93,6$ %. Tiedot on näytetty kuvassa 7.6-2 verrattavissa viskoottisen vastuksen arvoihin

(a) yhteenvedetty kuvassa 7.5-4. Viskoottinen vastusarvo osittaa myös huomattavaa nousua, mutta tasoittuu neliöpainoalueella (20-40) g/m^2 .

Taulukko 7.6-2. Lasketut retentiokertoimet sanomalehtipaperille

SULPUN NELIÖPAINO [g/m^2]		15,4	32,6	49,8
Kokonais	Retentoitunut neliöpaino [g/m^2]	9,5	21,5	38,0
	Kokonaisretentio %	61,5	65,9	76,4
	Retentoitunut hienoaines [g/m^2]	2,2	6,16	8,54
	Hienoaine retentiokerroin %	26,9	35,6	55,7
Lisäys	Retentoitunut neliöpaino [g/m^2]	9,5	12,0	16,6
	Retentoitunut hienoaines [g/m^2]	2,2	4,0	8,5
	Hienoaine retentiokerroin %	26,9	43,9	93,6



Kuva 7.6-2. Retention vaihtelu neliöpainon funktiona sanomalehtipaperi nro 2

7.7 Aukkojen tu kkeutumisen yhteys hienoaineen ja rainan rakenteen välillä

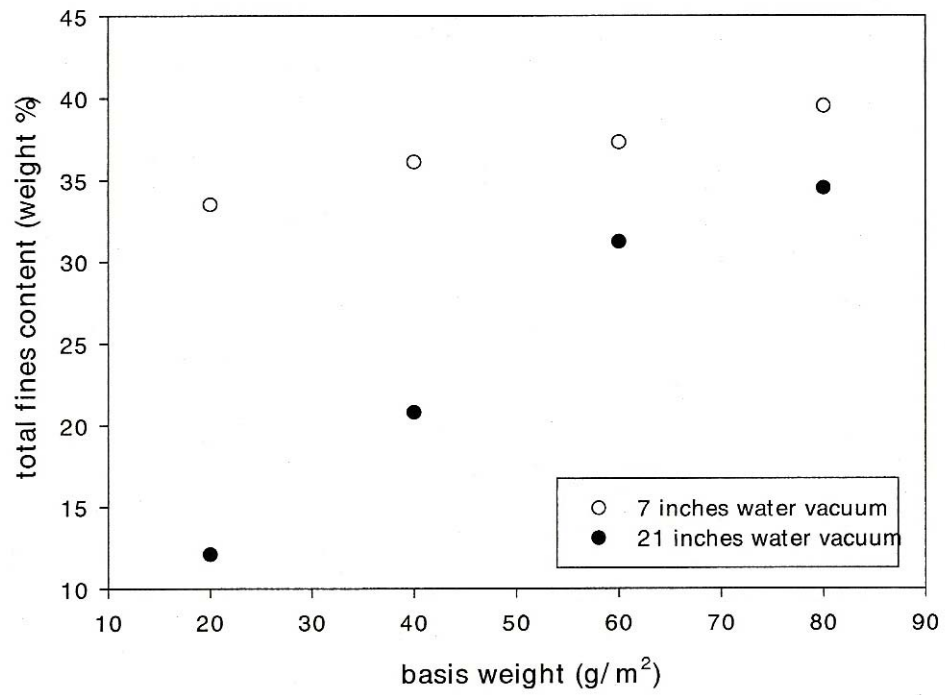
Hienoaineretentio on näyttänyt myötävaikuttavan viskoottisen vastuskertoimen (a) suuruusluokkaan. Lisäksi retentio ei ole tasainen läpi suotautumisprosessin, vaan kasvaa neliöpainon funktiona. Hienoaineen paikalla rainarakenteessa sen muodostumisen aikana on suuri merkitys suunniteltaessa paperikoneen muodostusosaa ja lopputuotteen laatua.

Rainan rakenteellinen tutkiminen johdettiin tekemällä kaksi analyysiä. Neliöpaino 80 g/m² hienopaperi nro.1 valittiin tähän analyysiin. Arkit muilla neliöpainoilla (20,40,60 ja 80) g/m²:ä tuotettiin RDT-laitteella kahdella alipainetasolla. Arkeista analysoitiin täyteaine ja kokonaishienoainepitoisuudet. Täyteainepitoisuus testattiin tuhkatestillä 550 C ja tulokset ovat taulukossa 7.7-1. Tulokset vastaavat hyvin dataa hienoaineretentio yhteenveto edellisessä kappaleessa. Tuhka ja hienoaines lisääntyvät datan mukaan neliöpainon noustessa, riippuen käytetystä alipainetasosta.

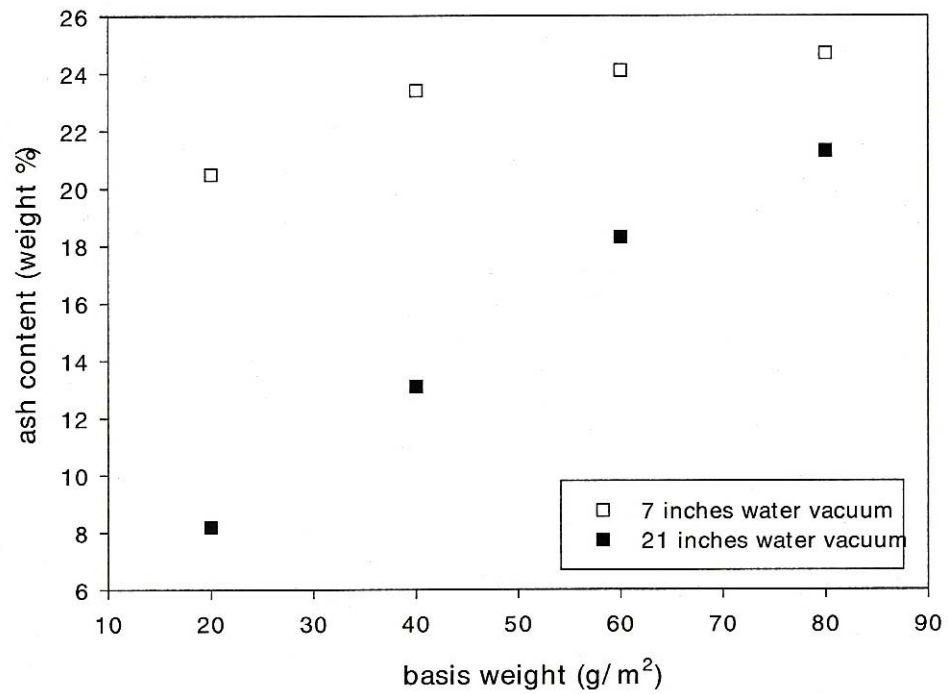
Taulukko 7.7-1. Hienoainepitoisuus sisältö lopullisessa neliöpainossa

ALIPAINETASO [kPa] (H ₂ O)	NELIÖPAINO [g/m ²]	TUHKA %	KUITU-HIENOAINEN %	KOKONAISHIENOAINEN %
1,742	20	20,5	13,5	33,5
	40	23,4	12,7	36,1
	60	24,1	13,2	37,3
	80	24,7	14,8	39,5
5,225	20	8,2	4,1	12,1
	40	13,1	7,7	20,8
	60	18,3	12,9	31,2
	80	21,3	13,2	34,5

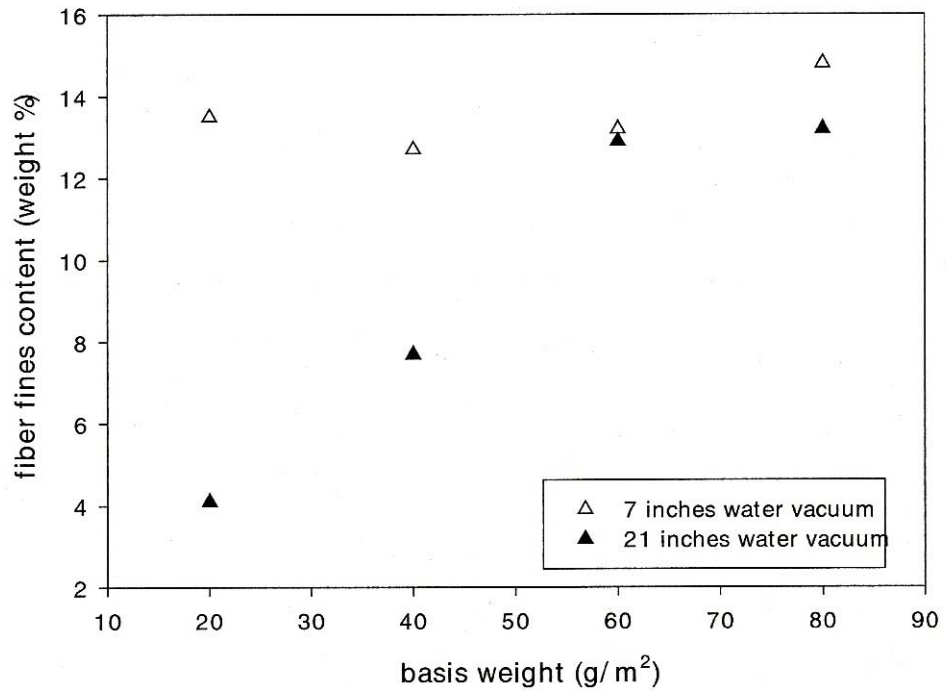
Kuva 7.7-1, 7.7-2 ja 7.7-3 kuvaavat retentikertoimen riippuvuutta lopulliseen arkin neliöpainoon. Taulukoissa esitetään arkkien sisältämä hienoaine- tuhka- ja kuituhienoainekoostus. Nopeampi virtausnopeus generoi kasvavan alipainetason aiheuttaen retention alenemisen alhaisilla neliöpainoilla molemmilla kuitu- ja täytehienoaineella (tuhka). Tämä eroavaisuus hienoainekoostumukseen nähdessä arkeilla laskee neliöpainon lopullisesti kasvaessa.



Kuva 7.7-1. Lopullisen neliöpainon vaikutus kokonaishienoaineretentioon



Kuva 7.7-2. Lopullisen neliöpainon vaikutus tuhkaretentioon

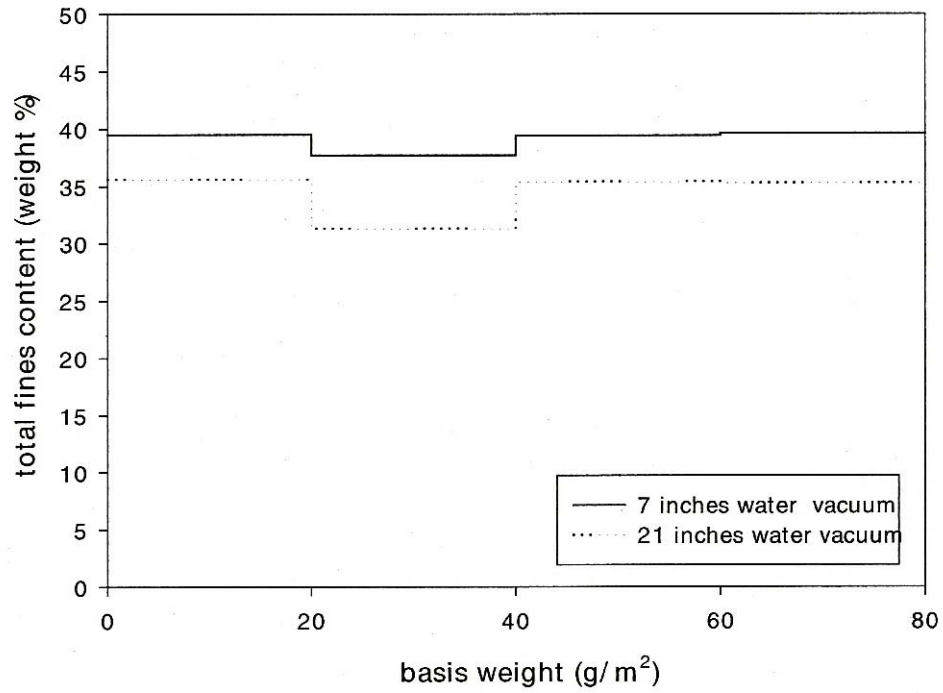


Kuva 7.7-3. Lopullisen neliöpainon vaikutus kuituhienoaineretentioon

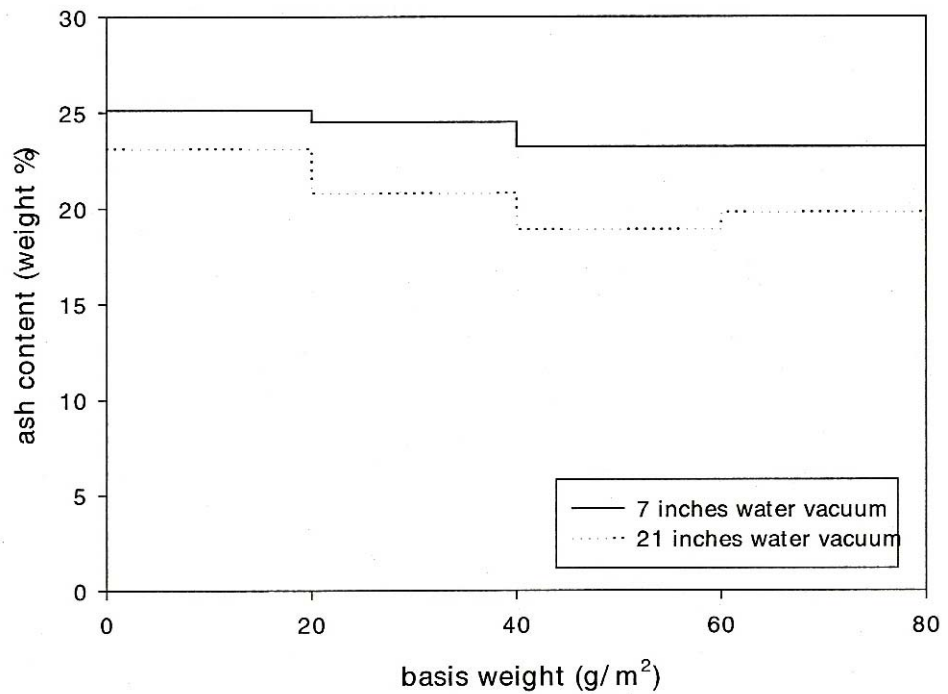
Neliöpainoltaan 80 g/m²:ä jaettiin neljään osaan Beloitin arkkileikkurilla, jotta saatiin selville hienoainekoostumus arkkien rakenteesta. Kokonaishienoaines määritettiin Britt- analyysillä. Kuituhienoaines arvioitiin käyttäen materiaalin tasapainoa ja tietoa kokonaishienoaineesta ja tuhkasta. Tulokset ovat taulukossa 7.7-2 ja kuvassa 7.7-4, 7.7-5 ja 7.7-6.

Taulukko 7.7-2. Kokonaishienoaine- ja tuhka jakautuminen hienopaperiarkilla 80 g/m²

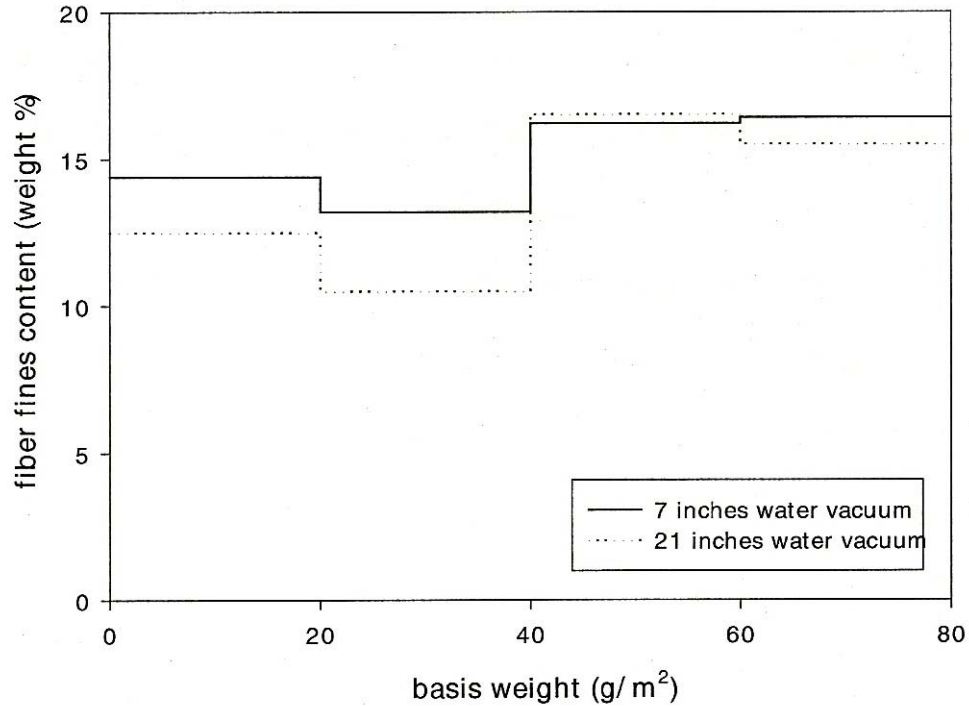
ALIPAINETASO [kPa] (H ₂ O)	TUHKKA %				KOKONAISHIENOAINI %			
	t1	t2	b2	b1	t1	t2	b2	b1
1,742	25,1	24,5	23,2	23,2	39,5	37,7	39,4	39,6
5,225	23,1	20,8	18,9	19,8	35,6	31,3	35,4	35,3
ALIPAINETASO [kPa] (H ₂ O)	KUITUHIENOAINI %							
	t1	t2	b2	b1				
1,742	14,4	13,2	16,2	16,4				
5,225	12,5	10,5	16,5	15,5				



Kuva 7.7-4. Alipaineen vaikutus z-suuntaan kokonaishienoaineretentioon



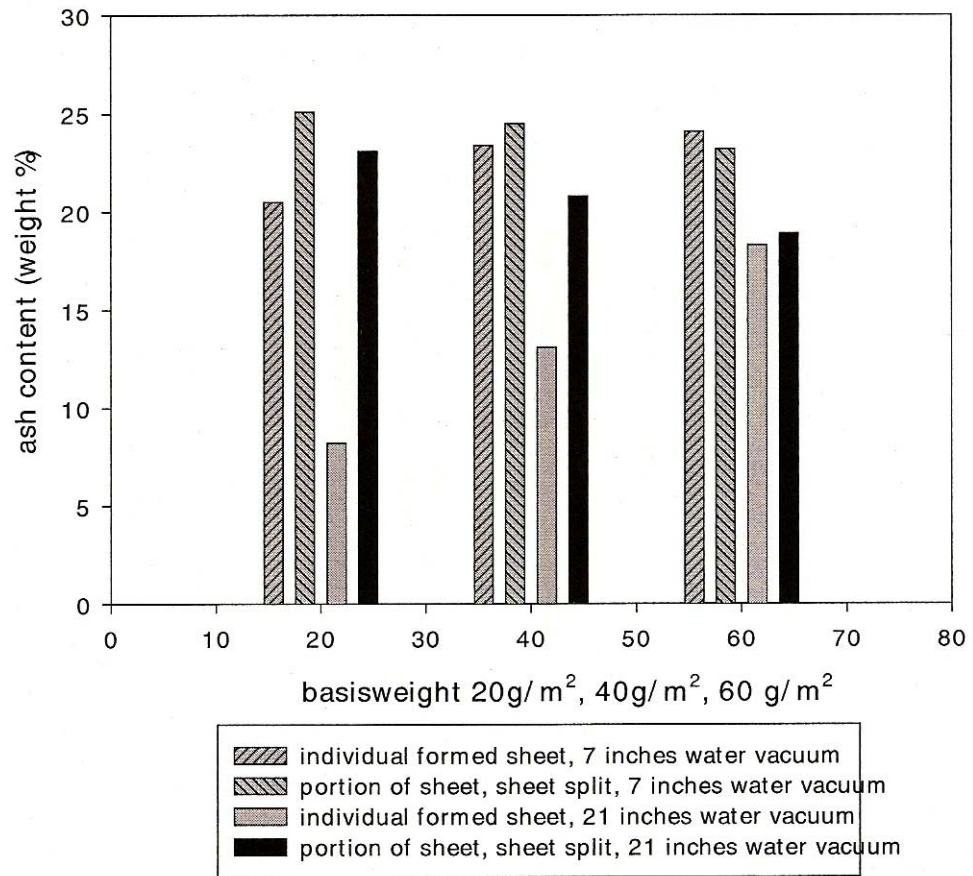
Kuva 7.7-5. Alipaineen vaikutus z-suuntaan tuhkaretentioon



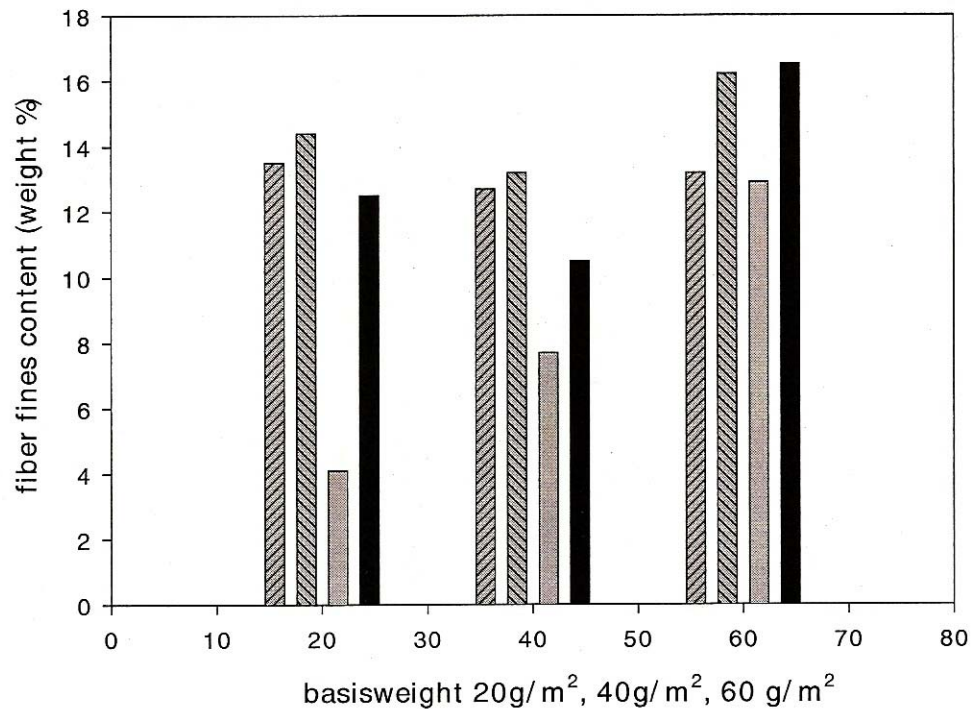
Kuva 7.7-6. Alipaineen vaikutus z-suuntaan kuituhienoaineretentioon

Kokonaishienoainejakauma näyttäisi olevan suhteellisen tasainen arkin läpi. Tuhkajakauma osoittautui pienemmäksi viiran puolella. Tämä vaikutus näyttäisi korostuvan enempi suurilla virtausnopeuksilla. Kuituhienoaineet käyttäytyvät päinvastaisesti kuin täyteaineet. Kuituhienoainepitoisuus lisääntyy selvästi viiran puolella.

Eri hienoainejakaumat olivat lopullisella 80 g/m²:n arkillä suhteellisen tasaisia. Tuhka ja hienoaines tasot olivat matalia alhaisilla neliöpainoilla muodostuneilla arkeilla, näytetty taulukossa 7.7-2. Kun arkin yläpinta muodostuu, hienoaineretentio nousee. Seuraavassa vaiheessa retentoitunut rainan hienoaineen esiintyminen suosisi saostumista alemmaan aikaisemmin muodostuneeseen kerroksiin rainassa. Hienoaines- ja tuhkapitoisuutta jaetuissa arkeissa verrattiin samanlaisiin yksittäin muodostettuihin arkkeihin. Tiedot on yhteenvedetty taulukossa 7.7-3 ja graafisesti esitetty kuvissa 7.7-7, 7.7-8.



Kuva 7.7-7. Tuhkapitoisuuden vertaaminen jaetuissa arkeissa samalla neliöpainolla yksittäin muodostettuihin arkkeihin



Kuva 7.7-8. Kuituhienoainespitoisuuden vertaaminen jaetuissa arkeissa samalla neliöpainolla yksittäin muodostettuihin arkkeihin

Taulukko 7.7-3. Hienoainepitoisuuden kasvaminen yksittäin muodostuneissa arkeissa

ALIPAINETASO [kPa] (H ₂ O)	NELIÖPAINO [g/m ²]	TUHKA %	KUITU HIENOAINE %	KOKONAIS-HIENOAINE %
1,742	20	+4,6	+0,9	+6
	40	+1,4	+0,5	+2,5
	60	+0,1	+1,4	+1,5
5,225	20	+14,9	+8,4	+23,5
	40	+8,8	+2,8	+13,3
	60	+2,6	+3,6	+2,9

Hienoainepitoisuuden kasvaminen jokaisella yksittäin mitatulla neliöpainolla on ilmeisen selvää. Pienemmällä alipainetasolla mitatuissa kasvaminen on vähäisempää. Kuituhienoaineretentio oli korkea molemmilla sekä halkaistuilla, että yksittäin muodostuneilla arkeilla pienemmällä alipainetasolla ja huomattavasti alhaisempi korkealla alipainetasolla.

7.8 Vedenpoisto nopeuden vaikutus hienopaperin suotautumisvastukseen

Hienoainepitoisuuden merkitys on suuri suunniteltaessa vastuskäyrää. Puristus vaikutus voisi myös edistää viskoottisen vastuskäyrän kasvamista, mutta vähemmän kuin

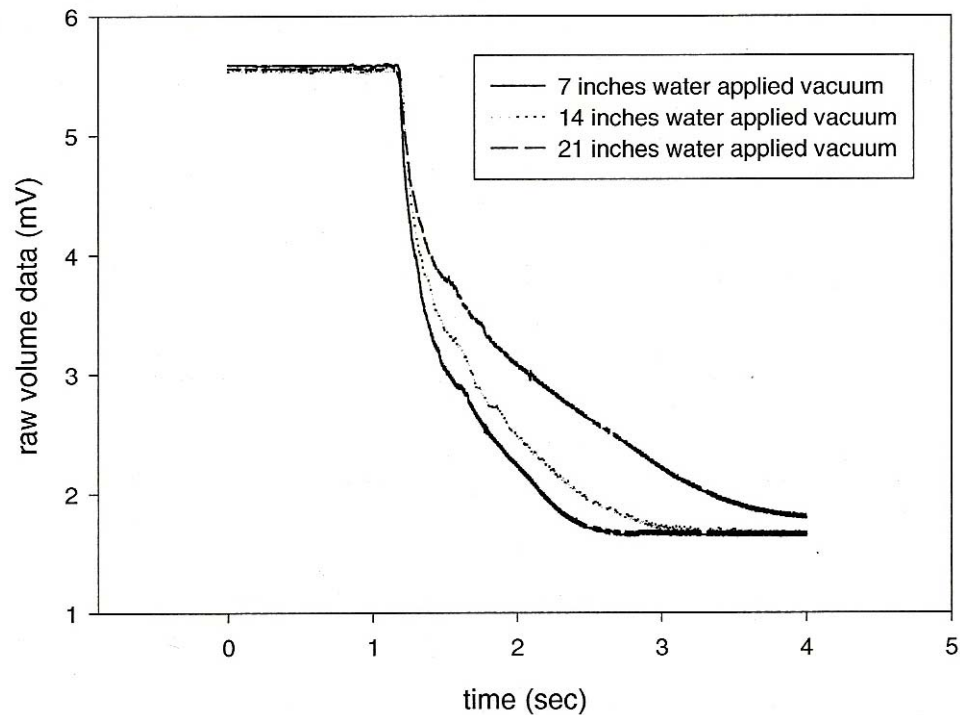
hienoaines. Tämä on todistettu vertaamalla vastuskertoimia havupuulla; esitetty aiemmin ja ominaiskaavoilla vedenpoistokäyrillä hienopaperi (sellumassa) ja sanomalehti (termomekaaninen massa) ilman hienoainesta. Tutkimus massoille erilaisilla alipainetasoilla ja vastaavilla virtausnopeuksilla pitäisi selvittää molemmat, viskoottinen vastus ja hienoaineretentio suotautumisprosessissa.

7.8.1 Hienopaperi nro 1

Hienopaperi nro 1 tutkittiin kolmella erilaisella vedenpoisto-ominaisuudella. Hienopaperi nro.1 sisältää valkaistua lehti- ja havupuumassaa ja lisäksi pienimmän hienoainepitoisuuden, mitä tutkimuksissa käytettiin. Tämän massan pitäisi maksimoida puristuvuusvaikutuksen seuraukset. Näytteet tutkittiin kolmella eri alipainetasolla 1,742 kPa:a (7 in H₂O), 3,484 kPa:a (14 in H₂O) ja 5,225 kPa:a (21 in H₂O). Jokainen alipainetaso aiheutti erilaiset vedenpoisto-olosuhteet. Suurin nopeudenarvo saavutettiin 5,225 kPa:n alipaineella ja oli 7,9 cm/s. Alipainetasolla 1,742 kPa nopeus oli 4,6 cm/s ja alipainetasolla 3,484 kPa se oli 6,4 cm/s. Suurin vedenpoistonopeus antoi pienimmän retention. Tutkimustulokset ja tutkimusolosuhteet ovat yhteenvedetty taulukossa 7.8-1. Vedenpoistoa vastaavat nopeuskäyrät ovat kuvissa 7.8-1 ja 7.8-2.

Taulukko 7.8-1. Hienopaperi nro 1 kokonaisretentio ja suurin virtausnopeus kolmella alipainetasolla selvitettyinä

SUSPENSION TILAVUUS [ml]	ALIPAINETASO [kPa] (H₂O)	SUURIN VIRTAUSNOPEUS [cm/s]	KOKONAISS- RETENTIO %
260	1,742	4,6	86,4
260	3,484	6,4	81,9
260	5,225	7,9	79,2



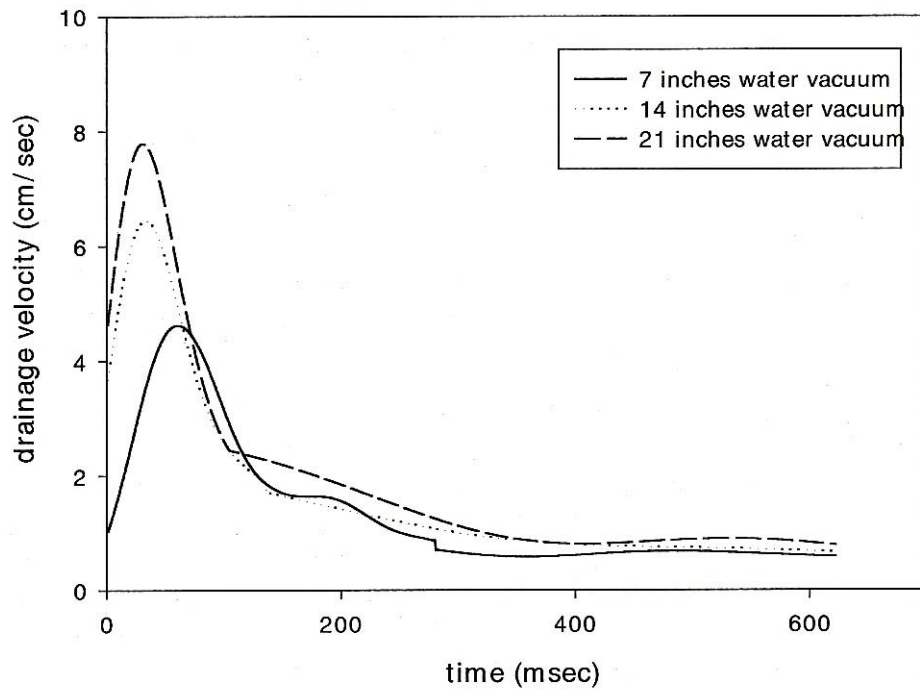
Kuva 7.8-1. Vedenpoistokäyrät hienopaperi nro 1:llä kolmella alipainetasolla ajan funktiona

Viskoottisen vastuskertoimien arvot ovat taulukossa 7.8-2 ja graafisesti esitettyinä kuvassa 7.8-3. Viskoottiset vastuskertoimet olivat pienempiä suurilla virtausnopeuksilla ja pienillä retentioilla. Vastus seuraa hienoaineretentiota; mitä pienempi retentio, sitä pienempi vastuskerroin on, vaikka nesteen kitkakertoimet rainassa ovat huomattavan korkeat. Jos puristuksella olisi suurempi myötävaikutus suhteessa viira-aukkojen tukkeutumiseen hienoaineesta, korkeimmat vastuskertoimet ilmenisivät suuremmilla virtausnopeuksilla. Hypoteesi on hylätty. Sopivampi hypoteesi olisi, että hienoainepartikkelit muuttavat aukkosuhdetta (huokoisuutta) viirassa. Tätä johtopäätöstä seuraa loogisesti relaatiota

$$a = k_1 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} S_v^2 \mu. \quad (2-5)$$

Kun aukkosuhde (ε) lähenee nollaa, viskoottinen vastuskerroin (a) lähestyy ääretöntä. Niin ikään kuitujen ominaispinta-alan (S_v) kasvaessa, kasvaa myös viskoottinen vastuskerroin. Nämä molemmat ominaisuudet ovat tyydyttyä kun hienoaineretentio on korkea. Kaksi muuta ominaisuutta ovat ilmeisiä viskoottisen vastuskertoimen kaavassa. Viskoottinen vastuskerroin kasvaa kun suspension dynaaminen viskoosi (μ) kasvaa.

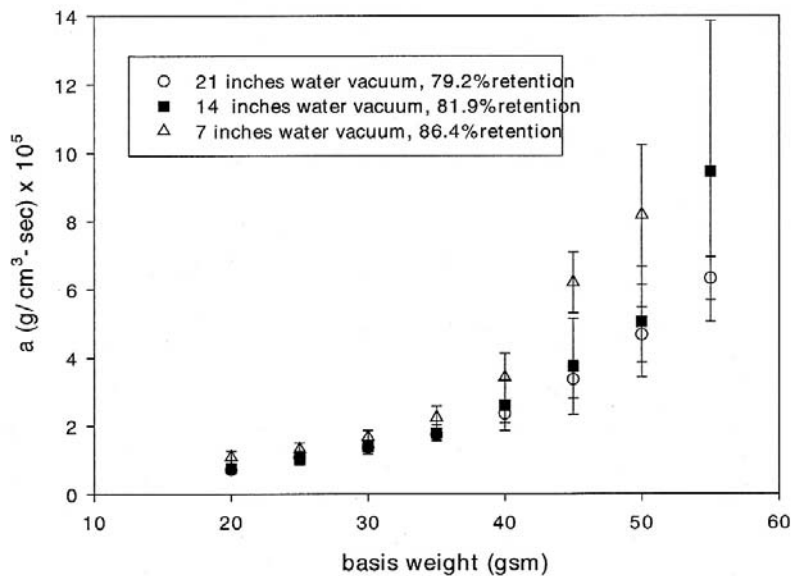
Totta kai tämä on triviaali tulos, ellei viskoottinen määre verkkaisesti lisääntyisi, muuttaen paikallista vedenpoistonopeutta kuitumaton aukoissa ja vaikuttaen hienoainepartikkeleiden paikkaan muodostuvassa rainassa. Lopuksi viskoottinen vastuskerroin kasvaa kun materiaalikohtainen kerroin k_1 kasvaa. Materiaalikohtainen kerroin voi kasvaa jauhettaessa kuituja, jolloin kuitujen kristallisoitunut sydän rikkoutuu ja kuitu fibrilloituu. Vesi voi myös aiheuttaa kuituseinämien ja muiden partikkeleiden turpoamista.



Kuva 7.8-2. Alipaineen vaikutus virtausnopeuteen 60 g/m^2 hienopaperi nro 1

Taulukko 7.8-2. Viskoottinen vastuserroin hienopaperi nro 1

Hienopaperi	Alipainetaso 5,225 [kPa] (H ₂ O) (21 in H ₂ O)			Alipainetaso 1,742 [kPa] (H ₂ O) (7 in H ₂ O)		
Neliöpaino [g/m ²]	Keskiarvo viskoottinen vastuserroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%	Keskiarvo viskoottinen vastuserroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%
20	0,70	0,10	14	1,08	0,18	17
25	1,06	0,20	19	1,31	0,18	14
30	1,36	0,19	14	1,67	0,19	11
35	1,74	0,17	10	2,24	0,34	15
40	2,35	0,26	11	3,42	0,70	20
45	3,36	0,56	16	6,20	0,89	14
50	4,67	0,80	17	8,18	2,05	25
55	6,31	0,63	10			
	Alipainetaso 3,484 [kPa] (H ₂ O) (14 in H ₂ O)					
Neliöpaino [g/m ²]	Keskiarvo viskoottinen vastuserroin a [g/cm ³ s x10 ⁵]	STD	%			
20	0,75	0,12	16			
25	1,02	0,11	11			
30	1,39	0,12	9			
35	1,78	0,23	13			
40	2,60	0,75	29			
45	3,73	1,41	38			
50	5,05	1,62	32			
55	9,45	4,4	47			



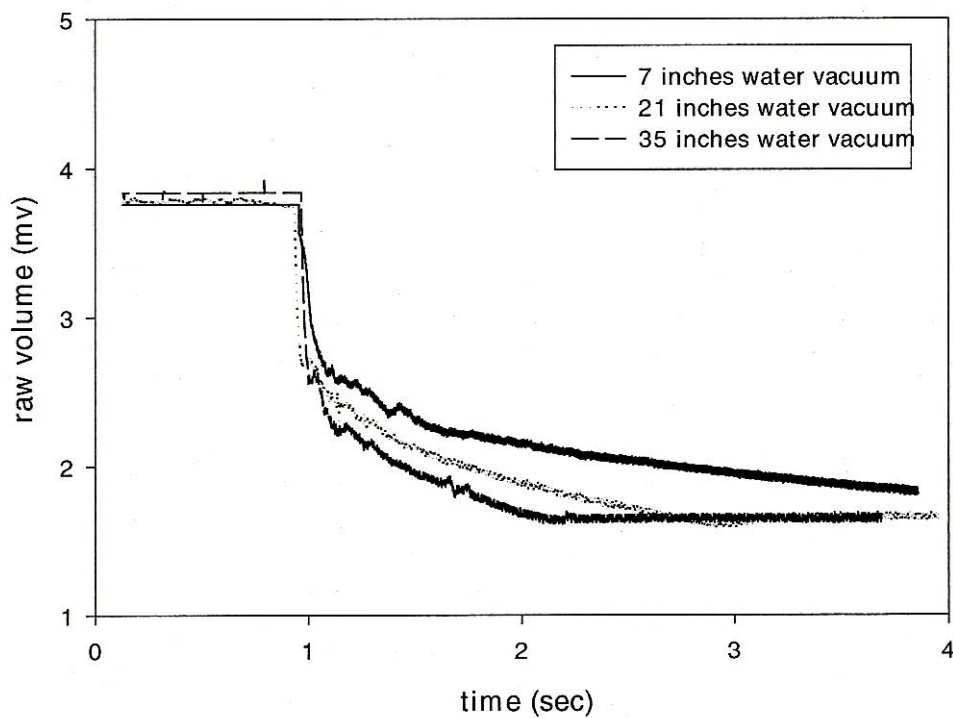
Kuva 7.8-3. Virtausnopeuden vaikutus viskoottiseen vastuserroimeen hienopaperi nro 1

7.8.2 Sanomalehtipaperi nro 2

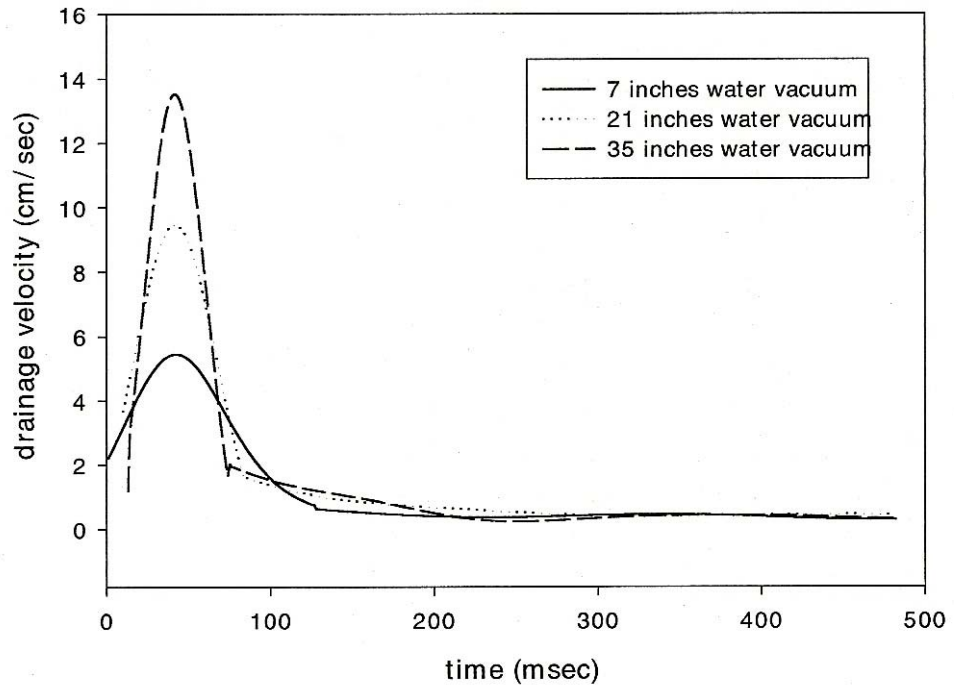
Vedenpoisto-olosuhteet tutkittiin myös sanomalehtipaperi nro 2 kolmella eri alipainetasolla. Neliöpaino 45 g/m^2 :ä valittiin tähän tutkimukseen. Alipainetasot, suurin virtausnopeus ja liittyvä kokonaisretentio on taulukossa 7.8-3. Virtausta vastaavat nopeuskäyrät on graafisesti esitetty kuvassa 7.8-4 ja 7.8-5. Sanomalehtipaperilla esiintyi samanlaiset trendit kuin hienopaperilla. Korkein vastuskerroin ilmeni pienillä virtausnopeuksilla, paitsi suurin arvo neliöpainolla 45 g/m^2 :ä. Virherajat kokeessa limittyivät suurilla neliöpainoilla. Johtopäätös näistä tiedoista on, että eroja viskoottisissa vastuskertoimissa ei voida havaita.

Taulukko 7.8-3. Sanomalehtipaperi nro 2 kokonaisretentio ja suurin virtausnopeus kolmella alipainetasolla selvitettyinä

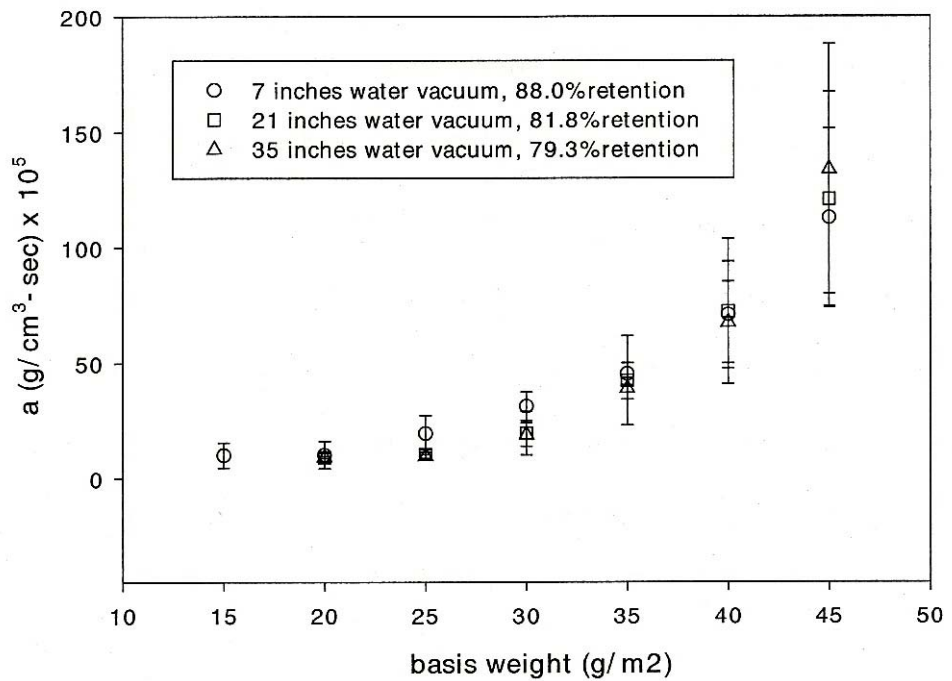
SUSPENSION TILAVUUS [ml]	ALIPAINETASO [kPa] (H ₂ O)	SUURIN VIRTAUSNOPEUS [cm/s]	KOKONAIS- RETENTIO %
260	1,742	5,3	88,0
260	3,484	9,5	81,8
260	5,225	13,8	79,3



Kuva 7.8-4. Vedenpoistokäyrät sanomalehtipaperi nro 2 kolmella eri alipainetasolla



Kuva 7.8-5. Alipaineen vaikutus virtausnopeuteen 50 g/m² sanomalehtipaperi nro 2:lla



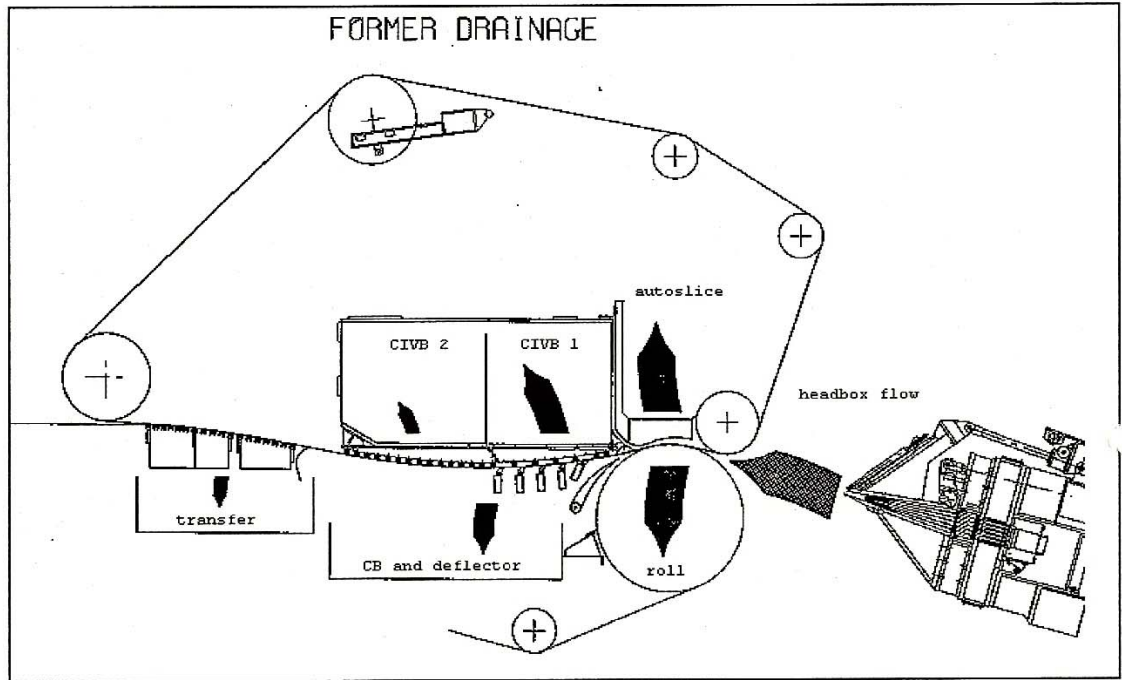
Kuva 7.8-6. Virtausnopeuden vaikutus viskoottiseen vastuskertoimeen sanomalehtipaperi nro 2

8 Virtausvas tuksen mittaaminen koekoneella

Koekoneella tehdyissä mittauksissa käytettiin kolmea massaa, jotka on listattu taulukossa 7.1-2. Sanomalehtipaperinäyte ja kaksi hienopaperinäytettä tutkittiin. Hienopaperinäyte sisälsi saman verran lehti- ja havupuumassaa, mutta lehtipuumassat olit erityyppisiä. Vertailu tehtiin suotautumisvastuskäyrillä jokaisella massalla suhteessa koekoneen vedenpoistokokeisiin.

8.1 Koekone esittely

Koeajot koneella tehtiin Beloitin Rocktonin tutkimuskeskuksessa. Koeajot ajettiin koekone numero kolmella. Koneen märkäosa on varustettu kuusi-kanavaisella konsepti IV-MH perälaatikolla, varustettuna 476,25 mm (18.75 in) huuliaukolla ja BelBaie RCB tela-lista- horisonttaaliformerilla. Massan virratessa ohi muodostusalueen tilavuusvirta voidaan mitata. Koepaperikone on varustettu keräämään virtaustiedot useista pisteistä, näytetty kuvassa 8.1-1. Nämä vedenpoistotiedot eri pisteistä kerättiin poikki koneen vedenpoistokanavista. Tilavuusvirta eri mittauspisteissä lasketaan V-patomittauksella. Tätä koetta varten koepaperikone varustettiin keräämään virtaustiedot kuudelta alueelta, kolme ylöspäin ja kolme alaspäin suuntautuvaa virtausta mitaten. Alas päin suuntautuva vedenpoistoalueet käsittävät: 1) telan, tai telaan sisälle menevän virtauksen ja vastapuolella autoslice listalta ylöspäin menevän virtauksen, 2) deflektorilista ja kuormituslistat (CB), 3) radan siirtoimulaatikko, käsittäen siirto- ja imulaatikot. Ylöspäin suuntautuvat vedenpoistoalueet käsittävät: 1) autolice-imulaatikko, 2) kaarevaimulaatikko CIVB 1 ja CIVB 2. Vedenmittauspisteet on näytetty kuvassa 8.1-1.



Kuva 8.1-1. Koekoneen vedenmittauspisteet

8.2 Massojen ominaisuudet

Kolme neljästä massasta tutkittiin: hienopaperi nro 1 ja 2 sekä sanomalehtipaperi nro 2. Massojen ominaisuudet ovat annettu taulukossa 8.2-1.

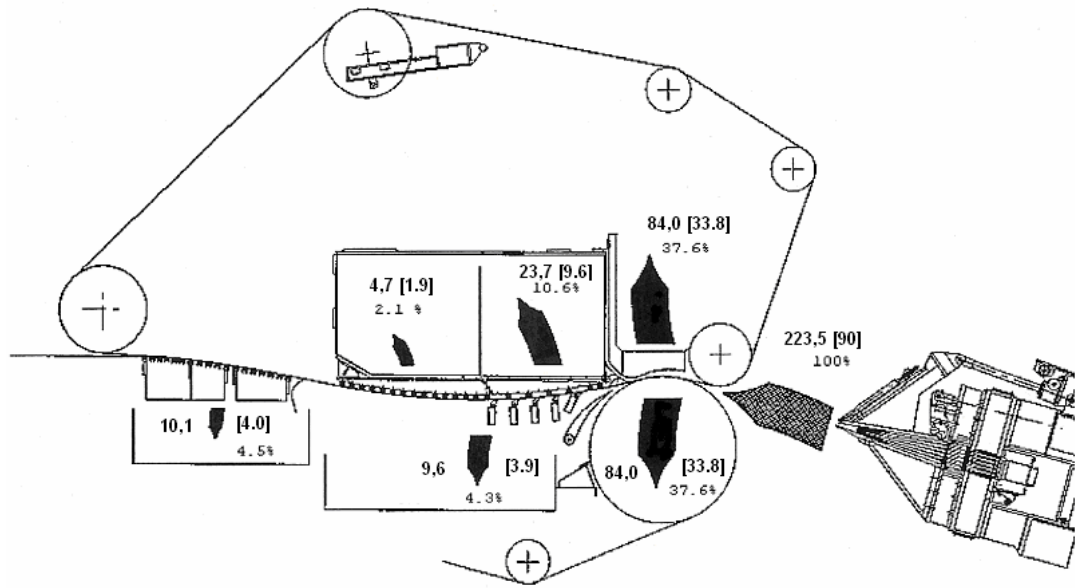
Taulukko 8.2-1. Koepaperikoneen massojen ominaisuudet

	HIENOPAPERI NRO 1 42034	HIENOPAPERI NRO 2 42376	SANOMALEHTI- PAPERI NRO 2 42359
Massat	75/25 Lehti/Havu	75/25 Lehti/Havu	Kierrätyskuitua hylkyrullista
HPD/ton	4,33/5,4	4,33/6,1	Kierrätyskuitua
Kuidutus CSF (ml)	450	370	125
perälaatikko CSF (ml)	295	150	45
% tuhkaa perälaatikko	23,8	28,8	2,0
Täyteaine	PCC	PCC	Uusio
Perälaatikon sakeus	0,674	0,698	0,596

8.3 Vedenpoisto mittaus tulokset koekoneelta

Vedenpoistomittausten tulokset ovat näytetty kuvissa 8.3-1, 8.3-2 ja 8.3-3. Kuvissa mittauspisteissä näkyvät alimmat arvot ovat prosentteja perälaatikon virtaamasta. Ylemmät arvot ilmoittavat virtauksen $\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ (gpm/in).

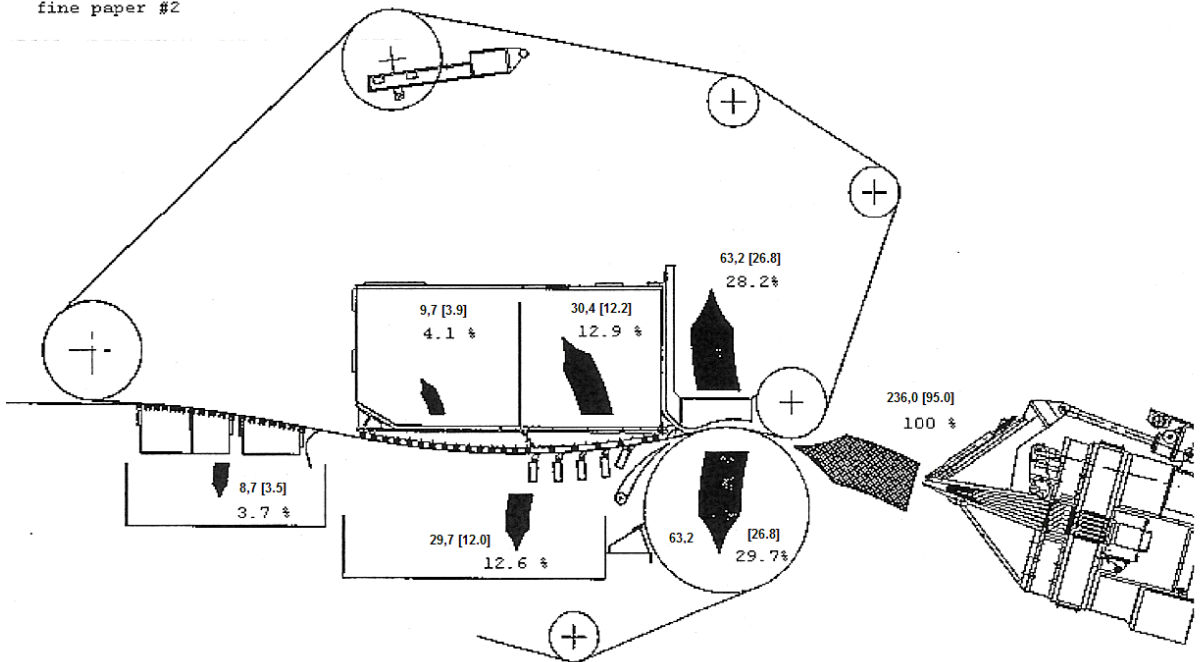
FORMER DRAINAGE



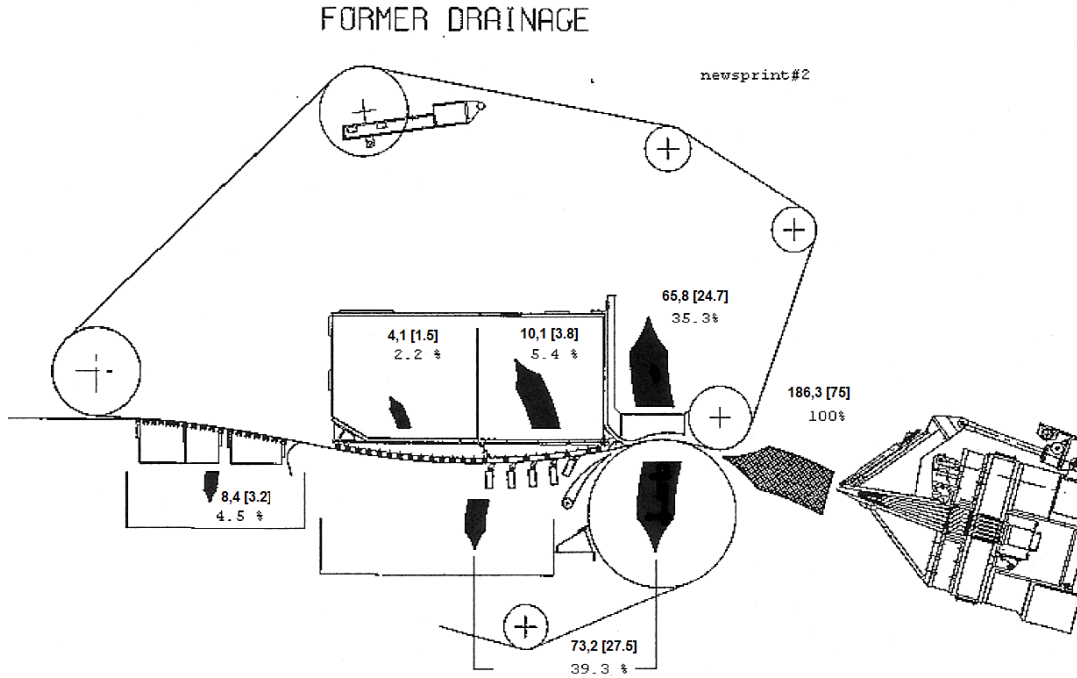
Kuva 8.3-1. Koekoneen vedenpoistojakauma hienopaperi nro 1

FORMER DRAINAGE

fine paper #2



Kuva 8.3-2. Koekoneen vedenpoistojakauma hienopaperi nro 2



Kuva 8.3-3. Koekoneen vedenpoistojakauma sanomalehtipaperi nro 2

Yhteenveto koeajotuloksista on taulukossa 8.3-1, 8.3-2 ja 8.3-3. RDT -testilaitte toimii vakioaineessa. Seurauksena on, että saatu virtausvastus, joka parhaiden edustaa virtausominaisuuksia vakioaineessa ilmenee alkuvedenpoiston aikana, kuten formeritelalla tapahtuva vedenpoistuminen. On myös vaikea verrata massan suotautumista listaosalla, johtuen tosiasista että listaosalla olisi erilaiset massaominaisuudet lähtöhetkellä riippuen kulloisestakin massasta. Koska jos massalla on korkea vastuskerroin, siitä poistuu vähempi vettä telan yläpuolelle ja on siten matalampi neliöpaino ja vastaavasti alhaisempi vastuskerroin kuin massalla pienemmällä virtausvastuksella. Tutkittaessa virtausta telan yli on kaikilla massoilla sama lähtötilanne muodostusosalla.

Taulukko 8.3-1. Koeajotulokset eri massoille

	HIENO- PAPERI NRO 1 42034	HIENO- PAPERI NRO 2 42376	SANOMA- LEHTI- PAPERI 42359
Perälaatikon CSF	295	150	95
Perälaatikon sakeus (%)	0,67	0,69	0,60
Viirarentio (%)	70,0	62,6	63,3
Neliöpaino (g/m ²)	75	75	45
Perälaatikon virtaama dm ³ /s·m)	223,5	236,0	186,3
Vedenpoistojakauma % perälaatikon virtaamasta			
#1 Viira virtaus ylös			
Autoslice	37,6	28,2	35,3
Yläimulaatikko 1. kammio	10,6	12,9	5,4
Yläimulaatikko 2. kammio	2,1	4,1	2,2
Σ Virtaus ylös	50,3	45,1	42,9
#2 Viira virtaus alas			
Alas formeritelalta	37,6	29,7	
Kuormituslistat	4,3	12,6	39,3
Siirtoimulaatikko	4,5	3,7	4,5
Σ Virtaus alas	46,4	46	43,8
Vedenpoistojakauma (dm³/s·m)			
#1 Viira virtaus ylös			
Autoslice	84,0	63,2	65,8
Yläimulaatikko 1. kammio	23,7	30,4	10,1
Yläimulaatikko 2. kammio	4,7	9,7	4,1
Σ Virtaus ylös	112,4	103,3	80
#2 Viira virtaus alas			
Alas formeritelalta	84,0	63,2	
Kuormituslistat	9,6	29,7	73,2
Siirtoimulaatikko	10,1	8,7	8,4
Σ Virtaus alas	103,7	101,6	81,6
Koekoneparametrit			
Formeritelan alipaine (kPa)	4,98	2,50	4,98
Yläimulaatikon alipaine 1. kammio (kPa)	6,98	7,47	7,21
Yläimulaatikon alipaine 2. kammio (kPa)	8,46	9,95	9,95
Kuormitettuja listoja (kpl)	3	4	3
Imulaatikko 1:n alipaine (kPa)	10,1	16,9	16,9
Imulaatikko 2:n alipaine (kPa)	13,5	20,3	20,3
Siirtoimulaatikon alipaine (kPa)	21,9	23,6	23,6

Taulukko 8.3-2. Retentio mittauspisteissä

	HIENOPAPERI NRO 1 42034		HIENOPAPERI NRO 2 42376		SANOMALEHTI- PAPERI 42359	
Mittauspiste	Sakeus %	Retentio %	Sakeus %	Retentio %	Sakeus %	Retentio %
#1 Viira virtaus ylös						
Autoslice	0,194	68	0,237	65	0,214	64
Yläimulaatikko 1. kammio			0,294	57	0,199	67
Yläimulaatikko 2. kammio			0,163	76	0,173	71
#2 Viira virtaus alas						
Alas formeritelalta			0,283	58	0,218	64
Kuormituslistat	0,268	56	0,346	49	0,245	59
Imulaatikko 1			0,374	45	0,448	25
Imulaatikko 2			0,177	74	0,302	50
Siirtoimulaatikko			0,163	76	0,258	57

Taulukko 8.3-3. Keskimääräinen virtausnopeus mittauspisteissä

MITTAUSPISTE	KESKIMÄÄRÄINEN VIRTAUSNOPEUS MITTAUSPISTEISSÄ (cm/s)		
	Hienopaperi nro 1 42034	Hienopaperi nro 2 42376	Sanomalehtipaperi 42359
#1 Viira virtaus ylös			
Autoslice	11,8	9,4	8,7
Yläimulaatikko 1. kammio	1,5	1,8	0,6
Yläimulaatikko 2. kammio	0,3	0,7	0,3
#2 Viira virtaus alas			
Alas formeritelalta	11,8	9,9	
Kuormituslistat	0,2	0,7	
Siirtoimulaatikko	0,9	0,8	0,8

RDT-testilaitteella mitatut virtausvastukset kolmelle massalle eivät vain ennusta oikeaa trendiä, vaan myös ennustavat että sanomalehti nro 2 ja hienopaperi nro 2 käyttäytyvät samoin ominaisuuksin. Hienoainetestit eivät ennustaneet samoja virtausominaisuuksia. Viskoottisen vastuksen tutkimustiedoista ja koekoneen vedenpoistomittauksista voidaan päätellä, että tässä työssä esitelty laboratorio mittauslaite ennustaa tarkemmin vedenpoisto taipumuksia, kuin hienoainetestejä, tehtynä perälaatikko- ja reunanauhanäytteistä. Lisäksi virtausnopeudet tuotettuna laboratoriotestilaitteella olivat samoja kuin keskimääräiset virtausnopeudet koneella mitattuna telavedenpoistosta.

9 Yhteenveto ja päätelmät

Aluksi voidaan todeta, että Beloitin tutkimusraportissa käsitelty suotautumistapahtuma ei ole yksiselitteinen tapahtuma. Tästä monimutkaisuudesta johtuen ei ole pystytty vielä kehittämään riittävän tarkkaa matemaattista mallia, joka simuloisi muodostusosalla tapahtuvan rainan muodostumisen. Tämän vuoksi yhä edelleen koekoneilla ajettavat testit ovat tarpeellisia. Testeistä saatavaa tietoa voidaan näin ollen verrata simulointimalleihin. Myös laborioriotestilaitteiden kehittäminen ja niiden tarkkuuden parantaminen palvelevat edellä mainittuja seikkoja. Kaikkea massaradan muodostumisen aikaista tietoa ei voida vielä mitata reaaliaikaisesti tuotantokoneelta. Massaradan suotautuminen on paperinteon kannalta yksi merkittävimmistä tapahtumista, eikä sen merkitystä lopputuotteen kannalta voida väheksyä. Painotalojen laatuvaatimukset kasvavat ja toisaalta paperia pitää nykyään pystyä tekemään kierrätyskuidusta energiatehokkaasti raaka-ainetta säästäen. Tämän vuoksi nopeiden ja silti laadukasta lopputuotetta tekevien paperikoneiden kehitystehtävissä olevien henkilöiden tulee hallita vedenpoiston teoria, sen fysikaaliset ja kemialliset ilmiöt. Erilaiset simulointiohjelmat ovat kehitystyön arvokkaita työvälineitä.

9.1 Vedenpoistomekanismit

Lähdetään tarkastelemaan perälaatikossa olevan sulpun sisältöä, ennen kuin se suihkutetaan muodostusosalle viiran päälle tai kahden viiran väliin. Massasulpun sakeus on perälaatikossa tyypillisesti 0,3 - 1,5 %. Vesi toimii kuitujen ja lisäaineiden kuljetusvälineenä. Sitä on vapaana kuitujen välissä, sitoutuneena vetysidoksin kuitujen pintaan tai osana kuitujen sisäisenä vetenä kuidun rakenteessa. Muodostusosalla on kolme erilaista vedenpoistomekanismia (kuva 9.1-1) [30].

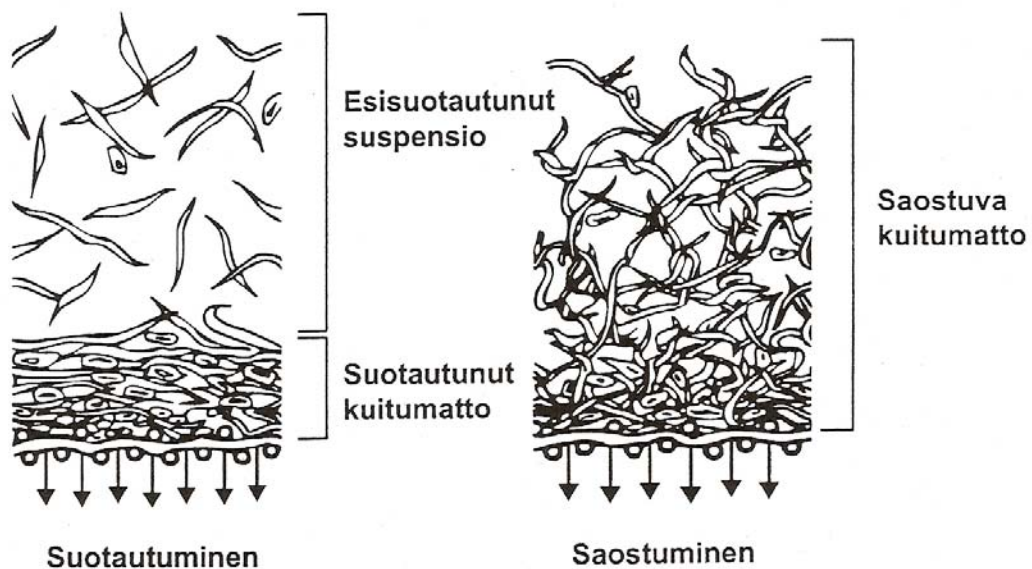
- Suotautuminen, jolloin vesi poistuu rainasta ja viiran pinnalle muodostuu kuitukerrosta, joka paksunee, mutta ei merkittävästi muodosta sidoksia eri kerrosten väliin. Suotautuneen kuitumaton päällä on kuituja vapaasti vedessä.
- Sakeutuinen, jolloin rainaan ei muodostu erilaisia sakeuksia olevia kerroksia. Kuidut asettuvat vapaasti eri suuntiin muodostaen sidoksia eri kerrosten välille. Puhdas sakeutuminen vaatisi koko vedenpoiston ajan voimakasta turbulenssia, jotta viiran päälle ei muodostuisi yhtenäistä kuitumattoa. Seurauksena olisi huono retentio.

- Turbulentti sakeutuminen, jolloin nopeilla paperikoneilla tapahtuma on edellisten yhdistelmä. Tällöin turbulenssi ja suuret leikkausvoimat saavat aikaan sekarakenteen matalasakeusrainauksessa.

Vedenpoistoon vaikuttavia tekijöitä ovat myös

- massan lämpötila
- kuidun pinnan muoto
- massan sisältämä ilma
- jauhatuste (freenes)
- kuidun pintakemia
- hienoaines ja LK -aineet (liuenneet ja kolloidiset aineet)
- suurmolekyyliset polymeerit
- kuidun fibrilliotumiminen (haivenisuus kuidun pinnalla)
- massan pH.

Massassa oleva ilma, hienoaines, LK- aineet ja suurmolekyyliset polymeerit vaikeuttavat kaikki vedenpoistoa rainasta. Pintakemialliset retentioaineet helpottavat vedenpoistoa keräämällä hienoainesta flokkeihin ja suurentamalla vapaata vedenpoistoalaa. Kuitenkin liian paljon käytettynä ne saattavat huonontaa vedenpoistoa.

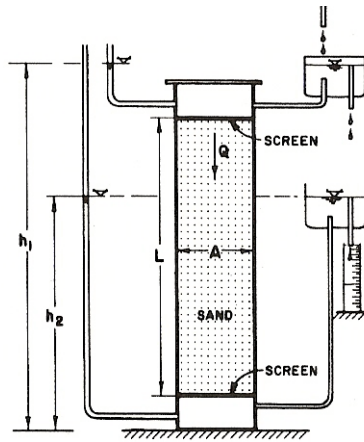


Kuva 9.1-1. Vedenpoistomekanismit rainan muodostumisessa

9.2 Darcyn laki

Kappaleessa neljä mitattiin viskoottisen ja inertiaalisen termin osuutta eri virtausnopeuksilla. Huomattiin, että virtausnopeuden noustessa inertiaalisen termin osuus kasvoi. Ilmiö liittyy oleellisesti käsiteltyyn vedenpoiston teoriaan huokoisessa materiaalissa, ja sen vuoksi vaatii tarkempaa tarkastelua. Teoriaa käydään läpi Jacob Bearin kirja *Dynamics of Fluids in Porous Media* mukaan [31].

Henry Darcy (1856) tutki kuvan 9.2-1 mukaisella laitteella veden virtausta huokoisen aineen läpi.



Kuva 9.2-1. Darcyn koelaite

Darcy huomasi, että tilavuusvirta aikayksikössä Q oli verrannollinen poikkipinta-alaan A , korkeuseroon $(h_1 - h_2)$ ja huokoisen ainekerroksen korkeuteen L . Yhdistämällä nämä tulokset, saatiin Darcyn laki muotoon

$$Q = KA \frac{(h_1 - h_2)}{L}, \quad (9-1)$$

Missä K on ainekohtainen kerroin. Kuvasta 9.2-1 on helppo huomata, että h on pietsometrinen nesteen painekorkeus ja kuvaa paineen ja potentiaalienergian summaa pituusyksikköä kohden. Tämä voidaan tulkita hydraulisena gradienttina ja merkitään

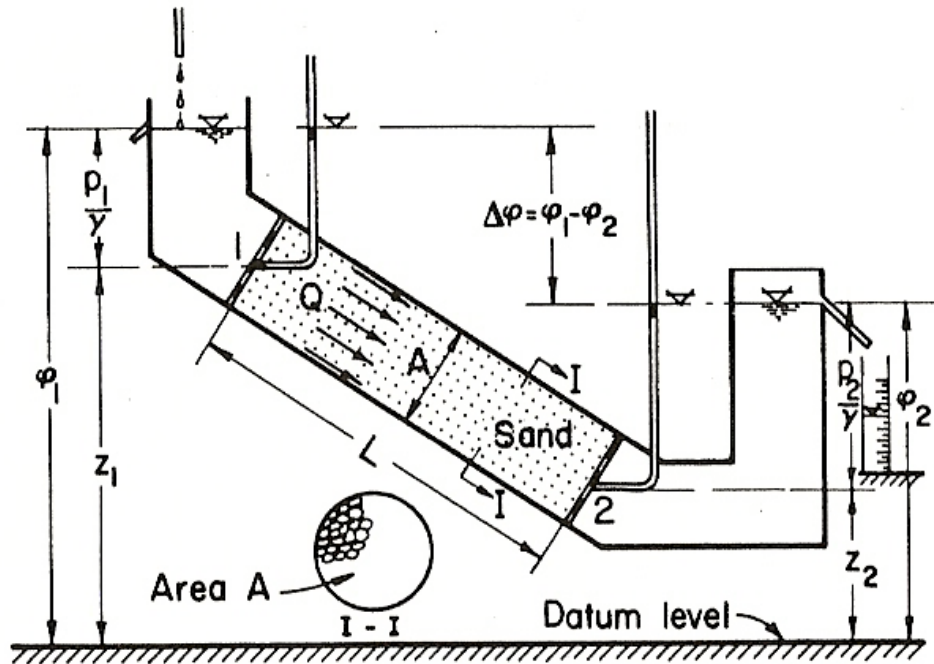
$$J = \frac{(h_1 - h_2)}{L}. \quad (9-2)$$

Nyt Darcyn laki voidaan kirjoittaa muodossa

$$q = KJ, \quad (9-3)$$

missä $q = \frac{Q}{A}$, $[q] = [\text{m/s}]$. (9-4)

Tarkastellaan kuvan 9.2-2 mukaista koejärjestelyä.



Kuva 9.2-2. Virtaus kaltevan huokoisin kerroksen läpi

Tällöin Darcyn laki ilmaistaan muodossa

$$Q = KA \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{L}; \quad (9-5)$$

$$q = K \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{L} \right) = KJ, \quad (9-6)$$

$$\text{jossa } \varphi_i = z + \frac{p_i}{\gamma}. \quad (9-7)$$

Termi $\gamma = \rho g$, eli huokoisin massan tiheys kertaa maan vetovoiman aiheuttama kiihtyvyyden. Edelliset on ilmaistu yhdessä suunnassa, mutta Darcyn laki voidaan yleistää kolmiulotteeseen muotoon merkitsemällä

$$\vec{q} = K\vec{J} = -K\nabla\varphi, \quad (9-8)$$

jossa \mathbf{q} on kolmiulotteinen vektori, ja \mathbf{J} on hydraulinen gradientti. Karteesisessa koordinaatistossa

$$J_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \quad J_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}, \quad J_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}. \quad (9-9)$$

Nyt Darcyn laki voidaan kirjoittaa yleisessä muodossa

$$\vec{q} = -\nabla(K\varphi), \quad (9-10)$$

Jossa ainekohtainen kerroin K on $K(x,y,z)$. Tällöin on otettu huomioon aineen erilaiset ominaisuudet eri suunnissa (anisotrooppinen aine).

Koska usein ainekohtaisesta kertoimesta K käytetään myös nimitystä permeabiliteetti-kerroin, on paras käydä läpi eri tapaukset. Darcy kutsui kerrointa K nimellä ainekohtainen kerroin tai hydraulinen ominaisjohtavuus. Nutting (1930) määritteli

$$K = \frac{k\gamma}{\mu} = \frac{k g}{\nu}, \quad (9-11)$$

missä kerrointa k [m^2] kutsutaan ominaispermeabiliteetiksi huokoisessa materiaalissa.

Darcyn laki voidaan nyt kirjoittaa muodossa

$$q_i = -K \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} = -\left(\frac{k\rho g}{\mu}\right) \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} = -\left(\frac{k\rho g}{\mu}\right) \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{p}{\rho g} + z\right), \quad (9-12)$$

missä $i=1,2,3$. Jos tiheys ρ on vakio,

$$q_i = -\left(\frac{k}{\mu}\right) \frac{\partial}{\partial x_i} (p + \rho g z). \quad (9-13)$$

Määrittelemällä kokonaispaine $P = p + \rho g z$, saadaan tämä Darcyn lain versio muodossa

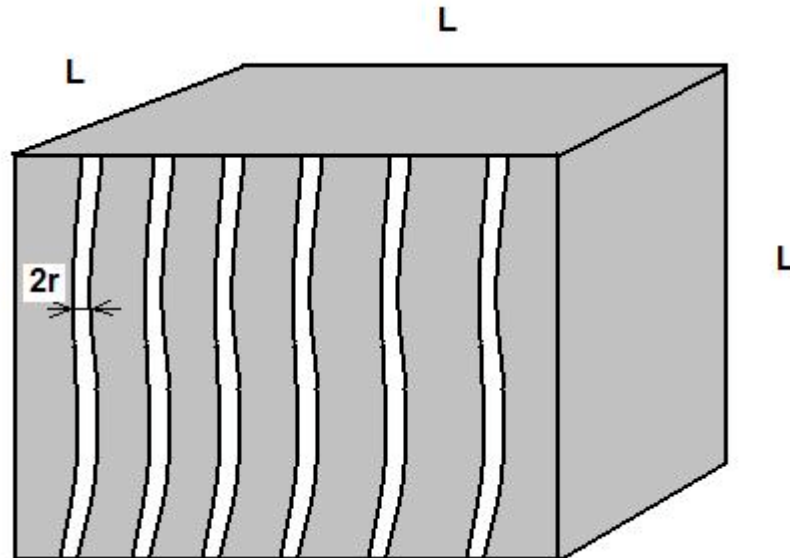
$$q_i = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x_i}. \quad (9-14)$$

Toisin sanoen

$$\vec{q}_i = -\frac{k}{\mu} \nabla P. \quad (9-15)$$

9.3 Kozenyn-Carmanin yhtälö

Kozenyn-Carmanin kaavaan liittyvä kerroin k (permeabiliteetti) kuvaa ehkä parhaiten virtausta huokoisessa aineessa (kuva 9.3-1). Käytännön kokeet tehtiin määrämittaisilla kapillaariputkilla, joiden muoto vaihteli. Kuvassa 9.3 - 1 on L-mittainen huokoinen kuutio, jonka poikkileikkauksessa näkyy kapillaariputkien muodostuma huokoinen tila. Putkien halkaisija on $2r$.



Kuva 9.3-1. Virtaus huokoisessa kerroksessa

Tarkastellaan kuvassa pientä kuutiomaista osaa, jonka särmän pituus on L ja joka käsittää yhden kapillaariputken. Kuution tilavuus on L^3 ja kiinteän aineen tilavuus

$$V_{SOLID} = L^3 - \pi \cdot r^2 L. \quad (9-16)$$

Huokoisen aineen pinta-ala on

$$A_{POROUS} = 2\pi \cdot r \cdot L \quad (9-17)$$

ja huokoisen osan tilavuus on

$$V_{POROUS} = \pi \cdot r^2 L. \quad (9-18)$$

Huokoisuus ε saadaan seuraavalla keinolla mukaan, kun tiedetään

$$\varepsilon = \frac{V_{POROUS}}{V}. \quad (9-19)$$

Huokoisen eli nyt kapillaariputken halkaisija on

$$d_{POROUS} = \frac{4 \cdot V_{POROUS}}{A_{POROUS}} = 2r. \quad (9-20)$$

Nyt voidaan laskea huokostilavuuden ominaispinta-alaksi S_0 sen pinta-ala jaettuna kiintoainetilavuudella:

$$S_0 = \frac{A_{POROUS}}{V_{SOLID}} = \frac{2}{r} \cdot \frac{V_{POROUS}}{(V - V_{POROUS})} = \frac{2}{r} \cdot \frac{\frac{V_{POROUS}}{V}}{1 - \frac{V_{POROUS}}{V}} = \frac{2}{r} \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} = \frac{4}{d_{POROUS}} \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}. \quad (9-21)$$

Tästä seuraa, että

$$d_{POROUS} = \frac{4}{S_0} \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}. \quad (9-22)$$

Suotautumisnopeus huokoisessa kerroksessa on

$$\vec{u}_D = -\frac{k}{\mu} \nabla P, \quad (9-23)$$

mistä seuraa, että virtausnopeus huokosissa on

$$\vec{u}_P = \frac{1}{\varepsilon} \vec{u}_D. \quad (9-24)$$

Hagen-Poiseuillen [44] yhtälön mukaan virtausnopeus huokoisessa kapillaariputkessa on

$$\vec{u}_P = -\frac{d_{POROUS}^2}{16 \cdot k_0 \cdot \mu} \nabla p = -\frac{k}{\varepsilon \cdot \mu} \nabla p, \quad (9-25)$$

missä k_0 on kapillaariputken poikkileikkauksen muodosta riippuva numeerinen tekijä. Sylinterimäisille kappaleille k_0 on kaksi ja muille $2 \leq k_0 \leq 2,5$. Saamme siten permeabiliteetille lausekkeen

$$k = \frac{\varepsilon \cdot d_{POROUS}^2}{16 \cdot k_0}. \quad (9-26)$$

Sijoitetaan edelliseen d_{POROUS} jolloin

$$k = \frac{\varepsilon}{16 \cdot k_0} \cdot \frac{16}{S_0^2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{(1 - \varepsilon)^2}. \quad (9-27)$$

Sievennetään ja saadaan Kozeneyn-Carmanin yhtälö

$$k = \frac{1}{k_0 \cdot S_0^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}, \quad (9-28)$$

Käytettäessä nimitystä permeabiliteetti kuvaa se nesteen tai kaasun läpäisevyyden helppoutta. Se on tarkasteltavan huokoisen materiaalin materiaalikohtainen vakio. Permeabiliteetti joudutaan määrittämään joka kerta erikseen ainekohtaisesti. Permeabiliteetin määrittämiseksi on lukuisia kokeellisia ja numeerisia simulointimenetelmiä. Kokeellisesti permeabiliteetti voidaan määrittää suoralla mittauksella $V(\Delta p)$, elohopeaporosimetrillä, sähkönjohtavuudella ja ydinmagneettisella resonanssilla.

Kuitumaisille materiaaleille on kehitetty omia malleja, joissa virtaus tapahtuu kuitujen muodostavan säännöllisen lankaverkkorakenteen läpi. Happelin [33] mukaan voidaan permeabiliteetti kirjoittaa muotoon

$$k = \frac{a^2}{4\rho} \left(-\ln \rho + \frac{\rho^2 - 1}{\rho^2 + 1} \right), \quad (9-29)$$

missä $\rho = 1 - \phi$ ja a on kuidun keskimääräinen säde.

Toinen muoto perustuu simulointimalleihin. Se on

$$k = \frac{5,55 \cdot a^2}{e^{10,1(1-\phi)} - 1}, \quad (9-30)$$

ja tunnetaan Kopsen funktiona [34].

Usein käytetään myös permeabiliteetin käänteislukua, suotautumisvastusta.

Käytännössä nestevirtaus huokoisen aineen läpi ei ole suoraviivaista virtausta pintojen läpi. Tämän vuoksi virtaviivojen monimutkaisuus otetaan huomioon materiaalien tortuositeettikertoimella τ . Tortuositeetti voidaan määrittää kullekin virtaviivalle esim. sen pituuden ja virtauksen suuntaisen matkan osamääränä [35],

$$\tau = \frac{L_T}{L}. \quad (9-31)$$

Tällöin Kozeneyn kerroin eli permeabiliteetti saa muodon

$$k = \frac{1}{k_o \cdot \tau^2 \cdot S_o^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2}. \quad (9-32)$$

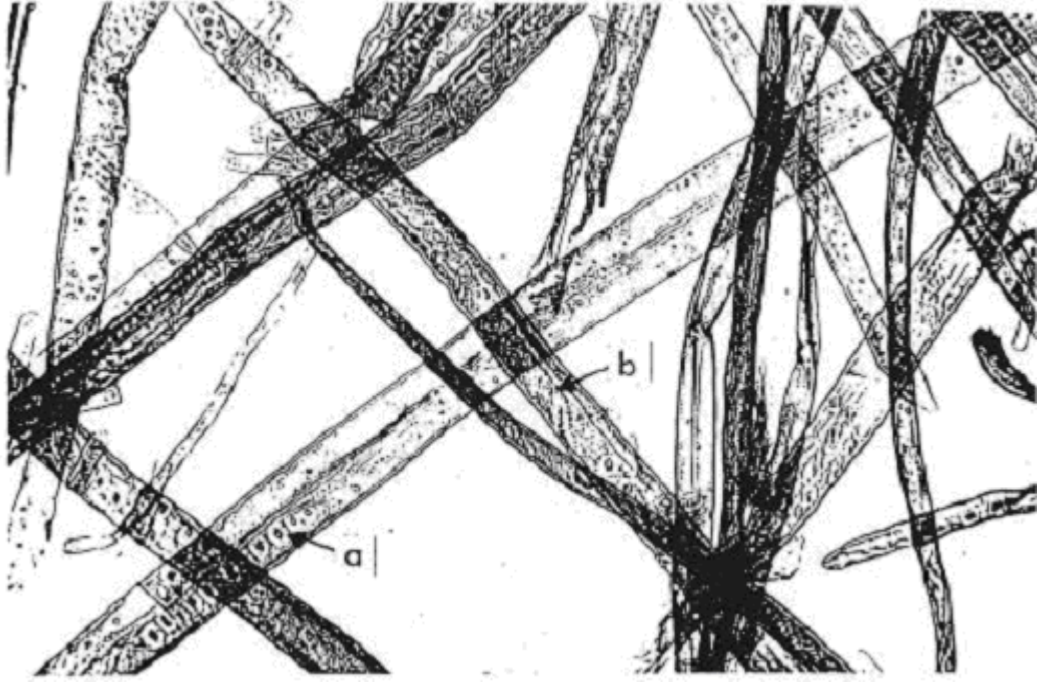
9.4 Kuidut ja hienoaines

Kuidut ovat lähinnä muodoltaan käyriä litistyneitä lankoja. Taulukossa 9.3-1 on kuitujen yleisiä mittoja [36]. Lisäksi esitetään kuvassa 9.3-1 havupuun kuituja 150-kertaiseksi suurennettuna. Kuvassa näkyvät kuidun (a) rengas- ja (b) elliptiset huokokset [37].

Taulukko 9.3-1. Havu- ja lehtipuun kuitujen pituus- ja paksuusmitat

	Fiber length, l_f , mm	Fiber width, w_f , μm	Length-to-width ratio, l_f/w_f	Volume fraction of fibers in wood, %
<i>Hardwoods</i>				
Acacia	0.8	14	60	
Black alder	1.2	28	41	58
Birch	1.3	25	52	65
Eucalyptus	1.1	20	53	49
European beech	1.2	21	53	37
European aspen	0.9	19	47	61
<i>Softwoods</i>				
Balsam fir	3.5	30–40	100	94
Parana pine	7.2	47	153	95
European spruce	3.5	27	130	95
Radiata pine	2.8	37	76	89
Scots pine	3.6	39	92	93
Sequoia	7.0	30–65	156	91
<i>Non-wood plants</i>				
Bagasse	1.7	20	85	
Bamboo	2.7	14	193	
Reed	1.2	12	100	
Wheat	1.5	13	115	
Rice	1.5	8.5	176	

Kuidun pituudella on suuri merkitys muodostuneen paperin lujuusominaisuuksiin. Pitemmällä kuidulla on enemmän kuitujen välisiä sidoksia ja se muodostaa kestävämmän kuituverkon. Merkitystä on myös sillä, miten massa on valmistettu, käytetäänkö kemiallista vai mekaanista massaa. Usein tehdään lopputuotteen käytöstä ja vaadituista ominaisuuksista riippuen kompromisseja.



Kuva 9.3-1. Havupuun kuituja 150- kertaaisessa suurennoksessa

Kuvasta 9.3-1 voidaan lisäksi päätellä, että Kozeneyn- Carmanin yhtälön ominaispinta-ala ja huokoisuus on määritettävä kuidulle tapauskohtaisesti. Yhtälöä pidetään Darcyn lain erikoistapauksena, jossa paineen muutokset aiheutuvat aukko-osuuden ja ominaispinta-alan muutoksista. Lisäksi otetaan huomioon virtaavan nesteen viskositeetti, mistä tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

Massasulppu sisältää vaihtelevan määrän hienoainesta. Hienoaineen fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet eroavat kuiduista merkittävästi. Kuituhienoaines määritellään fraktioiksi, jotka läpäisevät 200 tai 100 meshin viiran aukon [viite 36, s. 63]. Kuituhienoaines koostuu selluloosasta, hemiselluloosasta, ligniinistä ja uuteaineista. Mekaanisella massalla hienoaineen määrällä on merkittävä vaikutus kuiturakenteen muodostumiseen ja se on sen vuoksi otettava huomioon jo massan jauhatusta määritettäessä. Hiokemassa GW voi aikakausilehtipaperilla sisältää 50 % painostaan hienoainesta ja termomekaaninen massa TMP sanomalehdellä tyypillisesti korkeintaan 25 % hienoainesta painostaan. Hienoainepitoisuus kasvaa mekaanisilla massoilla järjestyksessä $TMP > PGW > SGW$, kun verrataan massoja samalla jauhatusteella.

Kemiallisella massalla hienoaineen määrä jää huomattavasti pienemmäksi kuin mekaanisella massalla. Kemiallisen massan sisältämä hienoaines jaetaan primaariseen ja sekundaariseen hienoainekseen. Primaarinen hienoaines koostuu jauhamattomalla massalla ydinsäde - ja epiteelitylppysoluista. Sekundaarinen jauhettu massa lisää

hienoaineen määrää jopa 15 % asti. Sekundaarinen hienoaines koostuu puukuitujen lamelleiden osista ja muusta LK - aineesta.

Hienoaineella on pienestä koosta ja määrästä johtuen suuri ominaispinta-ala. Kemiallisella massalla primaarista hienoainesta voi olla 4 - 5 g/m²:llä ja sekundaarista vastaavasti 10 - 20 g/m²:llä. Tyypillinen mekaanisen massan hienoaineksen määrä on 7 - 8 g/m². Kuitujen vastaava arvo on 1 g/m² [viite 36 s 64].

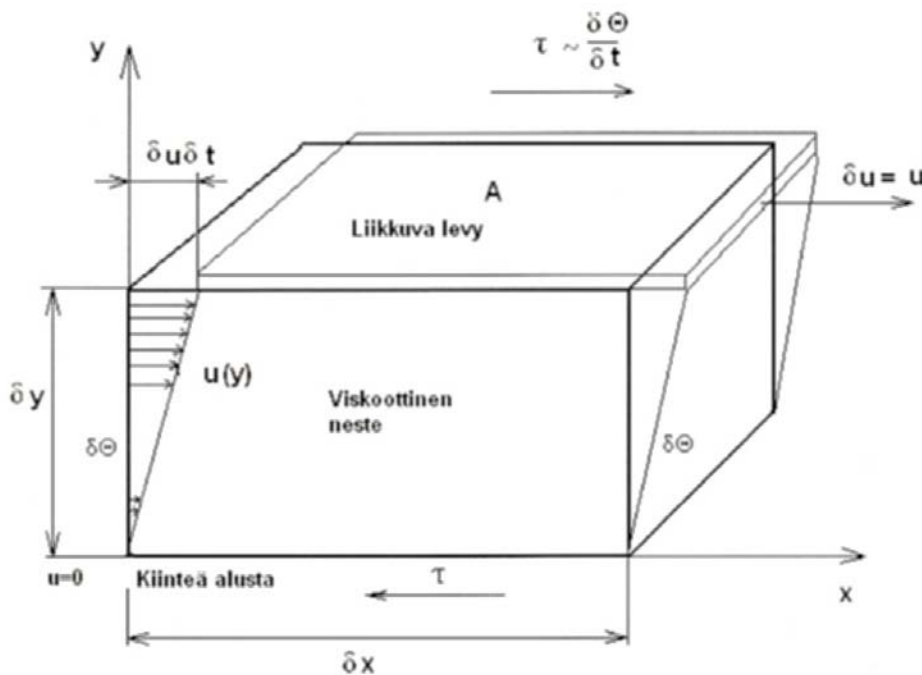
9.5 Viskositeetti

Perusero kiinteän ja virtaavan aineen välillä on, että kiinteässä aineessa voi staattisessa tilassa olla leikkausjännityksiä. Virtaavassa aineessa voi leikkausjännityksiä esiintyä vain, jos aine on liikkeessä siten, että sen virtauksensuuntaiset kerrokset liikkuvat eri nopeudella.

Viskositeetti määritellään seuraavasti [38]. Vedetään levyä L ohuen nestekerroksen päällä voimalla F. Levyn nopeutta kiinteän alustan suhteen merkitään u:lla. Nestekerroksen paksuus merkitään δ:llä (kuva 9.4-1). Leikkausjännitys τ on osamäärä

$$\tau = \frac{F}{A}, \quad (9-33)$$

missä A on levyn pinta-ala.



Kuva 9.4-1. Viskoottinen neste ja leikkausjännitys

Ajassa δt , levyjen välissä oleva suorakulmainen nestesärmiö deformoituu, jolloin pystysärmät muodostavat kulman $\delta\Theta$ y-akselin kanssa.

Rajalla $\delta t \rightarrow 0$ ($\delta\Theta \rightarrow 0$) saamme

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{du}{dy}, \quad (9-34)$$

jossa $\frac{du}{dy}$ on leikkausnopeus. Nesteen dynaaminen viskositeetti μ leikkausjännityksen

ja leikkausnopeuden välinen suhde,

$$\tau = \mu \frac{\partial\theta}{\partial t} = \mu \frac{du}{dy}. \quad (9-35)$$

Viskositeetti johtuu nesteosasten välisestä koheesiosta sekä myös eri nopeuden omaavien osasten välisestä liikemäärän vaihdosta. Nesteet luokitellaan usein niiden viskositeetin käyttäytyminen mukaan, siten että

1. newtonisillä nesteillä dynaaminen viskositeetti μ on vakio
2. ei-newtonisillä nesteillä dynaaminen viskositeetti riippuu leikkausnopeudesta ja joskus ajasta, jonka tietty leikkausnopeus nesteessä vaikuttaa.

Kumpaan luokkaan sitten massasulppu kuuluu, riippuu sulpun sakeudesta. Perälaatikkosakeudessa vastaa sulpun viskositeetti newtonista nestettä. Muodostusosalla tapahtuva vedenpoisto on monifaasivirtausta ja sulppu luokitellaan usein newtoniseksi nesteeksi, jonka viskositeetti vastaa veden viskositeettia [39].

9.6 Turbulentti virtaus

Turbulentille virtaukselle on tyypillistä, että nesteosaset, jotka kulkevat päävirtauksen suunnassa, puikkelehtivat pienessä piirissä epämääräisesti. Ilmiö on tilastollinen, koska jos tarkastellaan mitä tahansa aluetta tietyllä ajan hetkellä, ilmiö ei toistu samanlaisena myöhemmin. Tämän vuoksi analyyttistä ratkaisua on vaikea löytää ja numeerisia ratkaisuja on haettava mallinnuksen avulla. Yksi tällainen mallilaki on Buckinhamin teoreema, jota myös Pii-teoreemaksi kutsutaan.

9.6.1 Kitkallisen virtauksen π -malli

Tarkastellaan nesteessä liikkuvaa kappaletta, johon vaikuttaa vastus. Oletetaan että kitkavoiman F suuruuteen vaikuttaa nesteen tiheys ρ , kappaleen pituus d , kappaleen nopeus v ja nesteen viskositeetti μ . Oletetaan, että kitkavoima on viiden muuttujan funktio,

$$F = f(\rho, d, v, \mu). \quad (9-36)$$

Perusdimensioita ovat massa (M), pituus (L) ja aika (T). π -teoreeman mukaan voidaan muodostaa viisi miinus kolme dimensiotonta muuttujaa eli π -lukua. Tutkitaan ensin μ :n vaikutusta kitkavoimaan F :

$$\pi_1 = \frac{F}{\rho^{\alpha_1} \cdot v^{\alpha_2} \cdot d^{\alpha_3}}, \quad (9-37)$$

missä eksponentit α_1, α_2 ja α_3 määrittävät yhtälöt dimenssiottomiksi, ja

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho^{\beta_1} \cdot v^{\beta_2} \cdot d^{\beta_3}}, \quad (9-38)$$

missä eksponentit β_1, β_2 ja β_3 määrittävät yhtälöt dimenssiottomiksi.

Korvataan suureet dimensioillaan, jolloin π_1 :stä saadaan

$$\left[\frac{M \cdot L}{T^2} \right] = \left[\frac{M}{L^3} \right]^{\alpha_1} \cdot \left[\frac{L}{T} \right]^{\alpha_2} \cdot [L]^{\alpha_3}. \quad (9-39)$$

Koska kumpikin puoli on perusdimensioihin nähden samanasteinen, niin

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 1 \\ -3\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 &= 1 \\ \alpha_2 &= 2 \end{aligned} \quad (9-40)$$

Ratkaisemalla tämän yhtälöryhmän saamme $\alpha_1=1$, $\alpha_2=2$ ja $\alpha_3=2$, kertoimet β_1 , β_2 ja β_3 voidaan ratkaista samoin. Sijoitetaan kertoimet π_1 :n ja π_2 :n kaavoihin, jolloin

$$\pi_1 = \frac{F}{\rho \cdot v^2 \cdot d^2} \quad (9-41)$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho \cdot v \cdot d} \quad (9-42)$$

Buckinhamin teoreeman mukaan voidaan kirjoittaa

$$\pi_1 = f(\pi_2), \quad (9-43)$$

eli

$$\frac{F}{\rho \cdot v^2 \cdot d^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho \cdot v \cdot d}\right). \quad (9-44)$$

Huomataan, että dimensioton kitkavoima on pelkästään dimensiottoman suhteen

$$\frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (9-45)$$

funktio.

Keksijänsä Osborne Reynoldsin mukaan tätä dimensiotonta lukua sanotaan Reynoldsin luvuksi (Re). Reynoldsin luku voidaan myös kirjoittaa muodossa

$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} = \frac{v \cdot d}{\nu}. \quad (9-46)$$

On ilmeistä, että Re kuvaa viskoottisten ja inertiaalisten voimien suhdetta [40].

Kuituverkoissa on otettava huomioon tosiasia, ettei Reynoldsin lukua voida määrittää samoin kuin putkistovirtauksella, jossa kokeellisesti määritetään virtauksen luonne riippuen putkien materiaalisista ominaisuuksista riittävän pitkän virtausmatkan aikana. Kirjallisuudessa kuitumaiselle huokoiselle aineelle pituus d ilmaistaan muodossa d_{10} , mikä tarkoittaa, että kuitujen pituus kyseisellä arvolla d ylittyy 10 %:ssa materiaalin painosta. Collin (1961) suosittaa d :lle lauseketta $(k/\varepsilon)^{1/2}$, missä k on permeabiliteetti ja ε on huokoisuus. Käytännössä on todettu, että Darcyn laki on voimassa sellaisiin keskimääräiseen kuidun piteuteen perustuviin Reynoldsin luvun arvoihin asti, jotka ovat välillä 1 - 10.

9.6.2 Virtaus suurilla Reynoldsin luvuilla

Kun Re on pieni, kitkavoimat ovat hallitsevia ja virtaus on laminaarista. Kun Re on suuri, inertiaivoimat ovat hallitsevia ja virtaus on turbulენტista. Darcyn laki ei ole enää voimassa kun Reynoldsin luku on suurempi kuin 10 [41].

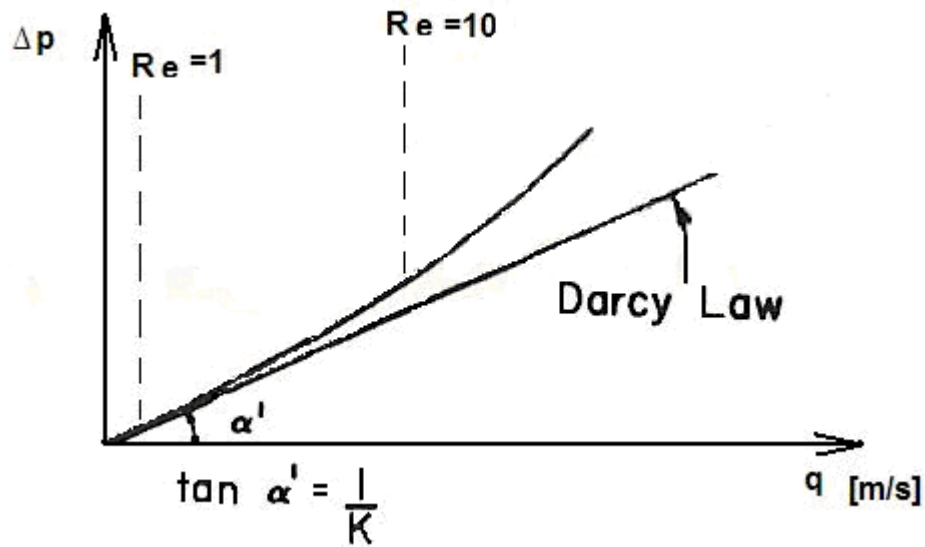
Forchheimer oli ensimmäinen joka huomioi paine-ero epälineaarisuuden suurilla virtausnopeuksilla Reynoldsin luvuilla. Kuvasta 9.6.2-1 nähdään inertiaivoiman vaikutus paine-eroon virtausnopeuden funktiona. Hän yleisti Darcyn lain muotoon

$$\frac{\Delta P}{L} = aq + bq^2, \quad (9-47)$$

missä kertoimet a ja b ovat vakioita. Kaavan (2-4) mukaan

a = viskoottinen vastuskerroin

b = massan inertiaasta riippuva vastuskerroin.



Kuva 9.6.2-1. Paine-ero virtausnopeuden funktiona

Kirjallisuudesta löytyy myös lukuisia muita yhtälöitä suurille virtausnopeuksille. Forchheimerin vuonna 1930 esittämä yhtälö on

$$J = Wq + bq^m, \quad (9-48)$$

missä $1,6 \leq m \leq 2$.

Kozeneyn ja Carmanin (1960) esittämä yhtälö on

$$J = 180\alpha \frac{(1-\varepsilon)^2 \nu}{g \cdot \varepsilon^3 \cdot d^2} q + \frac{3\beta(1-\varepsilon)}{4 \cdot g \cdot \varepsilon^3 \cdot d} q^2, \quad (9-49)$$

missä α ja β ovat muototekijöitä. Sekä Irmay (1964d) on esittänyt yhtälöä

$$J = 180 \frac{(1-\varepsilon)^2 \nu}{g \cdot \varepsilon^3 \cdot d^2} q + 0,6 \frac{1-\varepsilon}{g \cdot \varepsilon^3 \cdot d} q^2, \quad (9-50)$$

Kun Re vaihtelee välillä yhdestä kymmeneen.

Sovellamme tässä yhteydessä Reynoldsin lukuun kapillaarimallin antamaa Kozeynyn tulosta huokosen halkaisijaksi,

$$d_{POROUS} = \frac{4}{S_O} \cdot \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}. \quad (9-22)$$

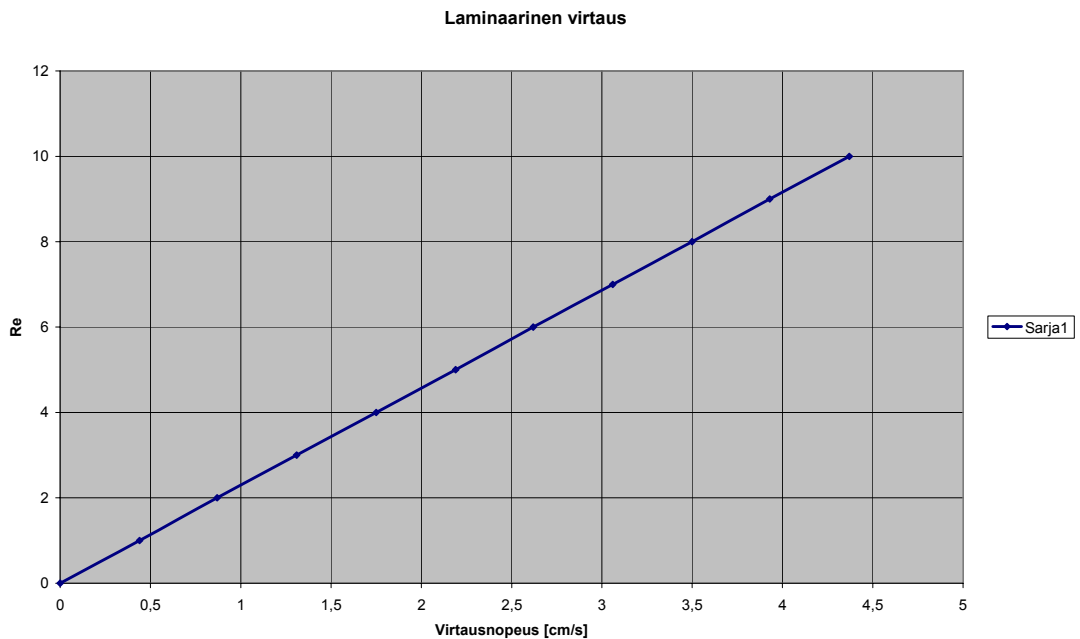
Reynoldsin luku (9-51) saa tällöin muodon

$$R_e = \frac{4\rho \cdot v \cdot \varepsilon}{S_O \mu (1-\varepsilon)}, \quad (9-51)$$

Tämä lauseke voidaan esittää myös huokosissa toteutuvalla virtausnopeudelle kun R_e tunnetaan, eli

$$v = \frac{R_e \cdot S_O \cdot \mu (1-\varepsilon)}{4\rho\varepsilon}. \quad (9-52)$$

Lauseketta voidaan myös käyttää sen arvioimiseen, millä vedenpoistonopeudella saavutetaan Reynoldsin luvun arvot, joilla lineaarinen Darcyn laki ei enää päde ja painehäviön välinen epälineaarisuus täytyy ottaa huomioon. Sen kuvaaja on esitetty kuvassa 9.6.2-2 käyttäen samoja materiaaliparametreja kuin luvussa 4.3.4 (havupuumassa).



Kuva 9.6.2-2 Reynoldsinluku virtausnopeuden funktiona tapaus 4.2.3

Kuvaajasta 4.4-2 voidaan arvioida karkeasti, että painehäviön epälineaarisuus on merkittävä noin 5 cm/s:n nopeuden yläpuolella. Taulukon 4.4-1 mukaan inertiaalinen

osuus painehäviöstä olisi jo selvästi suurempi kuin viskoottinen osuus, mutta taulukoista 4.2-2 ja 4.2-3 tiedämme toisaalta, että teoreettinen tulos yliarvio selvästi inertiaalista osuutta. Jos pidämme noin 5 cm/sekunti vedenpoistonopeutta jonkinlaisena rajana epälineaarisuudelle, niin kuvaajasta 9.6.2-2 voimme päätellä tämän vastaavan Reynoldsin lukua $Re \cong 10$. Epälineaarisuus näyttää tämän arvion perusteella muodostuvan merkittäväksi turbulentissa vedenpoistoon liittyvässä virtauksessa. Voidaan myös päätellä kuvista 7.8-2 ja 7.8-5, että perälaatikosta viirojen väliin suihkutetun sulpun virtausnopeus on alussa turbulenttista, mutta melko nopeasti (n.50 ms) virtausvastuksen kasvaessa muodostuneessa kuitumatossa se laskee ja saavutaan laminaarisen virtauksen alueelle. Virtausnopeus vaikutti hienoaineretentioon ja sen vuoksi myös viskoottiseen vastuskertoimeen. Retentoitunut hienoaines kuituverkossa kasvattaa viskoottista vastuskerrointa. Vertaamalla sanoma- ja hienopaperilla tehtyjä viskoottisen vastuksen mittaustuloksia neliöpainon funktiona, voidaan arvioida, että vastuskerroin lähtee jyrkkään kasvuun neliöpainolla 15 - 25 g/m². Sama neliöpainoalue saatiin myös tutkittaessa vastuskerrointa neliöpainon funktiona eri hienoainepitoisuuksilla. Kuvissa 7.8-2 ja 7.8-5 on näytetty virtausnopeus ajan funktiona eri alipainetasoilla. Virtausnopeus laskee dramaattisen nopeasti alle 4 cm/s kaikilla alipainetasoilla. Voidaan tehdä johtopäätös, että inertiatерmin ottaminen mukaan vedenpoistomalleihin olisi tässä yhteydessä merkityksetöntä.

9.7 Vedenpoiston mallintaminen ja kokonpuristunut raina

Ehkä tähän paikkaan voidaan ehdottaa uutta lähestymistapaa mallintaa vedenpoistoa muodostusosalla. Lähestymistapaa on käytetty lääketieteellisen biofysiikan luennoilla kuvaamaan verenkiertoa [42]. Määritellään fluidikapasitori ja fluidi-induktanssi.

Verenkierto ei ole tasaisista paineen aikaansaamaa, vaan sykkivää, nykyksenomaisesti etenevää virtausta. Samoin muodostusosalla sulppuun aiheutetaan suotautumisen edetessä sekä yli- että alipainepulsseja. Keraamisilla listoilla halutaan saada aikaan kuitususpensioon turbulenssia, joka estää haitallisten flokkien (kuitu- ja hienoainekasautumien) syntymisen. Kondensaattori toimii komponenttina, joka varastoi ja vuoroin purkaa fluidia. Ideaalisen fluidikapasitorin varaus, so. fluidin tilavuus, on suoraan verrannollinen fluidia syöttävään paineeseen,

$$C_F = \frac{\Delta V(t)}{\Delta p(t)} \quad [C_F] = \frac{m^5}{N} = \frac{m^5 \cdot s^2}{kg \cdot m} = \frac{m^4 \cdot s^2}{kg} . \quad (9-53)$$

Vastaavasti fluidisysteemissä virtaava massa nimetään fluidi-induktanssiksi,

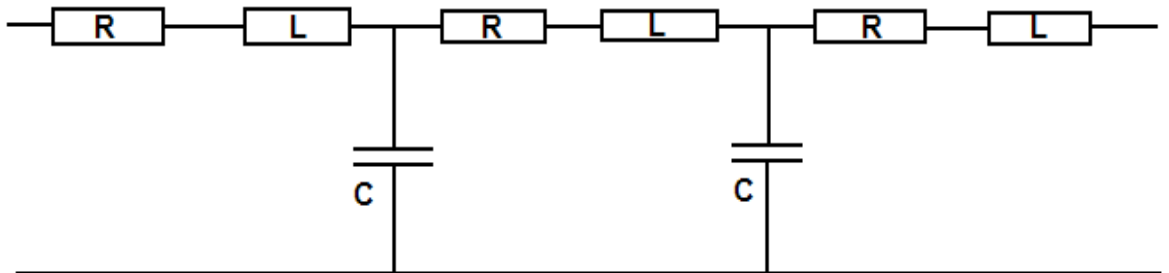
$$L_F = \frac{\Delta p_L(t)}{\frac{dI_L(t)}{dt}} \quad [L_F] = \frac{N \cdot s^2}{m^5} = \frac{N \cdot s^2}{m^5} = H_F = \frac{kg}{m^4}. \quad (9-54)$$

Fluidi-induktanssi saadaan lausekkeesta

$$L_F = \rho \frac{l}{A}. \quad (9-55)$$

Verisuonet muodostavat viskoelastisen elementin, joka sekä vastustaa virtausta, että varastoi energiaa elastisuuteensa (inertian vuoksi). Samoin kuituverkko ja viirakangas muodostavat näennäisesti vastaavan elementin. Alkuvedenpoiston aikana fluidi-induktanssi kuvaa nesteen inertiaa, sen halua jatkaa liikettään muuttumattomana ja fluidikapasitanssi taas kuitujen elastisuutta, kykyä varastoida ja purkaa nestettä. Niin sanotun märkärajan jälkeen ei ole käytännössä jäljellä kuin vastus, joka kuvaa massakakun kykyä pidättää nestettä.

Tämä voidaan mallintaa RLC-tikapuuksi, jossa R tarkoittaa normaalivastusta.



Kuva 9.7-1. RLC-tikapuumalli

RLC-mallin ratkaisu ja käsittely vaativat lisäpohdintaa, mitä ei tässä työssä käsitellä. Tämän lisäksi virtausnopeudet rainanmuodostuksessa vaatisivat lisäselvittämistä, samoin kuin dimensiottomien Reynoldsin lukujen käyttö.

Lähdeluettelo

- [1] V.J. Wildfong, J.M. Genco, J.A. J.A. Shands, D.W. Bousfield, Filtration Mechanics of Sheet Forming. Part I: Aparatus for Determination of Constant-Pressurew Filtration Resistance. J.Pulp Paper Sci. 26 (7) (2000): 250-254
- [2] V.J. Wildfong, J.M. Genco, J.A. J.A. Shands, D.W. Bousfield, Filtration Mechanics of Sheet Forming. Part II: Influence of Fine Material and Compression. J.Pulp Paper Sci. 26 (8) (2000): 280-283
- [3] Zhao, R.H., and Kerekes, R.J., Pressure Distribution Between Forming Fabrics in Blade Gap Formers Thin Blades, J. Pulp Paper Science 21(3) (1995) J97-J103
- [4] Green, S.I., Kerekes, R.I., Numerical Analysis of Pressure Induced By Blades in Gap Formers, Tappi (1996), Engineering Conference Notes
- [5] Zahhrai, S., and Bark, F.H., On the Fluid Mechanics of Twin Wire Blade Forming in Papermachines, Nordic Pulp Paper (1995) Res. J. 4:245
- [6] Turnbull, P.F., Scultz, W.W., Perkins, N.C., Beuther, P.D., One Dimensional Dynamic Model of A Paper Forming Process, Tappi (1996), Engineering Conference
- [7] Ingmanson, W.L., An Investigation of the Mechanism of Water Removal from Pulp Slurries, Tappi 35(10):439-448 (1952)
- [8] Ingmanson, W.L., and Whitney, W.P., The Filtration Resistance of Pulp Slurries, Tappi 37(11):523-534 (1954)
- [9] Scheidegger, A.E., *The Physics of Flow Through Porous Media*, Oxford Press, London, 1957
- [10] Forcheimer, P.Z., Ver. Deutsch Ing. 45, 1782 (1901)
- [11] Irmay, S., Trans. Amer. Geophysics., 39, 702 (1958)

- [12] Geankoplis, C.J., *Transport Processes and Unit Operations*, Allyn and Bacon, 1983
- [13] Mantar, E., Co, A., Genco, J.M., Drainage Characteristics of Pulp Slurries Under Dynamic Conditions, *J. Pulp Paper Science* 21(2):J44-J50 (1995)
- [14] Ingmanson, W.L., Andrews, B.D., and Johnson, R.C., Internal Pressure Distributions in Compressible Mats under Fluid Stress, *Tappi* 42(10):840-849 (1959)
- [15] Ingmanson, W.L., Han, S.T., Wilder, H.D., and Meyer, Resistance of Wire Screens to Flow of Water, *Tappi* 44(1):47-54 (1961)
- [16] Ingmanson, W.L., High Velocity Water Flow Through Fiber Mats, *Tappi* 46(3):150-155 (1963)
- [17] Wahlstrom, B., and O'Blenes, G., The Drainage of Pulps at Papermaking Rates and Consistencies *Pulp Paper Mag. Can.* 63(8):T405-T417 (1962)
- [18] Andrews, B.D. and White, L.R., A Constant Rate Rapid Drainage Tester, *Tappi* 59(6):1171-1175 (1969)
- [19] Britt, K.W., and Unbehend, J.E., New Methods for Monitoring Retention, *Tappi* 59(2):67-70 (1976)
- [20] Unbehend, J.E., "The Dynamic Retention/Drainage Jar", *Tappi*, 60(7):110-112 (1977)
- [21] Penniman, J.G., and Olson, C.R., Using the Britt Jar to Measure Drainage, *Paper Trade J.* 34-36 (April 15, 1979)
- [22] Abson, D., Bailey, R.M., Lenderman, C.D., Nelson, J.A., and Simons, P.B., *Tappi* 63(6):55-58 (1980)
- [23] Britt, K.W., and Unbehend, J.E., Water Removal During Paper Formation, *Tappi* 68(4):104-108 (1985)

- [24] Pires, E.C., Springer, A.M., and Kumar,V., A New Technique for Specific Filtration Resistance Measurement, Tappi 71(7):149-154 (1988)
- [25] Karras, M., and Springer, A., The influence of Aeration and Polymer on Drainage of Pine Kraft Slurries, Tappi 71(2):155-159 (1989)
- [26] Springer, A., Penniman, J.G., and Pires, E.C., Innovative Procedure for Automatic Measurement of Specific Filtration Resistance and Electrostatic Charge, Tappi 77(8):121-127 (1994)
- [27] Gess, J.M., Tappi 1989 Retention and Drainage Short Course Notes, Tappi Press, Atlanta, p49
- [28] Ramarao, B.V. and Kumar, P., A Model for the Gravity Drainage of Papermaking Suspensions, Nordic Pulp and Paper Research Journal, vol. 11, No. 2, pp. 86-94, May 30, 1996
- [29] Wei, H. and Ramarao, B.V., "Characterization of Pulp Slurries Using a Novel Drainage Tester", TAPPI Proceedings, pp. 517-523, Engineering Conference, (Oct., 1996)
- [30] Papermaking Science and Technology, Book 4, Papermaking Chemistry, Fapet Oy 1999, 63-65
- [31] Jacob Bear, Dynamics of Fluid in Porous Media, America Elsevier Publishing Company, Inc, New York, 1972, 119- 185
- [32] Airaksinen, T. Permeabiliteetti simulointeja hila Boltzmann- menetelmällä, Jyväskylän yliopisto, fysiikan laitos (2005) s 8
- [33] Happel, J. Viscous flow relative to arrays of cylinder, AIChE J.5 (1959) p.174
- [34] A.Koponen, D. Kandhai, E. Hellén, M. Alava, A. Hoekstra, M. Kataja, K. Niskanen, K. Sloot ja J. Timonen, Permeability of three-Dimensional Random Fiber Webs, Phys. Rev.80 (1998) 716

- [35] A. Koponen, M. Kataja, J. Timonen, Tortuos Flow in Porous Media, Phys, Rev.E (1996) 406
- [36] Papermaking Science and Technology, Book 16, Paper Physics, Fapet Oy 2000, 57
- [37] Ilvessalo-Pfäffli, M.-S. Wood Chemistry (W. Jensen Ed.), 2nd edn., Polytypos, Turku, Finland, 1977, Chap. 2
- [38] Frank M. White, Fluid Mechanics, Fifth Edition, McGraw-Hill, New York, 2003, 23-29
- [39] J. Pulp of Paper Science: Vol 29 NO 12 December (2003) 398
- [40] U. Aaltosalmi, Fluid Flow in porous Media With The Lattice-Boltzmann Method, Department of Physics JYU, research report no. 3/2005, 8
- [41] Jacob Bear, Dynamics of Fluid in Porous Media, America Elsevier Publishing Company, Inc, New York, 1972, 176- 184
- [42] Lääketieteellinen biofysiikka, Oulu,
http://cc.oulu.fi/~fysiowww/pdf/lbf/lbf_lu6_2005.pdf

Liiteluettelo

- Liite 1: Teolliset toimintaparametrit, taulukko A.1 Hienopaperi
- Liite 2: Teolliset toimintaparametrit, taulukko A.2 Sanomalehti
- Liite 3: Teolliset toimintaparametrit, taulukko A.3 LWCR
- Liite 4: Hienoaineretion laskeminen

Table A.1 Fine Paper Composition and Operating Parameters

	basis wt. (gsm)			Furnish	Ash (%)	Mach Chest CSF	Head box CSF	Head box consist (%)	white water consist (%)	first pass retn. (%)
Mill A	55	Bel Baie III	3060	70% HWK 30% SWK	8					
Mill B	80	Bel Baie IV	2625	75%HWK 475 CSF 25% SWK 275 CSF	15	430		1.02	0.41	61
Mill C	80	Bel Baie IV CB	3610	75%HWK 550 CSF 25% SWK 500 CSF	18	570	460	1.23	0.51	60
Mill D	75	Hor. Bel Baie IV	2500	75%HWK 400 CSF 25% SWK 525 CSF	17	420		0.63	0.12	81
Mill E	80	Bel Baie IV CB	2000	85%HWK 450 CSF 15% SWK 310 CSF	12	350		0.77	0.18	76

Table A.2 Newsprint Composition and Operating Parameters

	basis wt. (gsm)			Furnish	Ash (%)	Mach Chest CSF	Head box CSF	Head box consist (%)	white water consist (%)	first pass retn. (%)
Mill A	49	Bel Baie III	3414	19% kraft 675 CSF 81% TMP 65 CSF	0	70		1.29	0.48	63
Mill B	49	Bel Baie II	2625	23% kraft 670 CSF 45% TMP 63 CSF 14% grndwd 39 CSF 18% deinked 270 CSF	4	94	45	1.03	0.49	52
Mill C	45	Horz Bel Baie	3200	14% kraft 615 CSF 66% TMP 86 CSF 10% grndwd 56 CSF 10% deinked 85 CSF	2	86	38	0.83	0.37	55
Mill D	42- 49	Bel Baie III	2500	3% kraft 650 CSF 85% TMP 40 CSF 12% grndwd 80 CSF	0	80	33	1.40	0.71	49

Table A.3 Lightweight Coated Rawstock Composition and Operating Parameters

	basis wt. (gsm)			Furnish	Ash (%)	Mach Chest CSF	Head box CSF	Head box consist (%)	white water consist (%)	first pass retn. (%)
Mill A	37	Bel Baie III	2950	48% SWK 52% grndwd	12					
Mill B	42	Bel Baie IV	3500		5	128		0.98	0.46	53
Mill C	40	Bel Baie IV CB	3850		7	106	27	0.81	0.31	62

Determination of Incremental Retention

Determination of newsprint retention, examples of first two increments

Increment 1: 15.4 g/m² slurry

global and increment calculations are the same for the first increment

slurry basisweight = prefiltered slurry volume * slurry consistency / drainage area

$$\text{slurry basisweight} = \frac{40\text{cm}^3\text{slurry} \cdot 0.0082 \frac{\text{g fiber}}{\text{g slurry}} \cdot \frac{1.0\text{g slurry}}{\text{cm}^3\text{slurry}}}{0.0214\text{cm}^2} = 15.4\text{g} / \text{m}^2$$

total retained fiber = slurry basisweight * retention

total retained fiber = 15.4 g/m² * 0.615 = 9.5 g/m² total fiber

fines in prefiltered slurry = slurry basis weight * fines content

fines in prefiltered slurry = 15.4 g/m² * 0.53 = 8.2 g/m² fines

long fiber in prefiltered slurry = slurry basiweight * (1-fines content)

long fiber in prefiltered slurry = 15.4 g/m² * 0.47 = 7.2 g/m² long fiber

fines retained in sheet = total retained fiber - long fiber in prefiltered slurry

fines retained in sheet = 9.5g/m² - 7.2g/m² = 2.3 g/m²

$$\text{fines retetnion} = \frac{\text{fines in prefiltered slurry} - \text{fines in filtrate}}{\text{fines in prefiltered slurry}}$$

$$\text{fines retetnion} = \frac{8.2\text{ g} / \text{m}^2 \text{ fines in prefiltered slurry} - (8.2\text{ g} / \text{m}^2 - 2.3\text{ g} / \text{m}^2 \text{ fines retained in sheet})}{8.2\text{ g} / \text{m}^2 \text{ fines in prefiltered slurry}}$$

fines retention = 26.9%

summary of increment 1:

retained basisweight 9.5 g/m²

long fiber and fines retention 61.5%

retained fine material 2.3 g/m²

fines retention 26.9%

Increment 2: 32.6 g/m² slurry

$$\text{slurry basisweight} = \frac{85\text{cm}^3\text{slurry} \cdot 0.0082 \frac{\text{g fiber}}{\text{g slurry}} \cdot \frac{1.0\text{g slurry}}{\text{cm}^3\text{slurry}}}{0.0214\text{cm}^2} = 32.6\text{g} / \text{m}^2$$

global calculations

total retained fiber = 32.6 g/m² * 0.659 = 21.5 g/m² total fiber

fines in prefiltered slurry = 32.6 g/m² * 0.53 = 17.3 g/m² fines

long fiber in prefiltered slurry = 32.6 g/m² * 0.47 = 15.3 g/m² long fiber

fines retained in sheet = 21.5 g/m² - 15.3 g/m² = 6.2 g/m²

$$\text{fines retention} = \frac{17.3\text{ g} / \text{m}^2 \text{ fines in prefiltered slurry} - (17.3\text{ g} / \text{m}^2 - 6.2\text{ g} / \text{m}^2 \text{ fines retained in sheet})}{17.3\text{ g} / \text{m}^2 \text{ fines in prefiltered slurry}}$$

fines retention = 35.6%

Increment Calculations

retained fiber I2 = retained fiber I2 - retained fiber I1

$$\text{retained fiber I2} = 21.5 - 9.5 = 12.0$$

$$\text{retained fine material I2} = \text{retained fine material G2} - \text{retained fine material G1}$$

$$\text{retained fine material I2} = 6.2 - 2.2 = 4.0$$

$$\text{increment fines retention} = \frac{\text{fines in prefiltered slurry increment} - \text{fines in filtrate for increment}}{\text{fines in prefiltered slurry increment}}$$

$$\text{fines in prefiltered slurry increment} = 17.3 \text{ fines} - 8.2 \text{ fines} = 9.1 \text{ fines}$$

$$\text{fines in filtrate increment} = 9.1 - 4.0 = 5.1$$

$$\text{increment fines retention} = \frac{9.1 \text{ g/m}^2 \text{ fines in increment slurry} - (5.1 \text{ g/m}^2 \text{ fines retained increment sheet})}{9.1 \text{ g/m}^2 \text{ fines in increment slurry}}$$

$$\text{increment fines retention} = 43.9\%$$