



Ilmanvaihdon suorakaidekanaviston mitoitusmenetelmien vertailu

Jussi Kivioja

OPINNÄYTETYÖ
Kevät 2021

Talotekniikan insinöörikoulutus
LVI-talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan insinööritutkinto
LVI-talotekniikka

KIVIOJA, JUSSI

Ilmanvaihdon suorakaidekanaviston mitoitusmenetelmien vertailu

Opinnäytetyö 64 sivua, joista liitteitä 8 sivua
Toukokuu 2021

Ilmanvaihtojärjestelmien suunnittelussa kanavistosuunnittelulla ja kanaviston virtausominaisuuksilla on suuri vaikutus ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutukseen. Mikäli ilmanvaihtokanavisto toteutetaan suorakaidekanavistona pyöreään kanaviston sijaan, korostuu kanavageometrian suunnittelun tärkeys optimoidun virtaustehokkuuden saavuttamiseksi. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan suorakaidekanaviston painehäviön eri laskentamenetelmiä sekä kanaviston ja kanaosien geometrian vaikutusta mitoitusmenetelmien laskentatuloksiin.

Opinnäytetyössä vertailut suorakaidekanaviston painehäviön laskentamenetelmät olivat laskenta laskentakaavojen ja taulukkoarvojen avulla, laskenta alalla yleisesti käytetyn suunnitteluohjelmiston MagiCAD for AutoCAD avulla ja laskenta virtauslaskentaohjelmiston ANSYS Discovery AIM avulla. Mitoitusmenetelmävertailu tehtiin tutkimusta varten MagiCAD for AutoCAD:llä luotuun kanavistoon, jota tarkasteltiin muuttamalla kanavan poikkileikkauksen muotoa sekä kanaosien geometriaa.

Työn tuloksena huomattiin, että mitoitusmenetelmien laskentatuloksissa on eroja. Laskentakaavoja ja kirjallisuudesta löytyviä taulukkoarvoja käytettäessä on tärkeää tuntee niiden soveltuvuus tarkasteltavaan kanavistoon. Suurimpana erona suunnitteluohjelmiston ja virtauslaskentaohjelmiston välillä on virtauslaskennan yksityiskohtaisempi virtaustarkastelu, mikä huomioi lähekkäisten virtaushäiriön aiheuttajien vaikutuksen syntyviin painehäviöihin sekä virtauksen turbulentsuuteen.

Suorakaidekanaviston suunnittelussa on tärkeä tuntee käytettävän mitoitusmenetelmän laskentaperusteet sekä kanaviston geometriavalintojen vaikutus ilmanvaihtojärjestelmän virtausominaisuuksiin. Perinteisempien mitoitusmenetelmien rinnalle on syytä harkita virtauslaskentaa suunnittelun työkaluna kohteissa, joissa ilmanvaihtojärjestelmän tavoitetasot poikkeavat tavanomaisesta. Virtauslaskennan avulla pystytään tarkastelemaan virtauksessa syntyviä ongelmakohtia ja optimoimaan suorakaidekanavistogeometrian energiatehokkuus.

Asiasanat: suorakaidekanavisto, ilmanvaihto, virtauslaskenta

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services Engineering
HVAC systems

KIVIOJA, JUSSI:

Comparison of Calculation Methods for Pressure Loss in Rectangular Ducts

Bachelor's thesis 64 pages, appendices 8 pages
May 2021

The purpose of this thesis was to gather information about different calculation methods for pressure loss in rectangular ventilation ducts. Comparisons were made between calculations with formulas and charts, an HVAC design software MagiCAD for AutoCAD, and a CFD simulation software ANSYS Discovery AIM. The goal of this thesis was to examine differences between these calculation methods and the results they give with different duct geometries.

The theoretical section explores the theory of fluid dynamics in general and the calculation principles of the compared methods. The calculation method comparison was made for ventilation duct systems designed using MagiCAD for AutoCAD software. The pressure losses in duct systems were calculated with different ducts and duct fitting geometries.

The comparisons suggest that the most significant difference in calculation methods is CFD's ability to calculate pressure losses across multiple close fittings more accurately than the others. Therefore, using CFD should be considered when designing rectangular ducts with exceptionally high quality requirements for ventilation systems.

Key words: rectangular duct, ventilation, CFD

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	VIRTAUSTEORIAN PERUSTEET	9
	2.1 Paine.....	9
	2.2 Virtaushäviöt	10
	2.3 Virtaustyytit	11
	2.3.1 Turbulentti ilmavirtaus	12
	2.3.2 Laminaarinen ilmavirtaus.....	14
	2.4 Kertavastushäviö.....	15
3	VIRTAUSLASKENTA.....	17
	3.1 Kontrollitulavuusmenetelmä	18
	3.2 Turbulenssimallit	19
	3.2.1 RANS-yhtälöt.....	20
	3.3 Kanavavirtaus	20
	3.4 Laskentaverkko	23
4	MITOITUSMENETELMÄT	26
	4.1 Kaavat ja taulukot ("käsinelaskenta")	26
	4.1.1 Suoran kanavan mitoituserusteet	26
	4.1.2 Suorakaidekäyräosat.....	26
	4.1.3 Suorakaidemuuntokappaleet.....	28
	4.1.4 Lähtökaulukset	29
	4.2 MagiCAD for AutoCAD.....	31
	4.2.1 Suoran kanavan mitoituserusteet	31
	4.2.2 Suorakaidekäyräosat.....	32
	4.2.3 Suorakaidemuuntokappaleet.....	34
	4.2.4 T-haarat ja lähtökaulukset	35
	4.3 Virtauslaskenta.....	36
	4.3.1 Laskenta-asetukset	36
	4.3.2 Laskentaverkko	36
5	MITOITUSMENETELMIEN VERTAILU	38
	5.1 Vertailu kanavan poikkipinta-alan muodon suhteen	38
	5.2 Vertailu kanavaosien geometrian suhteen	38
	5.3 Tarkasteltavat kanavistot ja lähtötiedot	39
6	TULOKSET	41
	6.1 Tarkastelu 1.1	41
	6.2 Tarkastelu 1.2	43
	6.3 Tarkastelu 1.3	45

6.4 Tarkastelu 2.1	47
6.5 Haarakohtaiset tulokset.....	49
6.6 Tulosten analysointi	51
7 POHDINTA	53
LÄHTEET.....	55
LIITTEET	57
Liite 1. Tarkastelun 1.1 kanavisto	57
Liite 2: Tarkastelun 1.2 kanavisto	58
Liite 3: Tarkastelun 1.3 kanavisto	59
Liite 4: Tarkastelun 2.1 kanavisto	60
Liite 5: Tarkastelun 1.1 käsinlaskenta ja MagiCAD-painehäviö	61
Liite 6: Tarkastelun 1.2 käsinlaskenta ja MagiCAD-painehäviö	62
Liite 7: Tarkastelu: 1.3 käsinlaskenta ja MagiCAD-painehäviö	63
Liite 8: Tarkastelun 2.1 käsinlaskenta ja MagiCAD-painehäviö	64

LYHENTEET JA TERMIT

ASHRAE	The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineering
SMACNA	Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association Inc.

1 JOHDANTO

Ilmanvaihtokanaviston suunnittelua ohjaavat tiukentuneet energiatehokkuusvaatimukset, joista kanavistosuunnittelua merkittävästi ohjaavat ilmanvaihtokoneen SFP-luvulle asetetut raja-arvot. Ilmanvaihdon suunnittelua ohjaavassa lainsäädännössä ja asetuksissa esitetään vähimmäisilmamäärät suunnitellulle rakennukselle sen käyttötarkoituksen ja tilojen mukaan. SFP-lukuun vaikuttaa olennaisesti suunnitellun kanaviston geometria, joka vaikuttaa puhaltimen paineenkorotustarpeeseen.

Ilmanvaihtokanaviston suunnittelussa suositaan pyöreitä kanavistoja, koska ne ovat lähtökohtaisesti virtausominaisuuksiltaan parempia kuin suorakaide- tai ovaalikanavistot. Suorakaidekanaviston etuna on kuitenkin sen muokattavuus tilavarausten mukaisesti esimerkiksi alas lasketun katon korkeussuunnan tilan vähyden vuoksi.

Yleisesti käytettyjen pyöreiden kanavien ja kanavaosien geometria on käytännössä vakioitunut suurten tuotevalmistajien ansiosta, jolloin kanavistosuunnittelu on komponenttien virtausominaisuuksien osalta yksinkertaista. Suorakaidekanaviston suunnittelussa tulee huomioida kanavan poikkileikkauksen mittojen lisäksi kanavaosien eri toteutustavat ja geometriat, jotka riippuvat tuotevalmistajasta sekä virtausominaisuuksien tavoitetasosta.

Suorakaidekanaviston mitoitus voidaan tehdä käyttämällä suunnitteluohjelmiston, esimerkiksi MagiCAD for AutoCAD, mitoitusominaisuutta tai käsinlaskemalla käyttäen kirjallisuudesta löytyviä kaavoja, taulukoita ja mitoituskertoimia. Virtauslaskennan avulla pystytään tarkastelemaan kanaviston virtausominaisuuksia edellä mainittuja menetelmiä tarkemmin, sillä virtauslaskennassa tarkastellaan virtauksen eri parametrejä yksityiskohtaisemmalla tasolla.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan suorakaidekanaviston mitoitustapojen eroja ja niiden vaikutusta suorakaidekanaviston suunnitteluun painehäviön näkökul-

masta. Vertailukohteina on eri kirjallisuuslähteistä löytyvät laskentakaavat ja taulukkoarvot, Suomessa yleisesti alan käytössä oleva suunnitteluohjelmisto MagiCAD for AutoCAD sekä virtauslaskentaohjelmisto ANSYS Discovery Aim.

Työssä tarkastellaan kanavistovirtaukseen liittyvää teoriaa sekä edellä mainittujen mitoitustapojen laskentaperiaatteita, joiden avulla pystytään havainnollistamaan painehäviöeroja suorakaidekanaviston mitoitustyökalujen ja toteutustapojen välillä.

2 VIRTAUSTEORIAN PERUSTEET

2.1 Paine

Bernoullin yhtälön mukaisesti fluidien virtauksessa staattisen paineen, dynaamisen paineen ja korkeusaseman aiheuttaman potentiaalienergian summa on vakio (Kaava 1).

$$p_{st} + \rho gh + \frac{1}{2}\rho U^2 = \text{vakio} \quad (1)$$

Kaavassa 1 p_{st} on staattinen paine, ρ on tiheys, g on putoamiskiihtyvyys, h on korkeusasema ja U on ilman virtausnopeus. Koska korkeusaseman aiheuttama potentiaalienergia ilmanvaihtokanavassa on häviävän pieni, voidaan paineyhtälö olettaa muotoon

$$p_{st} + \frac{1}{2}\rho U^2 = \text{vakio}. \quad (2)$$

Bernoullin yhtälössä käytetyt paineet ovat absoluuttisia paineita, mutta ilmanvaihtosovelluksissa käytetään yleisesti suhteellisia paineita, eli niin sanottuja mittari-paineita (eng. *gauge pressure*). Suhteellinen paine saadaan, kun absoluuttisesta paineesta vähennetään ilmanpaine.

Bernoullin yhtälö voidaan johtaa muotoon

$$p_{st} + \frac{1}{2}\rho U^2 = p_{st} + p_{dyn} = p_{kok}, \quad (3)$$

jossa p_{dyn} on virtauksen dynaaminen paine ja p_{kok} on virtauksen kokonaispaine.

Ilmanvaihtokanavassa kokonaispaine muodostuu siis staattisesta ja dynaamisesta paineesta. Bernoullin yhtälö (Kaava 3) kuitenkin edellyttää, että virtaus on laminaarinen ja häviötön. Ilmanvaihtokanavassa ilmavirtaukseen kuitenkin syntyy häviöitä kanavan seinämän ja virtaavan ilman väliin syntyvästä kitkasta sekä

ilman sisäisestä kitkasta. Aiheutuvat häviöt muuttuvat pääasiassa lämmöksi. Virtaushäviöt sisältävä sovellettu Bernoullin yhtälö kitkalliselle virtaukselle on

$$p_{st_1} + \rho_1 g h_1 + p_{dyn_1} = p_{st_2} + \rho_2 g h_2 + p_{dyn_2} + \Delta p, \quad (4)$$

jossa Δp on ilmavirran painehäviö kahden tarkastelupisteen (1 ja 2) välillä. (Seppänen 1988, 93–95.)

Ilmanvaihtosovelluksissa staattinen paine ilmoitetaan usein mittaripaineena, jolloin ilmanvaihtokanavan staattinen paine on absoluuttisen staattisen paineen ja absoluuttisen ympäristön ilmanpaineen erotus. Staattinen paine vaikuttaa kanavassa kaikkiin suuntiin samalla voimalla. (Sandberg 2016, 98.)

Dynaaminen paine syntyy ilmavirran liikkeestä ja vaikuttaa virtaussuuntaan, jolloin tulo- ja poistoilmakanavassa dynaamisen paineen suunta on eri. Ilmanvaihtosovelluksissa dynaamisen paineen vaikutus virtaukseen on yleensä suurempaa kuin staattisen paineen. (Sandberg 2016, 99.)

2.2 Virtaushäviöt

Ilmanvaihtokanavistossa kokonaispainehäviön muodostavat kitkapainehäviö, eri kanavaosien ja -varusteiden kertavastuksien painehäviö sekä puhaltimen liitäntähäviöt (Sandberg 2016, 88). Puhaltimen liitäntähäviöitä ei tässä työssä tarkastella.

Ilmanvaihtokanavassa syntyvät ilman kokonaispainehäviöt $\Delta p_{häviöt}$ voidaan laskea kaavalla

$$\Delta p_{häviöt} = \Sigma \Delta p_{\lambda} + \Sigma \Delta p_{\zeta}, \quad (5)$$

jossa Δp_{λ} on yhden kanavaosuuden kitkapainehäviö ja Δp_{ζ} on kanavan yhden muodonmuutoksen kertavastushäviö. Avaamalla painehäviötekijät auki saadaan kaavaksi

$$\Delta p_{\text{häviöt}} = \Sigma \left(\frac{\lambda l}{d} \cdot \frac{\rho U^2}{2} \right) + \Sigma \left(\zeta \cdot \frac{\rho U^2}{2} \right), \quad (6)$$

jossa λ on dimensioton kitkavastuskerroin, l on tarkasteltavan kanavaosuuden pituus, d on kanavaosuuden sisähalkaisija, U on ilmavirtauksen keskinopeus ja ζ on dimensioton kertavastusluku. (Sandberg 2016, 88.)

Ilmanvaihtokanavistossa syntyviin virtaushäviöihin vaikuttaa kanaviston ominaisuuksien lisäksi virtaavan ilman fysikaaliset ominaisuudet. Virtaushäviöihin vaikuttavat käytetyn kanaviston dimensiot, materiaali ja komponenttivalinnat sekä ilman virtausnopeus, viskositeetti ja tiheys. (Sandberg 2016, 88.)

2.3 Virtaustyytit

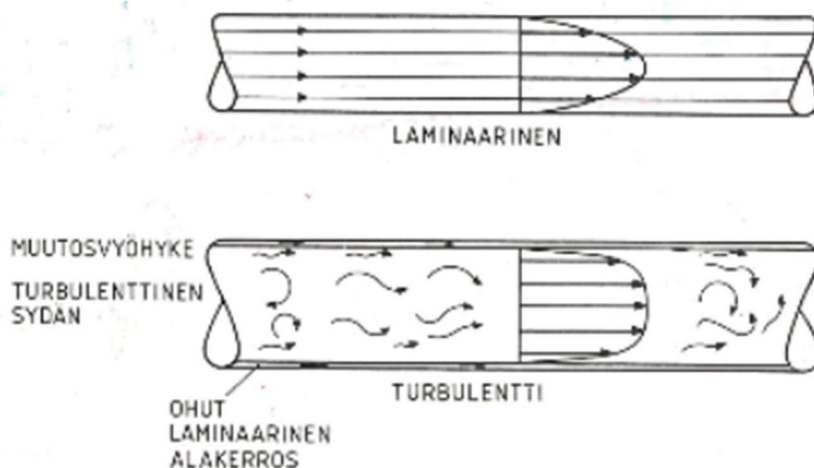
Fluidien virtaus voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan virtauksen laadun perusteella; laminaariseen, transitio-alueeseen ja turbulentiin. Virtauksen luonteen määrittämiseen kanavassa käytetään dimensiotonta Reynoldsin lukua Re , joka saadaan kaavalla

$$Re = \frac{UD_h}{\nu}, \quad (7)$$

jossa D_h on kanavan hydraulinen halkaisija ja ν on ilman kinemaattinen viskositeetti (Sandberg 2016, 89).

Kanavan sisäinen virtaus on turbulenti Reynoldsin luvun ollessa ≥ 3000 . Turbulentti virtaus on laadultaan pyörteistä ja arvaamatonta. Kanavan sisäinen virtaus on laminaarista Reynoldsin luvun ollessa ≤ 2320 . Laminaarinen virtaus kulkee kanavan pituusakselin suunnassa sekoittumattomana. Reynoldsin luvun ollessa $2320 < Re < 3000$ virtauksen laatu on siirtymävaiheessa (transitio-alue) laminaarisen ja turbulentin välillä, ja vaikeasti määritettävissä. (Seppänen 1988, 95.) Turbulenttisen virtauksen Reynoldsin luvun raja-arvot vaihtelevat kirjallisuuslähteen mukaan välillä 3000–10000.

Ilmanvaihtokanaviston virtausominaisuuksien laskennassa usein oletetaan virtauksen olevan turbulenttia vakiintuneiden virtausnopeuksien suunnittelukäytäntöiden seurauksena. Laskennassa on kuitenkin tärkeää tietää erot turbulentin ja laminaarisen virtauksen välillä sekä tietää virtausfysiikan lainalaisuudet.



KUVIO 1. Ilmavirtauksen tyypit ja nopeusprofiili (Seppänen 1988, 95)

2.3.1 Turbulentti ilmavirtaus

Ilmavirtausta kanavassa voidaan pitää täysin turbulenttina, kun Reynoldsin luku on >4000 . Turbulentissa virtauksessa kitka syntyy pääosin ilman pyönteilystä johtuvista häviöistä, mutta lisäksi ilman viskositeetti aiheuttaa kitkaa kanavan seinämän laminaarisessa rajakerroksessa kuvion 1 mukaisesti. Kitka rajapinnassa aiheuttaa ilmassa nopeuden hidastumisen kanavaseinämässä suhteessa keskellä kanavaa virtaavaan ilmaan. (Aalto University 2019, 18.) Turbulentin virtauksen rajakerroksen teoriaa käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.3.

Yhden kanavaosuuden kitkapainehäviö Δp_λ turbulentille ilmavirtaukselle voidaan laskea Darcyn yhtälön avulla seuraavasti

$$\Delta p_\lambda = \frac{\lambda l}{D_h} \cdot \frac{\rho U^2}{2}, \quad (8)$$

jossa λ on dimensioton kitkavastuskerroin, l on kanavan pituus, D_h on kanavan hydraulinen halkaisija, U on ilman virtausnopeus ja ρ on ilman tiheys. (Ai & Mak 2013, 2.) Kaavasta nähdään, että turbulentin virtauksen kitkapainehäviö on suoraan verrannollinen ilman tiheyteen ja virtausnopeuden neliöön, eli dynaamiseen paineeseen.

Kanavan hydraulista halkaisijaa D_h käytetään muodoltaan pyöreästä poikkeavien kanavien kitkakertoimen määrittämiseen. Suorakaidekanavalle hydraulinen halkaisija saadaan kaavalla

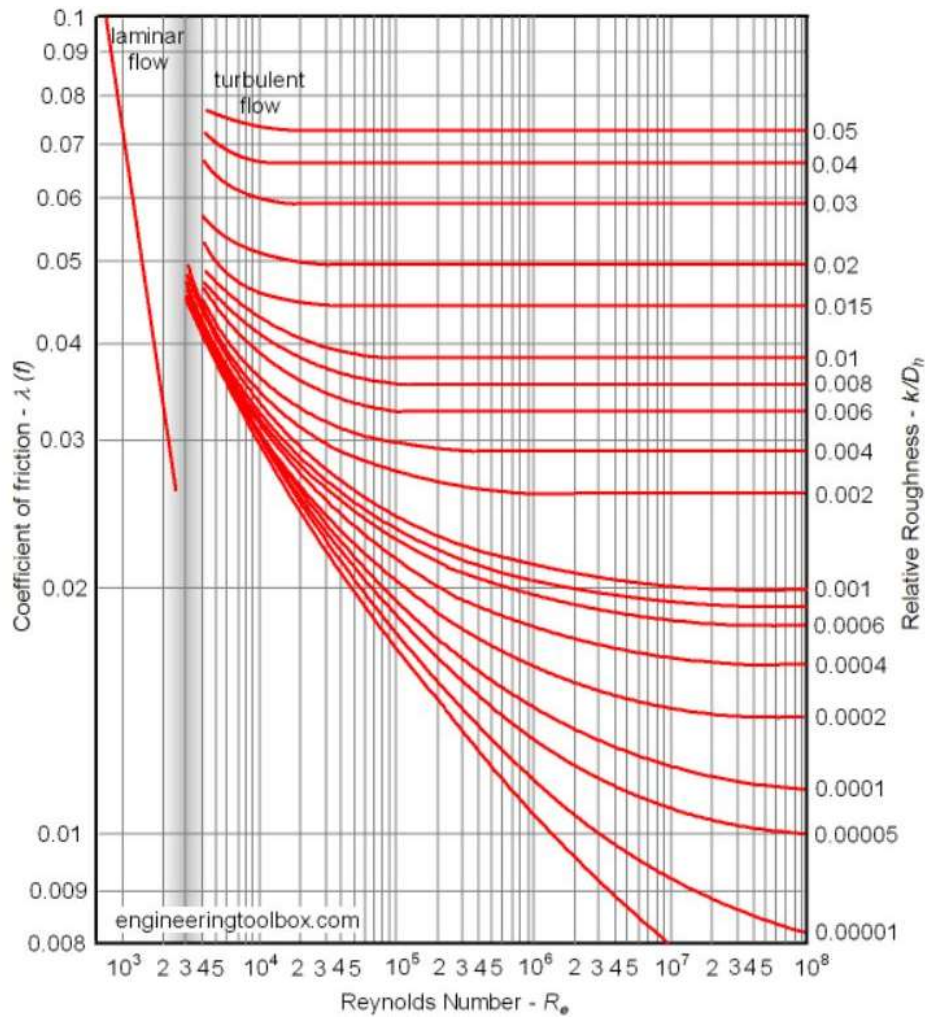
$$D_h = \frac{4 ab}{2 (a + b)} = \frac{2 ab}{a + b}, \quad (9)$$

jossa a ja b ovat kanavan sivujen mitat (Sandberg 2016, 89). Hydraulisella halkaisijalla tarkoitetaan sen pyöreän kanavan halkaisijaa, jonka painehäviö samalla ilman virtausnopeudella vastaa kyseisen suorakaidekanavan painehäviötä (Lindab n.d, 3).

Kitkavastuskertoimen λ määrittämiseksi turbulentille virtaukselle tulee tuntea Reynoldsin luvun (kaava 7) lisäksi käytettävän kanavan sisäpinnan karheus k , joka määräytyy käytettävän kanavamateriaalin perusteella. Kun tunnetaan nämä tekijät, saadaan kitkakerroin joko Moodyn diagrammista (Kuvio 2) tai laskennallisesti kaavalla

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,7D_h} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right). \quad (10)$$

(Ai & Mak 2013, 2)



KUVIO 2. Moodyn diagrammi (The Engineering Toolbox, 2003)

Moodyn diagrammissa käytettävä suhteellinen karheus saadaan jakamalla kanavan sisäpinnan karheus k kanavan sisähalkaisijalla d tai D_h .

2.3.2 Laminaarinen ilmavirtaus

Laminaarisessa virtauksessa kitkapainehäviöt aiheutuvat ilman viskositeetin synnyttämästä, virtaavan ilman ja kanavan seinämän väliin syntyvästä leikkausvoimasta (Aalto University 2019, 18). Täysin laminaarisen virtauksen kitkakerroin saadaan Darcy-Weisbachin yhtälöstä johdetulla kaavalla

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (11)$$

(Sandberg 2016, 90)

Kun tämä kitkakertoimen kaava sijoitetaan kitkapainehäviön lausekkeeseen (kaava 8), saadaan laminaarisen virtauksen kitkapainehäviön kaava muotoon

$$\Delta p_{\lambda} = \frac{32l\rho}{D_h^2} \cdot U. \quad (12)$$

Kaavasta nähdään, että laminaarisen virtauksen kitkapainehäviö on suoraan verrannollinen ilman virtausnopeuteen (Seppänen 1988, 96).

2.4 Kertavastushäviö

Kertavastuksien painehäviöitä syntyy ilmanvaihtokanavistossa, kun ilmavirran suuntaa tai virtauskanavan poikkipinta-alaa muutetaan. Ilmanvaihtokanaviston kertavastuksia ovat erilaiset kanavakomponentit, käyrät, muuntoyhteet sekä muut kanavistovarusteet. Kertavastuksien painehäviö Δp_{ζ} saadaan laskettua turbulentialle virtaukselle kaavalla

$$\Delta p_{\zeta} = \zeta \cdot \frac{\rho U^2}{2}, \quad (13)$$

jossa ζ on dimensioton kertavastusluku (Ai & Mak 2013, 2). Kaavasta nähdään, että kertavastuspainehäviö on turbulentissa virtauksessa suoraan verrannollinen virtaavan ilman tiheyteen ja nopeuden neliöön, ja sitä kautta dynaamiseen paineeseen.

Kertavastusluku ζ määräytyy kanavaosan/-komponentin geometrian mukaan. Pyöreille kanavaosille ja komponenteille on luotu laitevalmistajien toimesta valmiit taulukot, joissa ilmoitetaan kertavastusluku eri komponenteille. Vakioilmavirralla eri kokoisille, geometrialtaan samanmuotoisille kanavaosille ja komponenteille kertavastusluku on vakio. (Sandberg 2016, 93 – 97.)

Suorakaidekanavaosille löytyy alan kirjallisuudesta kertavastuslukuja, mutta koska suorakaidekanavaosien geometria ei ole vakio, kuten pyöreissä kanavaosissa, ei kertavastuslukua voida taulukoista todeta täysin oikeaksi. Kertavastusluvun suuruuteen vaikuttaa olennaisesti kanavaosan jäykistyksen ja pökkaukset, mahdolliset virtauksenohjauslevyt sekä muut virtausdynamiikkaa parantavat muodot.

Eri kanavaosien kertavastusluvut on yleensä laskettu häiriöttömään virtaukseen, mikä tarkoittaa, että kahden peräkkäisen, identtisen kanavaosan kertavastuspainehäviön taulukkoarvoa ei voida summata. Virtaussuunnassa ensimmäisen kanavaosan virtaushäviö vaikuttaa myös jälkimmäisessä kanavaosassa tapahtuviin häviöihin. (Seppänen 1988, 100.)

Kanavaosan tai -komponentin kertavastuksia voidaan myös ilmoittaa suoran kanavan *ekvivalenttipituuksina*. Ekvivalenttipituus kuvaa sitä, kuinka pitkän virtauspinta-alaltaan vastaavan suoran kanavan painehäviötä tarkastellun kanavaosan painehäviö vastaa. Ekvivalenttipituus l_{ekv} saadaan kaavalla

$$l_{ekv} = \frac{D_h}{\lambda}. \quad (14)$$

(Seppänen 1988, 99.)

Ilmavirtauksen pyörteet ja suorakaidekanaviston useat erilaiset toteutusmahdollisuudet luovat haasteita suorakaidekanavistokokonaisuuden tarkkaan suunnitteluun. Virtauslaskenta, jota käsitellään tarkemmin kappaleessa 3, mahdollistaa tarkan järjestelmäkohtaisen virtausominaisuustarkastelun, mikä luo mahdollisuuden ilmanvaihtojärjestelmän optimoidummille hankita- ja ylläpitokustannuksille (Ai & Mak 2013, 1).

3 VIRTAUSLASKENTA

Numeerinen virtausmallinnus eli virtauslaskenta (eng. Computational Fluid Dynamics, CFD) tarkoittaa fluidin virtauksen ja virtausilmiöiden numeerista ratkaisemista tietokoneella matemaattisesti simuloiden. Virtaussimulointi on yleistynyt niin teollisissa kuin ei-teollisissa sovelluksissa tietokoneiden laskentatehon kasvaessa.

Virtauslaskennan merkittävimpiä hyötyjä perinteiseen, kokeelliseen tutkimukseen ja testaukseen verrattuna ovat:

- Merkittävä kustannusten väheneminen uuden suunnittelussa.
- Mahdollisuus käsitellä suurtenkin, todellisuudessa vaikeasti tarkasteltavien järjestelmien toimintaa.
- Mahdollisuus tutkia turvallisesti olosuhteita ja suoritustasoja, jotka todellisuudessa ovat vaarallisia/ haitallisia ihmisille tai järjestelmille.
- Käytännössä rajattoman tarkka ja yksityiskohtainen laskentatulokset.

(Versteeg & Malalasekera 2007, 2.)

Virtauslaskennan kulku jaetaan pääpiirteittäin kolmeen osaan: esikäsittelyyn, simulointivaiheeseen ja jälkikäsittelyyn.

Esikäsittely

- Määritetään tarkasteltava laskentageometria (malli).
- Luodaan laskentaverkko, joka koostuu useista laskentakopeista.
- Määritetään virtauksen ominaisuudet ja lähtötiedot.
- Asetetaan virtauksen reunaehdot.

Simulointivaihe (laskentavaihe)

- Määritetään ratkaisumenetelmä (esimerkiksi kontrollitulavuusmenetelmä), turbulenssimalli sekä muut mallinnuskriteerit.
- Valitaan laskentakoppien yhtälöiden diskretointiin käytettävät algoritmit.
- Yhtälöryhmien ratkaiseminen iteroimalla numeeristen algoritmien avulla.

Jälkikäsitteily

- Laskentatulosten luotettavuuden arviointi ja analysointi.
- Tutkitun virtauksen visualisointi.

(Versteeg & Malalasekera 2007, 2 – 4; Kettunen 2017, 7.)

3.1 Kontrollitilavuusmenetelmä

Kontrollitilavuusmenetelmän (eng. Finite volume method) perustana ovat energian, massan ja liikemäärän säilymislaite. Fluidin virtausominaisuuksia, kuten nopeutta, painetta, tiheyttä ja niiden tila- ja aikajohdannaisia, tarkastellaan makroskooppisella tasolla. Virtauksen molekyyli-taso jätetään huomioimatta. (Versteeg & Malalasekera 2007, 9 – 20.)

Kun tarkastellaan kokoonpuristumatonta ilmaa ja jätetään lämmönsiirron osuus ilmavirtauksessa huomiotta sen ollessa erittäin vähäistä, voidaan ilmavirran liikettä kuvata Navier-Stokesin yhtälöillä

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (15)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{My} \quad (16)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mz} \quad (17)$$

joissa ρ on tiheys, t on aika, μ on dynaaminen viskositeetti, u , v ja w ovat nopeuksia x -, y - ja z -suunnassa ja S_M -termit ovat liikemäärän lähde-termit x -, y - ja z -suunnassa. (Versteeg & Malalasekera 2007, 9 – 23.)

Massan säilymistä kokoonpuristumattomalle fluidille kuvataan kaavalla

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0. \quad (18)$$

(Versteeg & Malalasekera 2007, 9 – 23.)

Koska Navier-Stokesin yhtälöt pätevät sellaisenaan laminaariselle virtaukselle, täytyy yhtälöitä muokata turbulentin virtauksen satunnaisuuden ja 3-ulotteisuuden mallintamiseksi järkevässä ajassa (Versteeg & Malalasekera 2007, 65 – 66).

3.2 Turbulenssimallit

Turbulenttisen virtauksen mallintamisen yksinkertaistamiseksi tarkasteltavalle virtaukselle valitaan turbulenssimalli. Turbulenssimalli valitaan tapauskohtaisesti riippuen tarkasteltavasta virtauksesta ja tavoitelluista tulosten tarkkuuksista. Turbulenssimallit jaetaan kolmeen eri ryhmään: RANS-menetelmiin (eng. Reynolds-averaged Navier-Stokes equations), LES-malliin (eng. Large Eddy Simulation) ja DNS-malliin (eng. Direct Numerical Simulation). (Versteeg & Malalasekera 2007, 65 – 66.)

Useissa turbulenssimalleissa esiintyy Boussinesq'n määrittelemä termi turbulenti viskositeetti μ_t , joka on riippuvainen virtaustilanteesta. Turbulenti viskositeetti on oletus, että Reynoldsin jännitykset ovat viskoosisen jännityksen kaltaisesti suoraan verrannollisia keskiarvovirtaukseen. (Versteeg & Malalasekera 2007, 67.)

Käytännön sovelluksissa käytetyin RANS-turbulenssimalli on kahden yhtälön k- ϵ -malli. Sen heikkoutena on kuitenkin virtaukset, joissa rajakerros irtoaa, virtaus on pyörteistä tai geometriassa on kaarevia pintoja (Sisäilmastoseminaari 2018, 141). RNG k- ϵ mallilla pystytään kuvaamaan paremmin kaartuvia virtauksia (Ansys 2020, 51). Muita yleisiä turbulenssimalleja ovat k- ω malli, RSM-malli, Spalart-Allmaras -malli sekä LES-malli.

3.2.1 RANS-yhtälöt

RANS-yhtälöitä voidaan käyttää useimmissa käytännön sovelluksissa turbulentin virtauksen laskennassa, sillä niissä ei tarvitse tuntea yksityiskohtaisesti turbulentin virtauksen muutoksia ja heilahteluja. RANS-yhtälöiden avulla turbulentin virtauksen satunnaisuus ja heilahtelut voidaan keskiarvottaa aikariippumattomaksi. (Versteeg & Malalasekera 2007, 66.)

Vaikka turbulenttia virtausta tarkastellaan virtausparametrien heilahtelujen aikariippumattomilla keskiarvoilla ajan suhteen, tulee turbulentsisuus silti huomioida. Virtauksen turbulentsisuuden aiheuttamia jännityksiä keskiarvotettuun virtaukseen kuvataan Reynoldsin jännityksillä. Turbulenssimallit ovat laskentamenetelmiä, jotka käyttävät RANS-yhtälöitä turbulenttisen virtauksen mallintamiseksi (Versteeg & Malalasekera 2007, 65 – 66).

3.3 Kanavavirtaus

Kuten kappaleessa 2 esitetään, ilmanvaihtokanavassa turbulenttisen virtauksen rajakerroksessa muodostuu kitkaa kanavan seinämän ja virtaavan ilman välillä, joka tulee huomioida virtauslaskennassa vapaan virtauksen turbulenssin lisäksi. Tästä syystä virtauslaskennassa kanavan seinämässä tapahtuvan virtauksen ja sen ilmiöiden riittävän tarkka mallintaminen on tärkeää.

Kanavavirtauksessa virtaava ilma voidaan jakaa osiin tarkastelupisteen etäisyyden y perusteella kanavaseinämästä. Virtauksen rajapinnassa viskoottiset voimat ovat hallitsevat, kun taas etäämmällä rajapinnasta vaikuttavat turbulenssin aiheuttamat voimat. (Versteeg & Malalasekera 2007, 57.)

Ilmavirtauksen turbulenttisisessa rajapinnassa vaikuttaa vain viskoottiset voimat, jolloin vapaan virtauksen parametrit eivät vaikuta virtauksen keskiarvonopeuteen. Rajapinnan keskivirtausnopeus on siis

$$U = f(y, \rho, \mu, \tau_w), \quad (19)$$

jossa y on etäisyys kanavaseinämästä, μ on ilman viskositeetti ja τ_w on kanavan seinämän aiheuttama leikkausjännitys. (Versteeg & Malalasekera 2007, 57.)

Kaava 20 (Law of the wall)

$$u^+ = \frac{U}{u_t} = f\left(\frac{\rho u_t y}{\mu}\right) = f(y^+) \quad (20)$$

sisältää dimensiottoman nopeusmuuttujan u^+ sekä etäisyysmuuttujan y^+ , jotka ovat olennaisia turbulentin rajakerroksen tarkastelussa. Kaavassa u_t on kitkanopeus, joka määritellään

$$u_t = \sqrt{\tau_w/\rho}. \quad (21)$$

Turbulentin virtauksen rajakerros (KUVIO 3) koostuu lineaarisesta alakerroksesta, puskurikerroksesta, log-law-kerroksesta ja turbulentista kerroksesta. Kerrokset muodostavat rajakerroksen paksuuden δ .

Kiinteällä pinnalla fluidi on stationaarista, koska fluidiin vaikuttaa käytännössä vain viskoottiset voimat. Rajakerroksen lineaarinen alakerros on erittäin ohut ($y^+ < 5$) ja voidaan olettaa, että leikkausjännitys on tasaista ja suuruudeltaan kanavan seinämän leikkausjännitys τ_w koko lineaarisen alakerroksen paksuudella, eli

$$\tau(y) = \mu \frac{\partial U}{\partial y} \cong \tau_w. \quad (22)$$

Kun oletetaan että $U = 0$ jos $y = 0$, integroimalla y :n suhteen saadaan keskivirtausnopeudelle ja seinämäetäisyydelle lineaarinen suhde

$$U = \frac{\tau_w y}{\mu}. \quad (23)$$

Yhtälö saadaan johdettua muotoon

$$u^+ = y^+. \quad (24)$$

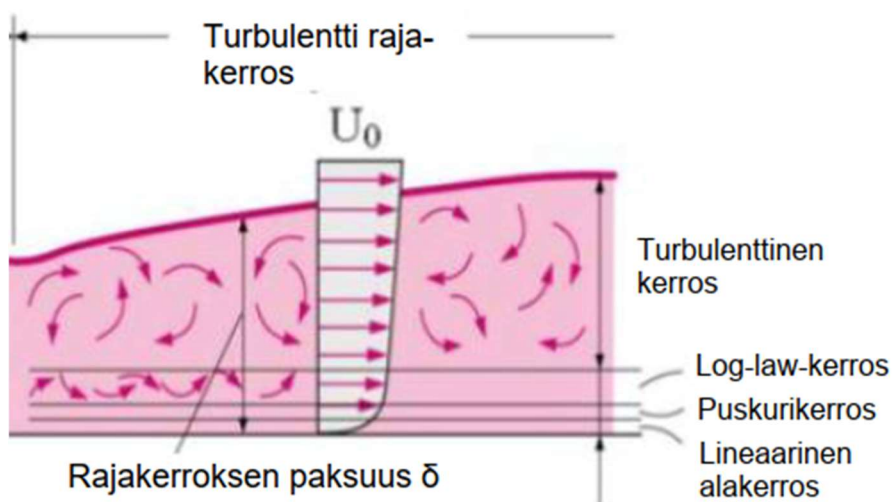
(Versteeg & Malalasekera 2007, 57-58.)

Log law -kerroksessa, joka on paksuudeltaan $30 < y^+ < 500$, viskoottiset ja turbulentit voimat tulevat molemmat ottaa huomioon vaikka turbulentit voimat ovat suurempia. Kun oletetaan, että turbulentin viskositeetin laskennassa sijainnin funktiona käytetty turbulenssin pituuskaala on $l_m = \kappa y$, kerrokselle voidaan muodostaa kaava

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B, \quad (25)$$

jossa κ on kokeellisesti mitattu von Karmanin vakio ($\kappa \approx 0,4$) ja B on vakio ($B \approx 5,5$). Vakiot pätevät sileille pinoille. (Versteeg & Malalasekera 2007, 58 – 59.)

Kauimpana seinämästä sijaitsevassa turbulentissa kerroksessa viskoosivoimien vaikutus on olematon turbulenssivoimiin nähden. Jotta kanavavirtauksen virtauslaskenta saadaan luotettavasti mallinnettua, on rajakerroksen muodostavat alueet ja niiden ominaisuudet sekä turbulentin virtauksen kompleksisuus otettava huomioon. (Versteeg & Malalasekera 2007, 59 – 61.)

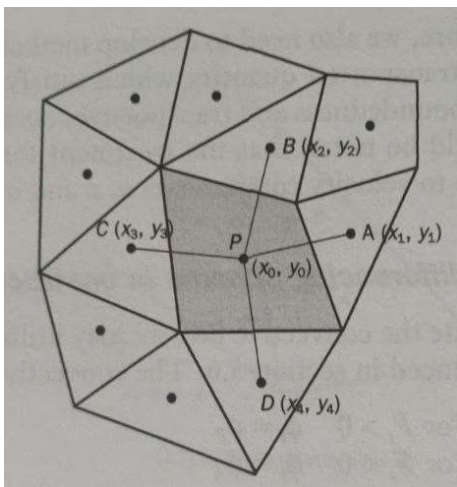


KUVIO 3. Fluidivirtauksen rajakerroksen muodostuminen (LearnCAx n.d, muokattu)

3.4 Laskentaverkko

Virtauslaskennan tulosten luotettavuuden kannalta laskentaverkon (eng. mesh) huolellinen luominen on tärkeää. Tarkasteltavalle laskenta-alueelle muodostetaan laskentaverkko, joka koostuu useasta pienestä laskentakopista. Laskentakoppeja kutsutaan myös kontrollitulavuuksiksi, ja ne voivat olla joko 1-, 2- tai 3-ulotteisia. Jokaisen laskentakopin keskipisteeseen sijoitetaan laskentasolmu, jossa ratkaistaan laskennassa tarkasteltavia ilmiöitä kuvaavia differentiaaliyhtälöitä (KUVIO 4). Laskentaverkon rajalla sijaitsevien laskentakoppien yhtälöt muokataan kuvaamaan rajapinnan olosuhteita. (Versteeg & Malalasekera 2007, 116–119.)

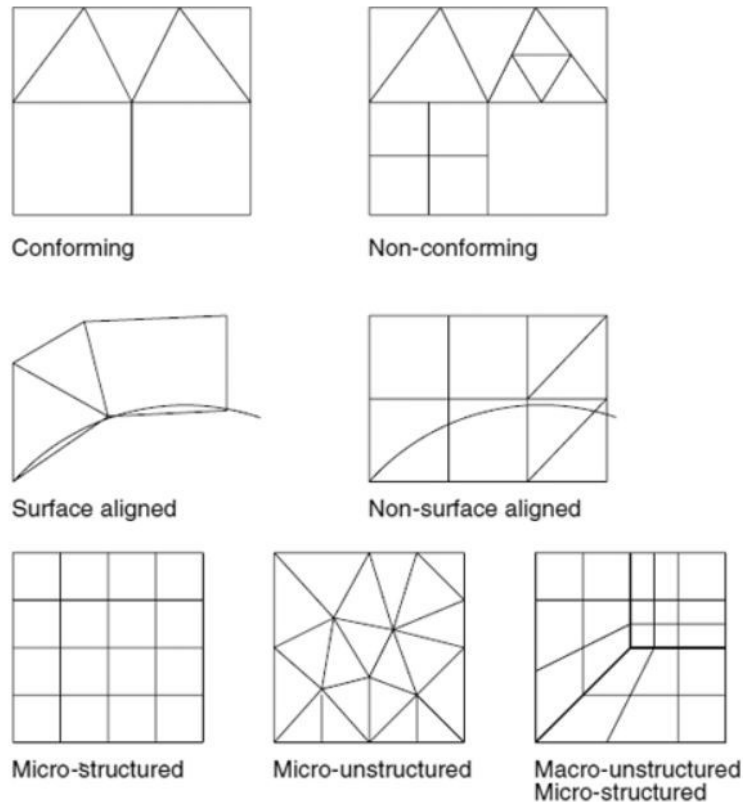
Kontrollitulavuusmenetelmässä diskretoidaan säilymisyhtälöä, ja jokaiseen kontrollitulavuuteen sisään- ja ulostulevat skalaarisuureiden vuot ovat yhtä suuret ja häviöttömät (Pohjolainen 2019, 6).



KUVIO 4. Kuva laskentaverkon muodostumisesta (Versteeg & Malalasekera 2007, 322)

Kanavavirtauksen mallintamiseksi luodaan kanavaseinämän geometriaa kuvaava rajakerrosverkko, jossa ratkaistavat yhtälöt kuvaavat kanavapinnassa tapahtuvia ilmiöitä. Rajakerrosverkon sisäpuolelle luodaan kontrollitulavuuksista koostuva laskentaverkko, jonka matemaattiset yhtälöt kuvaavat kanavavirtauksen ilmiöitä rajakerrosverkon sisäpuolella.

Laskentaverkon rakenne riippuu tarkasteltavasta geometriasta ja virtausilmiöistä, ja ne jaetaan rakenteellisiin (structured) ja rakenteettomiin (unstructured) laskentaverkkoihin (Versteeg & Malalasekera 2007, 342).



KUVIO 5. Laskentaverkon rakennemalleja (Löhner 2008)

Laskentaverkon muodostavien laskentakoppien muoto (KUVIO 6) valitaan tarkasteltavan geometrian perusteella.

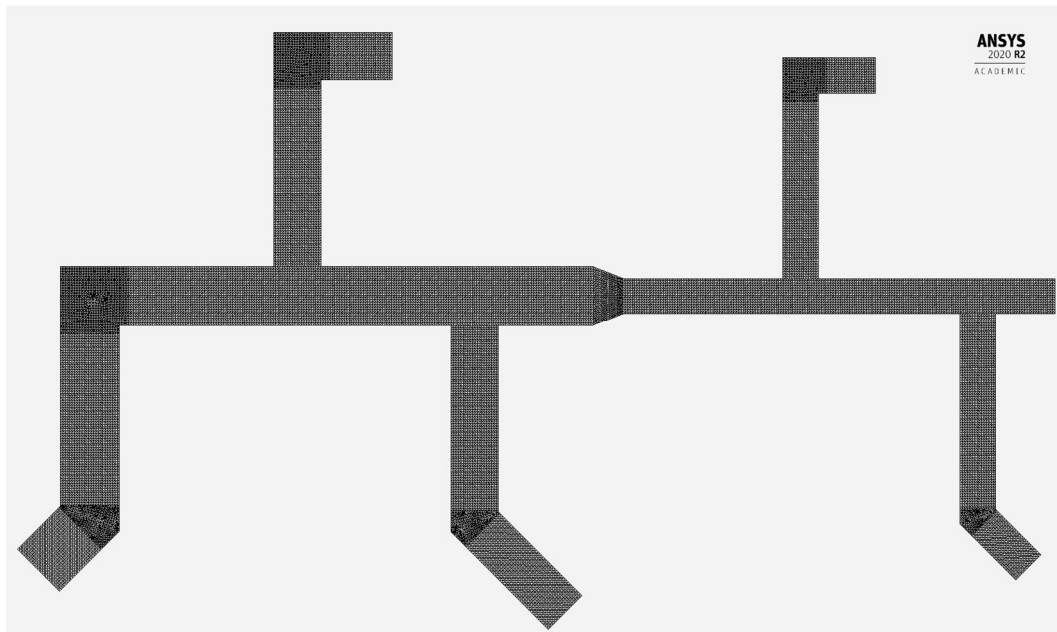


KUVIO 6. Laskentakoppien geometriamalleja (Löhner 2008)

Rakenteellinen laskentaverkko soveltuu rakenteetonta paremmin yksinkertaisille geometrioille. Rakenteellisen laskentaverkon laskentakopit on mahdollista muuttaa karteesisiksi, tiiliskiven muotoisiksi laskentakopeiksi koordinaatistomuutoksella. Jokaisessa laskentakopissa pätee ijk-indeksointi, joka vastaa karteesisen koordinaatiston xyz-koordinaatteja. (Inkeri 2014, 31.)

Rakenteeton laskentaverkko koostuu laskentakopeista, jotka useimmiten ovat kolmioita (2D) tai tetraedreja (3D). Rakenteeton laskentaverkko eroaa rakenteellisesta sen indeksointijärjestelmässä. Ijk-indeksoinnin sijaan jokaisen laskentakopin naapureista on pidettävä kirjaa, mikä monimutkaistaa laskentaverkon käsittelyä, diskretointia ja yhtälöiden ratkaisemista. (Inkeri 2014, 33.)

Laskentaverkon geometria ja siihen kuuluvien laskentakoppien määrä ja muoto vaikuttavat laskentatulosten tarkkuuteen sekä tarvittavien laskentaresurssien suuruuteen. Laskentaverkon luomisessa on tärkeää tunnistaa ne tarkasteltavan laskenta-alueen kohdat, joissa virtauksen muutokset ovat suurimpia ja virtausalue tulee jaotella pienempiin laskentakoppeihin, jolloin laskentakoppeja on määrällisesti enemmän. Kuviossa 7 on tässä työssä tarkastellulle kanavistogeometrialle luotu laskentaverkko.



KUVIO 7. Verkotettu kanavageometria

4 MITOITUSMENETELMÄT

4.1 Kaavat ja taulukot ("käsinlaskenta")

Suorakaidekanaviston painehäviölaskenta suoritetaan kappaleessa 2 esitettyjen yhtälöiden avulla tai kirjallisuudesta löytyvien taulukoiden avulla. Alan kirjallisuudesta löytyy eri lähteistä tietoa kanavassa ja eri kanavaosissa syntyvistä painehäviöistä ja niiden kertavastusluvuista. Suorakaidekanavien ja kanavaosien virtaustietoja esitetään esimerkiksi ASHRAEn, SMACNAn ja CIBSEn oppaissa. Seuraavissa kappaleissa esitetään työssä käytetyt laskentaperusteet eri kanavakomponenteille.

Tässä työssä tarkasteltavien kanavistojen painehäviölaskenta suoritettiin sekä ASHRAEN että CIBSEn julkaisuista saatujen kertavastuslukujen perusteella. Mikäli ASHRAElta ei löytynyt komponentin kertavastuslukua, käytettiin laskennassa CIBSEn kertavastuslukua.

Alaluvuissa on esitetty esimerkkinä ASHRAEn julkaisuista kanavaosien kertavastuslukujen laskentaperusteet. CIBSEn julkaisemat kertavastusluvut saatiin vuoden 2001 julkaisusta "CIBSE Guide C: Reference Data".

4.1.1 Suoran kanavan mitoitusperusteet

Vertailututkimuksen käsinlaskennassa suoran kanavan kitkavastuskertoimen määrittämiseen käytettiin Moodyn diagrammia (KUVIO 2). Muut suoran kanavaosuuden painehäviön laskennassa tarvittavat lähtöarvot laskettiin kappaleessa 2 esitettyjen laskentakaavojen mukaisesti.

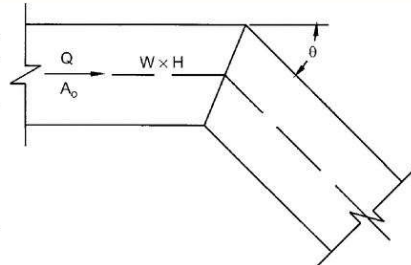
4.1.2 Suorakaidekäyräosat

Tarkasteltavien kanavistojen käyräosien laskennassa käytettiin ASHRAEn Duct Fitting Database -tietokannan mobiilisovelluksen ilmoittamia kertavastuslukuja,

jotka vastaavat ASHRAEn kirjallisuusjulkaisuista löytyviä kertavastuslukuja. Alla on koottuna ASHRAEn julkaisuista komponenttien kertavastuskertoimien laskentaohjeet.

CR3-6 Elbow, Mitered

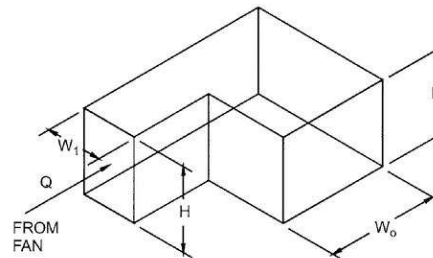
θ	C_o Values										
	0.25	0.50	0.75	1.00	1.50	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0
20	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05
30	0.18	0.17	0.17	0.16	0.15	0.15	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11
45	0.38	0.37	0.36	0.34	0.33	0.31	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24
60	0.60	0.59	0.57	0.55	0.52	0.49	0.46	0.43	0.41	0.39	0.38
75	0.89	0.87	0.84	0.81	0.77	0.73	0.67	0.63	0.61	0.58	0.57
90	1.30	1.27	1.23	1.18	1.13	1.07	0.98	0.92	0.89	0.85	0.83



KUVIO 8. Jyrkkäkurkkuisen käyräosan kertavastusluku (ASHRAE 2009, 21.52)

SR3-1 Elbow, 90 Degree, Variable Inlet/Outlet Areas, Supply Air Systems

H/W_1	C_o Values						
	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0
0.25	0.63	0.92	1.24	1.64	2.14	2.71	4.24
1.00	0.61	0.87	1.15	1.47	1.86	2.30	3.36
4.00	0.53	0.70	0.90	1.17	1.49	1.84	2.64
100.	0.54	0.67	0.79	0.99	1.23	1.54	2.20



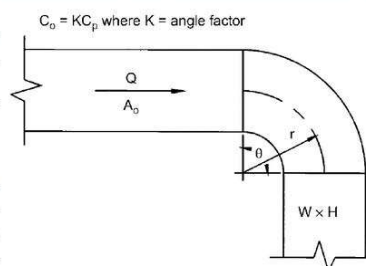
KUVIO 9. Jyrkkäkurkkuisen 90°-käyräosan kertavastusluku (ASHRAE 2009, 21.57)

RECTANGULAR FITTINGS

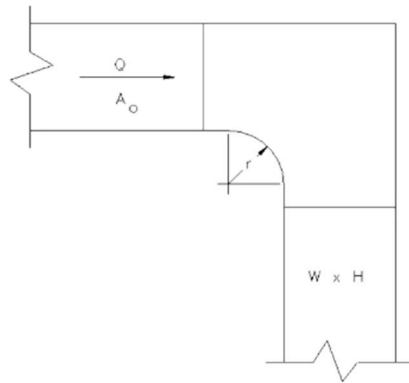
CR3-1 Elbow, Smooth Radius, Without Vanes

r/W	C_p Values										
	0.25	0.50	0.75	1.0	1.50	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0
0.50	1.53	1.38	1.29	1.18	1.06	1.00	1.00	1.06	1.12	1.16	1.18
0.75	0.57	0.52	0.48	0.44	0.40	0.39	0.39	0.40	0.42	0.43	0.44
1.00	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19	0.18	0.18	0.19	0.20	0.21	0.21
1.50	0.22	0.20	0.19	0.17	0.15	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17
2.00	0.20	0.18	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15

Angle Factor K											
θ	0	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
K	0.0	0.31	0.45	0.60	0.78	0.90	1.00	1.13	1.20	1.28	1.40



KUVIO 10. Kaarevakurkkuisen käyräosan kertavastusluku (ASHRAE 2009, 21.52)



KUVIO 11. KY90°-käyräosan dimensiot (ASHRAE Duct Fitting Database 2019)

Geometrialtaan kuvion 11 mukaisen 90°-käyräosan kertavastusluku saatiin ASHRAE Duct Fitting Database -mobiilisovelluksesta seuraavasti:

TAULUKKO 1. Kuvion 11 mukaisen 90°-käyräosan kertavastusluku

Sivunmitta (a/b)	Kertavastusluku ζ
1000x1000	0,88
800x800	0,83
600x600	0,76

45°-käyräosan, jonka sisäkurkku on kaareva ja ulkokurkku jyrkkä, kertavastusluku saatiin MagiCAD-suunnitteluohjelmiston mukaisesti jakamalla geometrialtaan vastaavan 90°-käyrän kertavastusluku luvulla 2, koska ASHRAElta ei kertavastustietoja löytynyt.

4.1.3 Suorakaidemuuntokappaleet

Työssä tarkasteltavien muuntokappaleiden kertavastusluvut saatiin CIBSEn C-standardista kuvion 12 mukaisesti, koska ASHRAEn julkaisuista ei soveltuvaa dataa löytynyt.

4.10.3.18 Symmetrical contractions

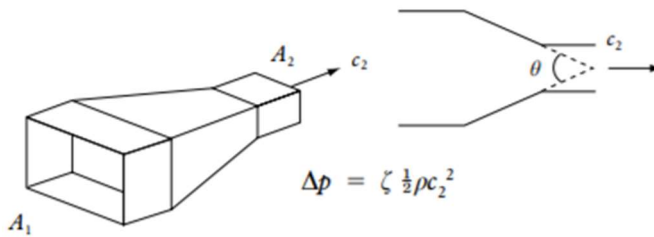


Table 4.80 Values of ζ for symmetrical contractions (from SMACNA⁽³⁾)

A_2/A_1	Included angle θ						
	10°	15–40°	50–60°	90°	120°	150°	180°
0.50	0.05	0.05	0.06	0.12	0.18	0.24	0.26
0.25	0.05	0.04	0.07	0.17	0.27	0.35	0.41
0.17	0.05	0.04	0.07	0.18	0.28	0.36	0.42
0.10	0.05	0.05	0.08	0.19	0.29	0.37	0.43

Notes

- (1) SMACNA gives the same values for symmetrical conical contractions.
- (2) In the absence of further data it is reasonable to suppose similar values for contractions with 2 sides parallel.

KUVIO 12. Virtaussuunnassa supistuvan muuntoyhteen kertavastusluku (CIBSE 2001, 101-4)

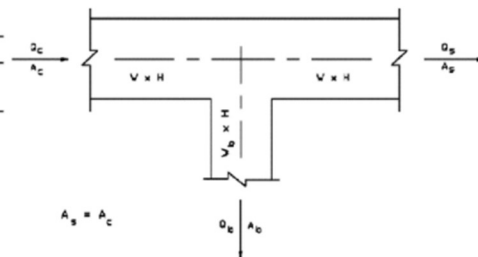
4.1.4 Lähtökaulukset

Tarkasteltavien kanavistojen lähtökauluksen laskennassa käytettiin ASHRAEn ilmoittamia kertavastuslukuja. Alla on koottuna ASHRAEn julkaisuista komponenttien kertavastuskertoimien laskentaohjeet.

SR5-5 Tee of the Type $A_s + A_b > A_c, A_s = A_c$ Diverging

A_b/A_c	C_b Values								
	Q_b/Q_c								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	2.06	1.20	0.99	0.87	0.88	0.87	0.87	0.86	0.86
0.2	5.15	1.92	1.29	1.03	0.99	0.94	0.92	0.90	0.89
0.3	10.30	3.12	1.78	1.28	1.16	1.06	1.01	0.97	0.94
0.4	15.90	4.35	2.24	1.48	1.11	0.88	0.80	0.75	0.72
0.5	24.31	6.31	3.04	1.90	1.35	1.03	0.91	0.83	0.78
0.6	34.60	8.70	4.03	2.41	1.65	1.22	1.04	0.94	0.87
0.7	46.75	11.53	5.19	3.01	2.00	1.44	1.20	1.06	0.96
0.8	60.78	14.79	6.53	3.70	2.40	1.69	1.38	1.20	1.07
0.9	76.67	18.49	8.05	4.49	2.86	1.98	1.59	1.36	1.20

Q_b/Q_c	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
C_s	32.40	6.40	2.18	0.90	0.40	0.18	0.07	0.03	0.00



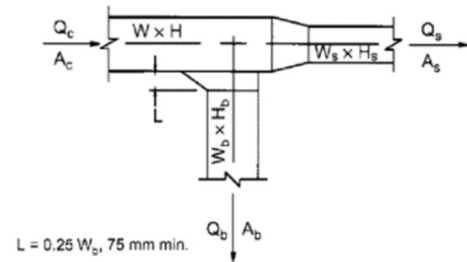
KUVIO 13. Jyrkän lähtökauluksen kertavastusluku (ASHRAE 2009, 21.63)

Jyrkän lähtökauluksen virtausominaisuuksien voidaan olettaa vastaavan kuvion 13 mukaista t-kappaletta, joka huomioi laskennassa haarakanavan molemmat sivun mitat.

SR5-13 Tee, 45 Degree Entry Branch, Diverging

		C_b Values								
		Q_b/Q_c								
A_b/A_c		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1		0.32	0.33	0.32	0.34	0.32	0.37	0.38	0.39	0.40
0.2		0.31	0.32	0.41	0.34	0.32	0.32	0.33	0.34	0.35
0.3		1.86	1.65	0.73	0.47	0.37	0.34	0.32	0.32	0.32
0.4		3.56	3.10	1.28	0.73	0.51	0.41	0.36	0.34	0.32
0.5		5.74	4.93	2.07	1.12	0.73	0.54	0.44	0.38	0.35
0.6		8.48	7.24	3.10	1.65	1.03	0.73	0.56	0.47	0.41
0.7		11.75	10.00	4.32	3.31	1.42	0.98	0.73	0.58	0.49
0.8		15.57	13.22	5.74	3.10	1.90	1.28	0.94	0.73	0.60
0.9		19.92	16.90	7.38	4.02	2.46	1.65	1.19	0.91	0.73

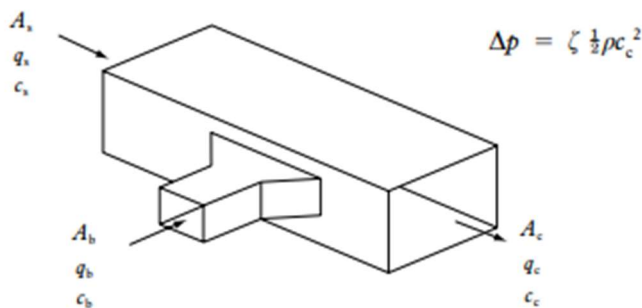
		C_s Values								
		Q_s/Q_c								
A_b/A_c		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1		0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2		0.98	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3		3.48	0.31	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4		7.55	0.98	0.18	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5		13.18	2.03	0.49	0.13	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00
0.6		20.38	3.48	0.98	0.31	0.10	0.04	0.02	0.01	0.00
0.7		29.15	5.32	1.64	0.60	0.23	0.09	0.04	0.02	0.01
0.8		39.48	7.55	2.47	0.98	0.42	0.18	0.08	0.04	0.02
0.9		51.37	10.17	3.48	1.46	0.67	0.31	0.15	0.07	0.04



KUVIO 14. Saapaslähtökauluksen kertavastusluku (ASHRAE 2009, 21.58)

4.10.3.24 90° Tees: rectangular from rectangular; bell-mouth branch (HVCA 107)

Converging and diverging flows ($A_c = A_s$)



No data can be found on this component.

There is no reason to believe that the values of ζ will be any less than for a shoe branch.

KUVIO 15. Molempiin suuntiin levitetyn saapaslähdön kertavastusluku (CIBSE 2001, 4-104)

Molempiin suuntiin levitetyn saapaslähdön kertavastusluku laskettiin kuvion 14 mukaisen lähtökauluksen ohjeilla, koska kuvion 15 mukaiselle lähtökaulukselle ei kertavastustietoja löytynyt.

4.2 MagiCAD for AutoCAD

MagiCAD on rakennussovellukseen tarkoitettu REVIT- ja AutoCAD-yhteensopiva suunnittelutyökalu. Tässä työssä tarkastellaan AutoCAD-pohjaista versiota 2021 ja sen mitoitusperusteita. MagiCADin ilmanvaihtokanaviston mitoitusperusteet on esitetty ohjelmiston käyttömanuaalissa. Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi suunnitteluohjelmiston laskentaperusteet.

4.2.1 Suoran kanavan mitoitusperusteet

Suorakaidekanavan kitkapainehäviöiden laskentaan MagiCAD käyttää Colebrook-yhtälöä

$$\Delta p = \frac{\lambda \cdot \rho}{D_h \cdot 2} \cdot U^2. \quad (26)$$

Mikäli kanavan sisäpinnan karheutta k ei mitoituksessa määritetä erikseen, käyttää MagiCAD mitoituksessa oletusarvoa 0,15 mm, jota normaalisti käytetään teräksestä valmistetuille ilmanvaihtokanaville.

Reynoldsin luvun laskentaan MagiCAD käyttää kaavaa 7. Laminaarisen virtauksen raja-arvot ovat $0,0001 \leq Re \leq 2200$, jolloin kitkakerroin lasketaan kaavan 11 mukaan.

Turbulenttisen virtauksen minimiraja-arvona MagiCADissa on $Re=2400$. Turbulenttisen virtauksen kitkakertoimen laskentaan käytetään kaavaa 10.

Laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen transiio-alueen kitkakertoimen määrittämiseen MagiCAD muuttaa kaavan 10 muotoon

$$\kappa = -2 \log \left(\frac{k}{3,7D_h} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right). \quad (27)$$

jossa κ on interpoloitu kitkakertoimen λ arvo välillä $2200 < Re < 2400$. Kitkakertoimen laskentaan käytetty kaava tulee muotoon

$$\lambda = \frac{64}{Re} \cdot \frac{Re - 2200}{2400 - 2200} \cdot \left\{ \left(\frac{1}{\kappa} \right)^2 - \frac{64}{Re} \right\}. \quad (28)$$

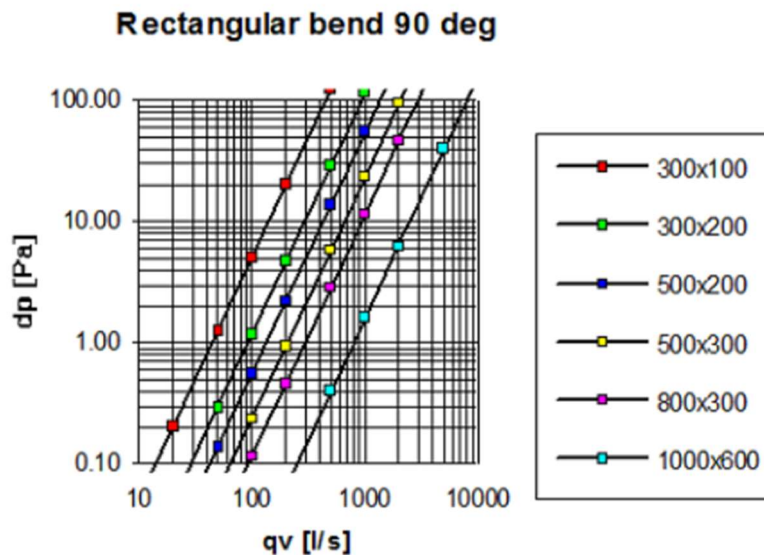
Mikäli interpolointi ei toimi, käytetään siirtymäalueen kitkakertoimen laskentaan kaavaa

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k}{D_h} + \frac{68,0}{Re} \right)^{0,25}. \quad (29)$$

(MagiCAD 2021)

4.2.2 Suorakaidekäyräosat

90°-käyräosien painehäviölaskennassa MagiCAD käyttää kaavan 13 yhtälöä, joka toteuttaa kuvion 16 arvot.



KUVIO 16. 90°-suorakaidekäyräosan painehäviötaulukko (MagiCAD 2021)

Painehäviötaulukon tulokset on ilmoitettu suorakaidekäyrille, joiden sisäkurkku on pyöristetty ja ulkokurkku on terävä. Ilman tiheyden oletusarvo on $1,2 \text{ kg/m}^3$.

MagiCADin suorakaidekanavistosuunnittelussa voidaan valita 90°-käyräosien geometria seuraavasti:

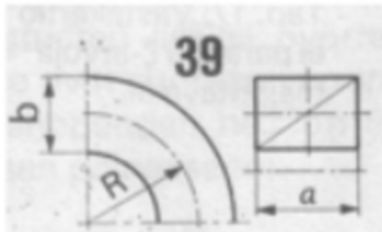
- Kaareva sisäkurkku, terävä ulkokurkku
- Kaareva sisä- ja ulkokurkku
- Terävä sisäkurkku, kaareva ulkokurkku
- Terävä sisä- ja ulkokurkku

Lisäksi suunnittelussa voidaan valita 90°-käyräosien kääntösäde R , toisin sanoen käyräosan pituus, seuraavasti:

TAULUKKO 2. 90°-käyräosien suunnitteluvaihtoehdot (MagiCAD 2021)

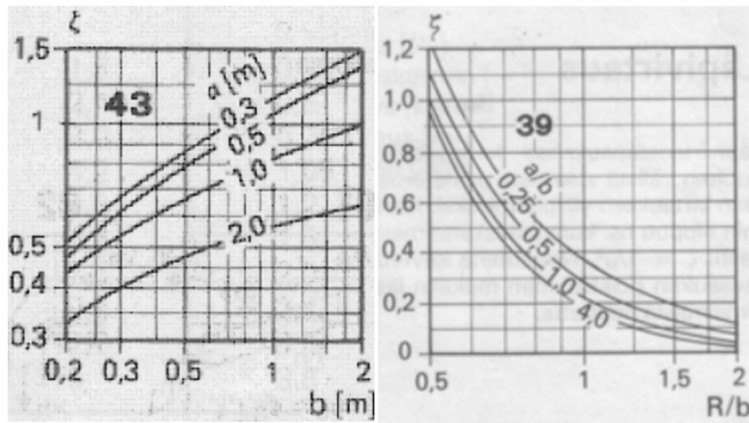
Lyhyt käyrä	$R = 0,6 \cdot b$
Keskikokoinen käyrä	$R = b$
Pitkä käyrä	$R = 1,5 \cdot b$
Oletus käyrä	$R = 0,5 \cdot b + 100$

Taulukossa R on kääntösäde ja b on sivun mitta kuvion 18 mukaisesti



KUVIO 17. 90°-suorakaidekäyrä (MagiCAD 2021)

Kanavaosan geometriasta riippuvainen kertavastusluku ζ määräytyy siis suunnittelijan valintojen perusteella. MagiCADin käyräosien kertavastusluvut ovat peräisin kirjallisuuden kokeellisesti testatuista arvoista. Kertavastusluvut määritetään kullekin käyrälle kuvion 18 mukaisista kuvaajista. Vasemmanpuoleinen taulukko on 90°-käyrälle, jonka sisäkurkku on kaareva ja ulkokurkku terävä. Oikeanpuoleinen taulukko on kuvion 17 mukaiselle 90°-käyrälle, jonka sisä- ja ulkokurkku ovat kaarevat.



KUVIO 18. 90°-käyräosien kertavastuslukukuvaaja (MagiCAD 2021)

90°-käyrälle, jonka sisä- ja ulkokurkut ovat terävät, kertavastusluku on $\zeta = 1,5$.

45°-suorakaidekäyräosille kertavastusluku lasketaan jakamalla vastaavan 90°-käyräosan kertavastusluku luvulla 2. 30°-suorakaidekäyräosille kertavastusluku lasketaan jakamalla vastaavan 90°-käyräosan kertavastusluku luvulla 3. Käyräosien, joiden kääntökulma on jokin muu, kertavastusluku ζ_α lasketaan kaavalla

$$\zeta_\alpha = \frac{\zeta_{90}}{90/\alpha}, \quad (30)$$

jossa ζ_{90} on geometrialtaan vastaavan 90°-käyräosan kertavastusluku ja α on tarkasteltavan käyräosan kääntökulma. (MagiCAD 2021.)

4.2.3 Suorakaidemuuntokappaleet

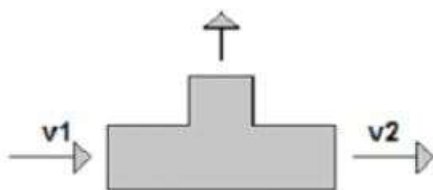
Suorakaidemuuntokappaleissa aiheutuvat painehäviöt MagiCAD mitoittaa CIBSE:n C-standardin mukaisesti. Symmetristen, virtaussuunnassa supistuvien muuntoyhteiden kertavastukset MagiCAD mitoittaa kuvion 12 mukaisesti. (MagiCAD 2021.)

4.2.4 T-haarat ja lähtökaulukset

MagiCAD käyttää t-haarojen painehäviölaskennassa samoja yhtälöitä pyöreille kanaville ja suorakaidekanaville. Lisäksi T-haarojen laskennassa on viittauksia CIBSEn aineistoihin, mutta selvää selostusta ei ole annettu missä tilanteissa eri laskentamenetelmiä käytetään. Tässä työssä oletetaan, että MagiCAD mitoittaa lähtökaulukset t-haarojen mukaisesti, koska muuta tietoa ei ole saatavilla.

T-branch – supply air – main route

Source: Fläkt Veloduct 1997 (Swedish edition)



$$c = \text{abs}(v2 - (v1 + 0.05*v2))$$

$$dp = 0.025*v2^2 + 0.25*c^2$$

v1 flow velocity at the inlet [m/s]

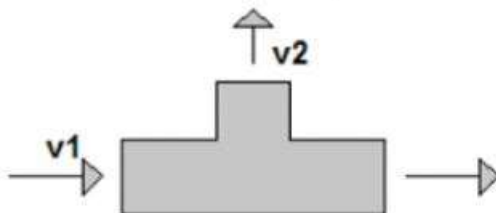
v2 flow velocity at the outlet [m/s]

Possible reduction is included in the value

KUVIO 19. T-haaraan painehäviö runkokanavaan (MagiCAD 2021)

T-branch – supply air – branch route

Source: Fläkt Veloduct 1997 (Swedish edition)



$$dp = 0.6*v1^2 + 0.12*v2^2$$

v1 flow velocity at the inlet [m/s]

v2 flow velocity at the outlet [m/s]

KUVIO 20. T-haaran painehäviö haarakanavaan (MagiCAD 2021)

4.3 Virtauslaskenta

Virtauslaskennassa käytettiin ANSYS Discovery AIM -simulointiohjelmiston versiota 2020 R2. Käytössä oli ohjelmistolle opiskelijalisenssi, joka asetti rajoituksia laskentasolmujen määrään sekä laskennassa käytettävään laskentatehoon.

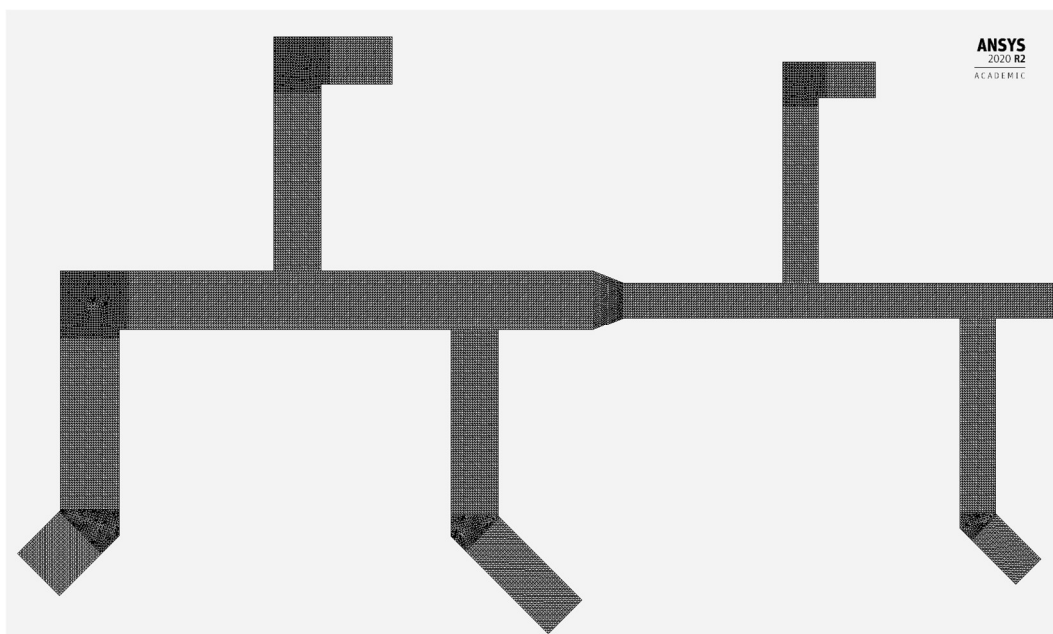
4.3.1 Laskenta-asetukset

Virtauslaskenta suoritettiin asettamalla laskennan reunaehdoksi kanaviston avoimiin päihin haluttu virtausnopeus. Laskennassa tarkasteltiin jokaisen kanavaosan päihin luotujen tarkastelupintojen kokonaispaineen keskiarvoa. Laskentamenetelmänä käytettiin pseudo-transienttia ajasta riippumatonta menetelmää. Ratkaisumenetelmänä käytettiin painepohjaista kytkettyä (eng. coupled) menetelmää. Kanavapintojen virtausilmiöiden mallintamiseen käytettiin Discovery AIMin "y⁺ insensitive" -mallia.

Virtaustarkasteluun valittiin turbulenssimalliksi $k-\omega$ SST -malli, joka sisältää kaksi kuljetusyhtälöä turbulentsisuuden mallintamiseen. $k-\omega$ SST-mallin etuna on sen kyky mallintaa virtauksen irtoamista ja kiinnittymistä. Malli yhdistää $k-\varepsilon$ ja $k-\omega$ -turbulenssimallien ominaisuuksia siten, että kanavan keskellä virtaavan ilman mallintamiseen käytetään $k-\varepsilon$ -mallia ja kanavaseinämän läheisyydessä $k-\omega$ -mallia. (Versteeg & Malalasekera 2007, 90 – 92.)

4.3.2 Laskentaverkko

Tarkasteltaville kanavistoille luotiin laskentaverkot, joiden laskentakoppien lukumäärä ja laskentaverkoston laatuparametrina käytettävä vinous (eng. skewness) on esitetty taulukossa 3. Laskentaverkkoa voidaan pitää laadukkaana laskentakoppien vinouden ollessa $< 0,98$. Kuviossa 21 on esitetty tarkastelun 1.1 kanavistogeometrialle luotu laskentaverkko.



KUVIO 21. Tarkastelun 1.1 kanaviston laskentaverkko

TAULUKKO 3. Tarkastelujen laskentaverkon laatu tiedot.

Tarkastelu	Skewness maksimi	Skewness keskiarvo	Laskentakoppien lukumäärä
1.1	0,7	0,12	670000
1.2	0,58	0,13	670000
1.3	0,74	0,12	710000
2.1	0,75	0,14	704000

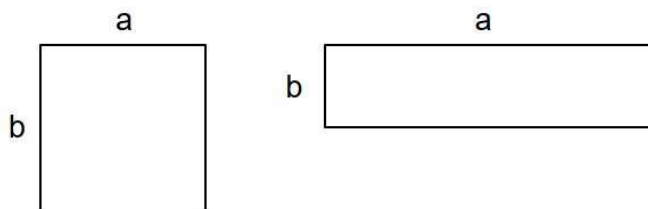
5 MITOITUSMENETELMIEN VERTAILU

5.1 Vertailu kanavan poikkipinta-alan muodon suhteen

Suorakaidekanavan poikkileikkauksen muodon vaikutusta virtausominaisuuksiin sekä laskentamenetelmien tuloksiin vertailtiin kahdella eri kanavistolla siten, että kanavan poikkipinta-ala pidettiin vakiona kahdella eri kanavamudolla. Tarkasteltavana kanavan poikkipinta-alan geometriana oli neliömuoto ($a: b = 1: 1$) ja litteä muoto ($a: b = 4: 1$). Vertailut kanavistot on esitetty liitteissä 1-4.

Tarkastelu 1.1 - 1.3

Tarkastelu 2.1

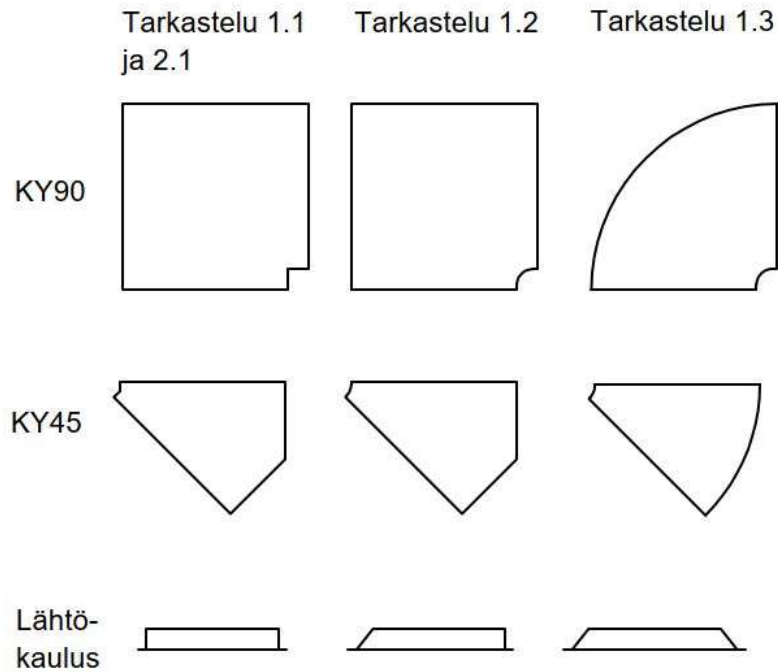


KUVIO 22. Tarkasteltavat kanavan poikkileikkauksen geometriat

5.2 Vertailu kanavaosien geometrian suhteen

Suorakaidekanaviston kanavaosien geometrian vaikutusta tarkasteltiin kolmella, kanavisto- ja kanavan poikkileikkausmuodoltaan samanlaisella kanavistolla. Tarkastelun tavoitteena oli selvittää, miten kanavaosien muodot vaikuttavat ilmavirtauksessa syntyviin painehäviöihin ja miten eri mitoitusmenetelmien laskentatulokset niissä eroavat. Kanavaosien geometria ja mitat tarkastelussa ovat vastaavat, mitä MagiCAD for AutoCAD -ohjelmiston piirroksessa.

Tarkasteltavat kanavaosageometriat eroavat toisistaan sisä- ja ulkokurkkujen muodoilta. Kanavaosat eri tarkasteluille on esitetty kuviossa 23.



KUVIO 23. Tarkasteltavat kanavaosien geometriat

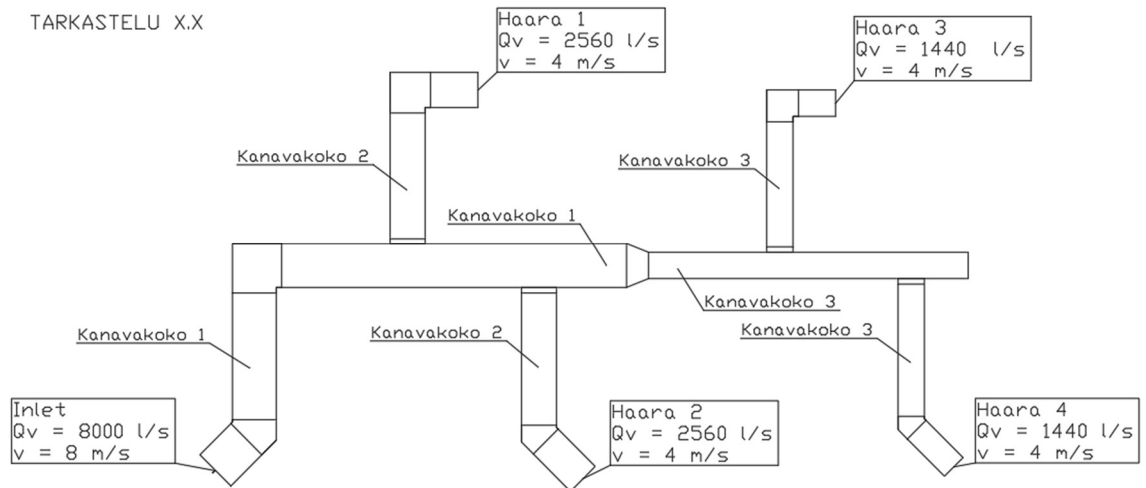
5.3 Tarkasteltavat kanavistot ja lähtötiedot

Kanaviston painehäviölaskenta eri menetelmillä suoritettiin alla olevan taulukon mukaisilla lähtötiedoilla:

TAULUKKO 4. Laskennan lähtöarvot

Lähtöarvot		
Ilman tiheys (ρ_i)	1,1843	kg/m ³
Dynaaminen viskositeetti (η_i)	1,844E-05	Pa s
Kinemaattinen viskositeetti (ν_i)	1,557E-05	m ² /s
Kanavapinnan karheus k	0,15	mm

Laskennassa tarkasteltava kanavistoesimerkki ja laskentaan määritetyt ilmavirrat ovat näkyvissä kuviossa 24. Ilmamäärät pidettiin vakiona jokaisessa tarkastelussa.



KUVIO 24. Tarkastelukanaavisto ja ilmamäärät

Tarkastellut kanaavistot ovat liitteissä 1-4. Tarkasteluissa käytetyt kanaavakoot määritettiin taulukon 5 mukaisesti:

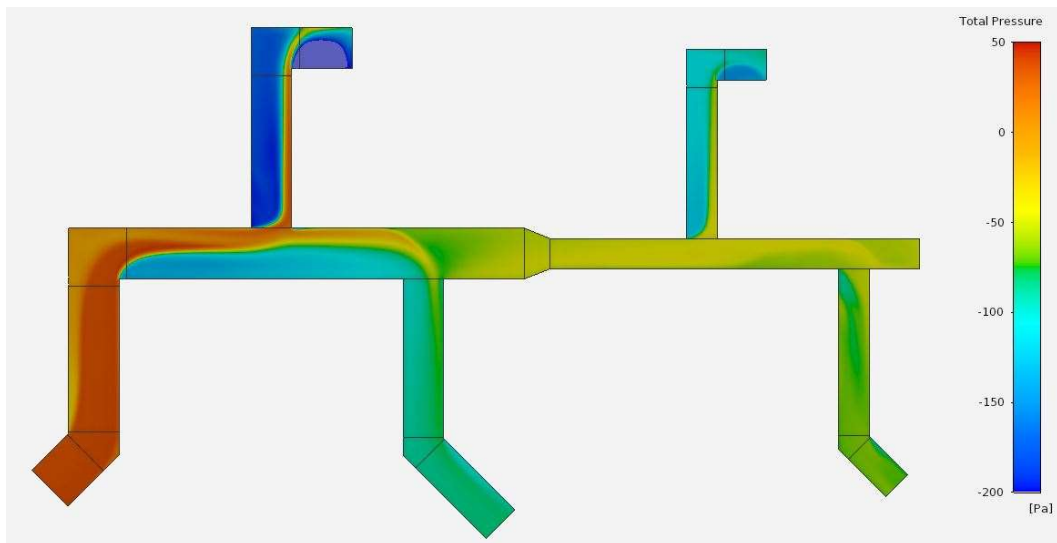
TAULUKKO 5. Vertailutarkastelujen suorakaidekanaavakoot

	Tarkastelu 1.1	Tarkastelu 1.2	Tarkastelu 1.3	Tarkastelu 2.1
Kanavakoko 1	1000x1000	1000x1000	1000x1000	2000x500
Kanavakoko 2	800x800	800x800	800x800	1600x400
Kanavakoko 3	600x600	600x600	600x600	1200x300

6 TULOKSET

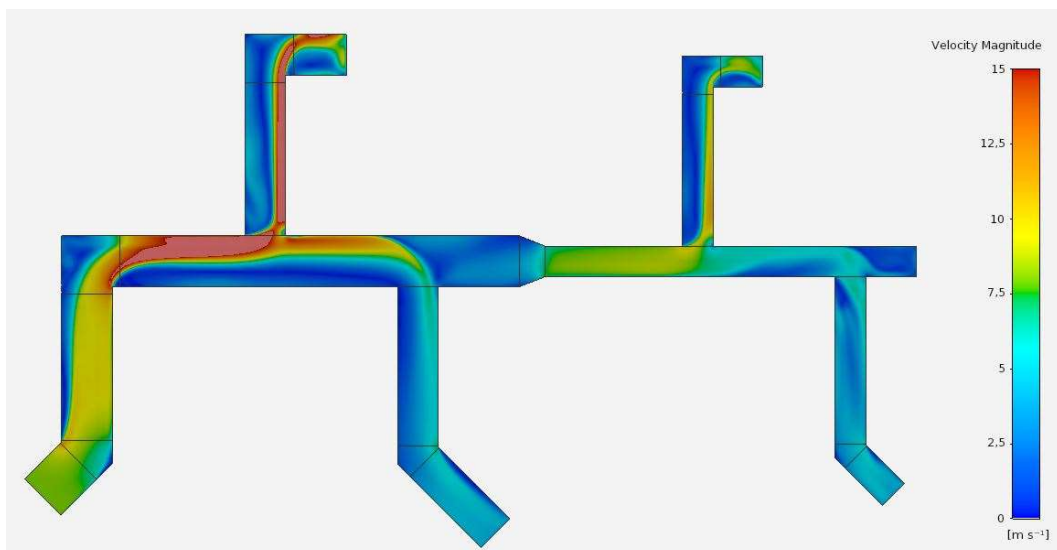
6.1 Tarkastelu 1.1

Tarkastelun 1.1 virtaussimuloinnin kanaviston kokonaispainejakauma on esitetty kuviossa 25. Painejakauman paineasteikko on esitetty kuvion oikeassa reunassa.



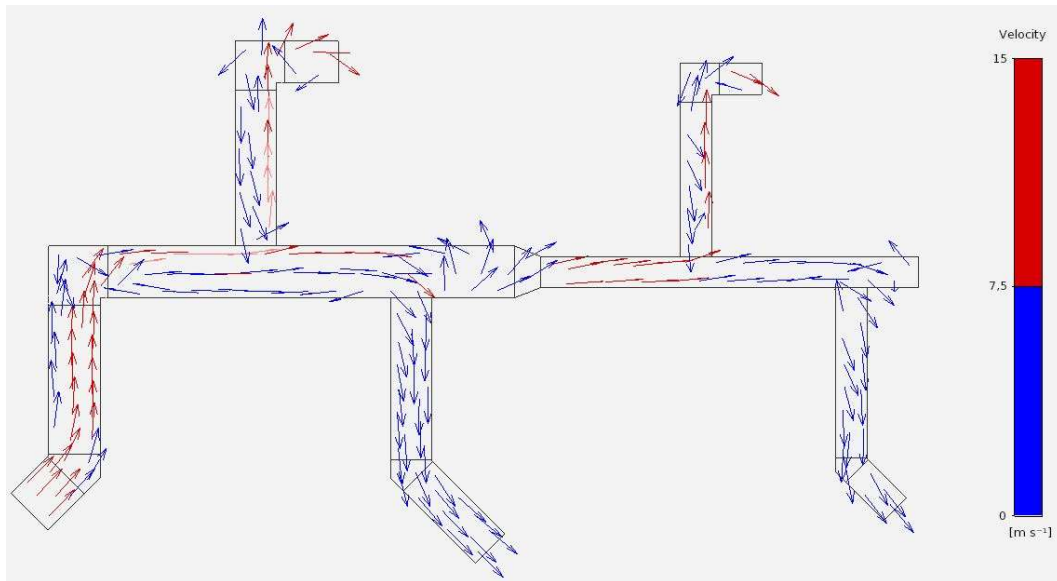
KUVIO 25. Tarkastelun 1.1 kanavistopainejakauma

Tarkastelun 1.1 virtausnopeusjakauma on esitetty kuviossa 26. Virtausnopeusjakauman nopeusasteikko on esitetty kuvion oikeassa reunassa.



KUVIO 26. Tarkastelun 1.1 virtausnopeusjakauma.

Tarkastelun 1.1 virtausnopeusvektorit on esitetty kuviossa 27. Virtausnopeusvektoreiden väri kuvaa nopeusaluetta kuvion oikeassa laidassa olevan asteikon mukaisesti. Vektorit ovat pituudeltaan vakiot.



KUVIO 27. Tarkastelun 1.1 virtausnopeusvektorit.

Tarkastelun 1.1 käsinlaskenta- ja MagiCAD-laskentatulokset on esitetty liitteessä 5. Taulukossa 6 on esitetty eri laskentamenetelmillä lasketut haarakanavien ja runkokanavan kokonaispainehäviöt.

TAULUKKO 6. Tarkastelun 1.1 painehäviöt (Pa)

	Käsinlaskenta ASHRAE	Käsinlaskenta CIBSE	MagiCAD for AutoCAD	ANSYS Discovery AIM
Haara 1	50	24	55	133
Haara 2	20	19	27	4
Haara 3	39	23	55	41
Haara 4	16	17	20	11
Runko	73	70	95	91

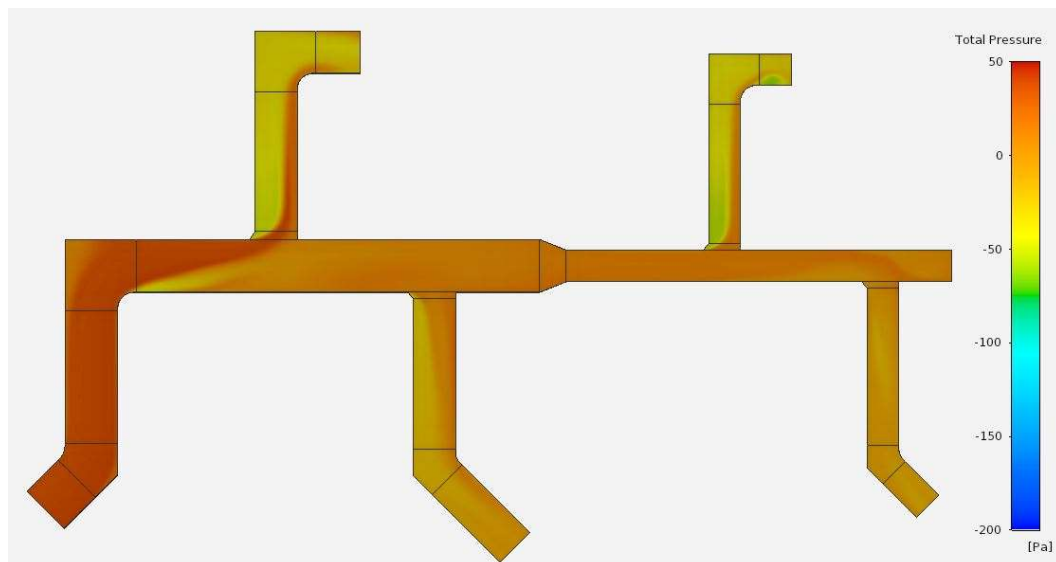
Taulukossa 7 on esitetty kuinka paljon eri laskentamenetelmien painehäviötulokset eroavat prosentuaalisesti MagiCAD for AutoCAD -suunnitteluohjelmiston tuloksista.

TAULUKKO 7. Tarkastelun 1.1 painehäviötulokset, referenssinä MagiCAD

	Käsinlaskenta ASHRAE	Käsinlaskenta CIBSE	ANSYS Discovery AIM
Haara 1	9 %	56 %	-143 %
Haara 2	28 %	30 %	86 %
Haara 3	29 %	59 %	25 %
Haara 4	20 %	16 %	45 %
Runko	24 %	26 %	5 %

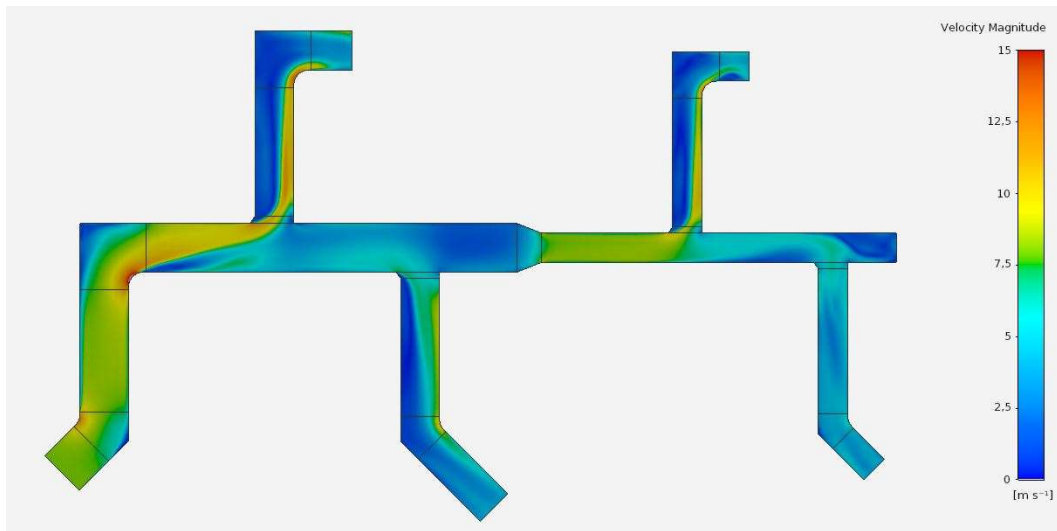
6.2 Tarkastelu 1.2

Tarkastelun 1.2 virtaussimuloidun kanaviston kokonaispainejakauma on esitetty kuviossa 28. Painejakauman paineasteikko on esitetty kuvion oikeassa reunassa.

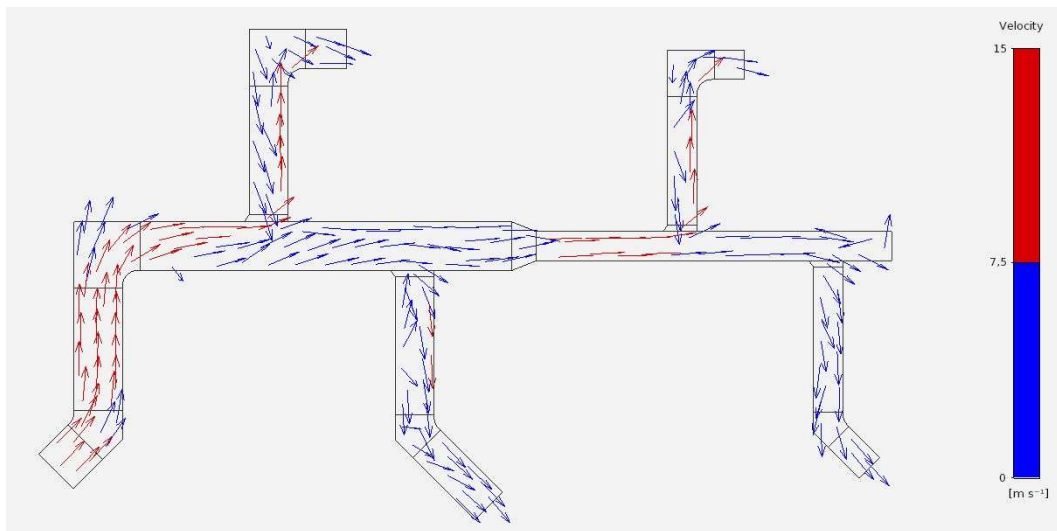


KUVIO 28. Tarkastelun 1.2 kanavistopainejakauma.

Tarkastelun 1.2 virtausnopeusjakauma on esitetty kuviossa 29 ja virtausnopeusvektorit kuviossa 30.



KUVIO 29. Tarkastelun 1.2 virtausnopeusjakauma



KUVIO 30. Tarkastelun 1.2 virtausnopeusvektorit

Tarkastelun 1.2 käsinlaskenta- ja MagiCAD-lasketatulokset on esitetty liitteessä 6. Tarkastelun 1.2 lasketut painehäviöt on esitetty taulukossa 8.

TAULUKKO 8. Tarkastelun 1.2 painehäviöt (Pa)

	Käsinlaskenta ASHRAE	Käsinlaskenta CIBSE	MagiCAD for AutoCAD	ANSYS Discovery AIM
Haara 1	38	16	49	37
Haara 2	15	12	24	13
Haara 3	32	14	49	26
Haara 4	12	10	17	8
Runko	69	63	56	35

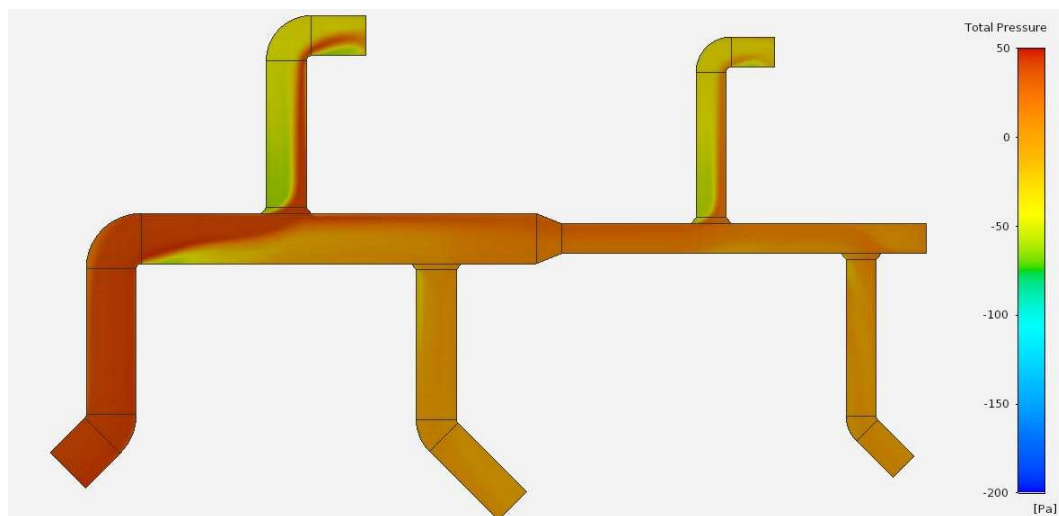
Taulukossa 9 on esitetty eri laskentatapojen vertailu MagiCAD for AutoCAD -suunnitteluohjelmiston tuloksiin.

TAULUKKO 9. Painehäviötulokset, referenssinä MagiCAD.

	Käsinlaskenta ASHRAE	Käsinlaskenta CIBSE	ANSYS Discovery AIM
Haara 1	22 %	67 %	24 %
Haara 2	40 %	51 %	45 %
Haara 3	35 %	72 %	47 %
Haara 4	30 %	37 %	55 %
Runko	-23 %	-13 %	38 %

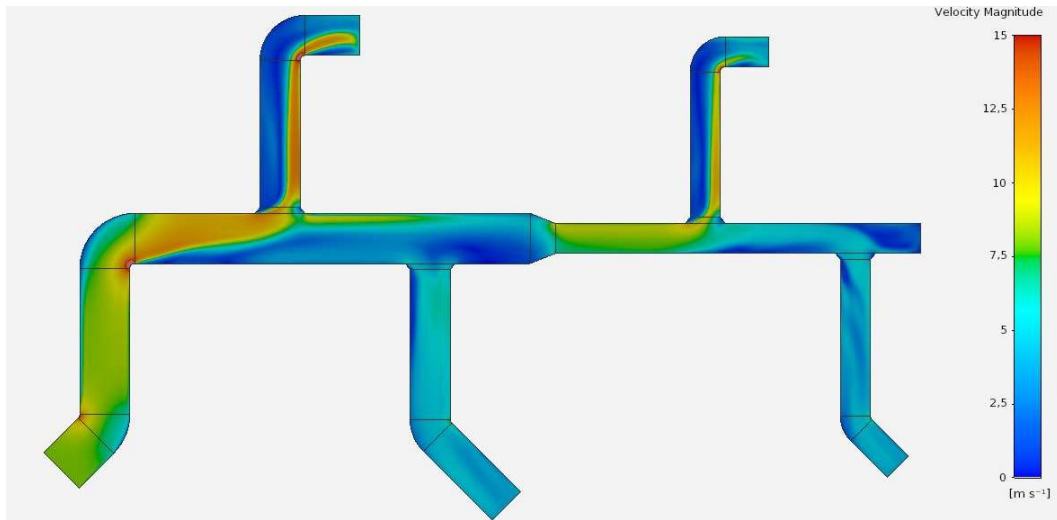
6.3 Tarkastelu 1.3

Tarkastelun 1.3 kanaviston virtaussimuloinnin kokonaispainejakauma on esitetty kuviossa 31.

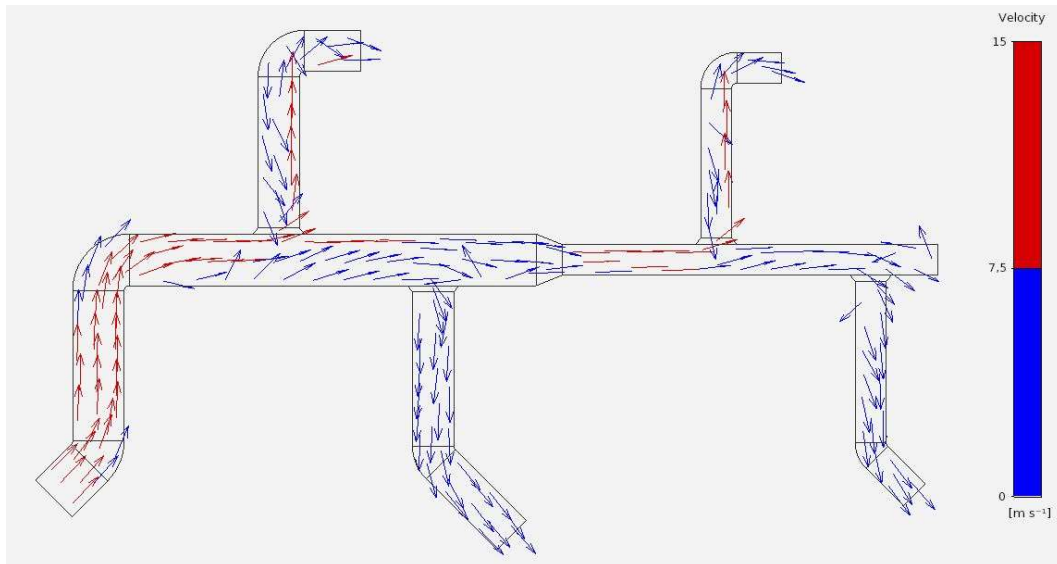


KUVIO 31. Tarkastelun 1.3 kanavistopainejakauma.

Tarkastelun 1.3 virtausnopeusjakauma on esitetty kuviossa 32 ja virtausnopeusvektorit kuviossa 33.



KUVIO 32. Tarkastelun 1.3 virtausnopeusjakauma



KUVIO 33. Tarkastelun 1.3 virtausnopeusvektorit

Tarkastelun 1.3 käsinlaskenta- ja MagiCAD-laskentatulokset on esitetty liitteessä 7. Tarkastelun 1.3 lasketut painehäviöt on esitetty taulukossa 10.

TAULUKKO 10. Tarkastelun 1.3 painehäviöt (Pa)

	Käsinlaskenta ASHRAE	Käsinlaskenta CIBSE	MagiCAD for AutoCAD	ANSYS Discovery AIM
Haara 1	36	14	43	46
Haara 2	14	11	21	9
Haara 3	30	11	43	30
Haara 4	12	10	14	9
Runko	67	52	22	30

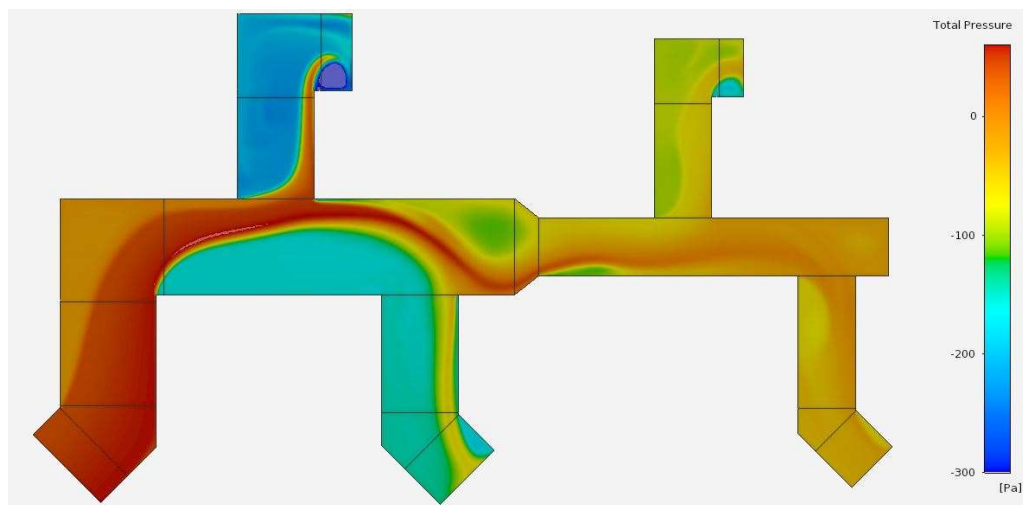
Taulukossa 11 on esitetty eri laskentatapojen vertailu MagiCAD-suunnitteluohjelmiston tuloksiin.

TAULUKKO 11. Painehäviötulokset, referenssinä MagiCAD.

	Käsinlaskenta ASHRAE	Käsinlaskenta CIBSE	ANSYS Discovery AIM
Haara 1	16 %	67 %	-8 %
Haara 2	32 %	49 %	58 %
Haara 3	30 %	73 %	29 %
Haara 4	13 %	25 %	-32 %
Runko	-211 %	-141 %	-39 %

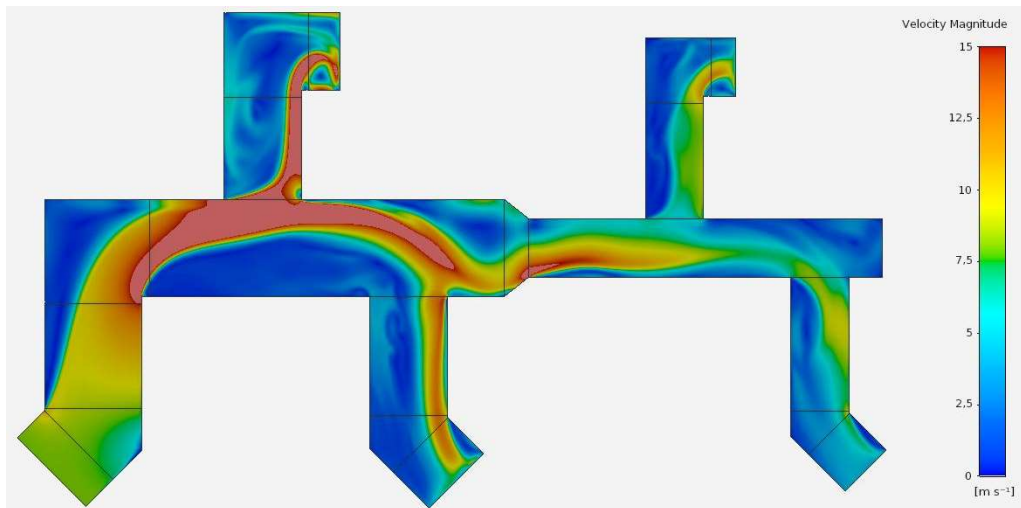
6.4 Tarkastelu 2.1

Tarkastelun 2.1 kanaviston virtaussimuloinnin kokonaispainejakauma on esitetty kuviossa 34.

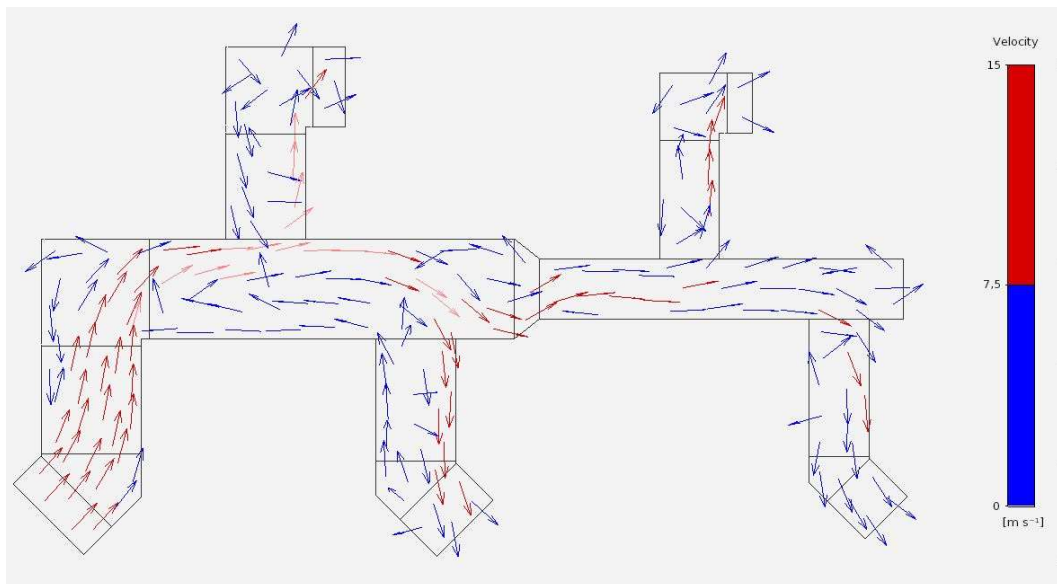


KUVIO 34. Tarkastelun 2.1 kanavistopainejakauma.

Tarkastelun 2.1 kanaviston virtaussimuloinnin virtausnopeusjakauma on esitetty kuviossa 35 ja virtausnopeusvektorit kuviossa 36.



KUVIO 35. Tarkastelun 2.1 kanaviston virtausnopeusjakauma



KUVIO 36. Tarkastelun 2.1 virtausnopeusvektorit

Tarkastelun 2.1 käsinlaskenta- ja MagiCAD-lasketatulokset on esitetty liitteessä 8. Tarkastelun 2.1 lasketut painehäviöt on esitetty alla olevassa taulukossa.

TAULUKKO 12. Tarkastelun 2.1 painehäviöt (Pa)

	Käsinlaskenta ASHRAE	Käsinlaskenta CIBSE	MagiCAD for AutoCAD	ANSYS Discovery AIM
Haara 1	51	25	55	151
Haara 2	20	19	27	-16
Haara 3	40	24	55	47
Haara 4	16	17	20	6
Runko	80	78	97	67

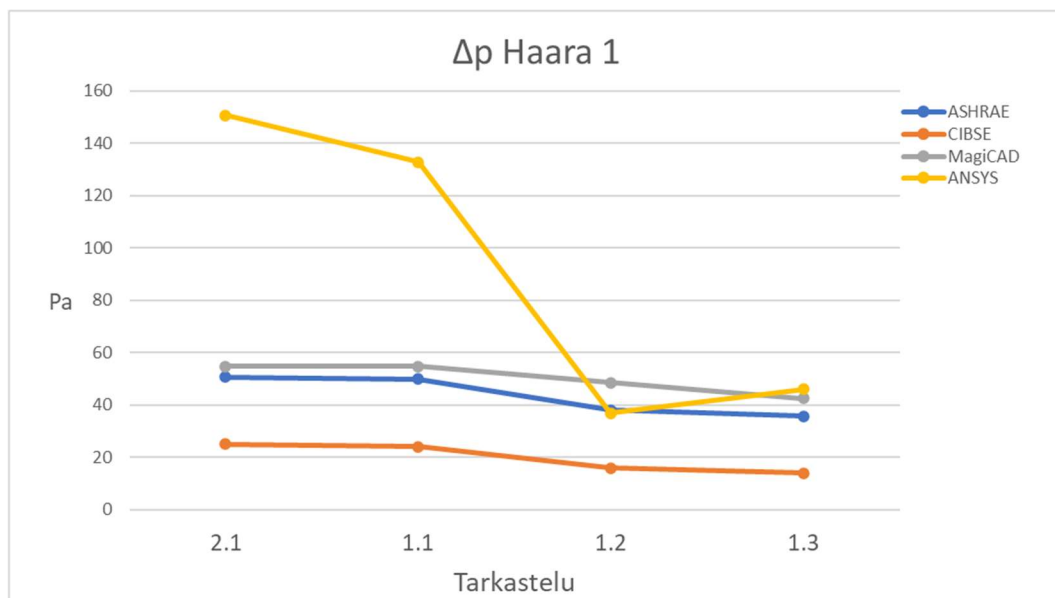
Taulukossa 13 on esitetty eri laskentamenetelmien vertailu MagiCAD-suunniteluohjelmiston tuloksiin.

TAULUKKO 13. Painehäviötulokset, referenssinä MagiCAD

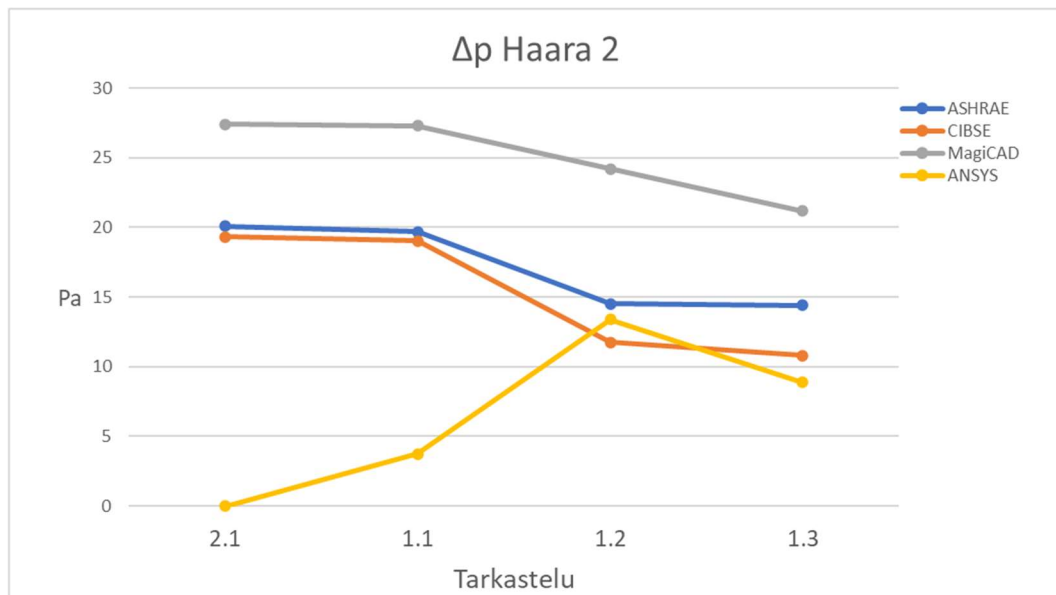
	Käsinlaskenta ASHRAE	Käsinlaskenta CIBSE	ANSYS Discovery AIM
Haara 1	7 %	54 %	-176 %
Haara 2	27 %	29 %	158 %
Haara 3	28 %	57 %	14 %
Haara 4	18 %	15 %	69 %
Runko	18 %	20 %	9 %

6.5 Haarakohtaiset tulokset

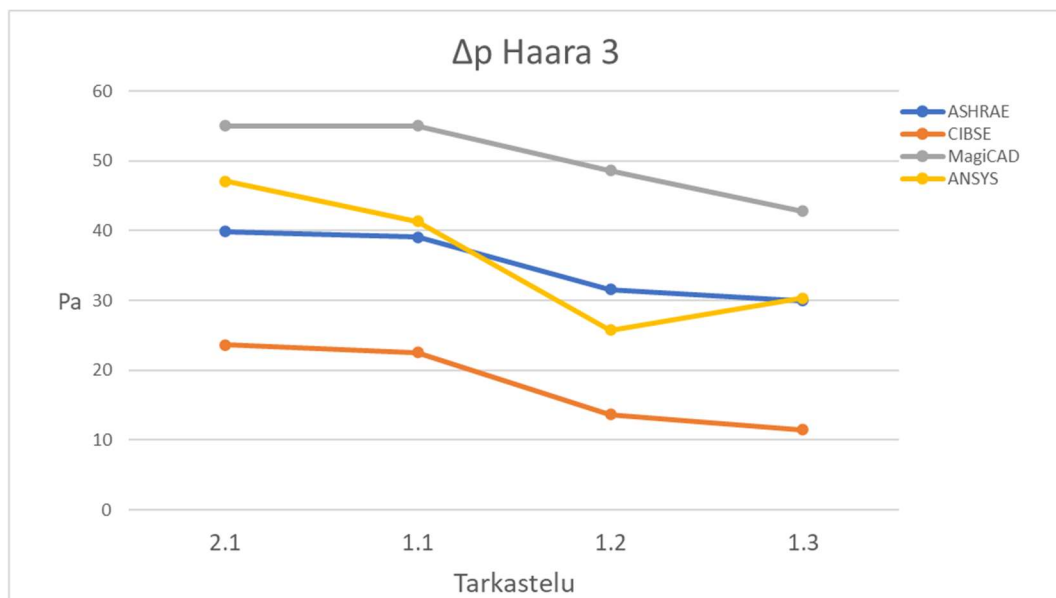
Lasketatulosten perusteella luotiin kuvaajat, joissa esitetään eri laskentamenetelmien tulokset eri tarkasteluiden välillä. Kuvaajista nähdään, miten kanavistogeometrian muutokset vaikuttavat eri mitoitusmenetelmien painehäviötuloksiin. Tulosvertailut on esitetty kuvioissa 37-41.



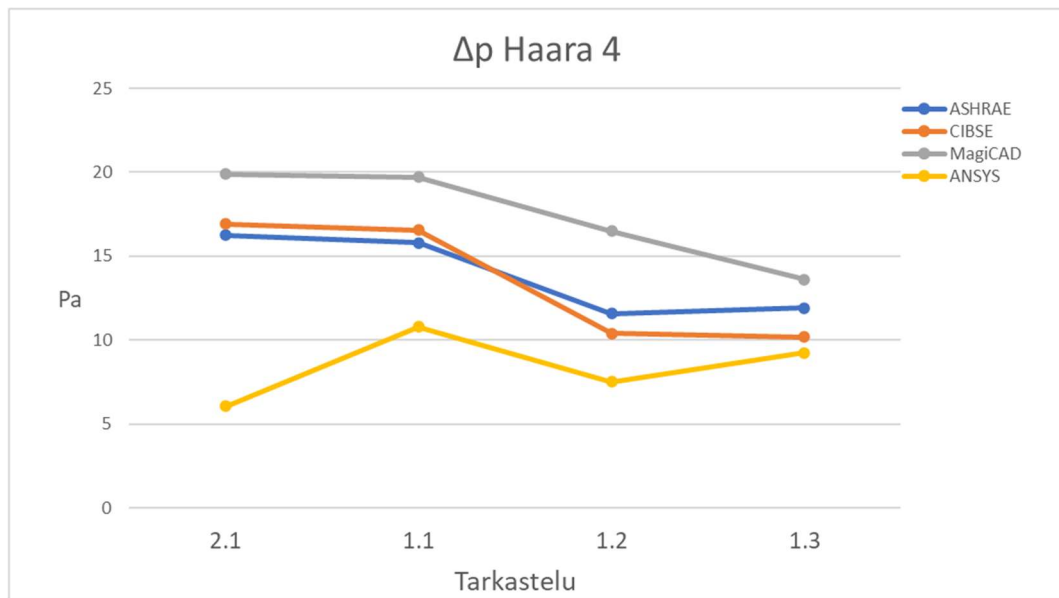
KUVIO 37. Haaran 1 painehäviökuvaaja



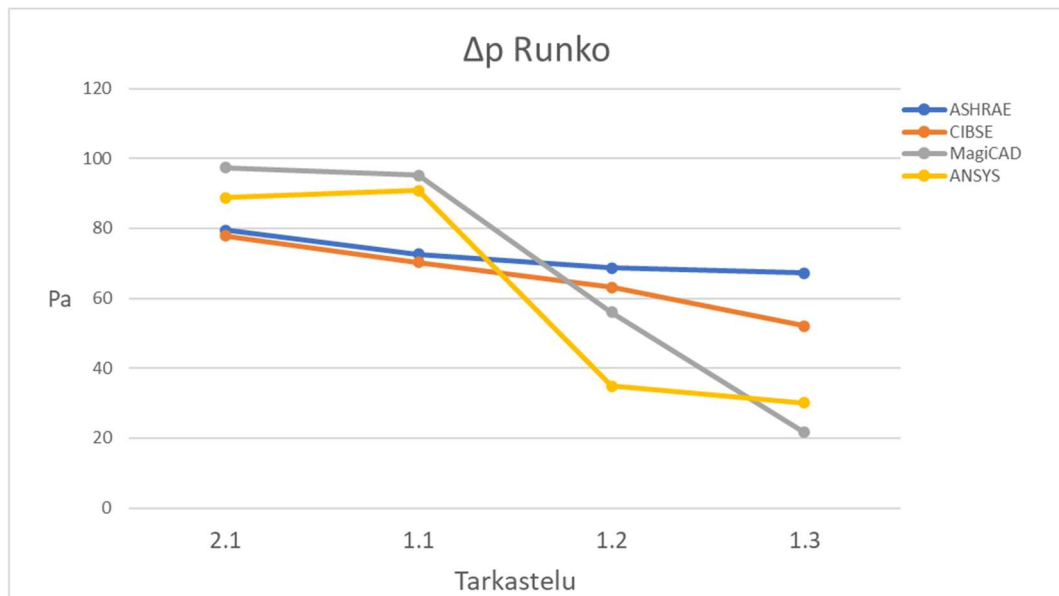
KUVIO 38. Haaran 2 painehäviökuvaaja



KUVIO 39. Haaran 3 painehäviökuvaaja



KUVIO 40. Haaran 4 painehäviökuvaaja



KUVIO 41. Runkokanavan painehäviökuvaaja

6.6 Tulosten analysointi

Lasketatulokset osoittavat, että MagiCAD-suunnitteluohjelmiston painehäviölaskenta tuottaa pääsääntöisesti suurimmat painehäviötulokset. Painehäviötulosten suuruutta käsinlaskentaan verrattuna aiheuttaa haarakanavissa lähtökaulusten painehäviöt, jotka ovat laskennan mukaan vakiot, vaikka tarkastelujen 1.1-1.3 mukaiset lähtökauluksen geometriat on piirtovaiheessa valittu.

Käsinlaskentatarkastelujen tuloserot CIBSEn ja ASHRAEn välillä aiheutuvat käytetyistä kertavastusluvusta. ASHRAEn ilmoittamat kertavastusluvut ovat suuremmat, jolloin myös painehäviötulokset ovat suuremmat.

Tarkasteluissa 1.1 ja 2.1, joissa kanavaosien muodot ovat jyrkät, jouduttiin tarkastelupintojen painehäviötuloksia keskiarvottamaan, mikä heikentää saavutettua tulostarkkuutta. Kyseisten tarkastelujen tulosten visualisoinnista nähdään, että virtaus törmäilee jyrkkien muotojen takia kanavaseinämiin, mikä aiheuttaa virtauksen turbulენტtisuuden ja nopeuden kasvua. Voimakas pyörteily vaikeuttaa turbulენტtisuuden mallintamista ja laskentaa, jolloin iteroitujen painehäviötulosten hajonta ja epätarkkuus kasvavat. Kyseisten tarkastelujen painehäviötulokset ovat haarassa 1 huomattavasti suuremmat ja haarassa 2 pienemmät kuin muilla laskentamenetelmillä. Tarkastelun 2.1 haaran 2 painehäviö on virtauslaskentatulosten mukaan negatiivista, mikä tarkoittaa, että kyseisen kanaviston haarassa 2 ilman kuuluisi virrata väärään suuntaan.

ANSYS-simulointiohjelmistoilla luoduista paine- ja nopeusvisualisoinneista nähdään, että luoduissa kanavistoissa virtaus ei ehdi tasaantua runkokanavan 90°-käyrän jälkeen ennen ensimmäistä haaraa, mikä estää virtauksen jakautumisen haaroihin tasaisesti.

7 POHDINTA

Tässä työssä tehtyjä ilmanvaihdon suorakaidekanavistojen mitoitusmenetelmien vertailuja ei voida pitää täysin onnistuneena, sillä virtauslaskennan tulostarkkuus jäi tarkasteluissa 1.1 ja 2.1 epätarkaksi ja tarkastelujen painehäviötuloksia jouduttiin keskiarvottamaan. Virtauslaskennassa tarkasteltujen kanavistojen inlet- ja outlet-päihin asetettiin reunaehdoksi virtausnopeus, mikä saattaa aiheuttaa tarkastelujen 1.1 ja 1.2 laskennassa epätarkkuutta, kun laskentamalli yrittää ”pakottaa” virtausta haarakanavaan. Nopeus asetettiin tarkastelun reunaehdoksi siksi, että siten pystyttiin määrittämään halutut ilmamäärät haarakanaville kun kanavan poikkipinta-ala oli tiedossa.

Käsinlaskennan ja MagiCAD for AutoCAD -suunniteluohjelmiston laskentatuloksia voidaan pitää luotettavana. Käsinlaskennassa tuloksen tarkkuuteen vaikuttaa pääasiassa käytetyt kertavastuskertoimet. Kertavastuskertoimissa on jonkin verran eroja julkaisijasta riippuen eikä kaikille suorakaidekanavaosille välttämättä ole ilmoitettu selkeästi kertavastustietoja. Käsinlaskennassa kertavastustietojen käyttäminen vaatii jonkin verran soveltamista, mikä vaikuttaa tulosten luotettavuuteen.

Työn tulokset osoittavat, että MagiCAD-ohjelmistolla mitoitettaessa painehäviötulos on suurempaa kuin muilla tarkastelumenetelmillä. Suorakaidekanaviston suunnittelussa on kuitenkin syytä käyttää jonkinlaista varmuuskerrointa, sillä kanaviston toteutustapoja on monia. Suorakaidekanavan pinta ei usein ole tasainen kanavan vaipan jäykistysprofiilin takia, mikä hieman lisää virtauksessa syntyvää painehäviötä.

Työn tulokset osoittavat, että suorakaidekanaviston suunnittelussa kaarevilla kanavaosan muodoilla on selkeä vaikutus kanaviston virtausominaisuuksiin. Suunnittelun aikaisessa kanavistomitoituksessa on syytä tunnistaa myös piirtekniset valinnat ja niiden vaikutukset kanavistosuunnittelulle sekä toteutukselle. Mikäli kanavisto suunnitellaan piirtovaiheessa kaarevilla kanavaosan muodoilla, mutta toteutetaan jyrkillä tai osittain jyrkillä muodoilla, on riskinä, että ilmanvaihdon suunnitelmanmukaista toimintaa ei saavuteta. Jyrkkiä kanavaosan muotoja

käytettäessä virtauksen törmäily, nopeus ja turbulenttisuus lisääntyvät, mikä aiheuttaa painehäviön lisäksi kanaviston aiheuttamaa melua ympäristöön.

Vaikka työn virtauslaskennassa ei täysin onnistuttu, voidaan suuntaa-antavien tulosten perusteella todeta, että virtauslaskenta tarjoaa hyödyllisen työkalun suunnitteluun suunnitteluohjelmiston rinnalle. Virtaussimuloinnin avulla pystytään tarkastelemaan virtauksen käyttäytymistä eri tilanteissa yksityiskohtaisella tasolla ja välttämään mahdolliset ongelmat jo ennen kuin ne toteutuksessa syntyvät.

Suorakaidekanaviston suunnittelua tai mitoitusta käsittäviä opinnäytetöitä ei suomeksi ole juurikaan tehty. Englanninkielistä tietoa suorakaidekanavista löytyy runsaasti, esimerkiksi ASHRAEn ja CIBSEn dokumenteista ja erilaisista tutkimuksista. Ongelmana kuitenkin on dokumenttien ja oppaiden maksullisuus, mikä vaikeuttaa tiedon saatavuutta. Saatavilla olevissa oppaissa kanavaosien komponenttitiedot pätevät kuitenkin vain tietyntilanteille osille ja toteutuksille, jolloin virtausominaisuusdataa voidaan pitää usein vain suuntaa-antavana. Tavannomaisessa kanavistosuunnittelussa ei esimerkiksi täysin tarkkoja kertavastuslukuja välttämättä tarvita, sillä Ympäristöministeriön asetus 1009/2017 sallii toteutuneelle ilmavirralle 10 prosentin poikkeaman järjestelmä- ja huonekohtaisesti suunnitelluista ilmamääristä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella eri mitoitusmenetelmien laskenta- ja tuloserot suorakaidekanaviston painehäviön laskennassa. Virtauslaskennasta ei opinnäytetyöntekijällä ollut kokemusta ennen opinnäytetyöprosessin alkua, mikä voi näkyä laskenta-asetusten valinnassa ja siten tuloksissa. Tässä työssä virtauslaskennassa ei saavutettu täysin riittävää tulostarkkuutta, ja se vähentää tämän opinnäytetyön merkittävyyttä. Työstä saadaan kuitenkin hyödyllistä tietoa eri menetelmien laskentaperiaatteista ja suorakaidekanaviston eri toteutustavoista, mistä voi olla hyötyä suorakaidekanaviston suunnittelijalle.

LÄHTEET

Aalto University, 2019. CHEM-A1120 Virtaustekniikka ja lämmönsiirto. Luentomateriaali. Luettu 15.2.2021.

<https://mycourses.aalto.fi/mod/folder/view.php?id=390168>

Ai, Z. T., Mak, M. 2013. Research Article: Pressure Losses across Multiple Fittings in Ventilation Ducts. Department of Building Services Engineering. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.

ANSYS INC, 2021. Fluent Theory Guide. Release R1.

ASHRAE Duct Fitting Database. Mobile App Apple. Versio 4.0. Copyright 2019. Ladattu 19.4.2021.

ASHRAE INC, 2009. ASHRAE Handbook. Fundamentals. SI-Edition. Atlanta, GA: ASHRAE Research.

CIBSE, 2001. Reference data. CIBSE Guide C. 1. painos. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Engineering ToolBox, 2003. Moody Diagram. Luettu 22.2.2021.

https://www.engineeringtoolbox.com/moody-diagram-d_618.html

Inkeri, E. 2014. Höyryturbiinin kanavistojen numeerinen virtauslaskenta. Energiatekniikan koulutusohjelma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Kettunen, S. 2017. Mielivaltaisista polyedreista muodostetut CFD-laskentahilat. Energiatekniikan koulutusohjelma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö.

LearnCAX. N.d. Basics of Y plus, Boundary Layer and Wall Function in Turbulent Flows. Luettu 5.4.2021.

<https://www.learncax.com/knowledge-base/blog/by-category/cfd/basics-of-y-plus-boundary-layer-and-wall-function-in-turbulent-flows>

Löhner, R. 2008. Applied Computational Fluid Dynamics Techniques: An Introduction Base on Finite Element Methods. 2. Painos. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd.

MagiCAD Group Oy, 2020. MagiCAD Ventilation and Piping 2020 UR-2 User guide. Luettu: 1.3.2021.

<https://help.magicad.com/mcaca/2020-UR-2/EN/VP/>

Oy Lindab AB. n.d. Suorakaidekanavat. Tuote-esite. Luettu: 22.2.2021.

<https://itsolution.lindab.com/lindabwebproductsdoc/pdf/documentation/ads/fin/technical/11-rectangular-fi.pdf>

Pohjolainen, J. 2019. Kontrollitilavuusmenetelmän adaptiivisuus, virhelähteet ja virhearviot. Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta. Tampereen yliopisto. Diplomityö.

Sandberg, E. 2016. 2. painos. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Ilmastointitekniikka osa 2. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

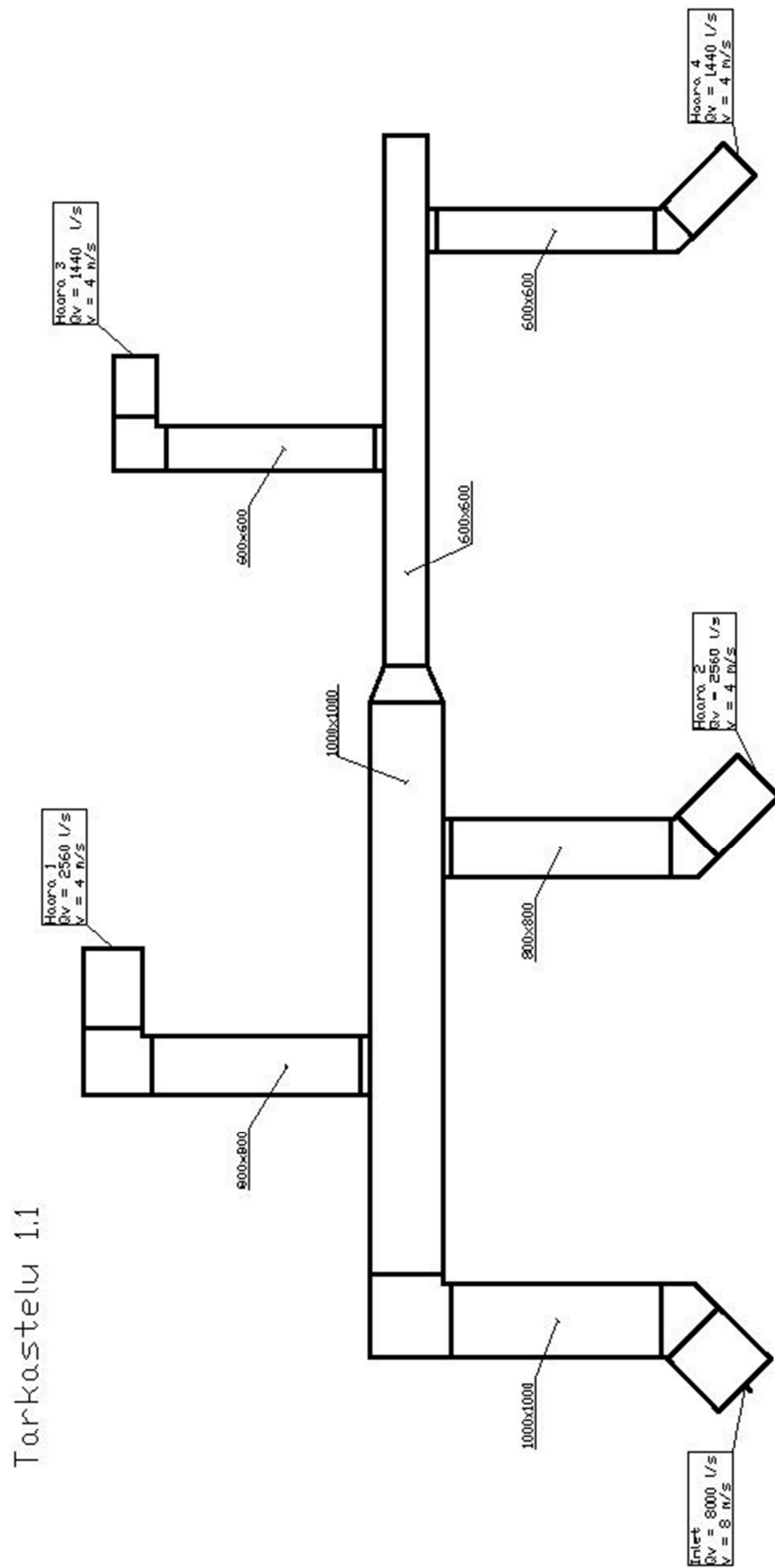
Seppänen, O. 1988. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. LVI-Kustannus Oy.

Sisäilmastoseminaari. 2018. SIY Raportti 36. Helsinki: Sisäilmayhdistys Ry.

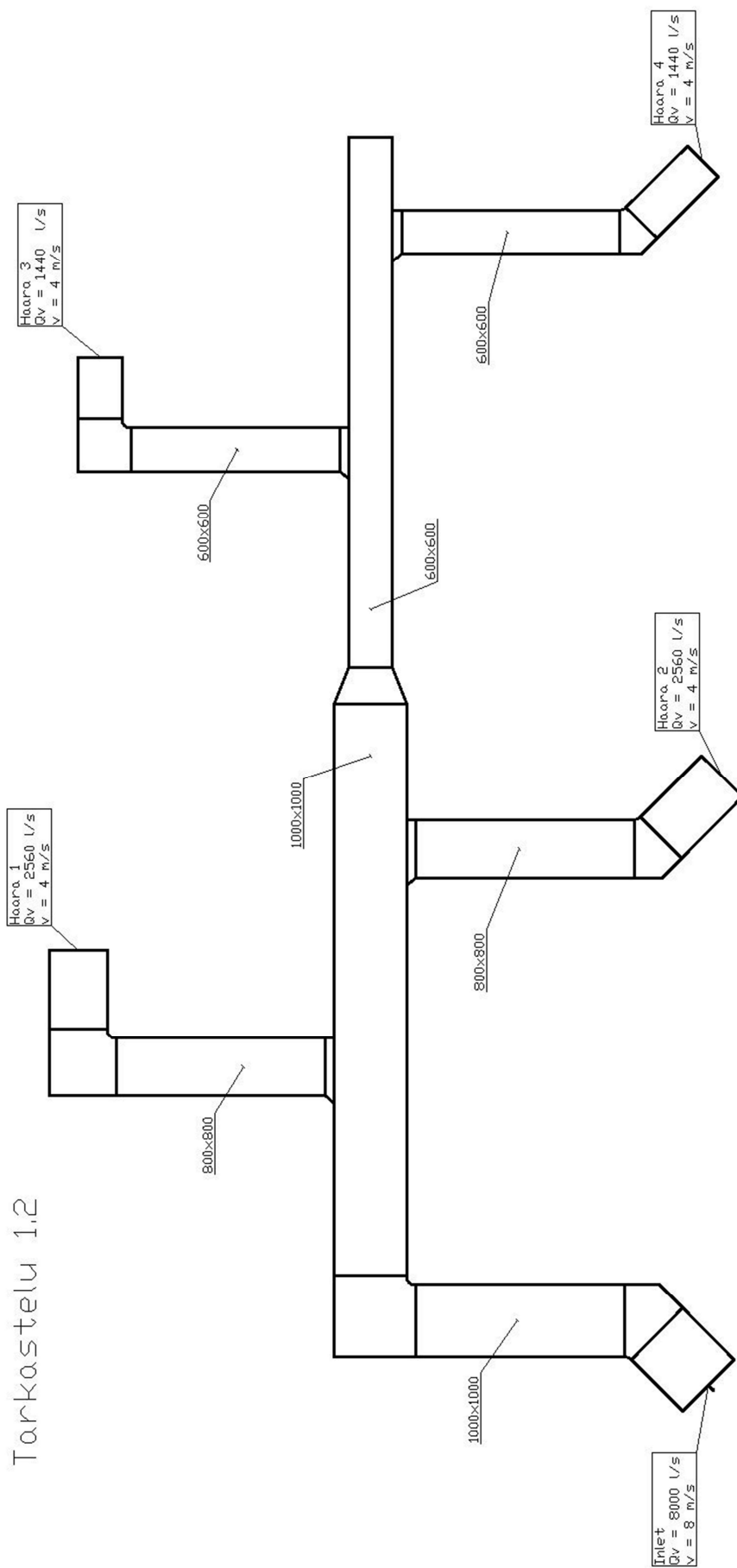
Versteeg, H.K, Malalasekera, W. 2007. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. 2.painos. Harlow: Pearson Education Limited.

LIITTEET

Liite 1. Tarkastelun 1.1 kanavisto

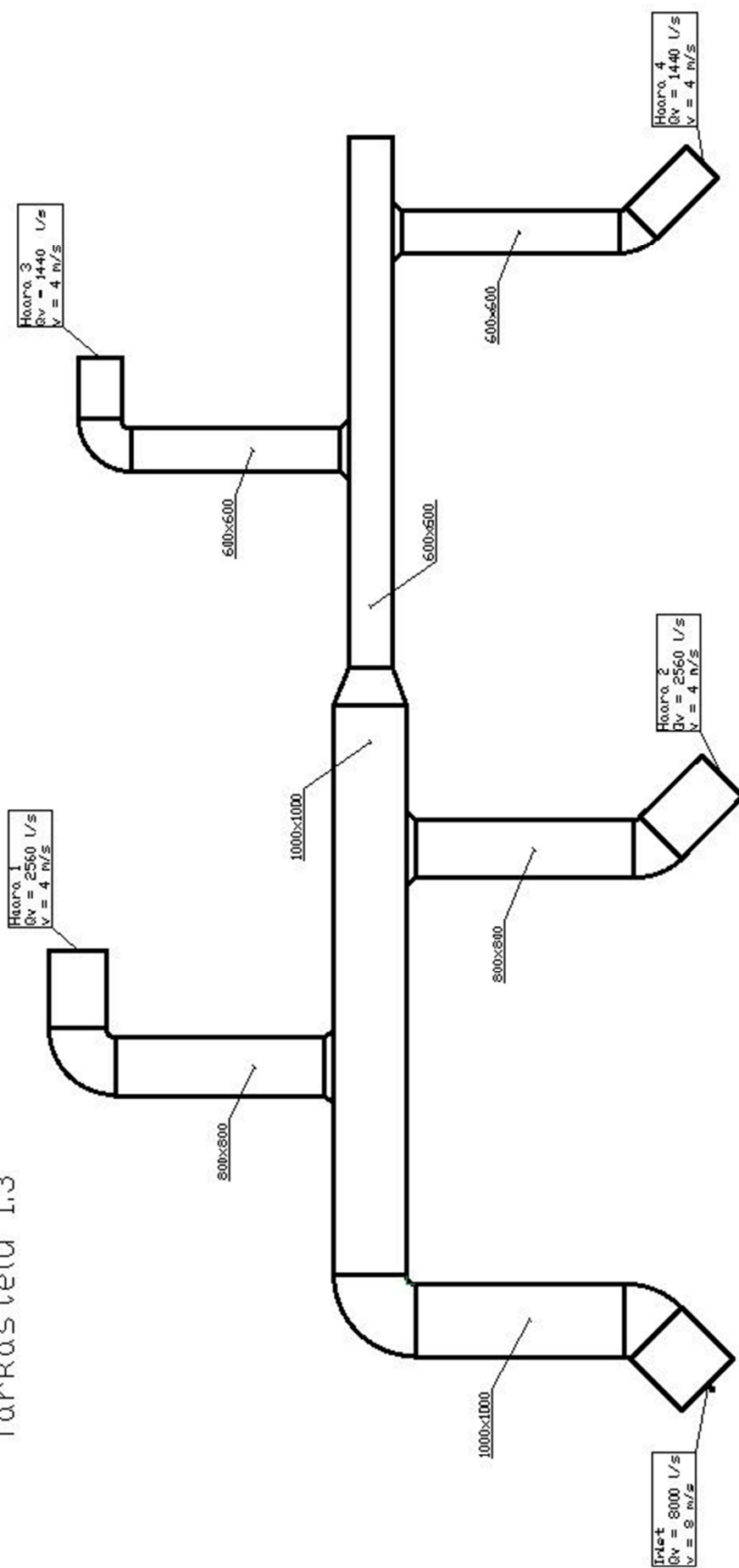


Liite 2: Tarkastelun 1.2 kanavisto

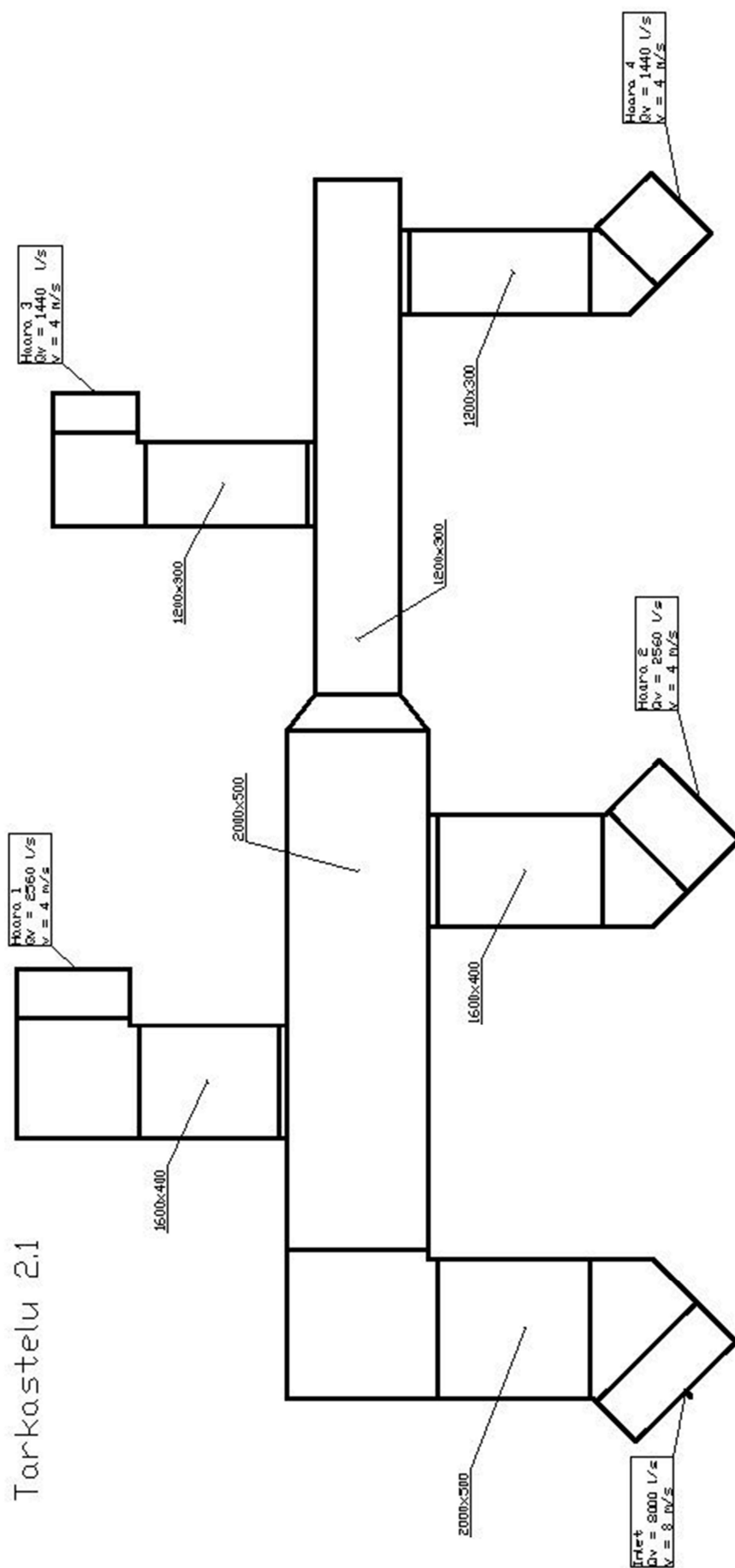


Liite 3: Tarkastelun 1.3 kanavisto

Tarkastelu 1.3



Liite 4: Tarkastelun 2.1 kanavisto



Liite 5: Tarkastelun 1.1 käsinlaskenta ja MagiCAD-painehäviö

Lähtökäytännön mahdollisesti runkoon vaikuttava painehäviön kertavastuskertoimen merkattu suoran kanavan osuudelle kertavastukseen.

Tarkastelu 1.1

Nro.	Kanavaosa	a mm	b mm	A m ²	D _h m	q _v dm ³ /s	U (m/s)	l m	Re	k/D _h	λ	ASHRAE		CIBSE		MagiCAD			
												ζ	ΔP _ζ Pa	ζ	ΔP _ζ Pa	ζ	ΔP _ζ Pa	ζ	ΔP _ζ Pa
1	Kanava 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8	1,0	513796	0,00015	0,015	0,0	0,6	0,0	0,6	0,6	0,6		
2	KY45 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8		513796	0,00015	0,015	0,0	0,6	0,34	12,9	12,9	12,1	28,4	
3	SK 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8	2,9	513796	0,00015	0,015	1,6	1,6		0,0	0,0	1,6	1,6	
4	KY90 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8		513796	0,00015	0,015	0,0	0,6	1,15	43,6	43,6	45,1	56,8	
5	SK 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8	2,9	513796	0,00015	0,015	1,6	1,6		0,0	0,0	1,6	1,6	
6	LK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4		205518	0,0001875	0,017	0,0	0,6	4,03	38,2	38,2	11,9	39,8	
7	SK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	2,9	205518	0,0001875	0,017	0,6	0,6		0,0	0,0	0,6	0,6	
8	KY90 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4		205518	0,0001875	0,017	0,0	0,6	1,15	10,9	10,9	11,3	14,2	
9	SK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	1,1	205518	0,0001875	0,017	0,2	0,2		0,0	0,0	0,2	0,2	
10	SK 1000x1000	1000	1000	1	1	5440	5,44	3,0	349381	0,00015	0,016	0,8	0,8	0,07	1,2	2,1	0,8	0,6	
11	LK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4		205518	0,0001875	0,017	0,0	0,6	1,65	15,6	15,6	15,2	19,4	
12	SK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	3,0	205518	0,0001875	0,017	0,6	0,6		0,0	0,0	0,6	0,6	
13	KY45 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4		205518	0,0001875	0,017	0,0	0,6	0,34	3,2	3,2	3,0	7,1	
14	SK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	1,2	205518	0,0001875	0,017	0,2	0,2		0,0	0,0	0,2	0,2	
15	SK 1000x1000	1000	1000	1	1	2880	2,88	2,0	184967	0,00015	0,017	0,2	0,2	0,4	2,0	2,1	0,2	0,1	
16	MY 1000x1000/600x600	1000	1000	1	1	2880	2,88	0,5	184967	0,00015	0,017	0,0	0,0		0,2	0,3	0,2	0,2	
17	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	2880	8	3,0	308278	0,00025	0,0165	3,1	3,1		0,0	0,0	3,1	2,8	
18	LK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4		154139	0,00025	0,018	0,0	0,6	2,86	27,1	27,1	10,2	39,8	
19	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	2,9	154139	0,00025	0,018	0,8	0,8		0,0	0,0	0,8	0,8	
20	KY90 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4		154139	0,00025	0,018	0,0	0,6	1,15	10,9	10,9	11,3	14,2	
21	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	0,9	154139	0,00025	0,018	0,2	0,2		0,0	0,0	0,2	0,2	
22	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	3,3	154139	0,00025	0,018	0,9	0,9	0,4	3,8	4,7	3,8	4,7	0,7
23	LK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4		154139	0,00025	0,018	0,0	0,6	1,2	11,4	11,4	12,3	11,4	
24	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	3,0	154139	0,00025	0,018	0,9	0,9		0,0	0,0	0,9	0,9	
25	KY45 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4		154139	0,00025	0,018	0,0	0,6	0,34	3,2	3,2	3,0	7,1	
26	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	1,2	154139	0,00025	0,018	0,3	0,3		0,0	0,0	0,3	0,3	

Painehäviö

	ASHRAE	CIBSE	MagiCAD
Haara 1	49,9	24,0	54,8
Haara 2	19,7	19,0	27,3
Haara 3	39,1	22,6	55,0
Haara 4	15,8	16,5	19,7
Runko	72,6	70,2	95,2

Liite 6: Tarkastelun 1.2 käsinlaskenta ja MagiCAD-painehäviö

Lähtökauluksen mahdollisesti runkoon vaikuttava painehäviön kertavastuskerroin merkattu suoran kanavan osuudelle kertavastukseen.

Tarkastelu 1.2

Nro.	Kanavaosa	ASHRAE										CIBSE			MagiCAD				
		a	b	A	D _h	q _v	U	l	Re	k/D _h	λ	ΔP _λ	ζ	ASHRAE	ΔP _ζ	Pa	ΔP _{yht}	Pa	Pa
1	Kanava 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8	1,0	513796	0,00015	0,015	0,6	0,0	0,0	0,6	0,0	0,6	0,6	0,6
2	KY45 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8		513796	0,00015	0,015	0,0	0,44	16,7	16,7	0,45	17,1	17,1	15,3
3	SK 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8	2,9	513796	0,00015	0,015	1,6							1,6
4	KY90 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8		513796	0,00015	0,015	0,0	0,88	33,3	33,3	0,9	34,1	34,1	30,7
5	SK 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8	2,9	513796	0,00015	0,015	1,6							1,4
6	LK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4		205518	0,0001875	0,017	0,0	3,1	29,4	29,4	0,7	6,6	6,6	39,8
7	SK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	2,9	205518	0,0001875	0,017	0,6							0,6
8	KY90 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4		205518	0,0001875	0,017	0,0	0,83	7,9	7,9	0,9	8,5	8,5	7,9
9	SK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	1,1	205518	0,0001875	0,017	0,2							0,2
10	SK 1000x1000	1000	1000	1	1	5440	5,44	3,0	349381	0,00015	0,016	0,8	0,15	2,6	3,5		0,0	0,8	0,6
11	LK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4		205518	0,0001875	0,017	0,0	1,03	9,8	9,8	0,7	6,6	6,6	19,4
12	SK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	3,0	205518	0,0001875	0,017	0,6							0,6
13	KY45 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4		205518	0,0001875	0,017	0,0	0,415	3,9	3,9	0,45	4,3	4,3	4
14	SK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	1,2	205518	0,0001875	0,017	0,2							0,2
15	SK 1000x1000	1000	1000	1	1	2880	2,88	2,0	184967	0,00015	0,017	0,2	0,1	0,5	0,7		0,0	0,2	0,1
16	MY 1000x1000/600x600	1000	1000	1	1	2880	2,88	0,5	184967	0,00015	0,017	0,0				0,05	0,2	0,3	2,2
17	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	2880	8	3,0	308278	0,00025	0,0165	3,1							2,8
18	LK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4		154139	0,00025	0,018	0,0	2,46	23,3	23,3	0,6	5,7	5,7	39,8
19	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	2,9	154139	0,00025	0,018	0,8							0,8
20	KY90 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4		154139	0,00025	0,018	0,0	0,76	7,2	7,2	0,73	6,9	6,9	7,8
21	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	0,9	154139	0,00025	0,018	0,2							0,2
22	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	3,3	154139	0,00025	0,018	0,9	0,67	6,3	7,3	0,3	2,8	3,8	0,7
23	LK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4		154139	0,00025	0,018	0,0	0,73	6,9	6,9	0,6	5,7	5,7	11,4
24	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	3,0	154139	0,00025	0,018	0,9							0,9
25	KY45 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4		154139	0,00025	0,018	0,0	0,365	3,5	3,5	0,37	3,5	3,5	3,9
26	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	1,2	154139	0,00025	0,018	0,3							0,3

Painehäviö

	ASHRAE	CIBSE	MagiCAD
Haara 1	38,0	16,0	48,5
Haara 2	14,5	11,7	24,2
Haara 3	31,6	13,7	48,6
Haara 4	11,6	10,4	16,5
Runko	68,7	63,2	56,0

Liite 7: Tarkastelu: 1.3 käsinlaskenta ja MagiCAD-painehäviö

Lähtökauluksen mahdollisesti runkoon vaikuttava painehäviön kertavastuskerroin merkattu suoran kanavan osuudelle kertavastukseen.

Tarkastelu 1.3

Nro.	Kanavaosa	a mm	b mm	A m ²	D _h m	q _v dm ³ /s	U (m/s)	l m	Re	k/D _h	λ	ΔP _A Pa	ASHRAE			CIBSE			MagiCAD	
													ζ ASHRAE	ΔP _ζ Pa	ΔP _{yht} Pa	ζ CIBSE	ΔP _ζ	ΔP _{yht} Pa	ζ	ΔP _ζ
1	Kanava 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8	1,0	513796	0,00015	0,015	0,6	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,6	0,6	0,6
2	KY45 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8	0,4	513796	0,00015	0,015	0,0	0,4	15,2	15,2	0,35	13,3	13,3	4	4
3	SK 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8	2,9	513796	0,00015	0,015	1,6	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	1,6	1,6	1,6
4	KY90 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8	0,88	513796	0,00015	0,015	0,0	0,88	33,3	33,3	0,705	26,7	26,7	8	8
5	SK 1000x1000	1000	1000	1	1	8000	8	2,9	513796	0,00015	0,015	1,6	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	1,6	1,6	1,6
6	LK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	3,1	205518	0,0001875	0,017	0,0	3,1	29,4	29,4	0,7	6,6	6,6	39,8	39,8
7	SK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	2,9	205518	0,0001875	0,017	0,6	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,6	0,6	0,6
8	KY90 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	0,59	205518	0,0001875	0,017	0,0	0,59	5,6	5,6	0,7	6,6	6,6	2	2
9	SK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	1,1	205518	0,0001875	0,017	0,2	0,15	2,6	3,5	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2
10	SK 1000x1000	1000	1000	1	1	5440	5,44	3,0	349381	0,00015	0,016	0,8	0,15	2,6	3,5	0,0	0,0	0,8	0,8	0,5
11	LK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	1,03	205518	0,0001875	0,017	0,0	1,03	9,8	9,8	0,7	6,6	6,6	19,4	19,4
12	SK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	3,0	205518	0,0001875	0,017	0,6	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,6	0,6	0,6
13	KY45 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	0,4	205518	0,0001875	0,017	0,0	0,4	3,8	3,8	0,35	3,3	3,3	1	1
14	SK 800x800	800	800	0,64	0,8	2560	4	1,2	205518	0,0001875	0,017	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2
15	SK 1000x1000	1000	1000	1	1	2880	2,88	2,0	184967	0,00015	0,017	0,2	0,1	0,5	0,7	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1
16	MY 1000x1000/600x600	1000	1000	1	1	2880	2,88	0,5	184967	0,00015	0,017	0,0	0,0	0,2	0,3	0,05	0,2	0,3	2,2	2,2
17	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	2880	8	3,0	308278	0,00025	0,0165	3,1	0,0	0,0	3,1	0,0	0,0	3,1	2,7	2,7
18	LK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	2,46	154139	0,00025	0,018	0,0	2,46	23,3	23,3	0,6	5,7	5,7	39,8	39,8
19	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	2,9	154139	0,00025	0,018	0,8	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,8	0,8	0,8
20	KY90 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	0,59	154139	0,00025	0,018	0,0	0,59	5,6	5,6	0,5	4,7	4,7	2	2
21	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	0,9	154139	0,00025	0,018	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2
22	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	3,3	154139	0,00025	0,018	0,9	0,67	6,3	7,3	0,3	2,8	3,8	0,6	0,6
23	LK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	0,73	154139	0,00025	0,018	0,0	0,73	6,9	6,9	0,6	5,7	5,7	11,4	11,4
24	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	3,0	154139	0,00025	0,018	0,9	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,9	0,9	0,9
25	KY45 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	1,2	154139	0,00025	0,018	0,0	0,4	3,8	3,8	0,35	3,3	3,3	1	1
26	SK 600x600	600	600	0,36	0,6	1440	4	1,2	154139	0,00025	0,018	0,3	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,3	0,3	0,3

Painehäviö

	ASHRAE	CIBSE	MagiCAD
Haara 1	35,8	14,1	42,6
Haara 2	14,4	10,8	21,2
Haara 3	30,0	11,5	42,8
Haara 4	11,9	10,2	13,6
Runko	67,2	52,0	21,6

Liite 8: Tarkastelun 2.1 käsinlaskenta ja MagiCAD-painehäviö

Lähtökauluksen mahdollisesti runkoon vaikuttava painehäviön kertavastuserroin merkattu suoran kanavan osuudelle kertavastukseen.

Tarkastelu 2.1

Nro.	Kanavaosa	a mm	b mm	A m ²	D _h m	q _v dm ³ /s	U (m/s)	l m	Re	k/D _h	λ	ΔP _A Pa	ASHRAE		CIBSE		MagiCAD	
													ζ ASHRAE	ΔP _ζ Pa	ζ CIBSE	ΔP _ζ Pa	ζ	ΔP _ζ Pa
1	Kanava 2000x500	2000	500	1	0,8	8000	8	0,8	411037	0,0001875	0,015	0,6	0,0	0,6	0,0	0,6	0,6	0,6
2	KY45 2000x500	2000	500	1	0,8	8000	8	2,2	411037	0,0001875	0,015	0,0	0,38	14,4	0,35	13,3	13,3	28,4
3	SK 2000x500	2000	500	1	0,8	8000	8	2,2	411037	0,0001875	0,015	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	1,6
4	KY90 2000x500	2000	500	1	0,8	8000	8	2,4	411037	0,0001875	0,015	1,7	1,24	47,0	1,31	49,6	49,6	56,8
5	SK 2000x500	2000	500	1	0,8	8000	8	2,4	411037	0,0001875	0,015	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	1,2
6	LK 1600x400	1600	400	0,64	0,64	2560	4	2,0	164415	0,000234375	0,017	0,0	4,03	38,2	1,26	11,9	11,9	39,8
7	SK 1600x400	1600	400	0,64	0,64	2560	4	2,0	164415	0,000234375	0,017	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5
8	KY90 1600x400	1600	400	0,64	0,64	2560	4	2,3	164415	0,000234375	0,017	0,0	1,24	11,7	1,31	12,4	12,4	14,2
9	SK 1600x400	1600	400	0,64	0,64	2560	4	2,3	164415	0,000234375	0,017	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2
10	SK 2000x500	2000	500	1	0,8	5440	4	3,0	279505	0,0001875	0,016	1,1	0,07	1,2	0,0	0,0	1,1	0,5
11	LK 1600x400	1600	400	0,64	0,64	2560	4	2,3	164415	0,000234375	0,017	0,0	1,65	15,6	1,6	15,2	15,2	19,4
12	SK 1600x400	1600	400	0,64	0,64	2560	4	2,3	164415	0,000234375	0,017	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,6
13	KY45 1600x400	1600	400	0,64	0,64	2560	4	2,3	164415	0,000234375	0,017	0,0	0,38	3,6	0,35	3,3	3,3	7,1
14	SK 1600x400	1600	400	0,64	0,64	2560	4	2,3	164415	0,000234375	0,017	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3
15	SK 2000x500	2000	500	1	0,8	2880	2,88	2,0	147973	0,0001875	0,017	0,2	0,4	2,0	0,0	0,0	0,2	0,1
16	MY 2000x500/1200x300	2000	500	1	0,8	2880	2,88	0,5	147973	0,0001875	0,017	0,1	0,0	0,8	0,17	0,8	0,9	4,1
17	SK 1200x300	1200	300	0,36	0,48	2880	8	3,0	246622	0,0003125	0,0165	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	3,3
18	LK 1200x300	1200	300	0,36	0,48	1440	4	2,3	123311	0,0003125	0,018	0,0	2,86	27,1	1,08	10,2	10,2	39,8
19	SK 1200x300	1200	300	0,36	0,48	1440	4	2,3	123311	0,0003125	0,018	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,8
20	KY90 1200x300	1200	300	0,36	0,48	1440	4	2,6	123311	0,0003125	0,018	0,0	1,24	11,7	1,31	12,4	12,4	14,2
21	SK 1200x300	1200	300	0,36	0,48	1440	4	2,6	123311	0,0003125	0,018	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2
22	SK 1200x300	1200	300	0,36	0,48	1440	4	3,6	123311	0,0003125	0,018	1,3	0,4	3,8	0,4	3,8	5,1	0,7
23	LK 1200x300	1200	300	0,36	0,48	1440	4	2,6	123311	0,0003125	0,018	0,0	1,2	11,4	1,3	12,3	12,3	11,4
24	SK 1200x300	1200	300	0,36	0,48	1440	4	2,6	123311	0,0003125	0,018	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	1
25	KY45 1200x300	1200	300	0,36	0,48	1440	4	2,6	123311	0,0003125	0,018	0,0	0,38	3,6	0,35	3,3	3,3	7,1
26	SK 1200x300	1200	300	0,36	0,48	1440	4	1,1	123311	0,0003125	0,018	0,4	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	0,4

Painehäviö

	ASHRAE	CIBSE	MagiCAD
Haara 1	50,6	25,0	54,7
Haara 2	20,1	19,3	27,4
Haara 3	39,8	23,6	55,0
Haara 4	16,3	16,9	19,9
Runko	79,5	77,8	97,3