



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TEEMU ALAJOKI
KAUKOLÄMPÖVERKOSTOSSA KÄYTETTÄVÄN PALLOVENTTII-
LIN RAKENTEEN KEHITYS
Diplomityö

Tarkastaja: professori Kari T.
Koskinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
4. huhtikuuta 2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

ALAJOKI, TEEMU: Kaukolämpöverkostossa käytettävän palloventtiilin rakenteen kehitys

Diplomityö, 79 sivua, 20 liitesivua

Marraskuu 2014

Pääaine: Hydrauliteknikka

Tarkastaja: professori Kari T. Koskinen

Avainsanat: Kaukolämpö, Kaukojäähdytys, Kaukokylmä, Palloventtiili, Sulkuventtiili, Tuotekehitys

Kaukolämpöverkoston liitos-, muutos- ja korjaustöiden suorittamiseksi verkostossa tarvitaan erilaisia venttiilejä, joilla voidaan rajoittaa nestevirtauksen kulkua. Sulkuventtiilien avulla verkosto voidaan jakaa osiin tai erottaa tietty johto-osuus verkostosta. Kaukolämpöverkoston sulkuventtiileinä käytetään joko pallo- tai läppäventtiilejä.

Uusien halvan työvoiman maista ilmestyneiden venttiilivalmistajien myötä kilpailu palloventtiilimarkkinoilla on viime vuosina kiristynyt. Muuttuvassa markkinatilanteessa menestyvältä tuotteelta vaaditaan entistä parempaa laatua ja halvempaa hintaa. Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia millaisilla rakenteellisilla muutoksilla palloventtiilin omakustannehintaa olisi mahdollista saada laskettua tuotteen laadusta tinkimättä.

Diplomityön tuotekehitysprosessi perustuu Gerhard Pahlin ja Wolfgang Beitzin kehittämään tuotekehitysoppiin, jota hyödynnettiin niiltä osin kuin se sopi kyseiseen diplomityöhön. Vertailevana kirjallisuuslähteenä käytettiin Karl Ulrichin ja Steven Eppingerin tuotekehitysoppia.

Diplomityön alussa tutustutaan kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen markkinoihin maailmalla ja arvioidaan useiden julkaisujen pohjalta kaukoenergiamarkkinoiden tulevaisuudennäkymiä.

Seuraavaksi esitellään tuotekehityksen kohteena olevan nykyisen palloventtiilin rakenne, toimintaperiaate sekä valmistusprosessi. Samalla tutustutaan venttiilin suunnittelua ohjaavaan lainsäädäntöön, joka osaltaan asettaa reunaehdot venttiilin muotoilulle ja mitoittamiselle.

Diplomityön teoriaosuudessa perehdytään nestevirtauksen periaatteisiin, työn kannalta keskeisiin lujuusopin käsitteisiin sekä venttiilin lujuuslaskennan tukena käytettävän elementtimenetelmän perusteisiin. Tässä vaiheessa käydään läpi myös työssä hyödynnettyjä tuotekehitysoppeja.

Varsinainen tuotekehitysprosessi koostuu esiselvitysvaiheesta, luonnosteluvaiheesta ja tuotteen kehittelyvaiheesta. Esiselvitysvaiheessa asetetaan projektin reunaehdot ja tavoitteet sekä tutustutaan omaan ja kilpailijoiden nykyisiin tuotteisiin. Luonnosteluvaiheessa ideat muutetaan luonnoksiksi, joista parhaat valitaan jatkokehitykseen.

Palloventtiilin kehittelyvaiheessa hienosäädetään venttiilin osia ja etsitään keinoja säästää raaka-ainemateriaalia. Venttiilin osien kehityksessä kiinnitetään huomiota myös tuotteen valmistettavuuteen. Hitsausvaiheessa jo asennettuna olevien osien tulee kestää hitsauksen aiheuttama korkea lämpötila.

Diplomityössä tarkastelun kohteena on viisi venttiilikokoluokkaa välillä DN65-DN150. Diplomityön tuloksena venttiilien materiaalikustannuksia saatiin kokoluokasta riippuen alennettua 2–8 %.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical engineering

ALAJOKI, TEEMU: Developing the Structure of the Ball Valve Used in District Heating Network

Master of Science Thesis, 79 pages, 20 Appendix pages

November 2014

Major: Fluid Power

Examiner: Professor Kari T. Koskinen

Keywords: District heating, District cooling, Ball valve, Shut-off valve, Product Development

In district heating and cooling systems shut-off valves are used in construction and renovation works. The function of the district heating shut-off valve is to subdivide the district energy system. The district heating shut-off valve is either a ball valve or a butterfly valve.

The purpose of this thesis is to develop a ball valve with even higher quality and lower manufacturing costs for Vexve ltd. High-quality and low price are the most important selling points in district heating valve market.

The product development process in this thesis follows the product development method of German professors Pahl and Beitz. The product development method of Ulrich and Eppinger was used as a comparative method.

The study started with familiarizing the district energy market. The market potential was estimated by way of several market publications. The structure and operating principle of the ball valve was also familiarized at first stage. The legislation relative to valve design was looked through at this stage.

The theory part consists of stream flow principles, essential strength theory and an abstract of product development theory. The actual product development process of this thesis started with the preliminary study where the edge conditions and aims of the project were defined. At sketching stage development ideas are converted as sketches. The best sketches were chosen to further development.

The development was executed part by part. The design, dimensions and material of each part were re-evaluated. Dimensions were sized according to district heating valve standards. Strength calculations and FE-analysis were made to improved version of valve stem. Thermoplastic material of sliding plate was analysed thoroughly.

In conclusion, material costs of ball valve were reduced even eight percent. The results give also promises improving level of automation in production.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Vexve Oy:lle vuoden 2014 aikana. Tahdon kiittää työnantajaani Vexve Oy:tä, joka soi minulle mahdollisuuden tämän diplomityön tekemiseen suunnittelijan toimeni ohessa. Kiitän Vexve Oy:n venttiililiiketoiminnan tuotepäällikköä Tuomas Teittistä sekä diplomityöni ohjaajaa ja tarkastajaa professori Kari T. Koskista aiheen määrittelystä sekä lukuisista neuvoista.

Lisäksi haluan kiittää niitä kaikkia Vexve Oy:n työtovereitani ja Tampereen teknillisen yliopiston henkilökunnan jäseniä, jotka auttoivat ja tukivat minua diplomityöni aikana. Suurkiitos kuuluu myös opiskelukavereilleni, sillä yksin en olisi opinnoistani selvinnyt.

Suurin kiitos kuuluu teille, joiden tukeen olen voinut turvautua ajasta ja ongelman suuruudesta riippumatta. Kiitos vanhemmilleni sekä puolisollleni Karoliinalle.

Tampereella 22.10.2014

Teemu Alajoki

SISÄLLYS

Abstract	3
Lyhenteet ja Merkinnät	7
1 Johdanto	10
1.1 Työn tavoitteet	10
1.2 Työn rakenne.....	10
1.3 Yritysesittely	11
2 Kaukolämpö- ja kaukojäähdytysverkot	12
2.1 Kaukolämmityksen toimintaperiaate	12
2.2 Kaukolämmön tuotanto ja kulutus	13
2.3 Kaukolämpömarkkinat	14
2.4 Kaukojäähdytys yleisesti.....	17
2.5 Kaukojäähdytyksen toimintaperiaate	18
2.6 Kaukojäähdytysmarkkinat.....	20
3 Palloventtiilin rakenne ja sitä ohjaava lainsäädäntö.....	23
3.1 Palloventtiilin rakenne	23
3.2 Palloventtiilin valmistusprosessi	26
3.3 Suunnittelua ohjaava lainsäädäntö	27
3.3.1 Panielatedirektiivi	27
3.3.2 Kaukolämpöventtiilistandardi SFS-EN 488	27
3.3.3 Energiateollisuus ry:n suositukset	28
4 Palloventtiilin kehityksen teoreettinen tausta.....	30
4.1 Nestevirtauksen periaatteita	30
4.1.1 Viskositeetti	30
4.1.2 Virtaustyytit	31
4.1.3 Palloventtiilin kapasiteettikerroin	32
4.1.4 Palloventtiilin virtaushäviöt.....	34
4.1.5 Kavitaatio.....	38
4.2 Tekninen laskenta.....	38
4.2.1 Keskeiset lujuusopin käsitteet.....	38
4.2.2 Elementtimenetelmä palloventtiilin mitoituksessa	41
4.3 Tuotekehitysoppi.....	43
4.3.1 Pahlin ja Beitzin koneensuunnitteluoppi	43
4.3.2 Ulrichin ja Eppingerin tuotekehitysoppi.....	48
4.3.3 Valmistettavuuden suunnittelu	49
5 Nykytilan analyysi ja uusien venttiilikonstruktioiden luonnostelu	53
5.1 Kilpailija-analyysi	53
5.2 Projektin vaatimuslista	54
5.3 Venttiilin omakustannerakenne.....	55
5.4 Venttiilikonstruktioiden luonnostelu.....	56

6	Osakohtainen kehitys	59
6.1	Karan kehitys	59
6.1.1	Karan luonnokset	59
6.1.2	Karan numeerinen lujuustarkastelu	62
6.1.3	Karan vääntökuormitustestaus	63
6.1.4	Karan FE-analyysi	64
6.2	Liukulevytutkimukset	66
6.3	Pallon kehitys	69
6.4	Runkoputken kehitys.....	70
6.5	Pallontiivisteiden kehitys	70
6.6	Kahvan kehitys.....	71
6.7	Muiden osien kehittäminen	72
6.8	Uudistukset kokoonpantavuuden kannalta.....	73
7	Yhteenveto ja jatkotoimenpiteet	75
	Lähteet.....	77
	Liite 1: Karan lujuuslaskut.....	80
	Liite 2: Kuvia karan vääntökuormitustestauksesta	87
	Liite 3: Karan FE-analyysin tuloksia	90
	Liite 4: Liukulevytestin tuloksia	99

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Absorptio	Operaatio, jossa aineensiirto tapahtuu kaasufaasin ja neste-faasin välillä.
Abstrahointi	Yleiskäsitteen muodostamista pelkistämällä.
AISI	American Iron and Steel Institute.
Ansys	Simulointiohjelmisto, joka on tarkoitettu erityisesti lujuus-laskelmien suorittamiseen.
CAB	Cellulose Acetate Butyrate. Vaihtoehtoinen liukulevymate-riaali.
CES	Cambridge Engineering Selector. Materiaalinvalintaohjelma
CHP	Combined Heat and Power. Sähkön ja lämmön yhteistu- tanto.
CTFE	Chlorotrifluoroethylene. Vaihtoehtoinen liukulevymateriaa- li.
DFA	Design For Assembly. Tuotteen suunnittelu kokoonpanta- vuuden näkökulmasta.
DFM	Design For Manufacturing. Tuotteen suunnittelu valmistet- tavuuden näkökulmasta.
DFX	Design For X. Tuotteen suunnittelu ominaisuuden X näkö- kulmasta.
DN	Diameter Nominal. Putken nimellinen sisähalkaisija.
EN	European Standard. Eurooppalainen standardi.
FEM	Fine Element Method. Numeerinen menetelmä rakenteiden analysointiin.
FTIR	Fourier Transform Infrared. Fourier-muunnettu infrapun- aspektri.
G439	PTFE:n tapainen kestopuovi.
GCC	Gulf Cooperation Council. Persianlahden arabimaiden yh- teistyöneuvosto.
HFC	Kylmäaine.
Kara	Palloventtiilin palloa ohjaava akseli
PED	Pressure Equipment Directive. Paineastiadirektiivi.
PEEK	Polyether Ether Ketone. Vaihtoehtoinen liukulevymateriaa- li.
PN-luokka	Kuvaa venttiilin rungon paineenkestoa
PTFE	Polytetrafluorieteeni. Fluoripohjainen kestopuovi, jota käy- tetään mm. liukumateriaalina.
RESCUE	Renewable Smart Cooling in Urban Europe. Kaukojäähdy- tystä EU:n alueella edistävä projekti.
SFS	Suomen Standardoimisliitto.
Solidworks	3D-mekaniikkasuunnitteluohjelmisto

Teflon	DuPontin kauppanimi PTFE-materiaalille.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure. Saksalainen suunnittelustandardisto.
Vääntiö	Karan pää, joka on kontaktissa venttiilin pallon kanssa.
<i>A</i>	Virtauskanavan poikkileikkauksen pinta-ala [m^2]
<i>A_v</i>	Venttiilin kapasiteettikerroin [m^3/s]
<i>C₂</i>	Vääntövastuksen apukerroin [-]
<i>C_v</i>	Venttiilin kapasiteettikerroin [m^3/s]
<i>d</i>	Virtauskanavan halkaisija [mm]
<i>D_H</i>	Hydraulinen halkaisija [m]
<i>F_P</i>	Putkiston geometriakerroin [-]
<i>F_R</i>	turbulenttisuuskerroin [-]
<i>G</i>	Materiaalin liukumoduuli [MPa]
<i>G_f</i>	Suhteellinen nesteen tiheys [-]
<i>I_p</i>	Polaarinen neliömomentti [mm^4]
<i>I_v</i>	Poikkileikkauksen vääntöneliömomentti [mm^4]
<i>k</i>	Putken sisäpinnan karheus [mm]
<i>K_v</i>	Venttiilin kapasiteettikerroin [m^3/s]
<i>l</i>	Virtauskanavan pituus [m]
<i>L_A</i>	Poikkileikkauksen piiri [mm]
<i>n</i>	Suunnittelu varmuusluku [-]
<i>Q</i>	Tilavuusvirta [m^3/s]
<i>r</i>	Kappaleen poikkileikkauksen säde [mm]
<i>R</i>	Kitkavastus/pituus-suhde [-]
<i>R_e</i>	Materiaalin myötölujuus [MPa]
<i>R_{eL}</i>	Materiaalin alempi myötöraja [MPa]
<i>R_m</i>	Materiaalin murtolujuus [MPa]
<i>Re</i>	Reynoldsin luku [-]
<i>Re_{kr}</i>	Kriittinen Reynoldsin luku [-]
<i>T</i>	Poikkileikkauksen vääntömomentti [Nm]
<i>v</i>	Nesteen virtausnopeus [m^3/s]
<i>v_{max}</i>	Nesteen maksimi virtausnopeus [m^3/s]
<i>W_v</i>	Poikkileikkauksen vääntövastus [mm^3]
<i>γ</i>	Liukuma [rad]
<i>Δp</i>	Venttiilin yli vaikuttava paine-ero [bar]
<i>Δp_{ref}</i>	Referenssiarvo paine-erolle venttiilin yli [bar]
<i>ε</i>	venymä [mm]
<i>ζ</i>	Kertavastuskerroin [-]
<i>η</i>	Dynaaminen viskositeetti [$Pa * s$]

θ	Poikkileikkauksen vääntymä [°]
λ	Kitkavastuskerroin [-]
ν	Kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]
ρ	Nesteen tiheys [kg/m^3]
σ_{sall}	Suurin sallittu vetojännitys [MPa]
τ_{sall}	Suurin sallittu leikkausjännitys [MPa]

1 JOHDANTO

Koventunut kilpailu kaukolämpöventtiilimarkkinoilla yhdistettynä jatkuvasti nouseviin valmistuskustannuksiin pakottavat venttiilivalmistajan kehittämään tuotteitaan jatkuvasti paremmiksi. Markkinoilla menestyäkseen tuotteen täytyy olla tarpeeksi edullisen ja tarpeeksi laadukas.

Tuotteen hintaan pystytään vaikuttamaan eniten silloin, kun se on vielä suunnittelupöydällä. Tuotteen raaka-aine- ja tuotantokustannukset riippuvat pitkälti siitä, millaisia ratkaisuja suunnitteluvaiheessa on tehty. Toisaalta epäonnistunut muotoilukin saattaa karkottaa asiakkaita. Tuotekehitystiimille annettu vastuu on siis suuri, kun tehtäväksi on annettu suunnitella uudestaan yrityksen menestyksen kivijalkana toimiva palloventtiili.

1.1 Työn tavoitteet

Tämän työn tavoitteena on kehittää palloventtiilistä erityisesti kaukolämpö- ja kaukojäähdytysverkostojen tarpeisiin suunniteltu, omakustannehinnaltaan nykyistä edullisempi, mutta laadultaan parempi versio. Palloventtiilin käyttökohteiden hyvä tuntemus vähentää tuotteiden ylimitoittamisen tarvetta. Kun tuote suunnitellaan kapeille markkinoille, myös asiakkaiden toiveet pystytään ottamaan paremmin huomioon suunnittelussa. Työn tavoitteisiin kuuluu lisäksi kartoittaa tuotannon automaatiotason nostoa rajoittavia venttiilin rakenteellisia yksityiskohtia.

Palloventtiilin muotoilussa on tarkoitus kuunnella sekä asiakkaiden toiveita, että panostaa venttiilin valmistettavuuteen. Tärkeimpiä mitoituksessa huomioon otettavia asioita olivat kaukolämpöventtiilistandardien määräämät mitat ja yksityiskohdat sekä raaka-ainetoimittajien tarjoamien standardituotteiden hyödyntäminen.

1.2 Työn rakenne

Diplomityön rakenne jakautuu markkinatutkimukseen, työssä esiintyvien ilmiöiden teoreettisen taustan läpikäyntiin, tuotekehitysprosessiin sekä projektin tulosten tarkasteluun. Markkinatutkimusvaiheessa tutustutaan palloventtiilien käyttökohteisiin kaukolämmitys- ja jäähdytysjärjestelmissä sekä tutustutaan markkinatilanteeseen ja markkinoiden kasvupotentiaaliin tärkeimpien markkina-alueiden osalta. Tätä seuraa tutustuminen palloventtiilin toimintaperiaatteeseen sekä rakenteeseen.

Diplomityön teoreettinen tausta koostuu nestevirtauksen perusteoriasta, työssä esillä olevista lujuusopin ilmiöistä sekä työssä käytetyistä tuotekehitysmetodeista. Diplomityöprojektin tuotekehitysprosessi käydään läpi noudattaen valitun tuotekehitysoopin

askelia. Työn tuloksia tarkastellaan osakohtaisesti, samalla selostaen kuhunkin osaan liittynyttä kehitystyötä.

Yhteenvedotulovussa kootaan projektin keskeisimmät tutkimustulokset yhteen. Tutkimustulokset analysoidaan ja niiden paikkaansa pitävyyden arvioidaan. Yhteenvedossa esitetään toimenpiteet, joita tämän diplomityön jälkeen tulisi projektin edistämiseksi tehdä.

1.3 Yritysesittely

Diplomityön toimeksiantaja Vexve Oy on vuonna 1961 perustettu sastamalalainen perheyrittäjä. Tuolloin yritys aloitti liiketoimintansa LVI-urakoinnin parissa nimellä Vesiniemi, mutta on sittemmin eriyttänyt Vesiniemisen LVI-liiketoiminnan omaksi yhtiökseen. Palloventtiilien valmistuksen Vexve aloitti vuonna 1990 ja läppäventtiilien valmistuksen vuonna 2004. Lisäksi Vexve valmistaa ja suunnittelee talojen lämmönsäätölaitteita.

Vexve on 1990-luvun alusta lähtien hiljalleen nostanut markkinaosuuttaan kaukolämpöventtiilien valmistajana ja reilussa kahdessa vuosikymmenessä se on noussut maailman johtavaksi kaukolämmitykseen ja -jäähdytykseen kehitettyjen venttiileiden valmistajaksi. Vuonna 2014 Vexve osti yrityskaupassa amerikkalaisen Flowserven omistuksessa olleen merkittävimmän kotimaisen kilpailijansa Naval Oy:n. Yrityskaupan myötä Vexven venttiililiiketoiminnan liikevaihto nousi noin 45 miljoonasta eurosta noin 70 miljoonaan euroon. Vexve valmistaa kaukolämpöventtiilejä nykyään kolmella paikkakunnalla: Laitilassa, Liperissä ja Sastamalassa.



Kuva 1.1. Palloventtiili (vas.) ja läppäventtiili (oik.) (Vexve 2014).

Kuvassa 1.1 ovat esillä Vexven venttiililiiketoiminnan tärkeimmät tuotteet. Vasemmalla on palloventtiili käsivaihteella varustettuna, keskellä on palloventtiili kahvalla varustettuna ja oikealla on läppäventtiili käsivaihteella varustettuna.

2 KAUKOLÄMPÖ- JA KAUKOJÄÄHDYTYS- VERKOSTOT

Tässä luvussa esitellään kaukolämpö- ja kaukojäähdytysjärjestelmien toimintaperiaatteet, kaukolämmityksen asema Suomessa, sekä kaukolämpö- ja kaukojäähdytysverkostojen kasvupotentiaali Suomessa ja ulkomailla.

2.1 Kaukolämmityksen toimintaperiaate

Kaukolämmitys on rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen tarvittavan lämmön keskitettyä tuotantoa ja julkista jakelua asiakkaina oleville kiinteistöille.

Kaukolämpöä tuotetaan lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksissa tai lämpökeskuksissa. Kaukolämmön polttoaineita ovat maakaasu, kivihiili, turve, sekä enenevässä määrin puu ja muut uusiutuvat energialähteet, kuten biokaasu. Suomessa lähes 80 % kaukolämmön tuotannosta perustuu lämmön ja sähkön yhteistuotantoon tai muuhun hyötyenergiamenetelmään. Pienillä paikkakunnilla kaukolämpö tuotetaan pelkkää lämpöä tuottavissa keskuksissa, koska riittävästi hukkalämpöä tuottavia tuotantolaitoksia ei aina ole lähistöllä. (Energiateollisuus ry 2014.)

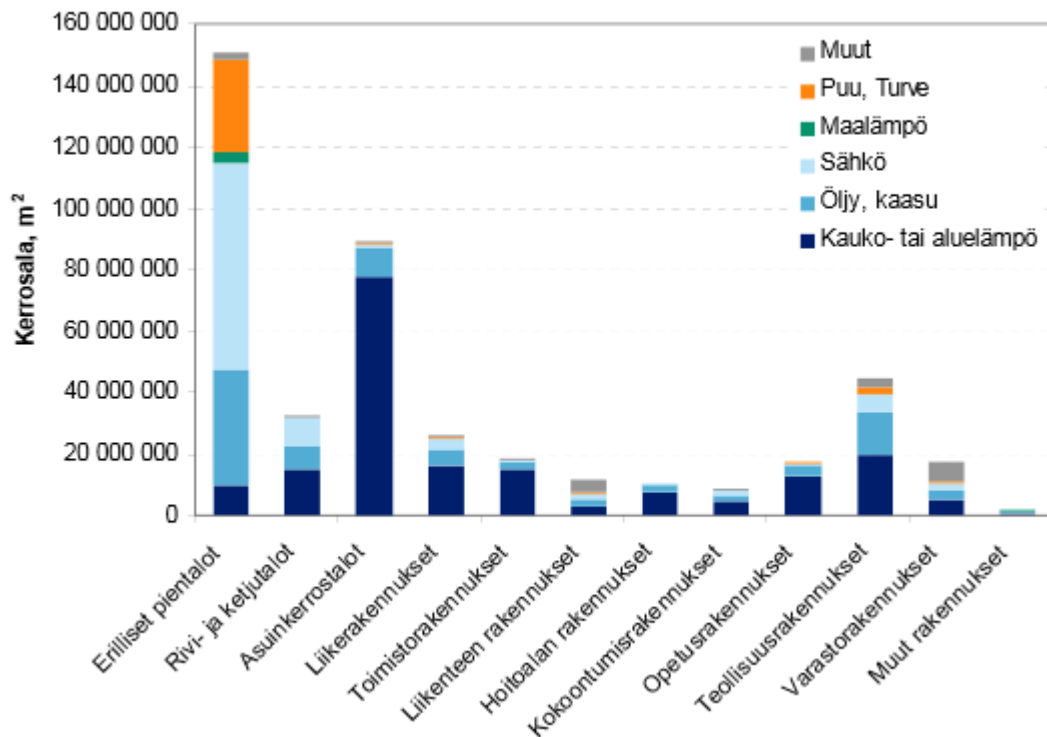
Lämpö siirretään asiakkaille kuumana vetenä suljetussa kaksiputkisessa kaukolämpöverkossa. Lämmin vesi johdetaan kiinteistön lämpökeskukseen, jossa se luovuttaa lämpöä asiakkaiden lämmitysverkkoon ja lämpimän käyttöveden valmistukseen lämmönsiirtimien avulla. Talot käyttävät lämpöä huoneiden ja käyttöveden lämmittämiseen sekä ilmanvaihtoon. Kaukolämpöverkon vesi palaa paluujohdossa jäähtyneenä takaisin tuotantolaitokseen uudelleen lämmitettäväksi (Energiateollisuus ry 2014.)

Asiakkaille tulevan kaukolämpöveden lämpötila vaihtelee sään mukaan 65–115 °C välillä. Alimmillaan se on kesällä, jolloin lämpöä tarvitaan vain käyttöveden lämmittämiseen. Asiakkailta tuotantolaitoksiin palaavan veden lämpötila vaihtelee 40–60 °C välillä. (Energiateollisuus ry 2014.)

Euroopan kaukolämpöjärjestelmät ovat vakiintuneet käyttämään lämpimään veteen perustuvaa jakelutekniikkaa. Euroopassa kaukolämpöverkostojen maksimilämpötilat ovat tavallisesti 120–130 °C. Poikkeuksena on kuitenkin Tanska, jossa yleinen jakelulämpötila on 90 °C. Itä-Euroopan kaukolämpöverkostoissa on käytössä myös korkeampia lämpötiloja ja esimerkiksi Venäjällä verkostossa kiertävän nesteen maksimilämpötila voi olla jopa 150 °C. Korkeita lämpötiloja käytetään varsinkin suurissa kohteissa, joissa siirtomatkat ovat pitkiä, sekä avoimen piirin kaukolämpöverkoissa. (Koskelainen et al. 2006.)

2.2 Kaukolämmön tuotanto ja kulutus

Kaukolämmön leviäminen on alkanut kaupunkien keskusta-alueilta, joissa lämpötehon tiheys maapinta-alaa kohti on suurimmillaan ja niin ollen johtopituutta kohti laskettu teho on suuri. Kaukolämmön jakeluverkko on kaukolämpöjärjestelmän eniten investointeja vaativa osa, joten kilpailukyky riippuu sen suuruudesta suhteessa toimitettuun tehoon.



Kuva 2.1. Eri lämmitysmuodot rakennustyypeittäin Suomessa (Kaukolämmön asema 2011)

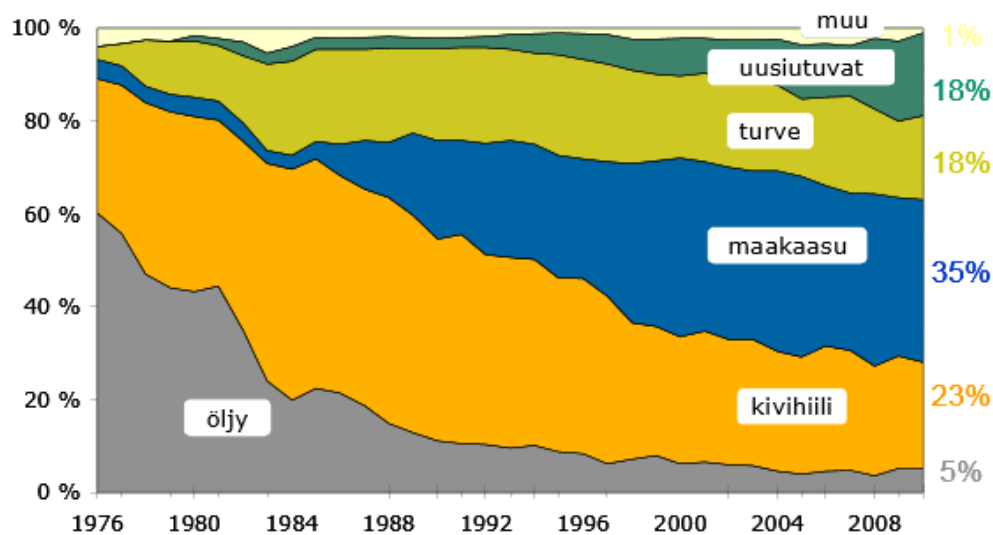
Kaukolämmön kannalta kannattavimpia kohteita ovat suuret taajamissa sijaitsevat paljon lämmitystehoa vaativat rakennukset, kuten asuinkerrostalot ja toimistorakennukset. Kuvassa 2.1 nähdään, että kaukolämpö onkin nimenomaan asuinkerrostaloissa suosituin lämmitysmuoto.

Kaukolämmön kilpailukyky riippuu myös mahdollisuudesta käyttää sähkön ja lämmön yhteistuotantoa, jolloin sekä tuotantokustannukset että päästöjen vähentämisestä aiheutuvat kustannukset jakaantuvat molemmille tuotteille. Hyötyenergian ja käytetyn polttoaineen suhteena ilmaistu kokonaishyötysuhde muodostuu korkeammaksi kuin useimmissa muissa energiantuotantotavoissa. Yhteistuotanto onkin saavuttamassa laajenevaa suosiota kaikilla kaukolämmitysalueilla. Suomi on maailmanlaajuisesti lämmön ja sähkön yhteistuotannon johtava maa. (Koskelainen et al. 2006, s.26–27.)

Kaukolämmityksellä ja erityisesti lämmön ja sähkön yhteistuotannolla on keskeinen rooli ympäristökuormituksen vähentämisessä. Kaukolämpöä tuotetaan entistä

enemmän uusiutuvilla polttoaineilla, joiden ansiosta hiilidioksidipäästöjä voidaan tehokkaasti vähentää. (Koskelainen et al. 2006.)

Yhdistetyn sähkön ja lämmön tuottaminen on hyötysuhteeltaan tehokasta erityisesti silloin, kun tarkastelu rajataan voimalan sisälle. Kaukolämmön kokonaishyötysuhdetta heikentävät kuitenkin voimakkaasti lämpöverkon häviöt ja laitoksien toiminta optimaaluen, eli kesän lämpimien aikojen ja talven kovimpien pakkasten ulkopuolella.



Kuva 2.2. Kaukolämpötuotannon jakautuminen Suomessa (Kaukolämmön asema 2011).

Kuvasta 2.2 nähdään, että uusiutuvien energiamuotojen osuus Suomen kaukolämmön tuotannosta on vielä kohtuullisen pienessä asemassa 18 % osuudellaan. Eniten kaukolämpöä Suomessa tuotetaan tällä hetkellä maakaasulla, kivihiilellä ja turpeella. Energialähteidensä puolesta kaukolämpöä ei voidakaan Suomessa pitää erityisen ilmastoystävällisenä lämmitysmuotona, vaikka uusiutuvien energialähteiden osuus kaukolämmöstä onkin vuosi vuodelta kasvanut.

2.3 Kaukolämpömarkkinat

Ensimmäinen kaupallisesti toimiva kaukolämpöjärjestelmä käynnistyi Yhdysvalloissa vuonna 1877, jolloin Birdsdill Holly perusti Lockportin kaupunkiin New Yorkin osavaltioon höyrykaukolämmitysjärjestelmän (Koskelainen et al. 2006, s.32).

Euroopassa kaukolämmitystä alettiin ensimmäisenä käyttää Saksassa ja Tanskassa. Saksan ensimmäinen kaukolämpöjärjestelmä rakennettiin Hampuriin vuonna 1893. Nykyään kaukolämmitystoimintaa harjoitetaan erityisesti Euroopassa, Venäjällä, Pohjois-Amerikassa ja Aasiassa. Euroopassa on yli 5000 kaukolämpöjärjestelmää ja kaukolämmön markkinaosuus lämmitysmarkkinoista on noin 10 %. Yhdysvalloissa puolestaan noin 4 % lämmitystarpeesta tuotetaan kaukolämmöllä. (Energiateollisuus ry 2014.)

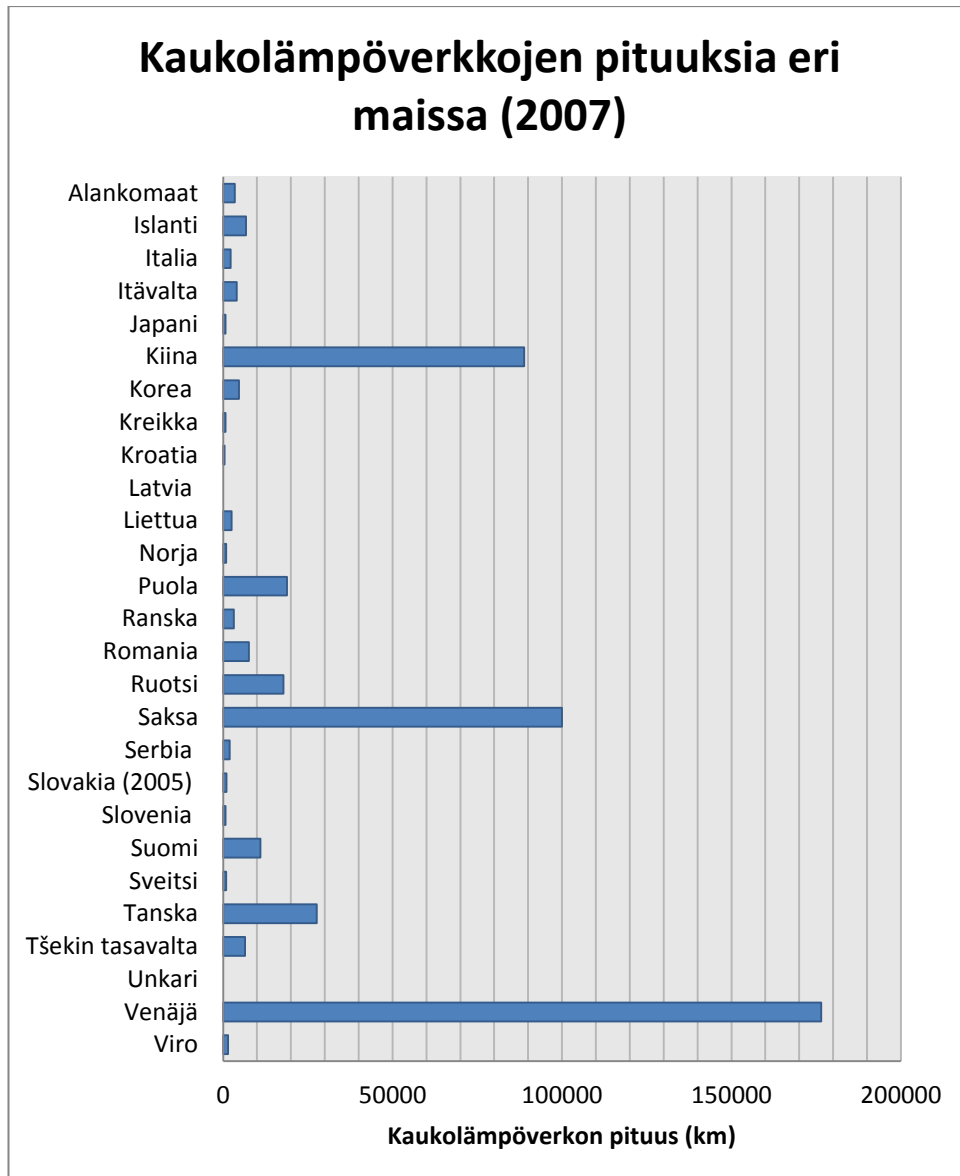
Suurin kaukolämpömaa on nykyisin kuitenkin Venäjä. Venäjän noin 50 000 usein pienehköä kaukolämpöjärjestelmää ovat varsin huonossa kunnossa ja epätaloudel-

lisiä energian, veden, sähkön ja varaosien käytön suhteen. Toinen suuri markkina-alue on Kiina, jossa kaukolämmitys alkoi vasta 1980-luvulla, mutta laajenee edelleen voimakkaasti. Jo vuonna 2002 1,4 miljardia neliometriä huoneistoalaa oli liitetty kaukolämmitykseen 600 kaupungissa. (Koskelainen et al. 2006, s.34.)

Kiinassa tapahtuva maalta kaupunkeihin muutto on myös omalta osaltaan lisännyt tarvetta keskitetyille lämmitysjärjestelmille. Kun vuonna 1980 18 % kiinalaisista asui kaupunkialueilla, niin tällä hetkellä noin puolet kiinalaisista asuu kaupungeissa. Vuonna 2030 arvioidaan Kiinan urbaaneilla alueilla asuvan jo miljardi asukasta. (Lidegaard 2013.)

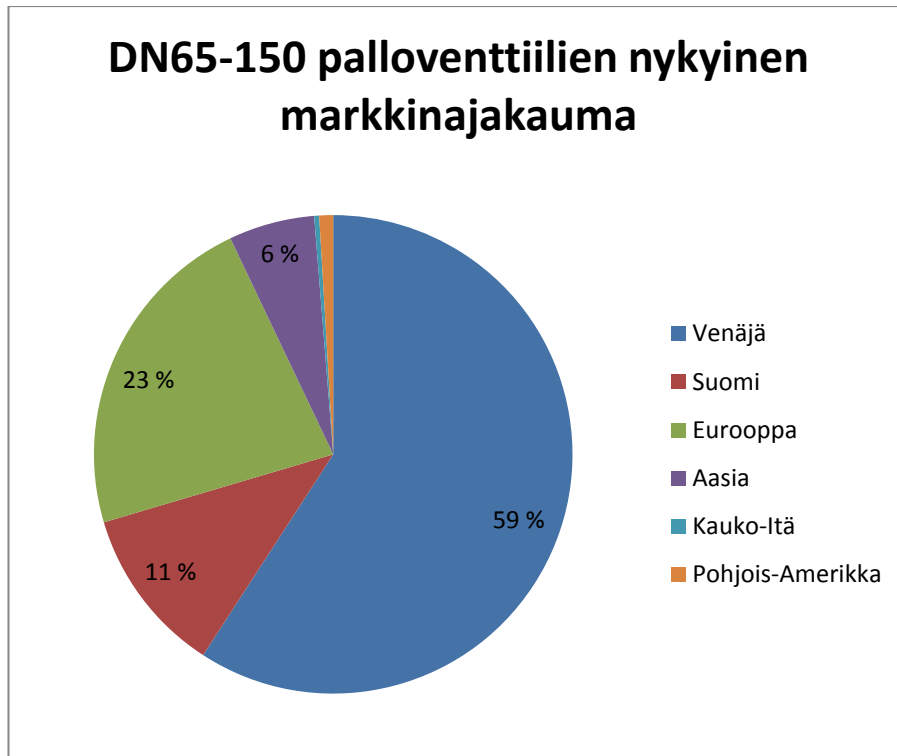
Kiinassa meneillään olevan kahdennentoista viisivuotissuunnitelman tavoitteena on lisätä suurella määrällä kaukolämpöverkoston peittoaluetta. CHP-laitosten määrän suhteessa kaukolämpölaitoksiin on tarkoitus kasvaa vuoden 2010 36 %:sta 45 %:iin vuoteen 2015 mennessä. Viiden vuoden aikana on suunniteltu toteutettavaksi 1000 maa-lämpöprojektia, jotka kattaisivat yhteensä 50 miljoonaa neliometriä. (Lidegaard 2013.)

Kaukolämpöventtiilien markkina-alueiden suuruutta voidaan arvioida tutkimalla kaukolämpöverkkojen pituuksia eri maissa. Venttiilejä tarvitaan sitä enemmän, mitä laajempi kaukolämpöverkko on kyseessä. Seuraavassa kuvassa 2.3 on esitetty merkittävimpien kaukolämmön käyttäjämaiten kaukolämpöverkkojen pituuksia. Kaukolämpöventtiilien suurimmat markkina-alueet Euroopassa ovat kuvan 2.3 perusteella perinteisiä kaukolämmön käyttäjämaita kuten Venäjä, Tanska, Saksa ja Puola.



Kuva 2.3. Kaukolämpöverkkojen pituuksia eri maissa vuonna 2007 (Energiateollisuus ry 2014).

Kuvassa 2.3 esitetyt kaukolämpöverkkojen pituudet ovat selvässä yhteydessä kuvassa 2.4 esitettyihin kaukolämpöpalloventtiilien suurimpiin markkina-alueisiin. Venäjän kaukolämpöverkoston laajuus näkyy myös kaukolämpöventtiilien suuressa menekissä. Eurooppa ja Aasia ovat seuraavaksi suurimmat kaukolämpöventtiilien markkina-alueet.



Kuva 2.4. DN65–150 palloventtiilien nykyinen markkinajakauma (Vexve oy 2014).

Kaukolämmön asema tulevaisuuden lämmitysmuotona ei ole taattu kaikilla markkina-alueilla. Länsi-Euroopassa kilpailu energiamuotojen kesken tiivistyy energiamarkkinoiden vapautuessa. Joissakin maissa kaukolämmön markkinaosuus on jo saavuttanut laajuuden, joka ei ole enää perusteltavissa taloudellisesti, vaan markkinaosuus tulee putoamaan tulevaisuudessa. Lisäksi energiansäästötoimet ovat johtaneet siihen, että rakennuskohtainen lämmönkulutus sekä sen myötä kaukolämpöputkistojen nimelliskoko tulevat pienemään hiljalleen. (Koskelainen et al. 2006, s.31.)

Toisaalta Euroopassa etsitään keinoja yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon lisäämiseksi ympäristösyistä. EU:n energiastrategia tähtää yhteistuotannon lisäämiseen ja uusiutuvan energian merkittävään kasvuun. Eräissä länsimaissa on lisäksi tehty poliittisia päätöksiä ydinvoimasta luopumiseksi pyrkien kuitenkin samalla vähentämään hiilidioksidipäästöjä ja parantamaan energiatehokkuutta. Muun muassa nämä seikat puoltavat kaukolämpöverkostojen laajentumisen puolesta tulevaisuudessa. (Koskelainen et al. 2006, s.31.)

2.4 Kaukojäähdytys yleisesti

Kaukojäähdytyksellä, eli kaukokylmällä, voidaan saavuttaa vastaavat hyödyt ja kilpailutekijät kuin kaukolämmityksellä. Kaukojäähdytystä tarvitaan erityisesti julkisissa rakennuksissa, kuten toimistotaloissa tai hotelleissa, mutta viime vuosien aikana kaukojäähdytyksen suosio on lisääntynyt myös pientalorakentamisessa.

Jäähdytystarve johtuu paitsi auringon tuottamasta lämmöstä myös rakennusten sisäisistä lämmönlähteistä, kuten kodinkoneista ja muista sähkölaitteista. Rakennukses-

sa voi esiintyä kylminä vuodenaikoina myös jäähdytystarvetta samanaikaisesti lämmitystarpeen kanssa. Kaukojäähdytys voikin olla kaukolämpöyrityksille liiketoimintaa täydentävä palvelu. (Koskelainen et al. 2006, s.26.)

Kaukojäähdytyksen etuja verrattuna muihin jäähdytysvaihtoehtoihin ovat järjestelmän verrattain pieni energian tarve, tehokas tilankäyttö sekä tehokas suhtautuminen jäähdytyshuippuihin. Viimeksi mainittu on toteutettu kaukojäähdytysjärjestelmissä varastoimalla jopa 30 % jäähdytyskapasiteetista jäähdytysvesitankkeihin, joiden kapasiteettia hyödynnetään vuorokauden lämpimimpinä aikoina. (Sarraf et al. 2012.)

Kaukojäähdytyksen yleistymistä jarruttavia tekijöitä ovat puolestaan yksittäisiä rakennuksia suunnittelevien insinöörien tekemät jäähdytysjärjestelmävalinnat, mahdollisesti epäedulliset energiatariffit sekä erityisesti kaukojäähdytysjärjestelmän suuret investointikustannukset. (Sarraf et al. 2012.)

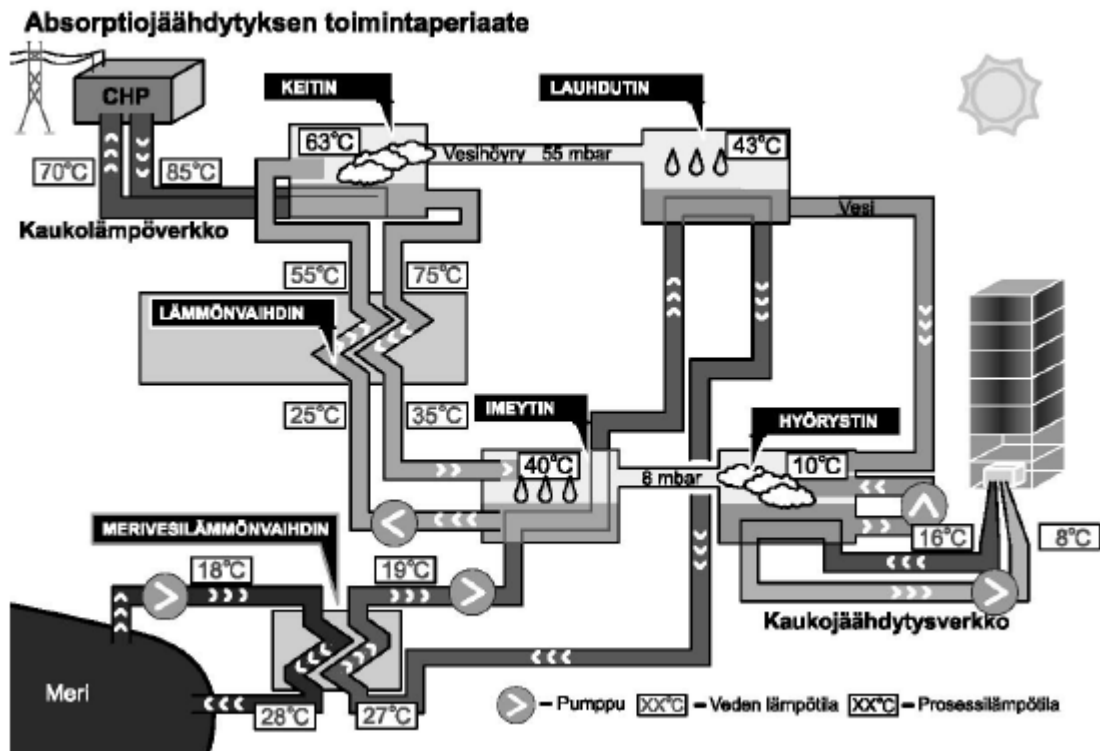
2.5 Kaukojäähdytyksen toimintaperiaate

Kaukojäähdytysenergia voidaan tuottaa useammalla vaihtoehtoisella tavalla: vapaajäähdytyksellä, absorptiojäähdytyskoneilla, kompressorikoneilla tai lämpöpumpuilla. Edellä mainittuja tuotantotapoja voidaan paikallisten olosuhteiden mukaan yhdistellä siten, että kulloinkin tarvittava energia tuotetaan edullisimmalla tavalla. Kaukojäähdytysenergian varastointi on oleellinen osa pienissäkin järjestelmissä parantamaan toiminnan kannattavuutta. (Pesonen et al. 2004, s.3.)

Vapaajäähdytykseksi kutsutaan luonnon omien energiavarastojen hyödyntämistä jäähdytykseen. Suurimman osaa vuodesta vesistöjen kylmä vesi riittää sellaisenaan kaukojäähdytykseen tarpeisiin. Myös lämpimän veden aikaan vesistöt ovat tehokas ja edullinen pohjatehon lähde. Vapaajäähdytyksen hyödyntäminen on luontainen lähtökohta, johon yhdistetään jäähdytysenergian muita tuotantomuotoja. (Pesonen et al. 2004, s.4.)

Kaukojäähdytysenergia voidaan tuottaa myös absorptiojäähdytyskoneilla, joiden käyttöenergiana on esimerkiksi teollisuuden hukkalämpö, kaukolämpö tai savukaasut. Absorptiojäähdytysprosessi perustuu liuottimen ja kylmäaineen ominaisuuksiin. Tietynä paineessa ja lämpötilassa vallitsee tasapaino kaasun ja nesteeseen absorboituneen kaasun välillä. Muutettaessa lämpötilaa tai painetta tasapaino muuttuu, jolloin kaasua vapautuu tai sitoutuu. (Pesonen et al. 2004, s.4.)

Absorptiojäähdytyskoneen osat ovat höyrystin, lauhdutin, keitin ja imeytin. Käytettävä työaine valitaan tarvittavan jäähdytyslämpötilan perusteella. Tavallisin työainepari on vesi ja litiumbromidi, joka soveltuu yli 5 °C lämpötiloille. Litiumbromidin tilalla käytetään yleisesti ammoniakkia, kun jäähdytysvedelle tarvitaan kylmempiä lämpötiloja. Absorptiojäähdytyksen toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 2.5. (Pesonen et al. 2004, s.4.)



Kuva 2.5. Absorptiojäähdytyksen periaate (Pesonen et al. 2004, s.5).

Myös kompressoriteknikkaa käytetään kaukojäähdytykseen. Kompressorikoneiston osat ovat kompressor, lauhdutin, höyrystin ja paisuntaventtiili. Kompressorin käyttöenergiana on sähkö. Kylmäaineena käytetään yleensä HFC:tä. Kompressoriteknikalla voidaan tuottaa kylmempää vettä kuin absorptiokoneilla. Jäähdytetyn veden lämpötila voi alhaisimmillaan olla noin 4 °C. (Pesonen et al. 2004, s.6.)

Kaukojäähdytysenergian tuottamisessa voidaan hyödyntää myös lämpöpumpua. Lämpöpumpun käyttö on erityisen kannattavaa silloin, kun kaukojäähdytys ja kaukolämmitys yhdistetään samaan prosessiin. Lämpöpumpulla alennetaan asiakkaalle menevän kaukojäähdytysveden lämpötilaa ja poistettu lämpöenergia voidaan siirtää kaukolämpöverkoston tuloveden lämpötilan korottamiseen. Lämpöpumpun lämmönlähteenä voidaan hyödyntää jätevettä tai vesistöä. (Pesonen et al. 2004, s.6.)

Jäähdytysenergian tarve vaihtelee merkittävästi vuodenajan, vuorokauden ajan ja sään mukaan. Jäähdytyksen tuotantokapasiteettia voidaan pienentää varastoimalla jäähdytysenergiaa akkuihin. Jäähdytysenergian varastoimisella saavutettavia etuja ovat energiantuotannon kapasiteettitarpeen pieneminen, alhaisemmat investointikustannukset, parempi käyttövarmuus ja välttyminen alhaisen kuorman aiheuttamalta huonolta hyötysuhteelta. Rakenteeltaan akku voi olla suuri eristetty vesisäiliö. Sitä ladataan yöaikaan, jolloin jäähdytysenergian tarve on pienempi, ja hyödynnetään päiväsaikaan tarpeen kasvaessa. Akun karkeana mitoitusperusteena voidaan käyttää yhtä kolmasosaa tuotantotehosta. (Pesonen et al. 2004, s.7.)

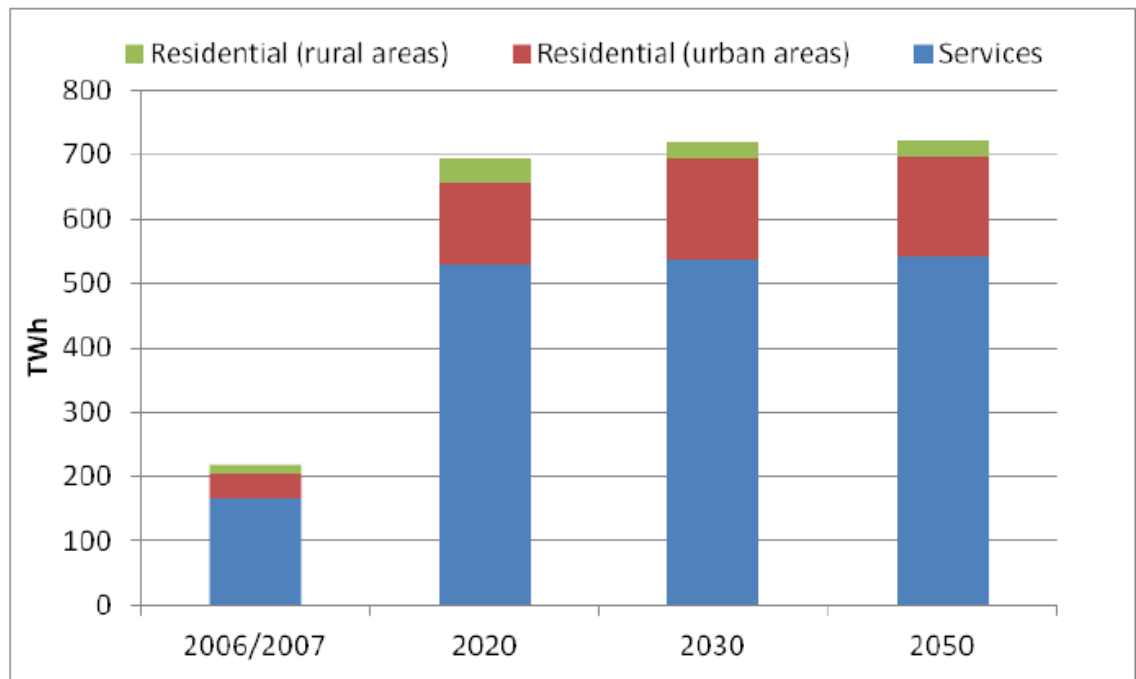
Kaukojäähdytyksessä meno- ja paluueden lämpötilaero on noin viidenneksen kaukolämmitysjärjestelmän meno- ja paluueden lämpötilaerosta. Esimerkiksi DN100-

kokoisella kiinnivaahdotetulla johdolla voidaan siirtää kaukojäähdytystehoa noin 370 kW, putken painehäviön ollessa 1 bar/km ja lämpötilaeron 8 °C. Vastaavasti kaukolämpötehoa voidaan samankokoisella putkella siirtää noin 3200 kW, putken painehäviön ollessa 1 bar/km ja lämpötilaeron 70 °C. Suuremmalla putkikoolla DN400 siirtyy kaukojäähdytysteho noin 10,2 MW ja kaukolämmitysteho noin 90 MW. (Pesonen et al. 2004, s.8.)

2.6 Kaukojäähdytysmarkkinat

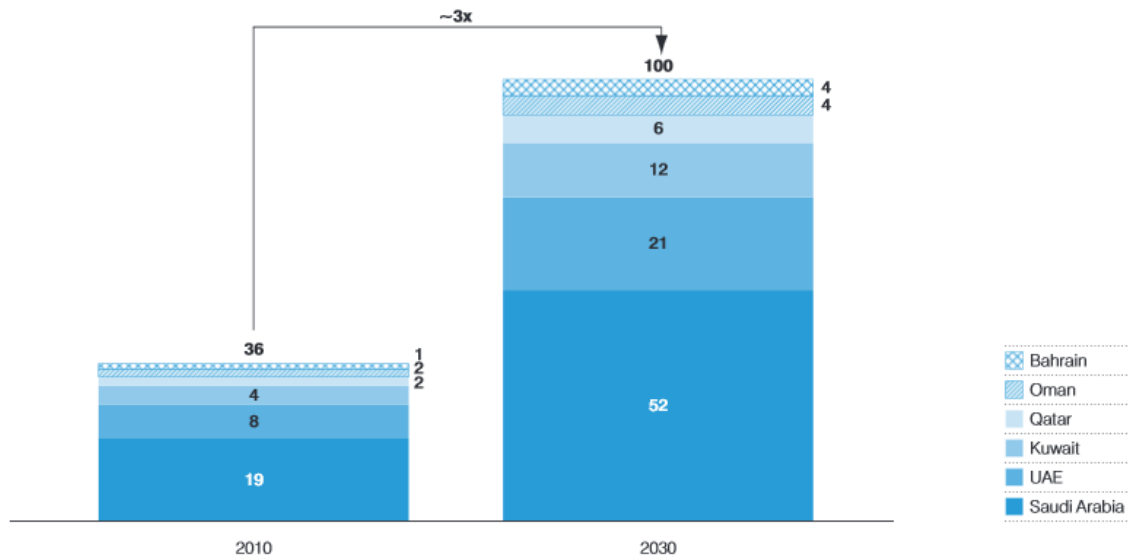
Kaukojäähdytyksen kysyntää Euroopassa käsittelevän RESCUE-projektin (Felsmann et al. 2012) perusteella Euroopan kaukojäähdytysverkoston tuottama jäähdytysteho tulee yli kolminkertaistumaan vuosien 2006 ja 2020 välillä (kuva 2.6). Vuoden 2020 jälkeen jäähdytysmarkkinoiden kasvu tulee tutkimuksen mukaan lähes pysähtymään. Markkinoiden kasvuvauhdin pysähtymistä vuoden 2020 jälkeen perustellaan tutkimuksessa teknologian kehittymisellä, ihmisten sosiaalisen käyttäytymisen muutoksilla sekä energiansäästötoimilla.

RESCUE-projektin mukaan Euroopan kaukojäähdytysmarkkinat ovat tällä hetkellä olennaisesti pienemmät kuin Yhdysvaltojen tai Japanin markkinat, mutta Euroopan markkinoiden nopean kasvuvauhdin ansiosta markkinat saattavat kasvaa jopa kaikkien suurimmiksi. (Felsmann et al. 2012, s.17.)



Kuva 2.6. Arvio Euroopan jäähdytysmarkkinoiden kasvusta (Felsmann et al. 2012).

Voimakkaimmin kasvavat kaukojäähdytysmarkkinat sijaitsevat ilmastoltaan kuumilla alueilla kuten Kaukoidässä. Kuvassa 2.7 on kuvattu jäähdytystarpeen kasvua GCC-maissa vuoteen 2030 mennessä.



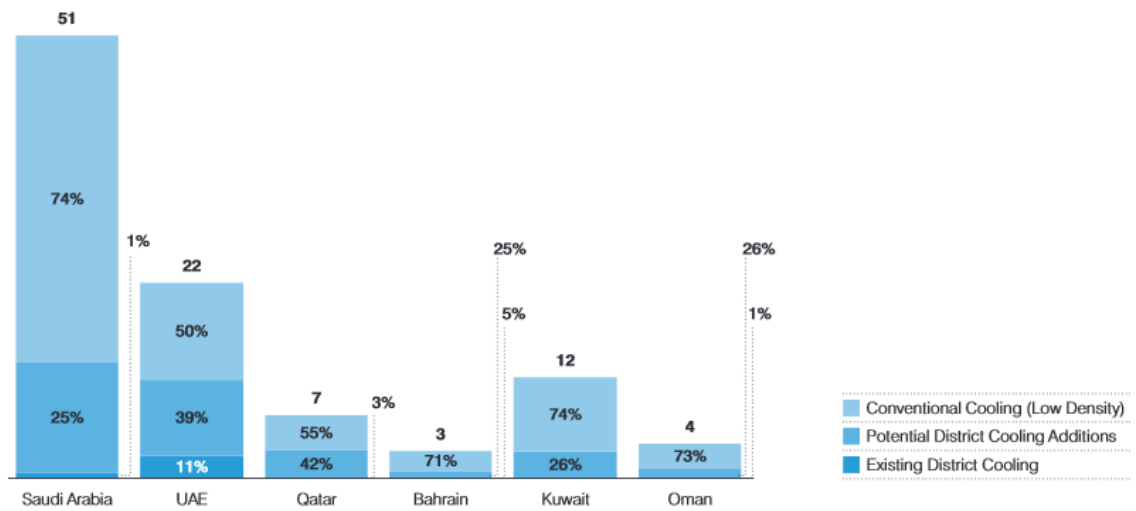
Kuva 2.7. Jäähdytystarpeen arvioitu kasvu GCC-maissa [$\times 10^6$ RT] (Sarraf et al. 2012).

Kuvan 2.7 lukuarvojen yksikkö RT on lyhenne sanoista Refrigeration ton eli suomeksi kylmyystonni. Kylmyystonni kuvaa kuinka monta tonnia jäätä kuluu päivässä jäähdytykseen. 1 RT on 3,517 kilowattia.

Kuvan 2.7 mukaan jäähdytystarve kasvaa GCC-maissa 225 miljoonaa kilowattia vuoteen 2030 mennessä. Tämä tarkoittaa käytännössä jäähdytystarpeen kolminkertaisumista vuoden 2010 tarpeesta. Eniten jäähdytystarve tulee kasvamaan Saudi-Arabiassa ja Arabiemiirikunnissa.

Kuvassa 2.8 on esitetty jäähdytystarpeen jakautumista rakennuskohtaisten ilmastointilaitteiden ja kaukojäähdytysverkoston kesken GCC-alueen maissa. Saudi-Arabian muita GCC-maita pienemmästä asutustiheydestä johtuen kaukojäähdytyksen osuus on vain neljännes maan kokonaisjäähdytystarpeesta. Mitä tiheimmin asutusta maasta on kyse, sitä suurempi on kaukojäähdytyksen arvioitu osuus arvioidusta kokonaisjäähdytysmäärästä vuonna 2030. Kuvan 2.8 perusteella kaukojäähdytyksen määrällisesti suurin kasvupotentiaali on Saudi-Arabiassa.

GCC FORECAST COOLING REQUIREMENTS, 2030
(IN MILLIONS OF RT)



Kuva 2.8. Ennuste jäähdytstarpeesta GCC-maissa [$x 10^6$ RT] (Sarraf et al. 2012).

GCC-alueen lisäksi myös muut samoilla, ilmastoltaan kuumilla, leveyspiireillä sijaitsevat maat ovat potentiaalisia kaukojäähdytyksen kasvumarkkinoita. Monissa näistä maista kaukojäähdytysverkoston suuret investointikustannukset vähentävät kuitenkin innostusta siirtyä keskitetyn jäähdytystekniikan käyttäjiksi.

3 PALLOVENTTIILIN RAKENNE JA SITÄ OHJAAVA LAINSÄÄDÄNTÖ

Kaukolämpöverkostoissa venttiilejä tarvitaan liitos-, muutos- ja korjaustöihin sekä isoissa kaukolämpöverkostoissa lisäksi aluejako- ja säätötoimintoihin. Käyttökohteesta riippuen tarvitaan joko sulk-, ohitus-, säätö-, tyhjennys- tai ilmanpoistovenntiilejä.

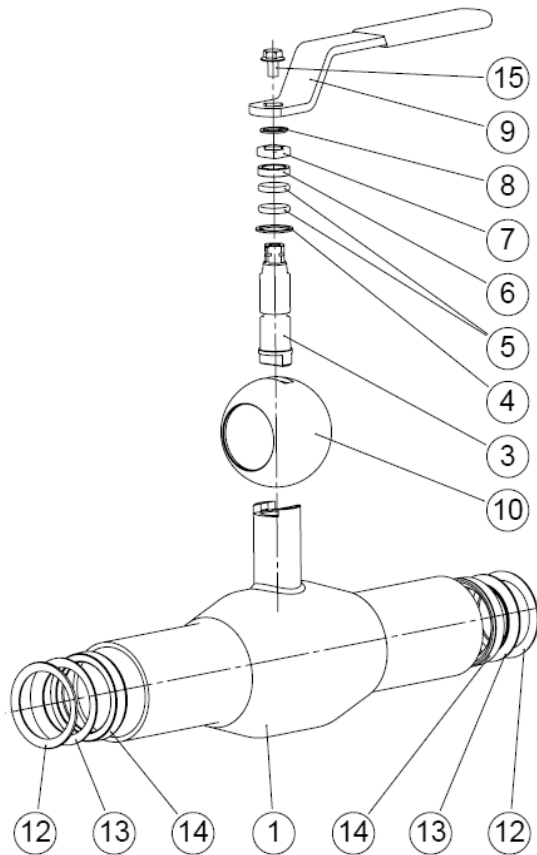
Sulkuventtiileillä verkko voidaan jakaa osiin ja erottaa verkosta tietty johtosuus. Verkossa voi käyttöhäiriöiden aikana esiintyä voimakkaita paineiskuja, jotka kohdistuvat myös sulkuventtiileihin. Jos virtaus pysäytetään sulkemalla venttiili nopeasti, saattaa virtauksen tulopuolelle aiheutua huomattava paineennousu. Suurten venttiilien sulkemista ja avaamista voidaan helpottaa asentamalla venttiilille ohitusventtiili.

Uudet kaukolämpöventtiilit ovat nykyään tyypiltään joko läppä- tai palloventtiilejä. Aiemmin kaukolämpöventtiileinä käytettiin myös luisti- ja istukkaventtiilejä sekä rasvatiivisteisiä tulppahanoja, mutta nykyään niitä ei juuri esiinny edes vanhoissa kaukolämpöverkoissa. (Koskelainen et al. 2006, s.167.)

Kokoluokaltaan DN250 ja sitä suurempina sulkulaitteina käytetään palloventtiilejä tai metallitiivisteisiä läppäventtiilejä. Suuremman kuin DN250 palloventtiilin paino ja tilantarve ovat suurempia kuin vastaavan kokoisessa läppäventtiilissä, jonka takia läppäventtiiliä pidetään näissä kokoluokissa ensisijaisena vaihtoehtona. Palloventtiilin parempi tiiveys kuitenkin puoltaa niiden asentamista verkoston kriittisiin pisteisiin. Kokoluokaltaan DN200 ja sitä pienempinä sulkulaitteina käytetään yksinomaan palloventtiilejä, jotka tiiveytensä puolesta ovat erinomaisia sulkuventtiilejä. (Koskelainen et al. 2006, s.167.)

3.1 Palloventtiilin rakenne

Kaukolämpökohteisiin suunnitellun palloventtiilin runko koostuu paineenkestävästä teräksestä valmistetusta runkoputkesta, kahdesta siihen hitsatusta jatkeputkesta, sekä karaholkista (kuva 3.1, kohta 1). Venttiilin sulkuelimenä toimii ruostumattomasta teräksestä valmistettu pallo (kuva 3.1, kohta 10).



Kuva 3.1. Vexve palloventtiilin rakenne (Vexve Oy).

Palloa ja toimilaitetta yhdistävää akselia kutsutaan karaksi (kuva 3.1, kohta 3). Koska putkiston paine pyrkii työntämään karaa ulos venttiilistä, täytyy karan olla rakenteeltaan sellainen, että karan vahingoittuessaakin venttiilin tiiveys pysyy huoltotöihin asti entisellään. Tämä karan niin sanottu uloslentämätön rakenne on toteutettu tekemällä karan alapäästä halkaisijaltaan paksumpi kuin karan toimilaitteen puoleisesta päästä. Karan paksu alapää, eli vääntiö, työntyy putkistopaineen alaisuudessa kohti karaa ympäröivän karaholkin päätä. Tämä karan ja karaholkin välinen kosketuspinta takaa siis karan uloslentämättömyyden.

Jotta venttiiliin käyttöön vaadittava vääntömomentti pysyisi sujuvan käytön kannalta tarpeeksi pienenä, täytyy karan ja karaholkin kontaktipinnan välissä olla kitka-kerrointa pienentävä PTFE:stä tai vastaavasta materiaalista valmistettu liukulevy (kuva 3.1, kohta 4).

Venttiilin tiiveys varmistetaan kahdella karan ympärillä olevalla FPM:stä tai vastaavasta materiaalista valmistetulla o-renkaalla (kuva 3.1, kohta 5). O-renkaiden pysyvuusliike estetään niiden päälle asetettavalla teräksisellä tiivisteholkilla (kuva 3.1, kohta 6). Venttiilin nopean ja huolettoman käytön takaamiseksi karan yläpäässä on venttiilin kokoluokasta riippuen joko rajoitinlevy (kuva 3.1, kohta 7) tai karan läpi työnnettävä uratappirajoitin rajoittamassa kääntökulmaa, jotta käyttäjä ei voi kääntää venttiilin sulkuelintä yli 90 astetta. Rajoitinlevy on lukittava paikoilleen sen päälle ase-

tettavalla pidätinrenkaalla (kuva 3.1, kohta 8), jotta kahva (kuva 3.1, kohta 9) voidaan tarvittaessa irrottaa niin, että venttiilin toiminta ei häiriinny.

Palloventtiilin rakenne on suunniteltu siten, että putkistoissa olevasta paineesta syntyvä voima pitää venttiilin tiukasti suljettuna sekä ulko- että sisäpuolelta. Jousilevyillä säädettyjen pallontiivisteiden (kuva 3.1, kohdat 12–14) väliin asennettu ”kelluva pallo” liikkuu paineen vaikutuksesta vasten tiivisteitä. Tiivistepintojen rakenteesta johtuen venttiilin tiiveys paranee paineen kasvaessa.

Pallon yhteydessä oleva pallontiiviste on muotoilultaan ympyränmuotoinen ja pallon pintaa mukaileva, jotta tiivistysjännitys olisi tasaisesti jakautunut virtausaukon ympärille. Suurimmassa osassa palloventtiilejä on pehmeä pallontiiviste, joka mukautuu hyvin pallon pintaan. (Zappe 1998, s.101.)

Palloventtiilin kustannuksissa säästämiseksi suurimmassa osassa palloventtiilejä pallon virtausaukko on supistettu noin kolmen neljäsosan kokoiseksi venttiilin nimelliseen kokoon nähden. Painehäviö tällaisella supistettuaukkoisella rakenteella on niin lähellä täysiaukkoisen venttiilin painehäviötä, että täysiaukkoisen venttiilin kalliimpaa hintaa ei yleensä nähdä perustelluksi. (Zappe 1998, s.101.)

Palloventtiilien pallontiivisteissä käytetyin ja tärkein materiaali on PTFE eli polytetrafluorieteeni. PTFE tunnetaan paremmin kauppanimellä Teflon. PTFE:llä on lähes kaikki kemikaalit kattava kemikaalinen kestävyys ja se säilyttää hyvin muotonsa myös erittäin korkeissa lämpötiloissa. Sillä on huono tarttuvuus ja pieni kitkakerroin, sekä hyvä jännityskorroosion kestävyys. PTFE:n käytön rajoittavia ominaisuuksia ovat puolestaan kuluminen, alhainen mekaaninen kestävyys sekä kylmäviruminen. (Vink Finland 2014.)

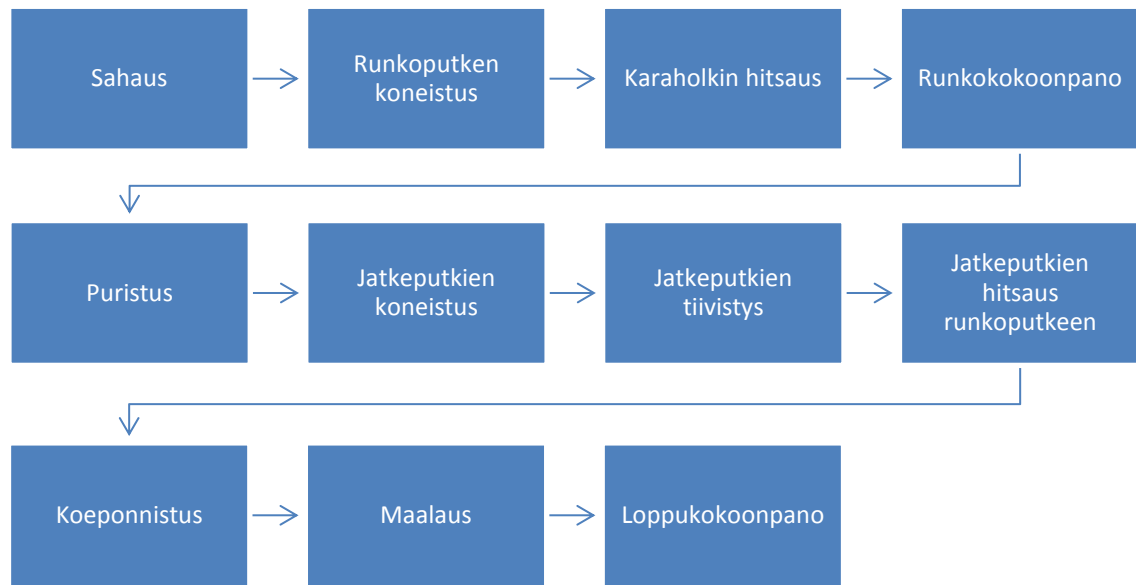
Hyvän lämmönkestävyytensä ansiosta PTFE:tä voidaan käyttää pitkäaikaisesti $-270\text{ °C} - +260\text{ °C}$ lämpötiloissa. PTFE säilyttää elastisuutensa myös alhaisissa lämpötiloissa. Maksimi ja minimikäyttölämpötilat voidaan ylittää hetkellisesti ilman ongelmia. Yli 300 °C lämpötilassa lämpötiloissa tulee varoa molekyyliarakenteen hajoamisesta aiheutuvaa vaarallisten fluoriyhdisteiden vapautumista. (Vink Finland 2014.)

PTFE:n lastuava työstö on helppoa tavanomaisilla työkaluilla. Materiaalin sitkeys ja jännityksettömyys mahdollistavat karkean työstön ilman, että lopputuotteen ominaisuudet heikkenevät. Lisäksi tulee huomioida suhteellisen suuri lämpölaajenemiskerroin ja se, että kiderakenteen muutos 19 °C lämpötilassa aiheuttaa suhteellisen suuria mittamuutoksia. (Vink Finland 2014.)

PTFE:n käyttäminen pallontiivisteinä rajoittaa osaltaan palloventtiilin mahdollisia käyttökohteita. Jos palloventtiili jätetään pitkäksi aikaa osittain auki sen sisällä vallitessa korkea paine, pallo saattaisi painautua syvälle pallontiivisteeseen ja jumittaa venttiilin. Tästä syystä manuaalisesti ohjattavat palloventtiilit soveltuvat parhaiten sulkuventtiiliksi tai lyhytaikaiseen säätökäyttöön. Jos venttiilin ohjaus on automatisoitu ja pallo on jatkuvassa liikkeessä, pallon jumiutumisen ei pitäisi olla huolta. (Zappe 1998, s.101)

3.2 Palloventtiilin valmistusprosessi

Palloventtiilin rakenteessa käytettyjen ratkaisujen ymmärtämiseksi on tunnettava tuotteen tuotantoprosessi. Vaikka diplomityön tavoitteisiin ei varsinaisesti kuulu tuotteen valmistusprosessin kehittäminen, suunnittelussa on kuitenkin huomioitava nykyiset valmistuskustannukset sekä ymmärrettävä mitä vaikutuksia tuotteen rakenteen muuttamisella on valmistuskustannuksiin.



Kuva 3.2. Palloventtiilin tuotantoprosessi yksinkertaistettuna.

Vexven DN65–150 kokoluokkien palloventtiilit valmistetaan tällä hetkellä Liperin tehtaalla Itä-Suomessa. Palloventtiilin tuotantoprosessin työvaiheet on esitetty kuvassa 3.2. Venttiilin valmistus alkaa sahaamalla runko- ja jatkeputkien aihiot määrämitta. Tämän jälkeen runkoputki-aihiin koneistetaan reikä karaholkkia varten ja putken päihin koneistetaan viisteet jatkeputkien hitsausta varten. Koneistuksen jälkeen runkoputkeen hitsataan karaholkki. Tätä seuraa runkokokoonpano, jossa koneistettu kara asetetaan runkoputken sisäkautta karaholkkiin ja pallo asetetaan kohdakkain karan kanssa. Pallon asettamisen jälkeen runkoputken päät puristetaan jatkeputkien ulkohalkaisijaa vastaavaan mitta.

Jatkeputket lähtevät sahauksen jälkeen puristukseen ja koneistukseen. Kun jatkeputki on valmis, sen sisään asennetaan tiiviisti lautasjousi, tukilevy ja pallontiivistet. Tämä jatkeputkikokoonpano yhdistetään jo puristettuun runkokokoonpanoon hitsaamalla. Tässä vaiheessa venttiili on jo käytännössä valmis ja se voidaan koeponnistaa. Tiiveystestin läpäistyään venttiili maalataan ja lopuksi siihen kiinnitetään käsikahva tai muu toimilaite.

3.3 Suunnittelua ohjaava lainsäädäntö

Kaukolämpökohteisiin tarkoitettujen palloventtiilien rakennetta säätelevät erityisesti painelaitedirektiivi eli PED, Energiateollisuus ry:n suositukset sekä useat yleiseurooppalaiset laatustandardit, joista tärkeimpinä SFS-EN 488 ja SFS-EN 1983.

3.3.1 Pinalaitedirektiivi

Painelaitedirektiivi koskee uusien painelaitteiden ja laitekokonaisuuksien suunnittelua, valmistusta ja vaatimustenmukaisuuden arviointia. Painelaitedirektiivi käsittelee paineesta aiheutuvia vaaroja ja koskee ensimmäistä markkinoille saattamista sekä käyttöönottoa Euroopan talousalueella. Se ei sisällä vaatimuksia käytönaikaisista tarkastuksista. Venttiilivalmistajan ei ole pakko noudattaa PED:n kanssa harmonisoituja standardeja, mutta ne ovat hyvä keino osoittaa painelaitteelle vaadittavan vaatimustenmukaisuusolettaman täytyminen.

Palloventtiilin rakennetta ja täten myös suunnittelua eniten koskettava PED:n kanssa harmonisoitu standardi on SFS-EN 1983. Se määrittelee vaatimukset teräksisille teollisuuspalloventtiileille. Suunnittelun kannalta standardin SFS-EN 1983 oleellimmat kohdat ovat luvussa 4.1.1.4 määritellyt pienimmät sallitut virtausaukon halkaisijat kullekin venttiilikoolle, luvun 4.1.1.5 määräys uloslentämättömästä ”anti-blow out”-rakenteesta sekä viittaukset muihin PED:n standardeihin, joita palloventtiilin tulee noudattaa. Suunnittelun kannalta huomionarvoisia viittauksia muihin standardeihin ovat erityisesti venttiilin rungon lujuustarkastelut määrittelevä SFS-EN 13445-3, venttiilin painetestaustandardi 12266-1 ja venttiilien rakennepituudet määrittelevät standardit SFS-EN 558, SFS-EN 12982.

Painelaitedirektiivin kanssa harmonisoituihin standardeihin kuuluu myös materiaalistandardeja, joissa määritellään hyväksytyt painelaiteteräslaadut. Näitä materiaali-standardeja ovat SFS-EN 10028, SFS-EN 10216 ja SFS-EN 10217. Harmonisoitujen standardien joukossa on omat standardinsa koskien venttiilien merkitsemistä (SFS-EN 19), metallituotteiden ainestodistuksia SFS-EN 10204, hitsausliitosten muotoja SFS-EN 1708 ja muita hitsausohjeita SFS-EN 15614. Standardien asettamia yksityiskohtaisia vaatimuksia on eritelty tarkemmin diplomityön varsinaista tuotekehitysprosessia käsittelevässä luvussa.

3.3.2 Kaukolämpöventtiilistandardi SFS-EN 488

Kaukolämpöventtiilistandardi SFS-EN 488 määrittelee vaatimukset ja koemenetelmät suoraan maahan asennettaville, kuuman veden johtamiseen käytettäville esieristetyille venttiilielementeille, joiden rakenneosia ovat teräsventtiili, jäykkä polyuretaanieriste ja polyeteenistä valmistettu suojakuori. (SFS-EN 488 2014, s.7.)

SFS-EN 488:n mukaan venttiilit tulee suunnitella joko 16 bar:n tai 25 bar:n putkiston käyttöpaineelle. Venttiilien tulee kestää nämä olosuhteet puolitoista kertaa venttiilin paineluokan suuruudessa koepaineessa niin avattuna kuin suljettunakin. Standardin

mukaan venttiili tulee suunnitella kestävä jatkuvaa käyttöä 120 °C:ssa ja vaihtelevissa lämpötiloissa. (SFS-EN 488 2014, s.9.)

SFS-EN 488:n mukaan venttiilin tulee olla rakenteeltaan täysin hitsattu. Irrotettavia osia, kuten laippa- tai kierrelitoksia, pois lukien karan tiivisteet, ei saa olla paineenalaisilla alueilla. Venttiilin hitsauspäiden nimellishalkaisijan, ulkohalkaisijan, ulkohalkaisijan toleranssin sekä seinämän paksuuden tulee olla standardin SFS-EN 488 mukaisia. Venttiilin rungon ulkohalkaisijan ja seinämän paksuuden tulee puolestaan olla standardin SFS-EN 488 mukaisia. Venttiilin pituustoleranssiksi on standardissa määrätty ± 20 mm ja korkeustoleranssiksi ± 5 mm. (SFS-EN 488 2014)

Kaukolämpöverkostossa palloventtiiliä ympäröivän polyuretaanieristyksen tulee noudattaa standardin SFS-EN 488 minimipaksuuksia. Standardissa määrätty minimieristyspaksuus sanelee samalla venttiilin karaholkin minimipituuden, sillä karaholkin yläpään pitää jäädä polyuretaanikerroksen ulkopuolelle. Karan ja karaholkin yläpää täytyy näin ollen myös suunnitella kestävä aggressiivisia luonnonoloja kuten kuumuutta, kylmyyttä, likaa ja suolaista vettä. (SFS-EN 488 2014, s.11.)

SFS-EN 488:n (2014) mukaan DN150 ja pienemmissä sulkulaitteissa käytetään yleensä toimilaitteena käsikahvaa tai T-avainta. DN200 ja suuremmissa venttiileissä tulee olla toimilaitte tai ainakin toimilaitelaippa toimilaitetta varten venttiilin hallitun käsittelyn takaamiseksi. Venttiilin kahva tulee olla irrotettavissa ilman, että venttiiliä ympäröivää eristettä täytyy purkaa.

3.3.3 Energiateollisuus ry:n suositukset

Energiateollisuus ry:n julkaisemat kaukolämpöverkostojen rakentajille suunnatut ohjeet ja suositukset perustuvat yleiseurooppalaisiin standardeihin, mutta sisältävät usein myös Suomen erityisolosuhteet huomioonottavia lisäyksiä.

Kaukolämpöventtiilien rakenteeseen liittyen Energiateollisuus ry on julkaissut suosituksen L4/2012, joka pohjautuu pääosin kaukolämpöjohtojen venttiilielementtejä koskevaan standardiin SFS-EN 488 ja täydentää sitä. Suositus L4 (2012) koskee sekä suoraan maahan asennettavissa venttiilielementeissä käytettäviä, että kaivon asennettavia kaukolämpöverkon sulkulaitteita. Suosituksessa on lueteltu sulkulaitteiden sekä niiden toimilaitteiden tekniset vaatimukset, venttiilien testausmenetelmät ja -vaatimukset sekä näihin liittyen tuotteiden laadunvarmistusta, toimitusta ja merkintää koskevat ohjeet. (L4 2012.)

Suosituksen L4 (2012) mukaan sulkuventtiileinä tulee käyttää joko pallo- tai läppäventtiilejä. Palloventtiilien käyttö on suositeltavaa niiden läppäventtiilejä paremman tiiveyden takia, mutta isoimmista kokoluokista läppäventtiilejä voidaan käyttää hinta- ja tilantarvesyistä. Läppäventtiilien tulee olla metallitiivisteisiä. Venttiilin virtausaukko voi olla supistettu tai täysi. Verkon sulkuventtiilien tulee normaalisti olla hitsauspäillä varustettuja. erikoistapauksissa, esimerkiksi perusparannuksissa voidaan käyttää myös laipallisia ja laippojen väliin asennettavia venttiilejä.

Suositus L4 (2012) määrää mitoittamaan venttiilin rungon siten, että se kestää sisäpuolisesta paineesta ja kiertoveden lämpötilamuutoksista aiheutuvat jännitykset sekä

asennuksen aiheuttamat nostovoimat ja jännitykset. Venttiili on varustettava nostokorvilla, jos se muuten ei ole nostettavissa. Venttiilien, joihin ei ole merkitty virtaussuuntaa, tulee kestää painekuormat ja olla tiivis molempiin suuntiin. Venttiilien sulkutiiviyys testataan tällöin molempiin virtaussuuntiin. (L4 2012, s.2-3.)

Suosituksessa L4 (2012) on annettu myös monia venttiilin tiettyihin osiin kohdistettuja vaatimuksia. Venttiilissä käytettävien materiaalien osalta on kirjoitettu, että rungon tulisi olla PED:n mukaista terästä, karan sekä pallon tulisi olla ruostumatonta terästä ja pallontiivisteiden hiilivahvisteista teflonia. Pallon virtausaukon tulee vähintään olla yhtä suuri kuin edellinen nimelliskoko millimetreinä. (L4 2012, s.4.)

Venttiilin maalauksen osalta on suosituksessa L4 (2012) määrätty, että runko maalataan vähintään hitsausalueen verran yli hitsauspäiden liitossauman. Hitsauspäät tulee kuitenkin jättää maalaamatta vähintään 50 mm matkalta. Esieristettyihin elementteihin tulevat venttiilit voidaan jättää kokonaan maalaamatta.

Palloventtiilin tuotekehitykseen liittyviä Energiateollisuus ry:n muita suosituksia ovat L1 (2010) ja L7 (2003). Suositus L1 (2010) sisältää koko järjestelmälle, suorille elementeille ja valmisosille sekä teräsputkille ja -osille, eristykselle ja suojaputkille asetetut vaatimukset ja testausmenetelmät sekä näihin liittyen tuotteiden laadunvarmistusta, merkintää sekä asennusta ja asennusvalvontaa koskevia ohjeita.

Suositus L7 (2003) koskee kaukolämpöjohdoissa käytettäviä teräsputkia ja teräskäyriä. Suosituksessa on esitetty putkien ja käyrien tekniset vaatimukset ja testausmenetelmät sekä testausta, valmistuksen valvontatoimia ja merkintää koskevat ohjeet.

4 PALLOVENTTIILIN KEHITYKSEN TEOREETTINEN TAUSTA

Tässä luvussa esitellään diplomityössä käytettävät tekniset ja teoreettiset taustatiedot, jotka ovat välttämättömiä diplomityössä käytettyjen menetelmien ymmärtämiseksi.

4.1 Nestevirtauksen periaatteita

Palloventtiilin virtauskanavan muotoilulla on suuri merkitys venttiilin aiheuttamaan virtausvastukseen ja täten myös venttiilin yli vaikuttavaan paine-eroon. Jotta suunnitteluvaiheessa tiedettäisiin mihin asioihin virtauskanavan muotoilussa on kiinnitettävä huomiota virtausvastuksen minimoimiseksi, on tässä vaiheessa tarpeellista käydä läpi muutamia nestevirtauksen peruseriaatteita.

4.1.1 Viskositeetti

Todellisessa häiriöttömässä putkivirtauksessa virtausprofiilin muoto on enemmän tai vähemmän kaareva. Aivan putken sisäseinämässä kiinni olevan nesteosasen virtausnopeus on nolla ja johdon keskikohdalla olevan nesteosasen virtausnopeus on suurimmillaan $v = v_{max}$. Koska eri nesteosasten välillä on nopeuseroja, hankaavat virtaavan aineen molekyylit toisiaan vasten. Tällöin syntyy sisäistä kitkaa, jota nimitetään virtaavan aineen viskositeetiksi. (Laiho 2009, s.31.)

Toisin sanoen virtausaineen viskositeetilla tarkoitetaan aineen kykyä vastustaa vierekkäisten kerrosten välisiä siirtymiä. Jähmeällä nesteellä on suuri viskositeetti. Viskositeetin kasvaessa Reynoldsin luku pienenee eli virtaus muuttuu laminaarisemmaksi. (Metropolia 2011.)

Nesteen sitkeysominaisuuksia eli kitkaa kuvataan verrannollisuuskertoimella η , dynaaminen viskositeetti. Teoreettisissa tarkasteluissa käytetään kuitenkin dynaamisen viskositeetin sijasta yleisesti kinemaattista viskositeettia ν . (Kauranne H. et al. 2008, s. 24.)

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \tag{1}$$

jossa η on nesteen dynaaminen viskositeetti ja
 ρ on nesteen tiheys

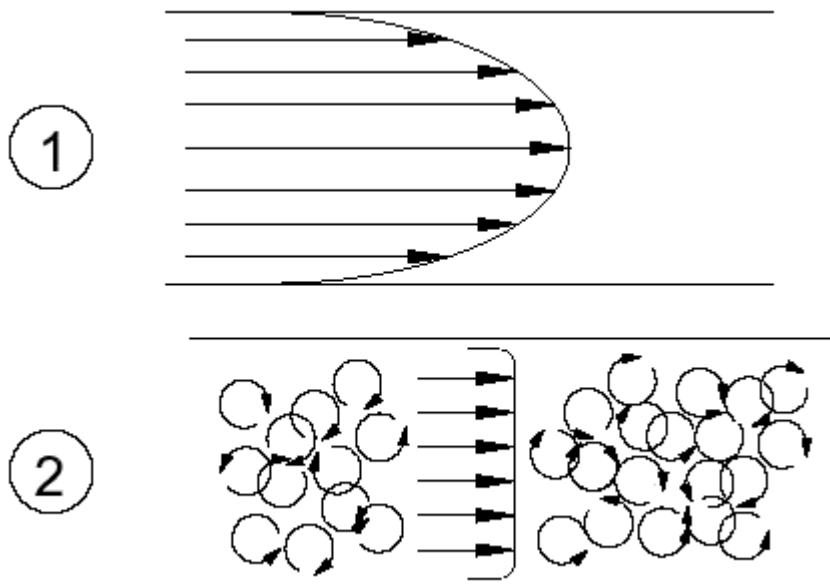
Nesteen viskositeetti kasvaa lievästi paineen kasvaessa ja pienenee melko voimakkaasti lämpötilan noustessa, nesteen ominaisuuksista riippuen. Kinemaattisen vis-

kositeetin yksikkö on m^2/s . Veden kinemaattinen viskositeetti lämpötilassa $20\text{ }^\circ\text{C}$ on $1,00 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ ja lämpötilassa $40\text{ }^\circ\text{C}$ vastaavasti noin $0,66 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$.

Viskositeetti otetaan huomioon venttiilin mitoituksessa kapasiteettikertoimen yhtälössä (6) kertoimella F_R . Viskositeetin kasvulla on käytännössä vaikutusta kapasiteettikertoimen arvoon vasta kun viskositeetti on luokkaa $100 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ ja virtausnopeus on pieni.

4.1.2 Virtaustyytit

Jotta järjestelmän virtaushäviöt eli nesteen siirtohäviöt olisivat mahdollisimman pieniä, virtauksen tulisi olla tasaista ja pyörteetöntä. Putkivirtaus on kuitenkin lähes aina luonteeltaan turbulენტtista eli pyörteistä. Laminaarista eli kerrosmaista virtausta (Kuva 4.1, kohta 1) esiintyy lähinnä nesteillä, joiden viskositeetti on hyvin korkea tai virtausnopeus hyvin pieni. Virtaushäviöt kasvavat laminaarisessa virtauksessa lineaarisesti virtausnopeuden funktiona. Turbulenttisessa virtauksessa (Kuva 4.1, kohta 2) häviöt taas kasvavat eksponentiaalisesti virtausnopeuden funktiona eli laminaarista virtausta nopeammin. (Kauranne H. et al. 2008, s. 27–28.)



Kuva 4.1. Putkivirtauksen luonne (Metropolia 2011).

Virtauksen luonnetta voidaan arvioida Reynoldsin luvun Re avulla. Reynoldsin luku määritellään yhtälöllä

$$Re = \frac{v D_H}{\vartheta} \quad (2)$$

jossa v on virtausnopeus,
 ϑ on kinemaattinen viskositeetti ja

D_H on hydraulinen halkaisija, joka puolestaan määräytyy kaavasta

$$D_H = \frac{4 \cdot A}{L_A} \quad (3)$$

jossa A on virtauskanavan poikkileikkauksen pinta-ala ja
 L_A on poikkileikkauksen piiri.

Virtaus muuttuu laminaarisesta turbulenttiseksi niin kutsutun siirtymäalueen kautta. Siirtymäalueella esiintyy sekä laminaarista että turbulenttista virtausta. Laskennassa siirtymäalueen virtaus oletetaan yleensä turbulenttiseksi. (Kauranne H. et.al. 2008, s.29.) Putkivirtausta voidaan pitää varmasti laminaarisena, kun Reynoldsin luku Re on alle 2000 ja varmasti turbulenttisenä, kun Reynoldsin luku on yli 4000. Tarkkaa virtauksen muuttumiskohtaa vaativissa tarkasteluissa käytetään niin sanottua kriittistä Reynoldsin lukua Re_{kr} , jonka arvoksi on sovittu 2300.

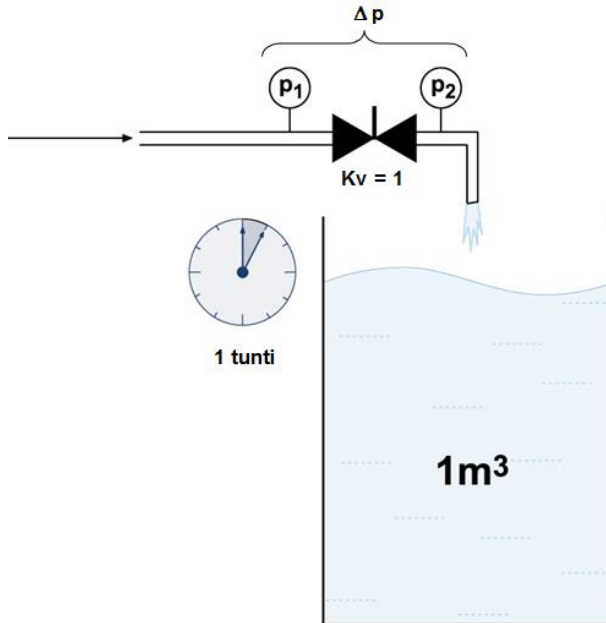
Putkistojen painehäviölaskennassa on tiedettävä onko virtaus mitoitettavassa johdossa laminaarista vai turbulenttista, sillä eri virtausmuotoihin on sovellettava eri yhtälöitä.

4.1.3 Palloventtiilin kapasiteettikerroin

Venttiilin läpi kulkevan tilavuusvirran suhdetta venttiilin yli vaikuttavaan paine-eron neliöjuureen kutsutaan kapasiteettikertoimeksi. Tietty virtausaukko omaa aina tietyn kapasiteettikertoimen.

Venttiilin kapasiteettikertoimeen voidaan vaikuttaa huomattavasti venttiilin mitoitusvaiheessa. Kapasiteettikerrointa voidaan suurentaa pallon virtausaukkoa suurentamalla ja muotoilemalla venttiilin virtauskanava mahdollisimman virtaviivaiseksi. Jatkeputken puristukset tulisi minimoida, jotta venttiilin K_v -arvo olisi mahdollisimman suuri. Käytännössä jo venttiilin nimelliskokoluokka kertoo tarpeeksi tarkasti venttiilin kapasiteettikertoimen, mutta kilpailijoita korkeampaa K_v -arvoa voidaan silti pitää pienenä kilpailuetuna.

Kirjallisuudessa käytetään kolmea eri kapasiteettikerrointa: K_v , C_v ja A_v . Eri kapasiteettikertoimet voidaan ratkaista toisistaan matemaattisesti. Euroopassa eniten käytetty venttiilin kapasiteettikerroin on K_v . Se kertoo kuinka monta kuutiometriä nestettä virtaa venttiilin läpi yhdessä tunnissa, kun venttiilin yli vaikuttaa 1 bar suuruinen paineero. Kapasiteettikerrointa on havainnollistettu oheisessa kuvassa.



Kuva 4.2. K_v kertoo venttiilin läpi virtaavan nestemäärän tunnissa (Metropolia 2014).

Kapasiteettikerroin K_v määritellään yhtälöllä

$$K_v = Q \cdot \sqrt{\frac{G_f}{\Delta p / \Delta p_{ref}}} \quad (4)$$

jossa Q on tilavuusvirta,
 G_f on suhteellinen nesteen tiheys,
 Δp on venttiilin yli vaikuttava paine-ero ja
 Δp_{ref} on referenssiarvo paine-erolle venttiilin yli.

Venttiilissä virtaavan nesteen tiheyden ollessa lähellä referenssitiheyttä, kuten vesivirtauksissa yleensä on, voidaan edellä esitetty kaava yksinkertaistaa muotoon

$$K_v = \frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} \quad (5)$$

Kun virtaavalla aineella korkea viskositeetti tai venttiili on nimelliskooltaan usean koon pienempi kuin putkisto, voidaan venttiilin läpi kulkeva tilavuusvirta laskea oheisesta yleisestä venttiilin kapasiteettiyhtälöstä. Kapasiteettiyhtälö ottaa huomioon virtauksen mahdollisen laminaarisen luonteen ja venttiilin yhteydessä olevat putkikartiot. Kaava on voimassa kavitoimattomille virtauksille. Yleinen venttiilien kapasiteettiyhtälö on

$$Q = K_v \cdot F_P \cdot F_R \cdot \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{G_f}} \quad (6)$$

jossa F_P on putkiston geometriakerroin ja
 F_R on turbulentsuuskertoimen.

Putkiston geometriakerrointa F_P tarvitaan, kun venttiili asennetaan putkistoon, jonka virtauskanavan halkaisija on merkittävästi isompi kuin venttiilin virtauskanavan halkaisija. Tällöin venttiilin yhteydessä joudutaan käyttämään putkikartioita venttiilin liittämiseksi putkistoon. Putkikartioiden vaikutuksesta venttiilin kapasiteettikertoimen täytyy olla isompi kuin vastaavan venttiilin ilman putkikartioita. Putkiston geometriakerroin F_P ottaa putkikartioiden vaikutuksen huomioon. (Niemelä 1989.)

Turbulentsuuskertoimen F_R on puolestaan riippuvainen nesteen viskositeetista ja täten myös Reynoldsin luvusta.

4.1.4 Palloventtiilin virtaushäviöt

Nesteen virtaus putkistossa aiheuttaa tehohäviöitä, jotka ilmenevät paineen alenemisena virtaussuunnassa. Nämä häviöt voidaan jakaa kahteen ryhmään: putkiston suorilla osuuksilla syntyviin kitkavastushäviöihin sekä putkiston venttiileissä ja yleensäkin virtauspoikkipinta-alan tai virtaussuunnan muutoksissa syntyviin kitkahäviöihin, joita tässä tapauksessa kutsutaan kertavastushäviöiksi. (Kauranne H. et.al. 2008, s.57.)

Kitkavastukset syntyvät virtaavan nesteen sisäisestä kitkasta eli viskositeetista sekä johdon sisäpinnan seinämän ja virtaavan aineen välisestä kitkasta. Putkiston suorilla osuuksilla syntyvän kitkavastushäviön yhtälö poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoiselle putkelle, kuten kaukolämpöputkelle, on

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (7)$$

jossa λ on kitkavastuskerroin,
 l on virtauskanavan pituus,
 d on virtauskanavan halkaisija,
 ρ on nesteen tiheys ja
 v on virtausnopeus.

Turbulenttien virtaustapauksien kitkavastuskerroinyhtälöt on määritetty kokeellisesti, sillä niiden johtaminen puhtaasti teoreettisesti ei ole mahdollista. Kitkavastuskertoimeen vaikuttaa Reynoldsin luvun lisäksi putken seinämän karheus ja putkikoko. Lisäksi näiden vaikutus kertoimeen ei ole vakio vaan se vaihtelee Reynoldsin luvun mukaan. Kitkavastuskertoimen arvo turbulentsissa tapauksissa voidaan ratkaista joko kokeellisilla yhtälöillä tai katsoa käyrästä. (Kauranne H. et.al. 2008, s.59.)

Painehäviölaskelmissa kitkavastukset on kätevä esittää putkijohdon pituusyksikköä eli metriä kohden. Tätä kitkayksikköä merkitään LVI-tekniikassa perinteisesti tun-

nuksella R , joka kuvaa siis putkijohdon kitkavastusten aiheuttamaa painehäviötä pituutta kohden.

$$R = \frac{\Delta p}{l} = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (8)$$

Käytännön painehäviöiden käsinlaskennassa putkisto-osien kitkavastus/pituus - suhde R katsotaan painehäviödiagrammeista tai taulukoista ja saatu R kerrotaan johto-osan pituudella, jolloin tulokseksi saadaan kyseisen johto-osan kitkavastusten aiheuttama painehäviö Δp . (Laiho 2009, s.45.)

$$\Delta p = R \cdot l \quad (9)$$

Suoran putkijohdon kitkavastusten laskentayhtälö (7) on muodoltaan yksinkertainen. Kitkavastus on yhtälön (7) mukaan suoraan verrannollinen johdon pituuteen ja dynaamiseen paineeseen, sekä kääntäen verrannollinen johdon sisähalkaisijaan verrannollisuuskertoimen ollessa kitkavastuskerroin λ . Yhtälön (7) soveltamisen vaikeudet keskittyvätkin kitkavastuskertoimen λ määrittämiseen. (Laiho 2009, s. 45.)

Kitkavastuskerroin λ riippuu virtaavasta aineesta, virtauksen luonteesta ja johdon sisäpinnan laadusta. Johdon sisäpinnan laatua kuvataan usein suhteellisella karheudella k/d , jossa k on johdon sisäpinnan karheus millimetreissä ja d on johdon sisähalkaisija millimetreissä. Erilaisten putkijohtojen sisäpinnan karheuden k arvoja saadaan käsikirjoista. (Laiho 2009, s. 46.)

Kitkavastuskertoimen määrittäminen on aloitettava selvittämällä virtauksen luonne. Tämä suoritetaan laskemalla Reynoldsin luku virtaukselle ja päättämällä onko virtaus laminaarista vai turbulentista.

Laminaarisessa virtauksessa kitkavastuskerroin riippuu ainoastaan virtauksen Reynoldsin luvusta. Putkijohdon sisäpinnan karheus k ei vaikuta kitkavastuskertoimeen, sillä virtaus on niin rauhallista, että kitkaa ei ole huomioitu. Kitkavastuskertoimen λ yhtälö saa näin ollen laminaarisessa virtauksessa muodon

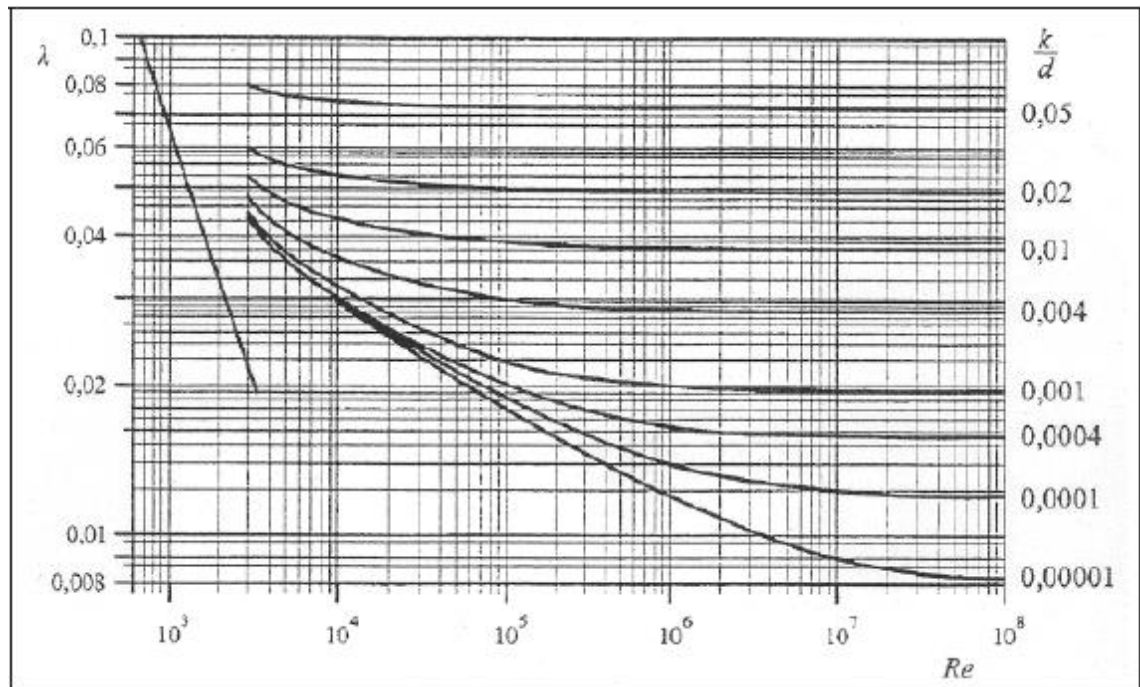
$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (10)$$

jossa Re on virtauksen Reynoldsin luku.

Yhtälöä (10) kutsutaan keksijöidensä mukaan Hagen-Poiseullen yhtälöksi. Putkivirtaus on kuitenkin hyvin harvoin laminaarista ja näin ollen kitkavastuskertoimen λ määrittäminen on harvoin näin yksinkertaista. (Laiho 2009, s. 47.)

Turbulenttisessa virtauksessa kitkavastuskerroin λ riippuu virtauksen Reynoldsin luvun Re lisäksi myös putkijohdon sisäpinnan karheudesta k . Riippuvuudet ovat niin monimutkaisia, että tavallisesti kolmelle eri karheustyypille: hydraulisesti sileille, puolikarheille ja karheille, joudutaan käyttämään eri yhtälöitä. Käytännön käsinlaskennan

tarpeita on professori Lewis Ferry Moody kehittänyt nimeään kantavan Moodyn käyrästön, josta kitkavastuskerroin λ saadaan selville Reynoldsin luvun Re ja suhteellisen karheuden k/d avulla.



Kuva 4.3. Moodyn käyrästö (Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2007, s.15).

Periaatteessa kitkavastuskerroimen arvo muuttuu aina, kun Reynoldsin luku tai suhteellinen karheus muuttuvat. Kitkavastuskerroin olisi siis määritettävä uudelleen aina, kun esimerkiksi putkikoko muuttuu. Koska kitkavastuskerroimen muutokset ovat suhteellisen pieniä edellä Reynoldsin luvun ja karheuden vaihdellessa, voidaan putkistojen rutiinimitoituksessa käyttää koko verkostolle samaa kitkavastuskerroimen arvoa. (Laiho 2009, s.50.)

Niissä putkiston osissa, joissa muutetaan virtauksen suuntaa tai nopeutta, syntyy kertavastushäviöitä. Tällaisia osia ovat esimerkiksi putkimutkat ja -haarat, liittimet sekä venttiilit, joissa virtaus muuttuu turbulenttiseksi jo pienillä Reynoldsin luvuilla. Laminaaria virtausta näissä osissa esiintyy sen sijaan vain harvoin. Kertavastushäviöstä aiheutuva painehäviö saadaan yhtälöstä

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (11)$$

jossa ζ on kertavastuskerroin,
 ρ on nesteen tiheys ja
 v on virtausnopeus

Kertavastuskerroimen arvo riippuu siis virtauskanavan rakenteesta ja Reynoldsin luvusta. Kirjallisuudessa on käsitelty teoreettisesti useita eri virtauskanavatapauksia ja

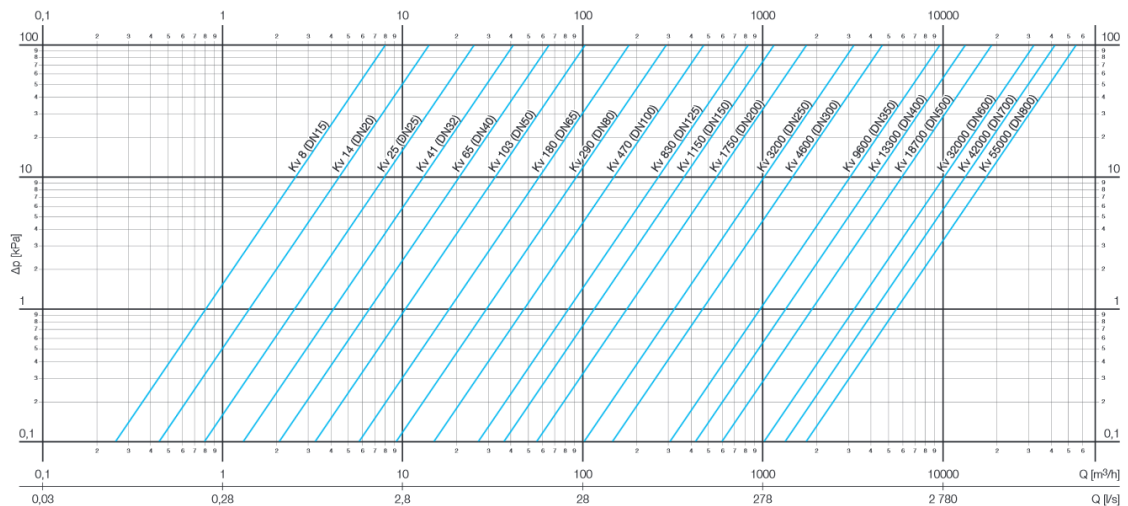
ilmoitettu näille kertavastuskertoimen arvoja, joista esimerkkinä ovat oheisen taulukon arvot.

Taulukko 4.1. Kertavastuskertoimen arvoja. (Kauranne H. et al. 2008, s. 65.)

Putkiston osa	ζ
Suora putkiliitos	0,5
Kulmaliitos	1,0
Putkimutka	0,4
Putkihaara	1,0
Putken laajennus	0,5
Venttiilit	3-6

Taulukossa 4.1 esitettävät kertavastuskertoimen arvot ovat vain suuntaa antavia. Esimerkiksi kuristukseen perustuvan venttiilin kerroin voi venttiilin asetuksen mukaan vaihdella välillä 0,5–300 ja saada tätäkin suurempia arvoja aina äärettömään asti (Kauranne H. et al. 2008, s.65). Täysiaukkoisen palloventtiilin kertavastuskertoimelle on annettu kirjallisuudessa arvoksi $\zeta = 0,1$. (Zappe, R.W. 1998, s.28.)

Putkistojen suurimmat kertavastushäviöt aiheutuvatkin yleensä juuri venttiileistä. Ne voidaan epämääräisten kertavastuskertoimien sijaan määrittää valmistajien antamista ominaiskäyristä tai -käyrästä, jotka ilmoittavat komponentin aiheuttaman painehäviön komponentin läpäisemän tilavuusvirran funktiona. Oheisessa kuvassa 4.4 on esitetty Vexven palloventtiilien ominaiskäyrästä.



Kuva 4.4. Vexven palloventtiilien ominaiskäyrästä (Vexve Oy 2014).

Putkiston kokonaispainehäviö on suorien putkenosien kitkahäviöiden ja putkiston kertavastushäviöiden summa eli

$$\Delta p = \Delta p_{\text{kitka}} + \Delta p_{\text{kerta}} \quad (12)$$

Painehäviö on likimain verrannollinen virtausmäärän toiseen potenssiin. Kun tunnetaan painehäviö jollakin tietyllä tilavuusvirralla, voidaan painehäviö jollekin toiselle tilavuusvirralle laskea yhtälöllä

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} \right)^2 \quad (13)$$

Koska vastuksista aiheutuu huomattava häviö, on putket pyrittävä mitoittamaan optimaalisesti siten, että sekä vastukset että putkikoko ovat edullisimmat (Koskelainen et al. 2006, s.202).

4.1.5 Kavitaatio

Kavitaatiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa nesteen virtaukseen syntyy ensin höyrykuplia ja sen jälkeen kuplat romahtavat kasaan. Kun nesteessä vallitseva paine laskee alle ilmanpaineen arvon, nesteessä liuenneessa muodossa oleva ilma alkaa tietyn painetason saavuttamisen jälkeen erottua vapaiksi kupliksi. Jos paineen lasku edelleen jatkuu ja saavutetaan nesteen höyrystymispaineeksi kutsuttu painetaso, neste alkaa höyrystyä ja siihen alkaa muodostua myös höyrykuplia. Kun nesteessä vallitseva paine jälleen nousee, kuplien koko pienenee ja lopulta höyrykuplat tiivistyvät nesteeksi ilmakuplien puolestaan liuetessa takaisin nesteeseen. Höyryn tiivistymisen ja ilman liukenemisen erona on se, että tiivistyminen on huomattavasti nopeampaa kuin liukeneminen, ja ilmiö on luonteeltaan romahdusmainen käännteinen räjähdys, ”implosion”. (Kauranne H. et.al. 2008, s. 106.)

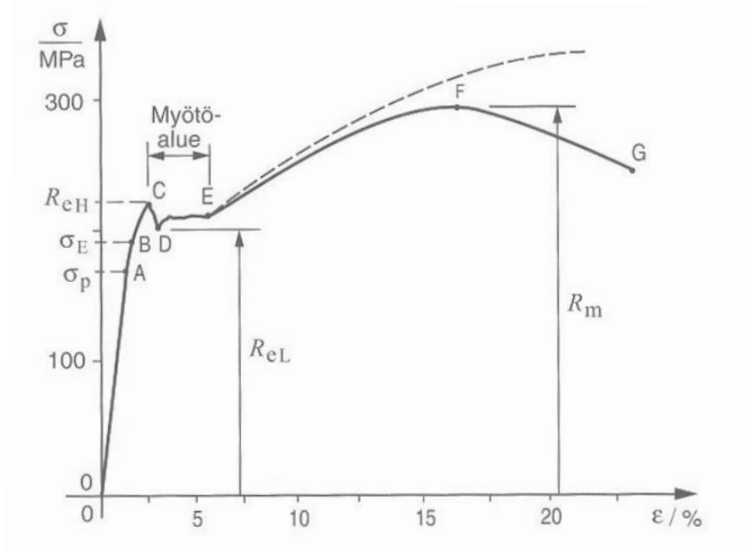
Venttiilin geometrialla on merkitystä venttiilin kavitoitiherkkyteen. Suurilla avautumilla palloventtiilin kavitoitiriski on suurimmillaan. Tämän vuoksi suuremman venttiilin valitseminen vähentää jonkin verran kavitoitiriskiä ja samalla melua. Vaikka kavitoinnin aiheuttamat ongelmat varsinkin kaukolämpöverkoston palloventtiileissä ovat äärimmäisen harvinaisia, kavitoinnin mahdollisuus on kuitenkin otettava huomioon venttiiliä kehitettäessä.

4.2 Tekninen laskenta

Erityisesti teräksen ominaisuudet sekä vääntölujuus olivat keskeisessä asemassa tutkittaessa venttiilin karan kestävyyttä. Seuraavassa luvussa käydään läpi karan suunnittelun kannalta tärkeimmät lujuusopin ilmiöt.

4.2.1 Keskeiset lujuusopin käsitteet

Materiaalin käyttäytymistä eri venymillä ε ja jännityksillä σ havainnollistetaan $\sigma\varepsilon$ -kuvaajalla. Teräksen käyttäytymisen kannalta tärkeimmät kohdat $\sigma\varepsilon$ -kuvaajalla ovat kuvan 4.5 mukaiset piste C eli myötölujuus R_e ja piste F eli murtolujuus R_m .



Kuva 4.5. Sitkeän teräksen $\sigma\varepsilon$ -kuvaaja (Salmi & Pajunen 2010, s.35.)

Koska lujuusopillisessa mitoituksessa rakenteesta muodostetaan aina mekaniikan malli, joka sisältää lukuisia yksinkertaistuksia niin geometrian, kuormitusten kuin materiaaliominaisuuksien osalta, on suunnittelussa otettava epävarmuustekijät huomioon käyttämällä riittävän suuria varmuuslukuja. Rakenteen suurin sallittu vetojännitys σ_{sall} voidaan laskea materiaalin myötölujuus R_e ja valitun varmuusluvun n avulla seuraavasti

$$\sigma_{sall} = R_e/n \quad (14)$$

Laskentalujuutena voidaan niin halutessa käyttää myötölujuuden R_e tilalla myös murtolujuutta R_m . Varmuusluku n on määritelty alakohtaisissa standardeissa. Esimerkiksi standardissa SFS 3200 *Teräsrakenteiden suunnitteluohjeet* sallitut jännitykset staattisessa kuormituksessa määritetään alemman myötörajan R_{eL} avulla seuraavasti

$$\sigma_{sall} = R_{eL}/1,5 \quad (15)$$

Sallittu leikkausjännitys saadaan kertomalla sallittu vetojännitys luvulla 0,6 jolloin

$$\tau_{sall} = 0,6\sigma_{sall} \quad (16)$$

(Salmi & Pajunen 2010, s.59.)

Väännöstä johtuvaa leikkausjännitystä sanotaan usein vääntöjännitykseksi. Leikkausjännitys saadaan lineaarisesti kimmoisen materiaalin Hooken laista. Yhtälön (17) mukaan lineaarisesti kimmoisen materiaalin vääntöjännitys τ on suoraan verrannollinen säteeseen r . (Salmi & Pajunen 2010, s.244.)

$$\tau = G\gamma = rG\Theta \quad (17)$$

jossa G on materiaalin liukumoduuli,
 γ on liukuma,
 r on kappaleen poikkileikkauksen halkaisijan säde ja
 Θ on poikkileikkauksen vääntymä

Poikkileikkauksen vääntömomentin T yhtälö voidaan johtaa yhtälöstä (17):sta lujuusopin oppikirjan (Salmi & Pajunen 2010, s.244.) mukaisella tavalla

$$T = GI_p\Theta \quad (18)$$

jossa T on poikkileikkauksen vääntömomentti ja
 I_p on polaarinen neliömomentti.

Väännössä muodonmuutosta esittää vääntymä Θ . Vääntymän Θ ja vastaavan rasituksen T välisen yhteyden nimittäjää GI_p kutsutaan vääntöjäykkyydeksi. Ympyrän vääntöjäykkyyden geometriaa kuvaava suure on polaarinen neliömomentti I_p , mutta muilla poikkileikkauksilla vääntöjäykkyys on muotoa GI_v , missä suure I_v on poikkileikkauksen vääntöneliömomentti. Neliömomentti kuvaa kappaleen kykyä vastustaa taipumaa poikkileikkaustason tietyn akselin suuntaan. (Salmi & Pajunen 2010, s.245.)

Sijoittamalla yhtälö (18) vääntöjäykkyyden τ lausekkeeseen (17), saadaan

$$\tau_{sall} = \frac{T}{I_p} \frac{d}{2} = \frac{T}{W_v} \quad (19)$$

jossa d on poikkileikkauksen halkaisija ja
 W_v on poikkileikkauksen vääntövastus.

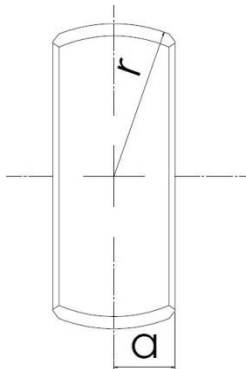
Ympyräpoikkileikkauksen, kuten palloventtiilin karan varren, vääntövastuksen lauseke on

$$W_v = \frac{I_p}{d/2} = \frac{\pi d^3}{16} \quad (20)$$

Tekniikan taulukkokirjan (Valtanen 2009) mukaan karan vääntömuotoiselle, kuvassa 4.6 esitetylle poikkileikkaukselle vääntövastuksen lauseke on

$$W_v = C_2 r^3 \quad (21)$$

jossa C_2 on suhteesta a/r riippuvainen ja W_v :n yhtälöstä johdettu kerroin ja r on poikkileikkauksen säde.



Kuva 4.6. Karan vääntiön poikkileikkaus (Vexve Oy).

Kerroin C_2 määräytyy Tekniikan taulukkokirjassa (Valtanen 2009) esitetyn taulukon mukaisesti riippuen suhteesta a/r .

Koska muun kuin ympyrän muotoisen poikkipinnan vääntöjännitys ei muodostu tasaisesti, likimääräisenä ohjeena vääntövastuksen arvolle voidaan pitää, että vääntöjännitys ei nouse suuremmaksi kuin poikkipinnan sisään piirretyn ympyrän vääntövastuksen arvo. (Valtanen 2009, s.451.)

4.2.2 Elementtimenetelmä palloventtiilin mitoituksessa

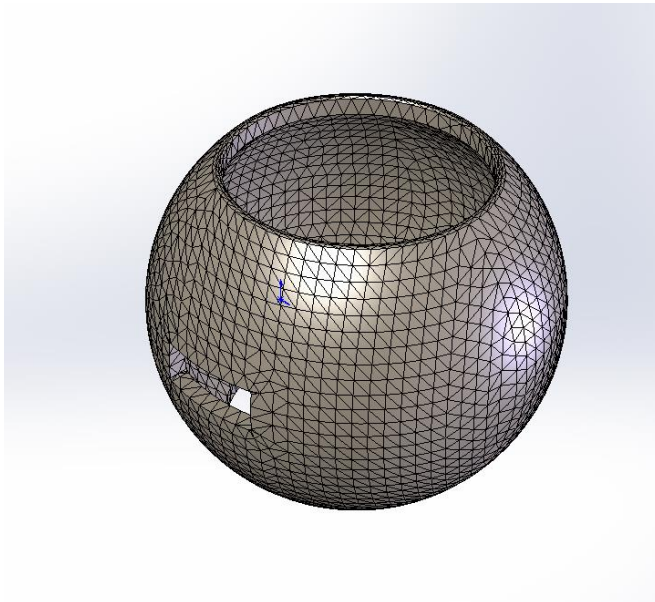
Lujuuslaskentaan on aikojen kuluessa kehitetty monia numeerisia ratkaisumenetelmiä. Ehdottomasti tehokkaimmaksi niistä on osoittautunut elementtimenetelmä eli FEM (Finite Element Method).

”Elementtimenetelmän perusyhtälöt voidaan johtaa kaikille rakennetyypeille lähtemällä liikkeelle lujuusopin perussuureita hallitsevista osittaisdifferentiaaliyhtälöistä tai vaihtoehtoisesti näiden kanssa ekvivalenteista työ- ja energiaperiaatteista. Perusyhtälöt muodostetaan elementtien alueissa toteutettavan interpoloinnin avulla ja niistä saadaan tarkasteltavalle tehtävälle likimääräinen ratkaisu.” (Lähtenmäki 2009.)

”Lujuusopin perusdifferentiaaliyhtälöiden analyttinen ratkaiseminen onnistuu vain yksinkertaisen geometrian, kuormituksen ja tuennan omaavissa perustapauksissa. Elementtimenetelmässä geometrisesti mutkikas kappale jaetaan äärellisiin osiin, jotka ovat geometrialtaan yksinkertaisia. Näitä jako-osia sanotaan elementeiksi. Kolmiulotteisen kappaleen elementteinä käytetään neli-, viisi ja kuusitahokkaita, joiden reunapinnat voivat olla tasoja tai yksinkertaisia kaarevia pintoja.” (Lähtenmäki 2009.)

Kappaletta kuvataan elementtijoukolla, jota sanotaan elementtiverkoksi. Vierekkäiset elementit liittyvät toisiinsa vain tietyissä pisteissä, joita sanotaan elementtiverkon ja elementtien solmuiksi. Elementtiverkko kuvaa usein todellista kappaletta vain likimääräisesti, mikä aiheuttaa laskennasta saataviin tuloksiin virhettä. (Lähtenmäki 2009.)

Kuvassa 4.7 on esitetty elementtiverkolla verkotettu palloventtiilin pallo. Varsinkin laajojen kokoonpanojen tapauksessa laskennan kannalta riittävä verkkotiheys on hyvä arvioida jo ennen suoritettavaa FE-analyysia, sillä laskenta vie sitä enemmän aikaa, mitä enemmän tutkittavassa osassa on elementtejä. Toisaalta mitä enemmän osassa on elementtejä, sitä tarkempi laskentatuloks saadaan.



Kuva 4.7. Esimerkki FE-analyysia varten verkotetusta esineestä (Vexve Oy).

Elementtimenetelmän monikäyttöisyys eri tiedealoilla on johtanut siihen, että monet kaupalliset FEM-ohjelmat tarjoavat useita erilaisia kappaleen analysointitapoja. Esimerkiksi rakennusten palkkilaskennassa ja mekaanisten koneiden dynaamisen kestävyuden laskennassa tarvitaan keskenään erilaisia analysointimenetelmiä. Ainakin staattinen, dynaaminen, lineaarinen ja epälineaarinen analyysi ovat yleensä käytettävissä FEM-ohjelmissa.

Staattinen analyysi on yleisin lujuuslaskennan analysointitapa. Siinä oletetaan, että kuormitukset sekä niistä johtuvat siirtymät ja jännitykset ovat ajasta riippumattomia. Kuormitusten ajatellaan kasvavan lopullisiin arvoihinsa niin hitaasti, että niistä syntyneet dynaamiset vaikutukset voidaan jättää huomioimatta. (Lähteenmäki 2009.)

Rakenteen ulkoisten kuormitusten vaihdellessa merkittävästi ajan kuluessa voidaan lujuuslaskenta suorittaa dynaamista analyysia käyttäen. Dynaaminen analyysi on huomattavasti staattista analyysia vaativampi tehtävä, sillä tällöin rakenteen siirtymät, nopeudet ja jännitykset ovat ajasta riippuvia ja ne on ratkaistava jollakin aikavälillä. (Lähteenmäki 2009.)

Sekä staattinen että dynaaminen analyysi voi olla lineaarinen tai epälineaarinen. Lineaarinen analyysi tarkoittaa sitä, että rakenteen kuormitusten ja niistä seurauksena olevien siirtymien ja jännitysten välinen yhteys on lineaarinen. Rakenteen epälineaarisuus voi olla luonteeltaan geometrinen, materiaalin käyttäytymisestä johtuvaa tai reunaehtoihin liittyvää. Geometrinen epälineaarisuus syntyy, kun kuormitukset aiheuttavat

rakenteeseen niin suuria siirtymiä, ettei niiden välinen yhteys ole riittävän tarkasti lineaarinen. Reunaehtoihin liittyvä epälineaarisuus voi johtua esimerkiksi siitä, että rakenteen tukeutuminen ympäristöönsä riippuu kuormituksen suuruudesta, jolloin kyseessä on niin sanottu kosketusongelma. (Lähtenmäki 2009.)

4.3 Tuotekehitysoppi

Tämän työn tuotekehitysprosessi mukaillee soveltuvien osin saksalaisten professorien Gerhard Pahlin ja Wolfgang Beitzin kehittämää koneensuunnitteluoppia, joka esitellään tässä luvussa.

Pahlin ja Beitzin koneensuunnitteluoppi sisältää useita tuotekehitystä helpottavia metodeja, joista kirjan tekijöiden mukaan on tarkoitus valita kulloiseenkin projektiin parhaiten sopivat menetelmät. Koska palloventtiilin kehitys voidaan lukea koneensuunnitteluprojektiksi, on Pahlin ja Beitzin koneensuunnitteluoppi mitä sopivien ohjenuora käytettäväksi tämän työn tuotekehityksen taustalla.

Teoriaosuudessa käydään läpi myös Karl Ulrichin ja Steven Eppingerin tuotekehitysopin tärkeimmät kohdat ja vertaillaan niitä Pahlin ja Beitzin suunnitteluoppiin. Kuten seuraavien lukujen tiivistelmistä voi huomata, näissä kahdessa tuotekehitysmenettelmässä on keskenään hyvin samanlaiset rungot.

4.3.1 Pahlin ja Beitzin koneensuunnitteluoppi

Pahlin ja Beitzin ”Konstruktionslehre” eli koneensuunnitteluoppi on kehitetty 1960-luvun Saksassa, jolloin siellä kärsittiin pahasta koneensuunnittelijapulasta. Koneensuunnittelutaito haluttiin saada opittavaksi ja opetettavaksi. Pahlin ja Beitzin koneensuunnitteluopista on pyritty kehittämään kokonaisvaltainen koneensuunnittelutapa, jossa lähdetään tuoteohjelman suunnittelusta ja päädytään lukuisia keskenään ristiriitaisiakin tavoitteita optimoiden viimeistelyihin valmistuspiirustuksiin ja niihin liittyviin muihin asiakirjoihin. (Pahl & Beitz 1990, s.1.)

Pahlin ja Beitzin suunnittelumetodiikka ei ole tarkoitukseen soveltaa kaavamaisesti vaan joustavasti, sillä se sisältää useita erikoistapauksiin tarkoitettuja tarkasteluja. Oleellista on sen sijaan ymmärtää, miten tärkeisiin tavoitteisiin voidaan päästä pienten vuorottelevien analyttisten ja synteettisten askelten avulla. (Pahl & Beitz 1990, s.1.)

Pahlin ja Beitzin (1990, s.34) mukaan seuraavien edellytysten on täyttyvä suunnittelussa, jotta järjestelmällisen suunnittelumetodiikan käyttäminen olisi mahdollista. Ensimmäiseksi, suunnitteluprojektille on määritettävä tavoitteet ilmoittamalla kokonaistavoite sekä yksittäiset osatavoitteet ja niiden merkityksellisyys.

Toiseksi, projektin reuna- ja alkuehdot on selvitettävä. Luvussa 5.2 esitetystä diplomityöprojektin vaatimuslistasta käy hyvin ilmi kyseisen projektin tavoitteet ja reunaehdot.

Kolmanneksi, ennakkoluulot on hylättävä, jotta ratkaisua voidaan hakea laajalta pohjalta ja välttää ajatusvirheitä. Tuotekehityksen kannalta tärkeää on myös useiden ratkaisuvaihtoehtojen etsiminen, joista voidaan myöhemmin valita suotuisin. Lisäksi

suunnittelussa on pystyttävä tekemään päätöksiä, sillä ilman päätöksentekoa minkäänlainen edistyminen ei ole mahdollista.

4.3.1.1 Tuoteohjelman suunnittelu ja tehtävän selvittely

Pahlin ja Beitzin (1990) mukaan ennen varsinaista tuotekehityksen suunnitteluprosessia pitää olla olemassa tuoteidea, jota varten kannattaa etsiä teknillisesti ja taloudellisesti suotuisia ratkaisuja ja kehitellä näitä valmistuskelpoisiksi. Tämän työn tuoteideana voidaan pitää visiota niistä kaikista mahdollisuuksista, joilla venttiilin omakustannehintaa voitaisiin mahdollisesti saada laskettua.

Tuoteohjelman suunnittelussa haetaan, valitaan ja seurataan yrityksen tavoitteiden kannalta lupaavia tuoteideoita. Tuoteohjelman suunnittelussa voivat laukaisevat impulssit tulla sekä ulkopuolelta markkinoilta ja ympäristöstä, että sisäpuolelta yrityksestä itsestään.

Yleisimpiä markkinainpulsseja ovat omien tuotteiden tekninen ja taloudellinen vanheneminen, markkinatoiveiden muutokset, asiakkaiden taholta tulevat virikkeet ja kritiikki, sekä kilpailevien tuotteiden tekninen ja taloudellinen etumatka. Palloventtiilin tapauksessa erityisesti tuotteen taloudellinen vanheneminen ja halvan työvoiman maista ilmestyneiden kilpailijoiden taloudellinen etumatka ovat tärkeimpiä markkinainpulsseja.

Omasta yrityksestä saatavia impulsseja ovat puolestaan omien ideoiden ja tutkimustulosten soveltaminen tuotekehitykseen ja valmistukseen sekä toimintojen uusiminen menekkialueen laajentamiseksi tai sen tarpeiden tyydyttämiseksi. Impulsseja ovat myös uusien valmistusmenetelmien käyttöönotto, sekä tuotevalikoiman ja valmistusrakenteen rationalisointitoimet. (Pahl & Beitz 1990, s.56.)

Tehtävänselvittelyvaiheeseen kuuluu myös oman markkina-asemansa selvittäminen. Sen analysointiin tarvitaan useita tutkimuksia. Tuotteen elinkaaren menossa olevan vaiheen tunnistaminen on erityisen tärkeää. Elinkaaren vaihe voidaan selvittää esimerkiksi liikevaihdon, voiton ja katteen pohjalta. Oman aseman tunnistamiseksi nyky-markkinoilla voidaan käyttää apuna tuote-markkina-matriisia. (Pahl & Beitz 1990, s.58.)

Viime vuosina voimakkaasti kasvanut Vexven palloventtiilien liikevaihto enteiliisi tuotteen olevan elinkaarellaan vielä kasvuvaiheessa. Uudet, halvoilla hinnoillaan markkinoita valtaavat kilpailijat ovat kuitenkin saaneet maailmanmarkkinoilla huomattavan markkinaosuuden. Tästä syystä Vexven palloventtiilin voitaneen sijoittaa elinkaarellaan kypsyyssvaiheeseen, jossa tuotteen voitto on suurimmillaan.

Oleellinen osa tuoteohjelman suunnittelua on tuoteideoiden löytäminen. Tuoteideoiden löytämisessä voidaan käyttää apuna samoja hakumenetelmiä kuin tuotekehityksessäkin, esimerkiksi aivorihtä. Tuoteideoita voidaan löytää myös kysymysten kautta: mitä toimintoja asiakas haluaa? mitä me toteutamme jo nyt? onko laitteen vaatima tila nykyoloihin sopiva? pitäisikö koko minimoida? onko muotoilu puoleensa vetävää?

Näihin kysymyksiin mietittiin vastauksia jo diplomityöprojektin aloitusvaiheessa. Kahden viime vuosikymmenen aikana tuotekehitysosastolla syntyneitä ideoita pallo-

venttiilin rakenteesta kerättiin diplomityötä varten yhteen. Palloventtiilin uuden rakenteen ideointia varten järjestettiin aivoriihi, jossa tuotekehitystiimin jäsenet saivat heitellä omia ajatuksiaan vapaasti ilmoille.

Pahlin ja Beitzin teorian (1990, s.61) mukaisesti saadut tuoteideat otetaan aluksi valintakäsittelyyn. Karkeavalintaan riittävät yrityksen tavoitteisiin liittyvät kriteerit, jos ne voidaan arvioida. Ainakin pitäisi ottaa huomioon suuri liikevaihto, suuri markkinaosuus ja käyttäjän saamat edut toiminnoista.

Vaatimuslistaa varten pitää tehdä selväksi vaaditut tavoitteet ja rajoitukset. Ne tehdään vaatimusten ja toivomusten muodossa. Vaatimukset pitää täyttää kaikissa olosuhteissa. Mikäli vaatimusta ei täytetä, päädytään ajatellun ratkaisun hylkäämiseen. Toivomukset otetaan huomioon sillä varauksella, että kohtuulliset ylimääräiset kustannukset ovat sallittuja. Erottelu vaatimukseen ja toivomukseen on välttämätöntä myös myöhemmän arvioinnin takia, koska valittaessa parhaita luonnoksia kysytään vaatimusten täyttymistä. Arvioinnissa otetaan puolestaan huomioon vain ne muunnelmat, jotka jo täyttävät vaatimukset. Diplomityöprojektin vaatimuslista on esitetty luvussa 5.2.

Lyömättä lukkoon mitään tiettyä ratkaisua, vaatimukset ja toivomukset on varustettava tiedoilla määrästä ja laadusta. Vaatimukset pitää ilmoittaa täsmällisinä lukuarvoina, mutta jos se ei ole mahdollista niin sanamuodot on muotoiltava mahdollisimman selvästi. (Pahl & Beitz 1990, s.64.)

4.3.1.2 Luonnostelu

Pahlin ja Beitzin tuotekehitysopissa (1990, s.71) tehtävänselvittelyä seuraa luonnosteluvaihe. Siinä abstrahoidaan eli pelkistetään ideat, laaditaan toimintorakenne ja etsitään sopivimmat vaikutusperiaatteet sekä niiden yhdistelmät. Näiden konkretisoinnin ja arvostelun jälkeen päädytään periaatteelliseen ratkaisuun eli luonnokseen.

Työstetyt luonnosmuunnelmat pitää myös arvostella. Muunnelmat, jotka eivät täytä vaatimuslistan vaatimuksia, hylätään ja muut arvostellaan sovitun menetelmän kriteerien mukaisesti. Tässä vaiheessa arvostellaan lähinnä teknisten näkökohtien mukaan, minkä ohessa taloudellisetkin näkökohdat otetaan jo karkeasti huomioon. (Pahl & Beitz 1990, s.49.)

Venttiilikonstruktiot eli luonnosvaihtoehdot venttiilin rungosta on esitetty luvussa 5.4. Koska kuvassa 5.3 esitettyjen venttiilikonstruktioiden hyvät ja huonot puolet ovat helposti arvioitavissa, ei luonnosten pistearviointia niiden kohdalla nähty tarpeelliseksi. Sen sijaan karaluonnosten kohdalla luvussa 6.1.1 käytettiin myös pistearviointia, jotta parhaat luonnokset saatiin selville.

Luonnostelua helpottaa tehtävänasettelulle tehtävä abstrahointi, jossa muotoiltaan keskeinen ongelma mahdollisimman yleiseen muotoon. Abstrahoivan tarkastelun mielessä diplomityöprojektin ydinolemus voisi olla palloventtiilin rakenteen yksinkertaistaminen.

Koska venttiilin omakustannehinnan pienentäminen on projektin päävaatimuksia, kustannusrakenne on analysoitava ja tutkittava voitaisiinko samalla fysikaalisella

valmistustavalla, mutta toisenlaisella materiaalin valinnalla, osien lukumäärän pienentämällä tai toisella valmistustavalla pienentää kustannuksia.

Tehtävän oleellisuus saadaan esille analysoimalla vaatimuslistasta toiminnalliset riippuvuudet ja tehtävälle ominaiset oleelliset reunaehdot samanaikaisesti askelittain abstrahoinnin kanssa. Tämä toteutetaan jättämällä ensin ajatuksissa toivomukset pois sekä jättämällä sellaiset vaatimukset pois, jotka eivät välittömästi koske toimintaa ja oleellisia ehtoja. (Pahl & Beitz 1990, s.74.)

Pahlin ja Beitzin tuotekehitysoopissa (1990, s.99) abstrahointia seuraa luonnoste-lussa vaikutusperiaatteiden haku. Osatoimintoja varten on löydettävä vaikutusperiaatteita, jotka myöhemmin yhdistetään vaikutusrakenteeksi. Sitä edelleen konkretisoidessa hahmottuu periaatteellinen ratkaisu. Vaikutusperiaate sisältää toiminnon toteuttamista varten tarpeellisen fysikaalisen ilmiön sekä geometriset ja aineelliset tunnusmerkit. Vaikutusperiaatteiden hakuun käytettyjä tavanomaisia menetelmiä ovat esimerkiksi kirjallisuustutkimukset, tunnettujen teknisten systeemien analyysi. Vaikutusperiaatteita voidaan hakea myös intuitiivisesti painotetuilla menetelmillä.

Nykyisen palloventtiilin sisältämät vaikutusperiaatteet on yksinkertaisuudessaan todettu toimiviksi, eikä venttiilin vaikutusrakennetta näin ollen haluttu diplomityön puitteissa muuttaa.

Seuraavassa työaskeleessa on arvosteltava periaatteelliseksi ratkaisumuunnelmiksi konkretisoidut ratkaisuehdotukset, jotta saataisiin objektiivinen peruste päätöksenteolle. Tätä varten on kehitetty pistearviointimenetelmiä. Nämä on laadittu siten, että ne eivät sovi vain nyt käsiteltävänä olevaan luonnosten valintapäätökseen vaan myös yleisesti ratkaisuvaihtoehtojen arvosteluun kaikissa suunnittelun vaiheissa.

Pistearviointiin pitää ilmoittaa ratkaisun arvo, hyöty tai vahvuus ennalta asetettuun tavoitteeseen nähden. Tavoitteen asettaminen on ehdottoman välttämätöntä, koska ratkaisun arvo ei voi olla absoluuttinen, vaan sitä on aina verrattava tiettyihin vaatimuksiin. Pistearviointi johtaa ratkaisumuunnelmien keskinäiseen vertailuun.

Pistearviointi ei saa perustua vain pistemäisiin osanäkökohtiin, kuten valmistuskustannuksiin, ergonomisiin, varmuus-, tai ympäristönäkökohtiin, vaan siinä täytyy oikeassa suhteessa ottaa huomioon yleisten tavoitteiden mukaisesti kaikki vaikuttavat seikat. (Pahl & Beitz 1990, s.140.)

4.3.1.3 Kehittely

Pahlin ja Beitzin tuotekehitysprosessin kehittelyvaiheessa suunnitellaan periaatteellisesta ratkaisusta lähtien teknisen tuotteen kokoonpanorakenne täydellisesti ja yksikäsitteisesti teknisten ja taloudellisten näkökohtien mukaan. Pahlin ja Beitzin mukaan (1990, s.49) kehittely onkin ratkaisun rakennemuodon vahvistamista. Diplomityöprojektin kehittelyvaihetta on esitelty luvussa 6, osakohtainen kehitys.

Kun luonnosteluvaiheessa oli oleellista periaatteellinen ratkaisu vaikutusrakenteen muodossa, pääpaino on nyt tämän periaatteellisen idean konkreettisessa rakennemuotoilussa. Muotoilu vaatii viimeistään nyt työainesten ja valmistusmenetelmien va-

lintaa, päämittojen vahvistamista ja kolmiulotteisten yhteensopivuusehtojen tutkimista. (Pahl & Beitz 1990, s.176.)

Kehittelyvaiheen työjärjestys on Pahlin ja Beitzin teorian mukaan seuraavanlainen. Ensin otetaan vaatimuslistasta käsiteltäviksi ne vaatimukset, jotka ovat oleellisesti rakennemuotoa määrääviä. Samalla selvitetään mahdolliset tilaehdot eli esimerkiksi tuotteen loppusijoituspaikan ääriimitat. Seuraavaksi hahmotellaan karkeasti kokoonpanorakenne ja rakennemuotoilua määrittelevät päätoiminnon toteuttimet. Alustavat kehitelmät arvostellaan haluttujen näkökulmien mukaan. Tämän jälkeen hienomuotoiluun tuotteen toiminnan kannalta oleellisimmat komponentit.

Edellä kuvatun kehittelyvaiheen jälkeen tuote päättyy teknis-taloudelliseen arvosteluun. Usein arvostelun jälkeen joku muunnelma näyttää selvästi edullisimmalta, mutta sitä voidaan kuitenkin vielä parantaa muiden, kokonaisuudessaan huonommilla vaikuttavien ehdotusten osaratkaisujen ideoilla. Sellaisten ratkaisujen ja niiden yhdistelmien soveltamisella ja arvostelujen paljastamien heikkouksien poistamisella voidaan päästä lopulliseen ratkaisuun ja tehdä päätös lopullisen kokonaiskehittelyn rakennemuotoilusta. Rakennemuotoilun pääsääntöjen mukaan hyvä tuote on yksikäsitteinen, yksinkertainen ja turvallinen. (Pahl & Beitz 1990, s.49.)

Näitä rakennemuotoilun pääsääntöjä pyrittiin hyödyntämään erityisesti venttiilin rungon ja karan kehityksessä, kuten luvuissa 5.4 ja 6.1 tulee käymään ilmi. Karan kehityksessä hyödynnettiin myös osaratkaisuja huonommiksi todetuista kokonaisratkaisuisista.

Lopullisessa kokonaiskehittelyssä on jo tarkistettu toiminnot, kestävyys ja tilankäytön sopivuus, minkä ohessa viimeistään tässä yhteydessä on osoitettava, että kustannuksia koskevat vaatimukset voidaan täyttää. Vasta tämän jälkeen voidaan siirtyä viimeistelyyn. (Pahl & Beitz 1990, s.49.)

Kehittelyvaiheessa arvioidaan tekniset ominaisuudet teknisellä arvostuksella ja taloudelliset ominaisuudet laskennallisten tuotantokustannusten avulla taloudellisella arvostuksella aina erikseen arvosteltuna. Sen jälkeen molemmat esitetään rinnakkain erityisessä vertailudiagrammissa. (Pahl & Beitz 1990, s.362.)

Arvioinnin edellytys on, että kehitelmät ovat samalla konkretisoinnin asteella. Lisäksi tuotantokustannukset on oltava laskettavissa. Myös mahdolliset investointikustannukset on lisättävä laskelmaan. Kehittelyvaiheen arviointikriteerit ovat vastaavat kuin luonnosteluvaiheessa. Vertailudiagrammin hyödyntämisestä diplomityöprojektissa on esimerkki kuvassa 6.2. (Pahl & Beitz 1990, s.362.)

4.3.1.4 Viimeistely

Viimeistelyvaiheessa teknisen rakennelman kokoonpanorakennetta viimeistellään osien muotoa, mitoitusta ja pinnanlaatua koskevilla määräyksillä, työainesten määrityksillä sekä valmistusmahdollisuuksien ja lopullisten kustannusten tarkistuksilla. Viimeistelyssä laaditaan sitovat piirustukset ja muut asiakirjat suunnitelman aineellista toteuttamista varten. (Pahl & Beitz 1990, s.50.)

Viimeistelyvaihe on olennainen osa kokonaisvaltaista tuotekehitysprojektia, mutta tässä diplomityössä se ei ole keskeisessä asemassa. Viimeistelyn sijaan painotus diplomityössä on uusien ideoiden etsimisessä ja jatkojalostus jätetään diplomityötä seuraaviin jatkotoimenpiteisiin.

4.3.2 Ulrichin ja Eppingerin tuotekehitysoppi

Professorit Karl T. Ulrich ja Steven D. Eppinger julkaisivat vuonna 1995 teoksessaan *Product Design and Development* yhden nykyajan tunnetuimmista tuotekehityksen prosessimalleista. Ulrichin ja Eppingerin tuotekehitysprosessi koostuu kuudesta vaiheesta, jotka on esitetty kuvassa 4.8.

Ulrichin ja Eppingerin prosessimallissa on paljon samoja piirteitä kuin Pahlin ja Beitzin prosessimallissa. Kummankin prosessimallin pääkohdat ovat tiivistetyssä muodossa esiselvitys-, luonnostelu-, yksityiskohtainen suunnittelu- sekä viimeistelyvaihe.



Kuva 4.8. Tuotekehitysprosessi Ulrichia ja Eppingeriä (1995) mukailten.

Ulrichin ja Eppingerin tuotekehitysprosessin ensimmäiseen vaiheeseen eli tuoteohjelman suunnitteluun katsotaan kuuluvaksi kaikki ne toimet, jotka edeltävät tuotekehitysprojektin käynnistymistä. Tuoteohjelman suunnitteluvaihe voidaan jakaa strategiseen tuotesuunnitteluun, joka toteutetaan yritysjohdon toimesta ja yksityiskohtaisempaan projektisuunnitteluun, joka toteutetaan projektin vetäjien toimesta. Vastaava vaihe on esitetty myös Pahlin ja Beitzin prosessimallissa luvun 4.3.1.1 mukaisesti. (Ulrich & Eppinger 1995, s.16.)

Varsinaisen tuotekehitysprosessin ensimmäinen vaihe, konseptin kehittäminen, alkaa asiakastarpeiden määrittämisellä. Tässä vaiheessa myös luodaan ja arvioidaan vaihtoehtoiset tuotekonseptit, joista yksi valitaan jatkokehitykseen. (Ulrich & Eppinger 1995, s.16.)

Järjestelmätason suunnitteluvaiheessa määritellään tuotteen tuotearkkitehtuuri ja jaetaan tuote alempiin järjestelmiin ja komponentteihin. Tavallisesti myös määritellään tuotteen lopullinen kokoonpanosuunnitelma. Tämän vaiheen lopputuloksena syntyy tuotteen geometrinen layout, toimintomäärittely tuotteen jokaiselle alijärjestelmälle ja alustava kulkukaavio kokoonpanoprosessille. (Ulrich & Eppinger 1995, s.17.)

Yksityiskohtainen suunnittelu sisältää kaikkien tavarantoimittajilta tilattavien osien geometrian, materiaalien ja toleranssien määrittämisen. Tässä vaiheessa laaditaan myös prosessisuunnitelma ja suunnitellaan työkalut omavalmisteosien valmistusta varten. Yksityiskohtaisen suunnittelun lopputuloksena syntyy suunniteltavan tuotteen hallintadokumentti, joka sisältää tuotteen geometrian selittävät piirustukset, esittelyt tuotteen valmistamisessa tarvittavista työkaluista, tarvittavat tiedot ostettavista osista, sekä prosessisuunnitelman tuotteen valmistusta ja kokoonpanoa varten. Vastaava kehittäelyvaihe löytyy myös Pahlin ja Beitzin prosessimallista. (Ulrich & Eppinger 1995, s.17.)

Testaus- ja hiomisvaihe pitää sisällään prototyyppien valmistamisen ja arvioinnin. Ensimmäisillä prototyypeillä testataan toimiiko tuote halutulla tavalla ja tyydyttäväkö se asiakkaan tarpeet. Myöhemmät prototyypit valmistetaan tavallisesti samoilla valmistusmenetelmillä kuin lopulliset tuotteet on tarkoitus valmistaa, mutta kokoonpano tehdään harvoin niillä menetelmillä, joilla lopullinen tuote on tarkoitus kokoonpanna. Myöhempien prototyyppien tarkoituksena on antaa vastauksia niiden luotettavuudesta ja suorituskyvystä, jotta tarvittavat muutokset voidaan tehdä lopulliseen tuotteeseen. (Ulrich & Eppinger 1995, s.17.)

Diplomityöprojektissa prototyyppejä hyödynnettiin karan kehityksessä. Liitteessä 2 on esitetty kuvaotoksia nykyisestä karasta jatkojalostetun prototyyppikaran testauksesta. Myös liukulevyn kuumankestoja testattiin prototyyppien avulla, kuten luvussa 6.2 ja liitteessä 4 on myöhemmin kerrottu.

Ulrichin ja Eppingerin prosessimallin mukaisessa tuotannon käynnistämisvaiheessa tuotetta aletaan valmistaa aiotuilla valmistusmenetelmillä. Tuotannon käynnistämisvaiheen tarkoitus on harjoituttaa työntekijöitä ja ratkaista viimeiset tuotantoprosessiin liittyvät ongelmat. Tuotannon käynnistämisvaiheessa valmistetut tuotteet arvioidaan tarkasti mahdollisesti jäljelle jääneiden vikojen löytämiseksi ja saatetaan toisinaan jopa myydä tutuille asiakkaille. Siirtymä tuotannon käynnistämisvaiheesta jatkuvaan tuotantoon on tavallisesti vähittäinen ja jatkuva prosessi. Diplomityössä esitettyjen uudistusten vieminen tuotantoon jätetään diplomityön jälkeisiin jatkotoimenpiteisiin. (Ulrich & Eppinger 1995, s.17.)

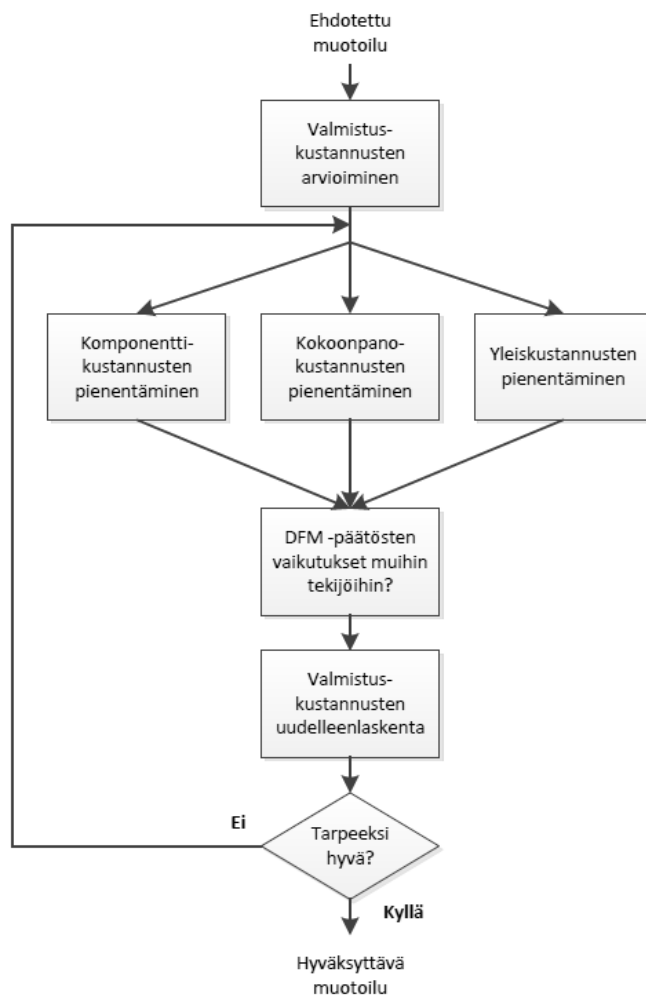
4.3.3 Valmistettavuuden suunnittelu

Tuotantokustannusten hallinnalla on merkittävä osuus tuotteen taloudellisessa menestyksessä. Tuotteesta saatava voitto syntyy valmistajan myyntihinnan ja tuotantokustannusten välisestä erosta. Myytyjen tuotteiden määrä ja myyntihinta määräytyvät puolestaan pitkälti tuotteen laadusta. Menestyvän tuotteen taustatekijöitä ovat siis tuotteen korkea laatu ja minimoidut tuotantokustannukset yhdessä. DFM on näiden tavoitteiden saavuttamisen helpottamiseksi kehitetty menetelmä. Tämän määritelmän mukaan DFM-menetelmä vaikuttaisi soveltuvan hyvin työkaluksi, joka auttaa saavuttamaan taulukossa 5.2 esitetyt diplomityöprojektin vaatimukset. (Ulrich & Eppinger 1995.)

Design for X-menetelmällä (DFX) tarkoitetaan tuotteen suunnittelua huomioidulla jotain tiettyä ominaisuutta X tuotteen suunnitteluvaiheessa. Yleisimmät suunnittelussa huomioon otettavat näkökulmat ovat valmistettavuus ja kokoonpantavuus. Suun-

nittelusta valmistettavuuden näkökulmasta käytetään lyhennettä DFM, joka tulee englanninkielen sanoista Design For Manufacturing. Kokoonpantavuuden suunnittelusta käytetään puolestaan lyhennettä DFA, Design for Assembly.

Ulrichin ja Eppingerin (1995) versio DFM-menetelmästä on viisivaiheinen, kuvan 5.8 mukainen prosessi. Se alkaa ehdotetun muotoilun valmistuskustannusten arvioinnilla, edeten sen jälkeen kustannusten pienentämistoimien ja kustannusten uudelleen laskennan kautta joko hyväksytyksi muotoiluksi tai uusiin kustannusten pienentämistoimiin.



Kuva 4.9. DFM-menetelmä mukaillen Ulrichin ja Eppingerin prosessimallia (1995, s.183).

Kuvan 4.9 DFM-prosessin ensimmäisessä vaiheessa arvioidaan ehdotetun muotoilun valmistuskustannuksia. Valmistuskustannukset koostuvat komponenttikustannuksista, kokoonpanokustannuksista ja yleiskustannuksista. Komponenttikustannukset koostuvat standardiosista, raaka-aineista, prosessikustannuksista ja työkalukustannuksista. Kokoonpanokustannukset muodostuvat puolestaan työvoima- ja työvälinekustannuksista. Yleiskustannuksiin sisältyvät tukikulut ja projektin määrärahat. (Ulrich & Eppinger 1995, s.185.)

Valmistuskustannukset voidaan toisaalta jakaa myös kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin. Kiinteitä kustannuksia ovat ne, joiden suuruus tiedetään ennalta riippumatta siitä, kuinka suuria määriä tuotetta tullaan valmistamaan. Investointi uuteen tuotantokoneeseen, esimerkiksi koneistuskeskukseen on yksi esimerkki kiinteästä kustannuksesta. Tuotantotilan layoutin muutokustannukset ovat myös kiinteitä kustannuksia. Muuttuvia kustannuksia ovat sellaiset kustannukset, jotka ovat riippuvaisia valmistettavien tuotteiden määrästä. Esimerkiksi raaka-ainekustannukset riippuvat suoraan tuotantomäärästä. (Ulrich & Eppinger 1995, s.185.)

Ulrichin ja Eppingerin DFM-menetelmän toinen porras jakautuu kolmeen rinnakkaiseen vaiheeseen: komponenttikustannusten, kokoonpanokustannusten ja yleiskustannusten pienentämiseen.

Jotkin komponentit saattavat olla kalliita siksi, että suunnitteluvaiheessa ei ole ymmärretty tuotantoprosessin kykyjä, ajokustannuksia tai rajoituksia. Pienet ja ylimääräiset muodot koneistettavassa osassa saattavat lisätä koneistusaikaa huomattavasti ja pahimmassa tapauksessa jopa vaatia oman työkalun. Suunnittelijan tulisi siis tuntea eri työstömenetelmien kyvyt ja rajoitukset, jotta osasta tulee mahdollisimman helposti työstettävä. (Ulrich & Eppinger 1995, s.191.)

Nykyisen palloventtiilin ja uusien luonnosten valmistus- ja materiaalikustannuksia arvioitiin ja vertailtiin toisiinsa työstömenetelmäasiantuntijoiden ja toiminnanohjausjärjestelmästä saatujen materiaalikustannustietojen avulla. Diplomityössä esitettyjen luonnosten vaikutusta osien omakustannehintoihin on kuvattu taulukossa 7.1.

Ehdotetun muotoilun huolellinen tarkastelu jo suunnitteluvaiheessa johtaa usein parannusehdotuksiin ja uuteen suunnittelukierrokseen, jonka tuloksena saadaan entistä yksinkertaisempi muotoilu tuotteelle, samalla mahdollisesti vähentäen valmistusprosessin työvaiheita. Komponenttikustannuksia voidaan pienentää myös valitsemalla tuotteeseen mahdollisimman paljon standardiosia. Standardiosalla tarkoitetaan osaa, joka on käytössä useammassa kuin yhdessä yrityksen tuotteessa ja sitä voidaan näin ollen tilata tai valmistaa suurempia eräkokoja. (Ulrich & Eppinger 1995, s.193.)

Kokoonpanokustannukset ovat merkittävä osa tuotteen valmistuskustannuksia ja siksi suunnittelukin tapahtuu joidenkin tuotteiden kohdalla kokoonpanopainotteisesti. Osien integroiminen yhdeksi osaksi jo suunnitteluvaiheessa on eräs toimiva keino pienentää kokoonpanokustannuksia. Integroitu osa on usein halvempi valmistaa, kuin niiden osien valmistuskustannukset olisivat yhteensä, jotka integroitu osa korvaa. Integroidun osan mittatoleranssit ovat lisäksi tarkempia verrattuna monesta osasta koottuun tuotteeseen. Osien integrointia mietittiin erityisesti ideoitaessa uusia venttiilikonstruktioita. Kuvan 5.3 vaihtoehto C on hyvä esimerkki integroidusta rakenteesta. (Ulrich & Eppinger 1995, s.197.)

Yleiskustannuksiin kuuluvat muun muassa varastointikustannukset, valvontakustannukset, henkilöstönhallintakustannukset ja laadunhallinnan kustannukset. Vähentämällä tuotteen osien määrää saadaan pienennettyä varastointikustannuksia ja puolestaan vähentämällä kokoonpanovaiheita pienenevät valvonta- ja henkilöstönhallintakustannukset. (Ulrich & Eppinger 1995, s.198.)

DFM-prosessin kolmannessa portaassa arvioidaan DFM-päätösten vaikutuksia muihin tuotteen kustannustekijöihin. Tuotteen taloudelliseen menestykseen vaikuttavat myös tuotteen laatu, projektin aikataulussa pysyminen ja tuotekehityksen kesto. DFM-prosessin tässä vaiheessa arvioidaan myös tuotteen komponenttien uudelleenkäyttöarvoa ja tuotteen elinkaaren kustannuksia. DFM-prosessin kolmannen portaan mukainen arviointi suoritetaan diplomityön ulkopuolella. (Ulrich & Eppinger 1995, s.201.)

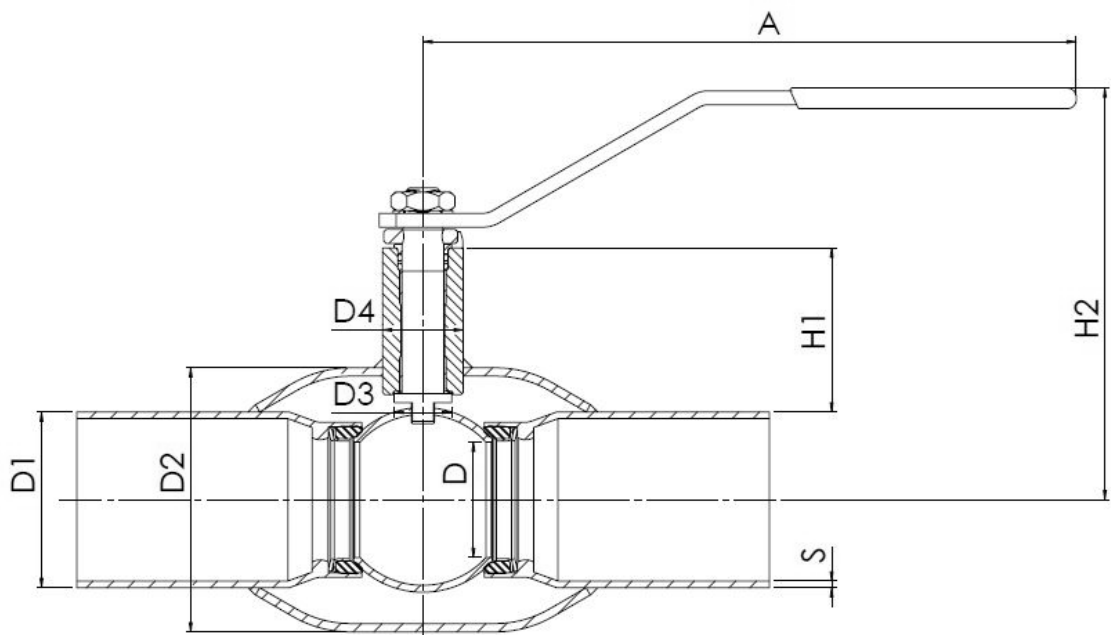
5 NYKYTILANNEANALYYSI JA UUSIEN VENTTIILIKONSTRUKTIOIDEN LUONNOSTELU

Tämän diplomityön tuotekehitysprosessi pohjautuu Gerhard Pahlin ja Wolfgang Beitzin systemaattiseen tuotekehitysmenettelyyn, joka noudattaa ohjeistoa VDI 2221. Tuotekehitysprosessi alkaa esiselvitysvaiheella, johon lukeutuvat markkina-analyysi, kilpailija-analyysi, projektin reunaehtojen ja vaatimuslistan määrittäminen sekä nykyiseen tuotteeseen tutustuminen. Esiselvitysvaihetta seuraa uuden tuotteen luonnosteluvaihe.

5.1 Kilpailija-analyysi

Palloventtiilin yksinkertaisesta rakenteesta ja toimintaperiaatteesta johtuen eri valmistajien palloventtiileistä ei löydy suuria keskinäisiä eroja. Merkittävimmät rakenteelliset erot löytyvät karan, karaholkin, runkoputken ja kahvan muotoilusta sekä koosta.

Taulukossa 5.1 on vertailtu kuvan 5.1 mukaisen palloventtiilin päämittoja eri palloventtiilivalmistajien venttiileistä.



Kuva 6.2. Palloventtiilin päämitat (Vexve Oy 2014)

Kuvassa 5.1 mitta D1 kuvaa jatkeputken halkaisijaa, D2 kuvaa runkoputken halkaisijaa, D3 kuvaa karan vääntiön halkaisijaa ja D4 kuvaa karaholkin ulkohalkaisijaa.

Taulukko 5.1. DN80 ja DN125 venttiileiden päämitat eri valmistajilta [mm].

DN80	D	D1	D2	D3	D4	S	H1	H2	A
Vexve	65	88,9	139,7	25	35	3,2	77	190	280
Kilpailija1	65	88,9	121	25	35	3,2	68	171	278
Kilpailija2	65	88,9	127	-	39	3,2	88	195	260
Kilpailija3	65	88,9	127	-	-	3,2	85	154	275
Kilpailija4	63	89	114,1	26	40	4	67	141	335

DN125	D	D1	D2	D3	D4	S	H1	H2	A
Vexve	100	139,7	177,8	38	45	6,3	96	244	424
Kilpailija1	100	139,7	177,8	40	45	6,3	101	252	400
Kilpailija2	100	139,7	194	-	44	6,3	109	215	350
Kilpailija3	100	139,7	178	-	-	6,3	151	261	365
Kilpailija4	100	133	180	38	49	6	94	195	525

Taulukossa 5.1 esitettyjen, vertailukelpoisten saman kokoluokan venttiilien välillä ei löydy merkittäviä eroja. Osa ulkomitoista on tarkoin määritelty alan standardeissa, jonka takia niissä ei ole eroja valmistajien välillä. Pallon virtausaukon pienin sallittu halkaisija DI on määritelty painelaitedirektiivin kanssa harmonisoidussa standardissa SFS-EN 1983 ja jatkeputken ulkohalkaisija DI , sekä seinämän paksuus s on määritelty standardissa SFS-EN 488. Karaholkin korkeuden $H1$ minimiarvo juontaa puolestaan kaukolämpöventtiilin ympärille tulevan eristekerroksen määrätystä minimipaksuudesta. Taulukosta 5.1 nähdään, että eroja valmistajien välillä löytyy erityisesti runkoputken, karan, karaholkin ja kahvan koossa.

Venttiilien samankaltaisuudesta kertoo muun muassa osien lukumäärä. Vexven vertailuventtiilissä oli 24 osaa, kun neljän vertailun kilpailijan venttiileissä osien lukumäärät olivat 19, 23, 24 ja 25. Erot osien lukumäärissä selittyvät erityisesti erilaisilla karan yläpään ratkaisuilla.

Venttiilin perusrakenne ja rakenteen vaatimat tuotannon valmistusvaiheet ovat vertailtavissa venttiileissä hyvin toistensa kaltaisia. Kaikkien vertailtujen venttiilien rungot ovat hitsirakenteisia ja venttiilin rungot koostuvat puristetusta runkoputkesta, kahdesta jatkeputkesta sekä karaholkista.

Jatkeputkien välillä merkittävimmät erot löytyvät jatkeputken tiivistepesän puoleisen pään työstömenetelmissä. Sekä Vexven, että kahden kilpailijan jatkeputken pää on ensin puristettu haluttuun halkaisijaan, jonka jälkeen putken sisäpintaan on koneistettu tiivistepesä. Kahden muun kilpailijan ratkaisuna toimii jatkeputken paksumpi seinämä, jolloin tiivistepesän koneistustarve on ollut suurempi, mutta puristusta ei ole tarvittu.

5.2 Projektin vaatimuslista

Pahlin ja Beitzin suunnittelumethodin mukaan tuotekehitysprosessin tehtävän selvittelyvaiheeseen kuuluu olennaisena osana suunniteltavan projektin vaatimuslistan luominen.

Taulukkoon 5.2 on koottu lista vaatimuksista ja toiveista, joita projekteille on asetettu. Vaatimuslista toimii samalla projektin reunaehtoina.

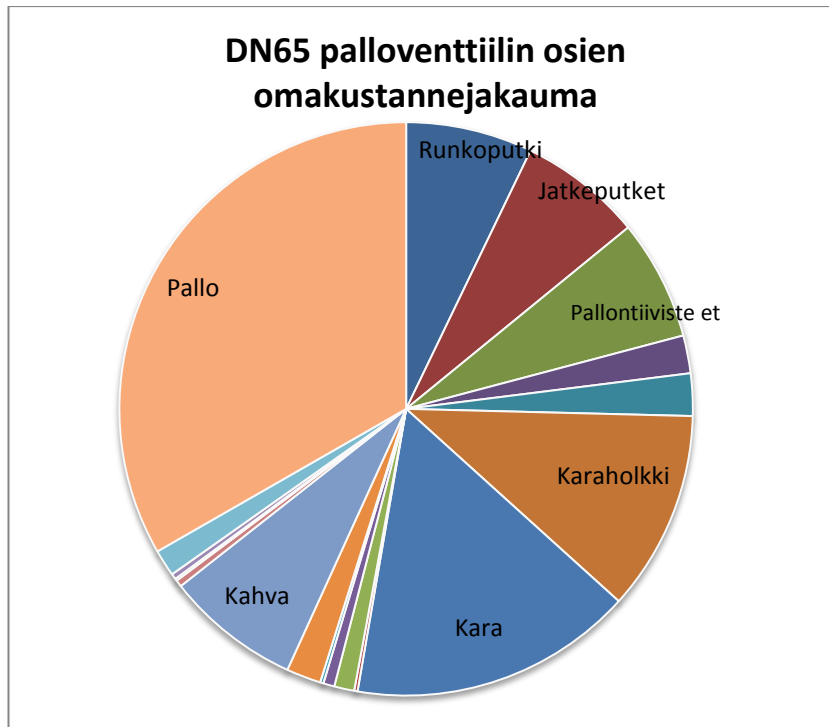
Taulukko 5.2. Tuotekehitysprojektin vaatimuslista Pahlin ja Beitzin mukaisesti.

Diplomityön vaatimuslista; T = Toive, V= Vaatimus	
V	Venttiilin omakustannehinnan on laskettava
V	Selvitetään salliiko venttiilin rakenne tuotannon automatisoinnin
V	Venttiilin noudatettava painelaitedirektiiviä.
V	Venttiilin noudatettava kaukolämpöventtiilistandardia EN 488.
V	Venttiilin noudatettava palloventtiilistandardia EN 1983.
V	Venttiilin noudatettava muita markkinoiden vaatimia standardeja.
V	Etsitään rohkeasti erilaisia rakennevaihtoehtoja venttiilille.
V	Tutkitaan olisiko saatavilla pienempiä standardikoon runkoputkia.
V	Ohennetaan karaa, jos lujuuslaskut antavat siihen luvan.
V	Tarkistetaan kaikkien osien tarpeellisuus ja mahdollisesti vähennetään osia.
V	Karan tiivisteinä oltava 2 o-rengasta, joista toinen käyttäjän vaihdettavissa.
V	Suunnitellaan venttiilit kaukolämmön eristevahvuuksille. Ei lyhennetä karaa.
V	Suunnitellaan oma kara jokaiseen kokoluokkaan, jos siitä on hyötyä.
T	Hyödynnetään samoja palloja supistettu- ja täysiaukkoisissa venttiileissä.
T	Hyödynnetään samoja palloja linjasäätöventtiileissä.
T	Parannetaan entisestään pallojen kestävyyttä paineiskuja vastaan.
T	Helpotetaan pallontiivisteiden paikalleen asentamista tukilevyn viisteillä.
T	Yksinkertaistetaan karan ja karaholkin muotoilua.
T	Selvitetään vaihtoehtoisia menetelmiä kahvan valmistukseen.
T	Etsitään tiivisteisiin ja liukuosiin parempia materiaaleja.

Jo yksin kaukolämpöventtiilin rakennetta määrittelevät standardit SFS-EN 1983 ja SFS-EN 488 sisältävät kymmeniä ehdottomia vaatimuksia palloventtiilille. Myös painelaitedirektiivin standardeihin perustuvat energiateollisuuden suositukset sisältävät Suomen olosuhteisiin sovellettuja toiveita ja vaatimuksia venttiilin rakenteesta.

5.3 Venttiilin omakustannerakenne

Projektin vaatimuslistasta käy ilmi, että projektin tärkeimmät tavoitteet liittyvät venttiilin materiaaleista ja valmistamisesta syntyvien kustannusten pienentämiseen. Jotta tuotekehitykseen käytettävä aika voitaisiin keskittää erityisesti venttiilin kalleimpien osien kehittämiseen, on jo esiselvitysvaiheessa viisasta tutustua venttiilin omakustannerakenteeseen.



Kuva 5.2. DN65 palloventtiilin osien omakustannejakauma (Vexve Oy 2014).

Kuvan 5.2 omakustannejakaumasta nähdään, että venttiilin kalleimpia osia ovat pallo, kara, karaholkki, runkoputki, jatkeputket, pallontiivisteet sekä kahva. Isommissa kokoluokissa erityisesti pallon osuus venttiilin omakustannehinnasta suurenee entisestään. Muiden osien kohdalta voidaan todeta, että mitä suurempi ja kalliimpi venttiili on kyseessä sitä tasaisemmin kustannukset jakaantuvat osien kesken.

5.4 Venttiilikonstruktioiden luonnostelu

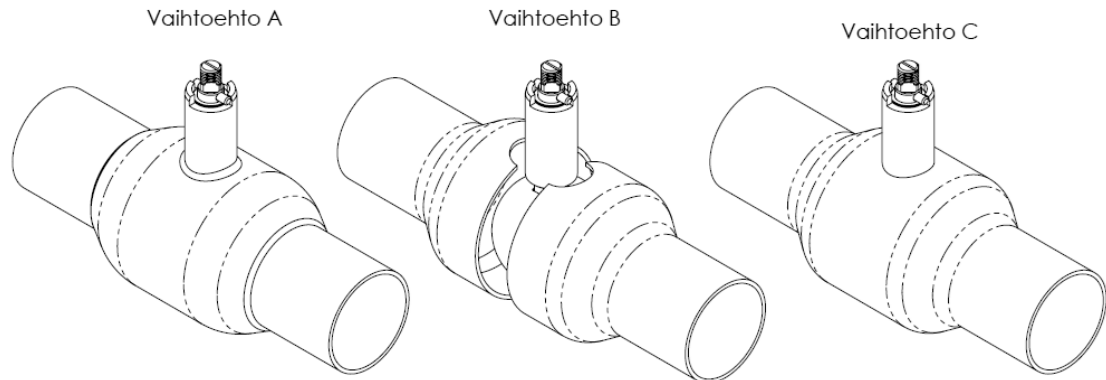
Aiemmin esiteltyjen koneensuunnitteluoppien mukaisesti tehtävän selvittelyvaihetta seuraa tuotekehitysprojektissa luonnosteluvaihe. Luonnosteluvaiheen tavoitteena on saada aikaan projektin tehtävänannon vaatimukset täyttäviä hahmotelmia tulevasta tuotteesta ja valita näistä parhaat luonnokset tarvittaessa erilaisia pisteytyksiä apukeinona käyttäen.

Diplomityön tavoitteena on kehittää palloventtiili kaukolämpöverkoston tarpeita ajatellen sekä tehdä palloventtiilistä entistä kustannustehokkaampi. Nämä vaatimukset täyttääkseen venttiilin tulee käytännössä täyttää kaukolämpölämpöstandardien vaatimukset, asiakkaiden toiveet sekä olla mahdollisesti edullisempi valmistaa.

Venttiilin komponenttikohtainen luonnostelu käydään läpi luvussa 7 samassa yhteydessä komponenttien kehittelyn kanssa. Ennen komponenttikohtaista luonnostelua ja kehittämissä vaiheita esitellään venttiilin runkoa koskevat luonnokset.

Venttiilin omakustannerakenteen perusteella tiedetään, että venttiilin valmistuksen kalleimpia työvaiheita ovat hitsaus, koneistus ja putkien puristaminen. Luonnosteluvaiheessa onkin etsitty venttiilin rungolle vaihtoehtoisia ratkaisua, jossa näiden työ-

vaiheiden määrä vähenisi. Kuvassa 5.3 on esitelty sekä nykyisen venttiilin rungon rakenne A, että kaksi vaihtoehtoista rakennetta.



Kuva 5.3. Vaihtoehdot palloventtiilin rungolle (Vexve Oy 2014).

Vaihtoehdon B mukainen runkorakenne koostuisi kahdesta putkesta, joiden päät puristettaisiin vastaan vaadittua jatkeputken halkaisijan kokoa. Putket olisivat symmetrisiä ja ne hitsattaisiin yhteen venttiilin keskilinjan kohdalla. Vaihtoehdon B etuja verrattuna nykyiseen runkorakenteeseen ovat venttiilin putkiosien väheneminen, hitsaustyön väheneminen sekä mahdollisesti kokoonpanotyön helpottuminen. Tällaisen runkorakenteen haasteita ovat puolestaan keskihitsaussauman lyhyt etäisyys kuumuudelle alttiisiin muoviosiin sekä pallontiivisteiden ja jousilevyjen paikallaan pysyminen runkoputken sisässä. Edellä mainitut osat voitaisiin tukea esimerkiksi putken sisäpintaan hitsattavilla tukiholkeilla, mutta tällöin venttiilin työvaiheet eivät vähenisi vaihtoehtoon A verrattuna.

Vaihtoehdossa C ajatuksena on valmistaa venttiilin runko jatkeputkineen yhdestä putkesta. Pallo asetettaisiin tiivistepesineen putken sisään ennen putken puristusta. Tiivistepesät joko hitsattaisiin putken sisäpintaan tai ne asettuisivat oikealle kohdalleen putken puristuksen yhteydessä. Vaihtoehdon C etuna voidaan pitää vuodotonta ja yksinkertaista runkorakennetta. Kokonaisvalmistuskustannukset eivät kuitenkaan tulisi vähenemään, sillä putken sisälle olisi hitsattava holkit pallontiivisteiden pitämiseksi paikallaan ja kokoonpanoon kuluva aika tulisi luultavasti lisääntymään. Pallon ja pallontiivisteiden paikalleen asettaminen olisi myös vaikeaa automatisoida. Kuvassa 5.3 vaihtoehdon C runkoa on puristettu pitkältä matkalta, jotta jatkeputken osuus näyttäisi yhtä pitkältä kuin nykyisessä venttiilissä. Puristuksen määrää voitaisiin huomattavasti vähentää tekemällä puristuksesta enemmän kartiomainen ja jatkeputken osuudesta lyhyempi.

Ulrichin ja Eppingerin DFM-menetelmän mukaan tuotteen kustannuksia voidaan pienentää kolmella tapaa: komponentti-, valmistus- ja yleiskustannuksia pienentämällä. Kuvan 5.3 vaihtoehdot B ja C ja vähentäisivät mahdollisesti venttiilin komponenttikustannuksia, koska puristamalla venttiili yhdestä putkikoosta voitaisiin ostaa suurempia määriä tiettyjä putkikokoja. Yleiskustannuksetkin saattaisivat vähentyä, koska voitaisiin keskittyä tiettyjen putkikokojen varastointiin.

Edellä mainitut kustannussäästöt olisivat kuitenkin merkityksettömän pieniä verrattuna niihin haasteisiin joita uusi rakenne toisi kokoonpanoprosessiin. Kokoonpano- ja valmistuskustannuksia lisäisivät pallontiivisteiden paikallaan pitävän holkin hitsaus, sekä lisääntynyt manuaalisen kokoonpanon määrä. Tämän yksinkertaisen luonnosvaihtoehtojen vertailun avulla voidaan todeta uusista runkovaihtoehdoista saatavien säästöjen olevan liian pieniä suhteessa syntyviin valmistuskustannuksiin.

6 OSAKOHTAINEN KEHITYS

Perinteisesti suunnitteluprojektissa luonnosteluvaihetta seuraa kehittäelyvaihe. Koska palloventtiilin ulkomuodot tulevat edellisen luvun perusteella pysymään nykyisen venttiilin kaltaisina, tässä luvussa keskitytään palloventtiilin komponenttien osakohtaiseen kehittämiseen.

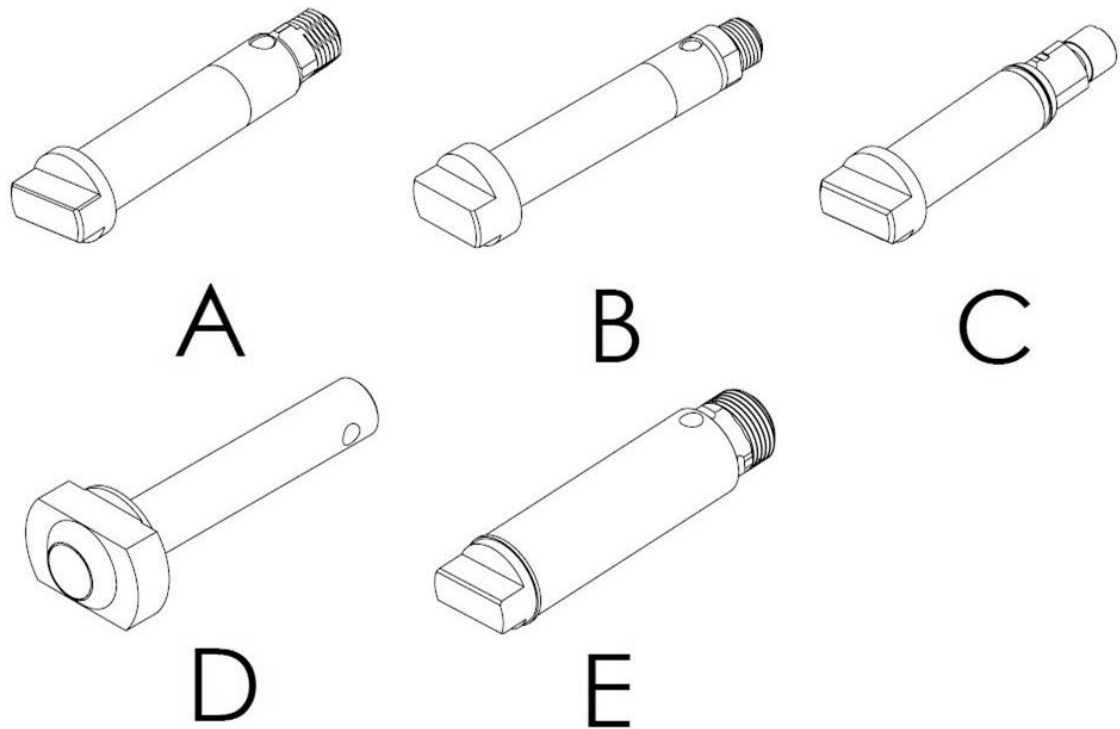
Suuri osa venttiilin osista on rakenteeltaan yksinkertaisia ja mitoiltaan jo valmiiksi mahdollisimman pieniksi mitoitettuja. Palloventtiilistä löytyy kuitenkin myös osia, joiden mitoitus tai materiaalia muuttamalla voidaan saada aikaan huomattavia säästöjä materiaalikustannuksissa yhä säilyttäen venttiilin varmatoimisuus. Erityistarasteluun osattiin kokemusten perusteella valita venttiilin kara, pallo, putket, pallontii-
visteet ja liukulevy.

6.1 Karan kehitys

Karan kehittäminen on tärkeässä roolissa haettaessa kustannussäästöjä venttiilin omakustannehinnasta. Mikäli kara voitaisiin valmistaa pienemmästä standardikokoisesta pyörötangosta, raaka-aineen massa pienenesi venttiilin kokoluokasta riippuen jopa yli 10 %.

6.1.1 Karan luonnokset

Karasta tehtiin luonnosteluvaiheessa useita luonnoksia, joissa painoarvoa annettiin koneistettavan ainesmäärän vähenemiselle, koneistusvaiheiden vähenemiselle ja koneistusajan lyhenemiselle, kuitenkin ohentamatta väännön kannalta karan kriittisiä kohtia. Kuvassa 6.1 on esitelty luonnoksista vartenotettavimmat vaihtoehdot uudeksi karaksi.



Kuva 6.1. Karaluonnokset (Vexve Oy 2014).

Kuvan 6.1 vaihtoehto A vastaa nykyistä Vexven DN65-venttiilin karaa. Siinä vääntiö on paksumpi kuin karan varsi, koska vääntiön täytyy olla väännön suhteen karan vahvin kohta. Vexven venttiilissä rajoitintappi estää karaa vääntymästä yli 90°. Karalle tehtyjen vääntötestien perusteella nykyisen mallisen karan heikoin kohta väännön suhteen on juuri rajoitintapin reiän kohdalla, josta kara alkaa myötää kun sitä kuormitaan liian kauan liian suurella vääntömomentilla.

Vaihtoehto B eroaa A:sta sillä, että karan yläpäässä on säästetty jyrskintään kulu- vassa ajassa tekemällä venttiilin kahvaa varten jyrskinnät vain kahdelle puolelle karaa. Vaihtoehdossa C rajoitintappi on korvattu rajoitinlevyllä, joka estää rajoitintapin tapan karaa vääntymästä yli 90° akselinsa ympäri. Rajoitinlevy pysyy paikallaan sen yläpuo- lulle asetettavan pidätinrenkaan avulla. Kaukolämpöventtiilin kahva ei voi toimia rajoi- tinlevyä paikallaan pitävänä osana, sillä kahva irrotetaan venttiilistä usein heti putkis- toon asentamisen jälkeen.

Vaihtoehdossa D on pyritty minimoimaan koneistuksen määrä hitsaamalla kara kokoon kahdesta osasta, vääntiöstä ja karan varresta. Ainoat karan varrelle tehtävät työstövaiheet olisivat rajoitintapin reiän poraaminen ja varren pinnan viimeistelykoneis- tus. Tässä vaihtoehdossa venttiilin kahva olisi nykyisen lattaraudasta tehdyn kahvan sijasta valmistettu valumuotissa ja siihen olisi porattu reikä karaa varten. Karan ja vään- tiön välinen hitsausliitos aiheuttaa merkittäviä lisäkustannuksia suhteessa muihin kara- vaihtoehtoihin.

Vaihtoehdossa E standardin SFS-EN 1983 vaatimus uloslentämättömästä kara- rakenteesta on toteutettu karan pienellä ulokkeella, jonka päälle asetetaan karan ja kara- holkin välistä vastinpintaa suurentava metallirengas. Karan varsi on halkaisijaltaan sa-

mansuuruinen kuin vääntiö. Tällä tavalla on saatu minimoitua koneistettavan materiaalin määrä. Vaihtoehdon huonona puolena voidaan pitää epävarmuutta karan uloslentämättömyydestä ennen perusteellisia prototyypin testauksia. Toisaalta karan paino saattaa suuremman kokoluokan venttiileissä nousta suureksi.

Jotta voitaisiin puolueettomasti valita paras kara luonnosvaihtoehdoista, tehdään Pahl & Beitzin suunnittelumetodiikan ja VDI-ohjeiston 2225 mukainen pistearviointi. Suoritetaan erikseen tekninen arviointi ja taloudellinen arviointi, joista sitten muodostetaan kummatkin huomioon ottava arvostuspiirros.

Pisteytyksenä käytetään VDI-ohjeiston 2225 mukaista asteikkoa 0–4. Tällä asteikolla nolla tarkoittaa epätyytyttävää, yksi tarkoittaa juuri ja juuri siedettävää, kaksi tarkoittaa riittävää, kolme tarkoittaa hyvää ja neljä tarkoittaa erittäin hyvää.

Taulukko 6.1. Karojen pistearviointi teknisin kriteerein

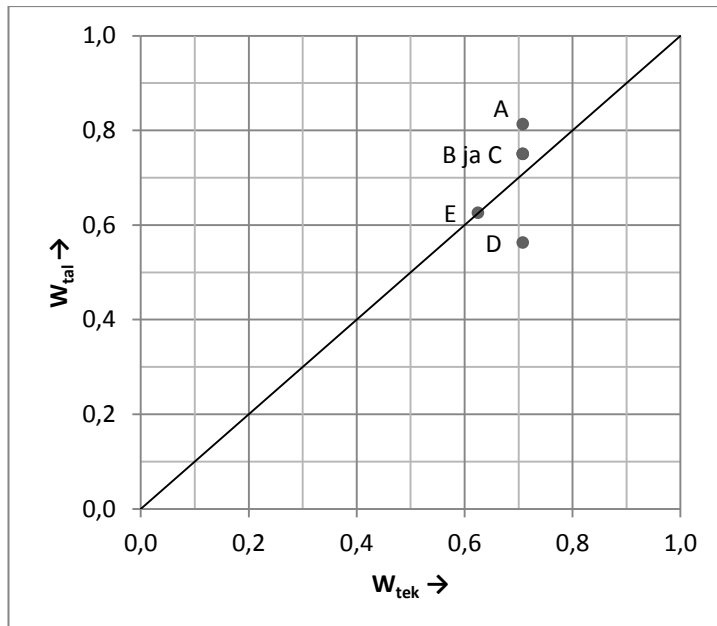
Muunnelmat \ Tekn.kriteerit	A	B	C	D	E
Uloslentämättömyys	4	4	4	4	3
Ylhäältä päin kasattavissa	0	0	0	0	1
Kahva helposti irroitettava	3	3	3	3	3
Mahd. vähän osia	3	3	3	4	2
Hallittu karan hajoaminen	4	4	4	4	3
Helppo tiivisteiden vaihto	3	3	3	2	3
Summa	17	17	17	17	15
$W_{\text{tek}} = \text{Summa}/24$	0,71	0,71	0,71	0,71	0,63

Taulukon 6.1 perusteella näyttää siltä luonnosvaihtoehtojen väliset tekniset eroavaisuudet eivät olisi merkittäviä. Ainoastaan luonnos E jää muista jälkeen teknisissä ominaisuuksissa.

Taulukko 6.2. Karojen pistearviointi taloudellisin kriteerein

Muunnelmat \ Tal.kriteerit	A	B	C	D	E
Pieni raaka-aineen määrä	3	3	3	2	3
Lyhyt työstöaika	2	3	2	2	3
Lyhyt prototestausaika	4	3	4	3	2
Pienet muutuskust.	4	3	3	2	2
Summa	13	12	12	9	10
$W_{\text{tal}} = \text{Summa}/16$	0,81	0,75	0,75	0,56	0,63

Taulukon 6.2 vertailutuloksien perusteella luonnosvaihtoehdot A, B ja C olisivat suotuisimpia vaihtoehtoja. Luonnos A on Vexven nykyisen karan mallinen ja sen käyttäytyminen tunnetaan hyvin. Luonnoksen A valitsemista puoltavat myös pienet muutuskustannukset tuotannossa.



Kuva 6.2. Karan teknisten ja taloudellisten arvostusten vertailu

Kuvassa 6.2 esitetty teknisten ja taloudellisten arvostusten vertailu osoittaa, että paras vaihtoehto olisi pysyä nykyisessä karamallissa. Myös luonnosvaihtoehtoja B ja C voitaisiin harkita jos uusi karamalli tulee olemaan pitkään käytössä, sillä tällöin tuotannon muutoskustannusten merkitys vähenisi.

6.1.2 Karan numeerinen lujuustarkastelu

Esiselvitysvaiheessa tehdyn vaatimuslistan mukaisesti tuotekehitysprojektiin kuuluu karan pienimmän halkaisijan etsiminen lujuustarkastelun avulla. Karamalliksi lujuustarkasteluun valittiin Vexven palloventtiilissä nykyisin käytössä oleva kara erityisesti siitä syystä, että sitä oli helposti saatavilla testausta varten.

Karan lujuus laskettiin käyttäen perinteisiä lujuusopin kaavoja. Karan testaukset suoritettiin käyttäen apuna laskettuja teoreettisia maksimivääntömomenteja. Koska pistearvioinnin perusteella parhaita luonnosvaihtoehtoja olleet A, B ja C ovat vääntiön osalta keskenään samanlaisia, voidaan Vexven nykyisen karamallin eli luonnos A:n lujuustarkastelun katsoa pätevän näihin kaikkiin kolmeen luonnosvaihtoehtoon.

Vexven karojen materiaalina käytetään ruostumatonta teräslajin EN 1.4305 eli AISI 303 pyörötankoa. Kyseinen teräslaji on tarkoitettu erityisesti kohteisiin, joissa työstettävyyden on tärkeämpää kuin materiaalin muovattavuus, hitsattavuus ja korroosionkestävyys (Ruukki 2014).

Teoriaosuudessa esitettyjen laskukaavojen mukaiset vääntörasitukseen keskittyvät lujuuslaskut on esitetty Mathcad-dokumenttina liitteessä 1.

Lujuuslaskujen tarkoituksena on selvittää mikä karan kohta kestää vähiten vääntörasitusta. Tämän selvittämiseksi karamateriaalin myötörajaa vastaava vääntömometti karan kolmen eri kohdan poikkileikkauksella. Vääntömometti laskettiin karan yläpään nelikantin kohdalla, karan pyöreän varren kohdalla ja karan vääntiön kohdalla. Lujuus-

laskujen keskeisimmät tulokset on esitetty oheisessa taulukossa 6.3. Karan ja pallon poikkileikkausmuodoista saa parhaan käsityksen liitteiden 2 ja 3 kuvien avulla.

Taulukko 6.3. Karan eri osien vääntörasituksen kesto.

Karan osio	Poikkileikkaus	R_e :tä vastaava vääntömomentti
Karan yläpää	kulmista pyöristetty neliö	74% suurimmasta
Karan varsi	Ympyrä	75% suurimmasta
Karan vääntiö	Pyöristetty suorakulmio	94 % suurimmasta
Pallon reikä	Pyöristetty suorakulmio	Kestää suurimman vääntömomentin

Tarkastelun kohteena olleista karan kohdista parhaiten vääntörasitusta näyttää odotetusti kestävä karan vääntiö. Vääntiön kuuluukin olla karan kestävin osa, mutta ylimitoitettu vääntiö johtaisi toisaalta tarpeettoman suuren raaka-ainetangon valintaan.

6.1.3 Karan vääntökuormitustestaus

Edellisessä luvussa esitetyt karan lujuuslaskelmat antoivat suuntaa siitä vääntömomentin maksimiarvosta, jolla karaa voidaan kuormittaa. Näitä lujuuslaskelmia taustatietona käyttäen suoritettiin karan vääntökuormitustestit. Liitteessä 2 on esitetty kuvia vääntökuormitustestauksesta.

Vääntökuormitustestaukseen valittiin edellisen luvun lujuuslaskuja vastaava Vexven nykyisen DN65–80 kokoluokan palloventtiilin kara. Vääntökuormitustestauksen tarkoituksena oli saada vertailupohjaa tehdyille lujuuslaskuille ja tutkia kuinka suuri vaikutus karan vääntiön halkaisijan pienentämisellä on sallittuun maksimivääntömomenttiin. Tarkoitus oli myös tutkia mistä kohdasta kara alkaa ensimmäisenä myötää.

Vääntökuormitustestauksen ensimmäisessä vaiheessa testauksen kohteena oli pelkkä kara ja jälkimmäisessä vaiheessa testauskonstruktio koostui karasta, pallosta ja osittaisesta palloventtiilin rungosta. Vääntömomentin suuruutta säädettiin ja tarkkailtiin momenttiavaimella.

Vääntökuormitustestauksen ensimmäisessä vaiheessa vääntömomenttia lisättiin 30 Nm kymmenen toiston välein. siirryttäessä karamateriaalin myötämisen kannalta kriittisiin vääntömomentin arvoihin myös toistokertojen määrää vähennettiin.

Mahdollista pysyvää muodonmuutosta seurattiin vääntötestin aikana tarkkailemalla momenttiavaimen varren radiaalista palautumista vääntöliikettä edeltäneelle paikalleen. Ensimmäiset havainnot karan pysyvästä muodonmuutoksesta saatiin materiaalin myötörajan tuntumassa. Karan pintaan piirretyn mitta-asteikon perusteella ensimmäisenä myötännyt alue sijaitsi karan yläpäässä porareian ja nelikantin kohdalla.

Vääntökuormitustestauksen toisessa vaiheessa testauskonstruktioon lisättiin palloventtiilin runko ja pallo, jotta karan tuenta vastaisi mahdollisimman hyvin todellista tilannetta. Vääntökuormitustestien testikaroina toimivat nykyisin käytössä oleva kokoluokan DN65-80 kara ja 12 % edellä mainittua ohuempi protokara. Testauskonstruktio on esitetty liitteen 2 kuvassa 3.

Vääntökuormitustestauksen toinen vaihe suoritettiin toistotestinä kuormittamalla karaa 100 kertaa 20 % teoreettista myötörajaa pienemmällä vääntömomentilla. Kyseinen vääntömomentti valittiin ensimmäisen vaiheen mittaustulosten, sekä nykyiselle venttiilille ilmoitetun maksimivääntömomentin perusteella. Ensin testattiin halkaisijaltaan paksumpi kara. Testin aikana ei havaittu myötämistä. Testin jälkeen karalle tehty visuaalinen analyysi viittaa siihen, että karaan muodostui ainoastaan pinnallisia kulumajälkiä.

Tämän jälkeen testattiin 12 % ohennettu kara vastaavalla kuormituksella. Myöskään tämän testin aikana ei havaittu myötämistä. Testin jälkeen tehdyssä visuaalisessa analyysissä havaittiin syvyydeltään 0,5–1 mm painauma karan ja pallon keskinäisen kosketuspinnan alueella. Karan yläpäässä havaittiin vain kulumajälkeä momenttiavaimen kontaktipinnan alueella.

Vääntökuormitustestien perusteella karan heikoimmat kohdat näyttävät olevan karan yläpään porareian ja nelikantin alue, sekä karan alapään osalta karan ja pallon välinen kontaktipinta. Testaustulokset ovat karan ohentamisaikeiden kannalta lupaavia, mutta niitä voidaan pitää vain suuntaa antavina suuren mittausepä-tarkkuuden johdosta.

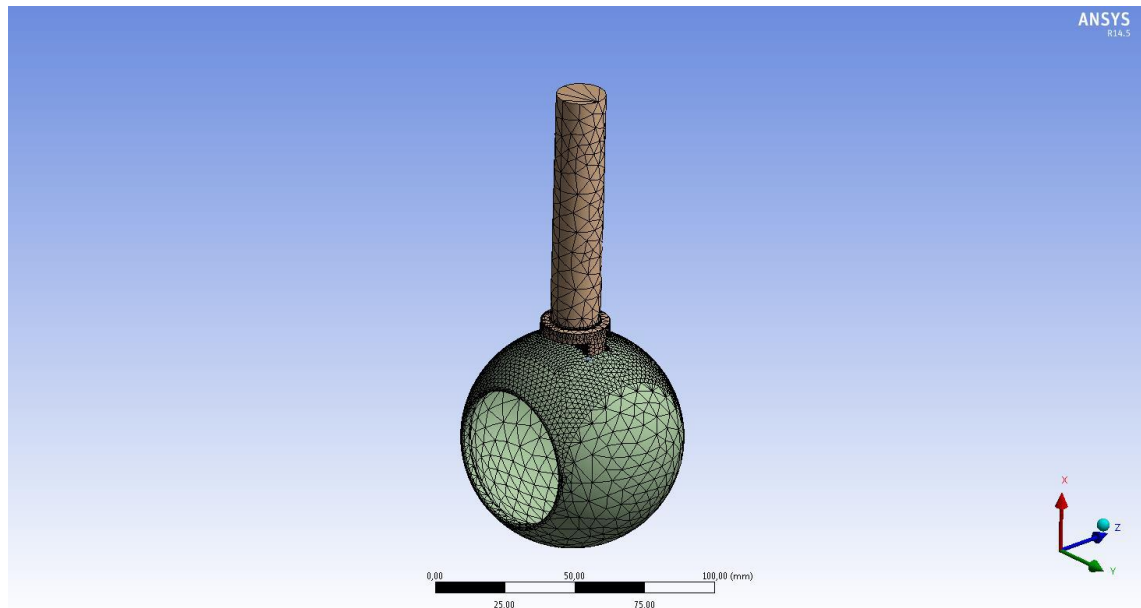
Vääntökuormitustestauksen mittaustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä olivat momenttiavaimen epätarkkuus, testaushenkilön aikaansaama vaihteleva vääntömomentti, karan epätoivottu liikahtelu testipenkissä tukemattomiin suuntiin, sekä todellisista käyttöolosuhteista eroavat testausolosuhteet. Venttiilin kestävyyttä väännön suhteen heikentävät todellisissa olosuhteissa erityisesti korroosio, viruminen ja venttiiliä kaukolämpöputkessa ympäröivä kuuma vesi.

6.1.4 Karan FE-analyysi

FE-analyysin tarkoituksena on selvittää voisiko karan aihiona käyttää nykyistä ohuempaa standardikokoista terästankoa. FE-analyysissa on keskitytty erityisesti karan vääntöön sekä pallon vääntöreiän alueiden lujuustarkasteluun. Analyysi on voitu keskittää tietylle karan alueelle, koska vääntö on todettu lujuuslaskuissa karan vahvimaksi kohdaksi. FE-analyysi on suoritettu diplomityön puitteissa ainoastaan kokoluokkien DN65–100 karoille. Diplomityössä esitettyä FE-analyysia voidaan kuitenkin käyttää esimerkkitapauksena myöhemmin muiden kokoluokkien karoja analysoitaessa.

FE-analyysi on suoritettu pääosin Ansysella, joka on erityisesti FEM-laskentaan erikoistunut laskentaohjelmisto. Vertailupohjaa Ansysen laskentatuloksille haettiin tekemällä vastaava analyysi Solidworksin Simulation -työkalulla ja vertailemalla näistä kahdesta eri laskentaohjelmistosta saatuja laskentatuloksia toisiinsa.

Lujuustarkastelun kannalta osien kiinnostavimmat kohdat on otettu mallin verkotuksessa huomioon verkottamalla alueet tiheämmällä elementtiverkolla kuin vähemmän kriittiset alueet. Kuvassa 6.3 on esitetty FE-analyysia varten tehty karan ja pallon kokoonpanomalli elementtiverkotuksella.



Kuva 6.3. Karan ja pallon kokoonpano verkotuksella (Vexve Oy 2014).

Tarkasteltavaan kokoonpanomalliin on valittu ainoastaan ne venttiilin osat, joiden välistä vuorovaikutusta haluttiin tutkia. Kiinnostavia kohtia ovat erityisesti karan vääntö ja pallon vääntöreiän ympäristö. Karaa ympäröivät osat, kuten liukulaakerit, tiivisteet ja karaholkki on jätetty kokoonpanomallista pois, koska niiden tukivaikutukset karaan on huomioitu Ansyksen asetuksia säätämällä. Ylimääräiset osat kuluttaisivat lisäksi Ansyksen rajallista elementtikapasiteettia ja lujuustarkastelun kannalta kriittisellä alueella jouduttaisiin käyttämään isompaa elementtikokoa.

Kokoonpanomallin tukipinnat ja tukivoimat on säädetty Ansyksen asetuksista kuvaamaan mahdollisimman hyvin todellista kuormitustilannetta. Karaa kuormittava vääntömomentti on asetettu vaikuttamaan karan yläpäästä, karan varsi tuettiin liukulaakerien tukipintaa vastaavalta alueelta ja pallo lukittiin paikalleen pallontiivisteiden tiivistyspintaa vastaavalta alueelta.

FE-analyyseissä on kuormitettu kunkin kokoluokan kokoonpanomallia Vexven määrittämällä maksimivääntömomentilla. Näitä vääntömomenteja vastaavat Von Mises -vertailujännityshuiput on tilastoitu talteen. Uusille protokokoonpanoille on etsitty iteroimalla vääntömomentit, joilla Von Mises -vertailujännitys pysyisi mahdollisimman lähellä vanhan mallin Von Mises -vertailujännitystä. FE-analyysein tavoitteena on etsiä uusille karoille sellaiset maksimivääntömomentit, että väännön aiheuttama leikkausjännitys ei olisi suurempi kuin vanhassa karassa.

FE-analyysi on suoritettu käyttäen sekä lineaarista mallia, että epälineaarista mallia. Lineaarisen mallin tapauksessa Von Mises -vertailujännitys jatkaa lineaarisesti kasvamistaan materiaalin myötörajan ylittymisen jälkeen. Epälineaarinen malli ottaa lisäksi huomioon kappaleessa syntyvän pysyvän muodonmuutoksen myötörajan ylityksen jälkeen ja kertoo näin myös kappaleessa syntyvän plastisen muodonmuutoksen määrän.

FE-analyysin tuloksia on esitetty kuvien avulla liitteessä 3. FE-analyysin perusteella suurimmat plastiset muodonmuutokset syntyvät karan ja pallon kontaktipinnan alueella. Plastinen muodonmuutos kohdistuu erityisesti vääntiön ja pallon vääntiöreiän kulmiin. Vexven määrittämää maksimivääntömomenttia käyttäessä plastisen muodonmuutoksen määrä oli sekä vanhalla, että uudella karalla käytännössä merkityksettömän pieni. Plastisen muodonmuutoksen määrän perusteella uuden karan Von Mises -vertailujännitykseksi voidaan sallia nykyisen karan vertailujännitystä huomattavasti suuremmatkin jännitysarvot.

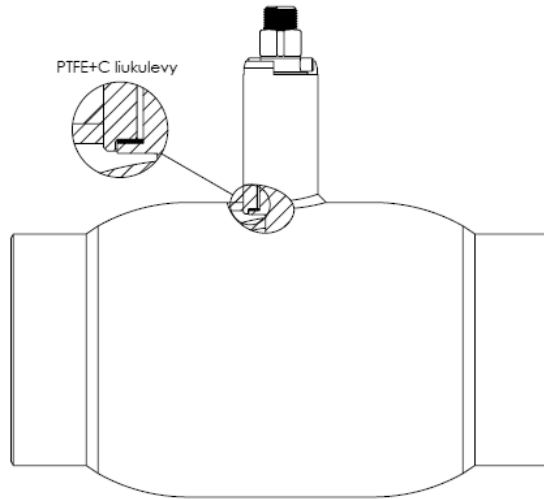
Liitteen 3 kuvissa 1–7 on kuvattu karan plastista muodonmuutosta. Näiden kuvien perusteella voidaan todeta, että vääntömomentin pysyessä ennallaan ja karan ollessa 12 % nykyistä ohuempi, kasvaa plastisen muodonmuutoksen määrä vastaamaan kuvan 4 tilannetta, jossa ohentamaton kara on kuormitettu kokoluokan DN80 maksimi vääntömomentilla. Käytännön kokemusten perusteella nykyisen DN80 kokoluokan karan tiedetään kestävän tämä vääntömomentti. Jos plastisen muodonmuutoksen määrän ei sallittaisi nousevan nykyisestä kokoluokan DN65 maksimikuormitustilanteesta, olisi ohennetun karan maksimi vääntömomentti mitoitettava ohentamattoman karan plastisen muodonmuutoksen määrän mukaisesti (liite 3, kuva 3). Jos vastaavasti DN80 kokoluokan karaa ohennettaisiin 12 % alkuperäisestä, olisi uusi DN80 kokoluokan maksimi vääntömomentti määritettävä kuvan 6 mukaisesti. Kuvassa 7 on kuvattu miten kuormitus jakautuu pallon vääntiöreiän seinämässä.

Liitteen 3 kuvissa 8–17 on tarkasteltu karan Von Mises -vertailujännityksiä. Malli on lineaarinen, joten materiaalin käyttäytymistä myötö- ja murtorajalla ei ole otettu huomioon. Liitteen 3 kuvien 8–17 mukaisessa lineaarisen mallin analyysissä tavoitteena on ollut selvittää mikä on suurin sallittu vääntömomentti, jos karan halkaisijaa pienennetään vertailujännityksen pysyessä muuttumattomana.

FE-analyysin tulokset eivät ota huomioon ympäristön olosuhteita. Todellisuudessa karan ja pallon suurimpia sallittuja leikkausjännityksiä alentavat ainakin korkea käyttölämpötila, hyvin pitkäaikainen viruminen putkistossa ja mahdollinen korrosio. Nämä muuttujat voidaan ottaa suunnittelussa huomioon käyttämällä riittäviä varmuuskertoimia.

6.2 Liukulevytutkimukset

Liukulevyn tehtävä on nimensä mukaisesti pienentää karan ja karaholkin välistä kitka-kerrointa ja näin tehdä venttiilin käytöstä mahdollisimman kevyttä myös korkeissa käyttöpaineissa. Liukulevy sijaitsee kuvan 6.4 mukaisesti karan ja karaholkin välissä. Vexven palloventtiilin liukulevy valmistetaan tällä hetkellä helposti työstettävästä ja hyvät liukuominaisuudet omaavasta PTFE-kestomuovista.



Kuva 6.4. Liukulevyn sijainti palloventtiilissä (Vexve Oy 2014).

Vaikka virallisesti PTFE:n korkein sallittu käyttölämpötila $+270\text{ °C}$ riittääkin erinomaisesti palloventtiilin käyttökohteiden olosuhteisiin, se aiheuttaa omat haasteensa venttiilin kokoonpanovaiheessa. Liukulevy asetetaan nykyään manuaalisesti venttiilin sisälle karan mukana, kun karaholkki on ensin hitsattu kiinni venttiilin runkoon. Työvaiheet ovat tässä järjestyksessä, koska liukulevy ei nykytiedon mukaan kestäisi karaholkin hitsauksesta johtuvaa kuumuutta, jos se olisi paikallaan jo ennen hitsausta.

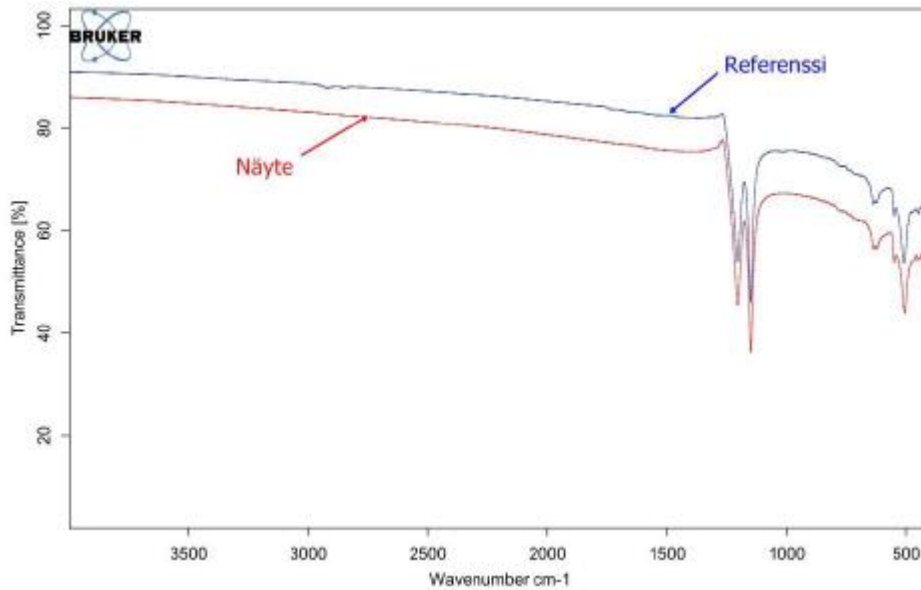
Jos liukulevyn materiaalin tiedettäisiin kestävän karaholkin hitsauksesta syntyvää korkeaa lämpötilaa, voitaisiin kara asettaa karaholkin sisälle jo ennen hitsausta. Tällainen työvaihe olisi myös helpompi tulevaisuudessa automatisoida, koska osat voitaisiin tällöin kokoonpanna suoraviivaisin liikkein.

Osana diplomityötä liukulevyn kuumuudenkestoa on tutkittu testikappaleilla. Kuumuudenkestotestissä on testattu kymmenen kappaletta liukulevyjä pitämällä ne paikallaan jo karaholkin hitsauksen aikana. Osa testikappaleista on jäädytetty hitsauksen jälkeen upottamalla ne vesiastiaan, osan taas on annettu jäähtyä itsekseen.

Testikappaleliukulevyjen pintaan on hitsauksen aikana syntynyt mustaa karstaa (Liite 4, kuva 1). Karsta lienee olevan liukulevymateriaaliin sisältyvää hiiliainesta. Karsta irtoaa raaputtamalla liukulevyn pinnasta ja silmämääräisesti liukulevy vaikuttaa vielä täysin käyttökelpoiselta. Kuvia hitsauksen läpi käyneistä liukulevyistä löytyy liitteestä kolme.

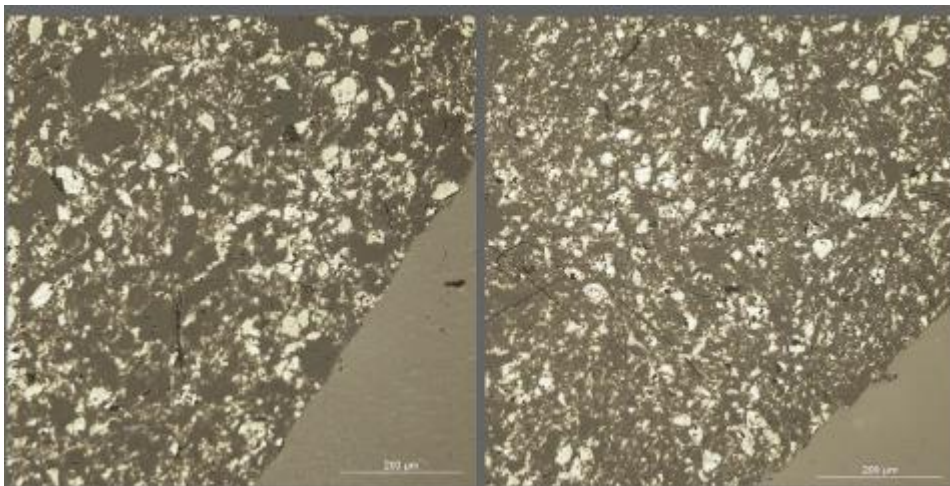
Varmemman tuloksen saamiseksi kaksi hitsauksen läpi käynyttä liukulevyä on tutkittu mikroskooppitasolla TTY:n materiaalilaitoksen laboratorioissa. Liukulevyille on suoritettu laboratorioissa sekä FTIR-analyysi, että mikroskooppitarkastelu.

FTIR-analyysi on suoritettu käyttäen Bruker Tensor 27 FTIR-spektrometriä. Kuvassa 6.5 on esitetty käyttämättömälle referenssikappaleelle ja näytteelle mitatut spektrit. Spektreistä voidaan tehdä johtopäätös, että näytteen ja referenssin välillä ei ole eroa. FTIR ei kuitenkaan anna tietoa polymeeriketjun moolimassan alentumisesta ketjun katkeamisesta johtuen. (Tampereen teknillinen yliopisto 2014.)



Kuva 6.5. Liukulevyjen FTIR-spektri (Tampereen teknillinen yliopisto 2014).

Liukulevyn poikkileikkaus on tutkittu myös mikroskooppisesti. Poikkileikkausnäyte on valmistettu valamalla referenssi- ja näytekappaleesta pala kylmäkovettuun epoksihartsiiin. Epoksin kovetetut näytenapit on hiottu vesihiontapapereita käyttäen ja lopuksi alumiinioksidilla kiillottamalla. Referenssi- ja näytenappi on kuvattu optisella mikroskoopilla. Kuvassa 6.6 on esitetty rinnakkain, vasemmalla referenssin ja oikealla näytteen poikkileikkaus. (Tampereen teknillinen yliopisto 2014.)



Kuva 6.6. Mikroskooppikuvat poikkileikkeistä (Tampereen teknillinen yliopisto 2014).

Kuvista voidaan havaita eroja hienorakenteen suhteen. Referenssissä ja näytteessä ei havaita erillistä altistuskerrosta pinnan läheisyydessä. Visuaalisesti tämä on kuitenkin havaittavissa näytteen pinnassa.

PTFE vapauttaa erilaisia kaasumaisia yhdisteitä hajotessaan termisesti, mutta nämä kaasumaiset yhdisteet eivät jää näytteeseen ja siten eivät näy analyysissä. Tehtyjen analyysien pohjalta ei voida täysin sulkea pois termistä hajoamista.

Kuumakestotestien ja laboratoriotutkimusten perusteella ei voida vetää johtopäätöstä, että liukulevy voitaisiin huoletta pitää paikallaan jo karaholkin hitsauksen aikana. Testatut liukulevyt olivat käyttökelpoisia testin jälkeenkin, mutta toisaalta testausolosuhteet vastaavat harvoin täydellisesti aitoja tuotanto-olosuhteita. Käytännön tilanteessa hitsausta ei tehtäisi niin huolellisesti kuin testaustilanteessa.

Vexven nykyisen liukulevymateriaalin PTFE +25 % C ei taata kestävän nykyisen hitsausprosessin aiheuttamaa lämpötilapiikkiä, vaikka Tampereen teknillisen yliopiston laboratoriossa tehdyt liukulevytutkimukset antoivatkin lupaavia tuloksia. Sen sijaan PTFE-johdannainen liukulevymateriaali G439 kestäisi toisaalla tehtyjen empiiristen tutkimusten mukaan hitsauksen aiheuttaman lämpötilapiikin. Suurin ero PTFE G439:n ja PTFE +25 % C:n merkittävin ero on G439:n huomattavasti suurempi suhteellinen murtovenymän arvo.

Materiaalinvalintaohjelma CES eli Cambridge Engineering Selector tarjoaa puolestaan vaihtoehtoisiksi liukulevymateriaaleiksi yhdisteitä CAB, CTFE ja PEEK. Nämä yhdisteet saatiin hakutuloksiksi, kun hakukriteereinä olivat korkea maksimilämpötila, pieni kitkakerroin, hyvä koneistettavuus ja materiaalin kova tuntuma. Näiden yhdisteiden tarkempi analyysi jätetään kuitenkin diplomityön ulkopuolelle.

6.3 Pallon kehitys

Pallo on venttiilin kokoluokasta riippumatta sen arvokkain komponentti ja näin ollen siihen kohdistuvat myös suurimmat säästöpaineeet. Pallojen mitoituksen lähtökohtana on erityisesti kaukolämpöventtiilien kohdalla vallinnut oletus, että pallon virtausaukon halkaisija millimetreissä on yhtä suuri kuin yhtä pienemmän kokoluokan nimelliskoko. Tällä tavoin mitoitettua venttiiliä kutsutaan supistettuaukkoiseksi venttiiliksi. Täysiaukkoisessa venttiilissä virtausaukon halkaisija millimetreissä on yhtä suuri kuin kyseinen nimelliskoko. Esimerkiksi supistettuaukkoisen DN65-venttiilin virtausaukon halkaisija on 50mm.

Kaukolämpöventtiilistandardi SFS-EN 1983 sallii tietyissä kokoluokissa myös edellä esitettyä mitoitus tapaa pienemmät pallon virtausaukot. Tämän projektin puitteissa mitoitettiin vaihtoehtoinen venttiilimallisto, joka noudattaa kyseisessä standardissa ilmoitettuja pienimpiä sallittuja virtausaukkoja. Virtausaukon pienentäminen on avainasemassa muita venttiilin komponentteja mitoitettaessa. Sen myötä voidaan pienentää myös pallon halkaisijaa ja voidaan mahdollisesti valita pienempi runkoputki.

Venttiilin virtausaukkoa ei voida kuitenkaan pienentää niin, että venttiilin läpi kulkema tilavuusvirta ei pieneneisi. Merkittäville muutoksille venttiilin läpäisemässä tilavuusvirrassa ja K_v -arvossa täytyykin saada myös markkinoiden hyväksyntä ennen kuin vanhaa tuotetta voidaan korvata uudella tuotteella, jonka toiminta-arvot ovat selvästi muuttuneet.

Palloventtiilin halkaisijaa pienentäessä on otettava huomioon, että samaa palloa käytetään myös linjasäätöventtiilin pallona, jolloin siihen tosin tehdään laserleikkaamal-

la linjasäätöventtiilin oma, muotoiltu virtausaukko. Tietyissä kokoluokissa pallon pienentäminen aiheuttaisikin tarpeen mitoittaa linjasäätöventtiilin virtausaukko uudelleen.

6.4 Runkoputken kehitys

Runkoputken kehityksessä on keskitytty etsimään pienintä kyseeseen tulevaa putkikokoa. Kaukolämpöstandardit eivät määrää runkoputken halkaisijan kokoa, kuten jatkeputkien kohdalla. Sen sijaan painelaiteteräspankkoa koskeva standardi SFS-EN10217 rajoittaa osaltaan runkoputkikoon valintaa. Kyseisessä standardissa putkikoot on asetettu kolmeen yleisyysluokkaan, jotta putkivalmistajat voisivat keskittyä tekemään tiettyjä putkikokoja halvemmalla. Runkoputkikokoa valitessa onkin syytä valita mahdollisimman yleinen ja näin myös edullisempi putkikoko.

Runkoputken halkaisijan pienin mahdollinen koko määräytyy puolestaan runkoputken sisään asetettavan pallon koon mukaan. Nykyisen venttiilimalliston venttiileistä osassa pallo hyvinkin tarkkaan mitoitettu runkoputken sisään, mutta monessa kokoluokassa runkoputkea on selvästi varaa pienentää.

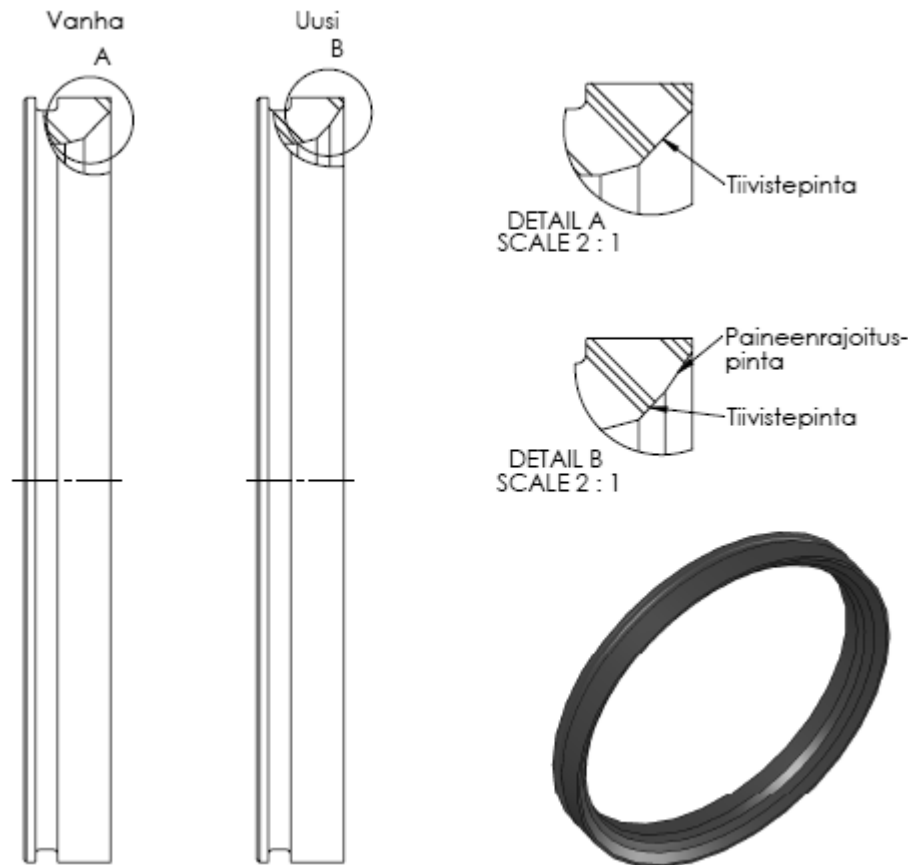
Koska nykyisessä tuotantolinjassa kara asetetaan paikalleen runkoputken sisäpuolitse ennen pallon asettamista, on runkoputkea mitoitettaessa otettava huomioon myös pallon asentaminen runkoputkeen sisään. Runkoputkea ja pallon välissä on oltava tarvittavasti väljyyttä, jotta lopullisella paikallaan oleva karan vääntiö saadaan ujutettua pallon vääntiöreikään.

Runkoputken seinämää ei puolestaan ole haluttu muuttaa, jotta venttiilin paineenkestosta ei tulevaisuudessakaan tarvitsisi huolehtia. Venttiilin seinämän paksuuden määrää paineluokka, johon venttiili suunnitellaan. DN65–150 kokoluokkien paineluokka on 25 bar.

6.5 Pallontiivisteiden kehitys

Pallontiivisteiden osuus palloventtiilin komponenttien kokonaiskustannuksista on venttiilin kokoluokasta riippuen 5–10 %. Materiaalia säästävät muutokset pallontiivisteiden rakenteessa heijastuvat suoraan pallontiivisteiden omakustannehintaan. Näin ollen pallontiivisteiden kehityksessä ensisijainen tavoite oli materiaalin määrän vähentäminen.

Toisena tavoitteena pallontiivisteiden kehityksessä on venttiilin pallon paineenkeston parantaminen tiivistepinnan muotoilua muuttamalla. Tiivistepinnan tarkkaan harkitulla muotoilulla pystytään vaikuttamaan pallon kestämiseen paineiskuja vastaan.



Kuva 6.7. Pallontiivisteiden paineenrajoituspinta (Vexve Oy 2014).

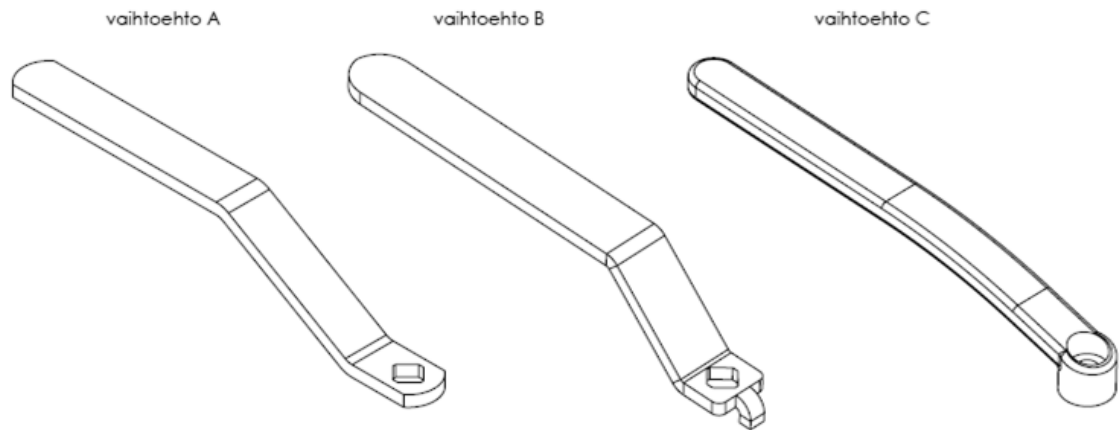
Suurentamalla pallontiivisteiden paineenalaista pinta-alaa kuvan 6.7 mukaisesti, saadaan lisättyä paineen pallontiivisteeseen aiheuttamaa työntövoimaa. Työntövoiman suuressa verrattuna vanhaan tiivisteeseen, ylipaine pääsee purkautumaan vuotona pallontiivisteiden ja pallon välistä helpommin. Venttiili palaa entiseen tiiveyteensä heti, kun ylipaine on purkautunut venttiilistä pois.

Pallontiivisteiden materiaalin määrää on pienennetty tiivisteiden syvyyttä lyhentämällä. Pallontiivisteiden lyhentämisen voidaan katsoa olevan turvallista, koska pallontiivistettä ympäröi venttiilissä metallinen tukilevy. Pallontiivisteiden lyhentämisessä on päädytty maltilliseen ratkaisuun, jossa pallontiivisteiden kaikki entiset muodot säilyivät ja lyhennys kohdennettiin pallontiivisteiden kyljen suoraan osuuteen.

6.6 Kahvan kehitys

Kahvan muotoilua ei ole standardeissa määritelty ja siksi se onkin venttiilin tärkein yksittäinen osa, jonka avulla voi erottautua kilpailijoiden venttiileistä. Kahvan muotoilun tärkeimmät periaatteet ovat helppokäyttöisyys ja toimintavarmuus.

Nykyinen Vexven palloventtiilin kahva valmistetaan lattaraudasta. Vexven kahvan hyviä puolia ovat yksinkertainen valmistustapa, varmatoimisuus sekä helppo irrotettavuus venttiilistä. Huonoiksi puoliksi voitaneen laskea muotoilu, sekä suhteellisen kallis raaka-aineen hinta.



Kuva 6.8. Vaihtoehtoiset kahvamuotoilut (Vexve Oy 2014).

Karsintakierrosten jälkeen jäljelle jääneet kahvaluonnokset on esitetty kuvassa 6.8. Vaihtoehto A kuvaa Vexven kahvan nykyistä rakennetta. Sen valintaa puoltavat jo edellisessä luvussa esitetyt seikat sekä muutokustannusten välttäminen.

Vaihtoehto B:n mukainen rakenne mahdollistaisi rajoitintappirakenteen jättämisen pois kararakenteesta, sillä kahvan päässä oleva alas taitettu uloke toimii venttiilin asennon rajoittimena. Asiakaspalautteen perusteella nykyisen venttiilin hyvänä puolena on kuitenkin pidetty sitä, että vaikka kahva irrotettaisiin, niin karan rajoitintappi pysyy silti paikallaan. Vaihtoehto B yksinkertaistaisi siis kararakennetta, mutta asiakkaiden palaute saattaisi olla huonoa kahvan ominaisuuksien muuttuessa.

Vaihtoehto C:n mukainen kahva on rakenteeltaan monimutkaisempi ja sen aihio olisikin tarkoitus valmistaa valamalla, jonka jälkeen kahvaan tulevat reiät koneistettaisiin. Valumuotti-investoinnin myötä alkukustannukset olisivat siis suuremmat kuin A ja B:ssä. Paksumpi rakenne mahdollistaisi kuitenkin kevyemmän materiaalin, kuten alumiinin, käytön raaka-aineena. Vaihtoehto C:n rakenteessa karan yläpään jyrskitty nelikantimuoto asetetaan kahvaan koneistettuun karan yläpään muotoiseen koloon. Kahva kiinnitetään karaan mutterilla, jonka kiinnittämistä varten on kierteet karan yläpäässä.

Kahvojen osalta lujuuslaskut jätetään tuleviin projekteihin ja nykyinen kahvamalli tultaneen pitämään käytössä toistaiseksi. Ainakin kokoluokan DN65–80 kahvan ainepaksuutta tullaan jo lähiaikoina ohentamaan, jolloin materiaalikustannuksia saadaan pienennettyä.

6.7 Muiden osien kehittäminen

Edellisissä luvuissa on esitelty palloventtiilin omakustannusrakenteen kannalta merkittävempien osien kehitystyötä. Toistaiseksi mainitsematta jääneet komponentit olivat sivuosassa tässä työssä ja niihin kohdistui vain vähäistä kehitystyötä. Tässä luvussa on esitelty kehitysehdotuksia niiden komponenttien osalta, joiden osuus venttiilin omakustannushinnasta on pienempi kuin aiemmissa luvuissa esitettyjen komponenttien.

Karaholkki on vielä mainitsematta jääneistä osista arvokkain. Karaholkin materiaali on halvempaa ja helpompaa koneistaa kuin karan materiaalina käytettävä automaattiteräs. Tästä syystä karan ympärille tulevien liukulaakereiden ja o-renkaiden urat koneistetaan karaholkin sisäpintaan eikä karan ulkopintaan.

Karaholkin sisäpuolisia koneistuksia ei nähdä tarpeelliseksi muuttaa. Sen sijaan kokoluokassa DN100 karaholkin ulkohalkaisijaa voidaan ohentaa 5 %, jolloin karaholkiin tarvittavan raaka-aineen määrä vähenee noin 6 %.

Jatkeputkien osuus venttiilin komponenttikustannuksista on yhteensä 5–10 %, riippuen jälleen kokoluokasta. Jatkeputkien kehitystyölle on kuitenkin jätetty kaukolämpöventtiilistandardeista johtuen todella vähän mahdollisuuksia, sillä sekä jatkeputken ulkohalkaisija, seinämäpaksuus että materiaalikin ovat standardeissa tarkoin määritellyjä suureita.

Vielä mainitsematta jääneiden komponenttien kohdalla on mietitty lähinnä niiden olemassa olon välttämättömyyttä palloventtiilissä sen sijaan, että olisi lähdetty kehittämään niitä paremmiksi. Venttiilistä voitaisiin jättää pois jatkeputken ja lautasjousen välissä oleva pidätinrenkas. Pidätinrenkaan tarkoituksena on antaa lautasjouselle lisää tukipinta-alaa, mutta testien ja kokemusten perusteella lautasjousen on todettu pysyvän tukevasti paikallaan ilman pidätinrengastakin.

6.8 Uudistukset kokoonpantavuuden kannalta

Kehitettäessä uusia osia vanhaan kokoonpanoon, on varmistettava että uusi osa sopii hyvin paikalleen kokoonpanoon. Yhteensopivuus pystyttiin luotettavasti tarkistamaan vaihtamalla uusi osa vanhan tilalle Solidworksin venttiilikokoonpanoon.

Joidenkin osien kohdalla pelkkä osan sopiminen Solidworksin kokoonpanomallissa paikalleen ei takaa osan kokoonpantavuutta. Parhaimpana esimerkkinä tästä on venttiilin pallo, joka joudutaan kokoonpanovaiheessa ujuttamaan vääntiöreiästään kohdakkain karan kanssa. Palloa ei siis voitu mitoittaa sopimaan juuri ja juuri runkoputken sisään vaan näiden väliin oli jätettävä reilu vällys pallon kokoonpanoa varten. Pallon kokoonpanovaihetta pystyttiin simuloimaan animaatioilla Solidworksissa ja näin varmistamaan jo suunnitteluvaiheessa kokoonpanon onnistuminen.

Valmistusprosessin työvaiheet voidaan pitää suunniteltujen rakenneuudistusten jälkeen ennallaan, eivätkä muutokset kokoonpanolinjaan ole välttämättömiä. Palloventtiilin valmistusprosessilla olisi kuitenkin paineita nykyaikaistua, sillä useat nykyisen valmistusprosessin työvaiheista on valittu osaksi tuotantoa yli vuosikymmen sitten. Eri-tyisesti hitsausmenetelmät ja metallinleikkausmenetelmät sekä robotiikka ovat kehittyneet viime vuosien aikana. Tässä diplomityössä pohditaan valmistusprosessin nykyaikaistamista vain ajatustasolla, sillä aihealue laajuus vastaisi työmäärältään jo yksin yhtä diplomityötä.

Palloventtiilin valmistusprosessin automatisoinnin kannalta erityisen paljon hyötyä olisi vaihtaa hitsausmenetelmää nykyistä pienemmän hitsauslämpötilan mahdollistavaan menetelmään. Tällöin kara sitä ympäröivine tiivisteineen ja liukulevyineen voi-

taisiin kokoonpanna karaholkin sisään jo ennen karaholkin hitsausta. Karan ujuttaminen runkoputken sisäkautta karaholkin sisään on ollut tähän asti tuotannon automatisointia eniten jarruttava työvaihe. Hitsausmenetelmän vaihtamisella voitaisiin siis myötävaikuttaa myös tuotannon automaatiotason nostoon.

Taulukko 6.4. Hitsausprosessien vertailu (Steen et al. 2010, s.201).

	Laser	Elektronisuihku	TIG	Vastus
Nopeus	+	+	-	+
Vähäinen lämmöntuonti	+	+	-	+
Kapea HAZ	+	+	-	
Hitsin ulkonäkö	+	+	-	
Yksinkertainen kappaleen kiinnitys	+	-	-	
Laitteiston luotettavuus	+		+	+
Syvä tunkeuma	+	+		-
Hitsaus ilmassa	+	-		+
Magneettisten materiaalien hitsaus	+	-	+	+
Heijastavien materiaalien hitsaus	-	+	+	+
Lämpöherkkien materiaalien hitsaus	+	+	-	-
Hitsin luoksepäästävyys	+			-
Ympäristö, melu, höyry	+	+	-	-
Laitteiston hinta	-	-	+	
Käyttökustannus	-	-	-	-

Steenin mukaan (taulukko 6.4) lämpöherkkien materiaalien hitsaukseen sopisivat parhaiten laser- tai elektronisuihkuhitsaus. Toisaalta ne ovat myös perinteisiä hitsauslaitteistoja kalliimpia vaihtoehtoja.

7 YHTEENVETO JA JATKOTOIMENPITEET

Diplomityön päätavoitteita eli palloventtiilin omakustannehinnan alentamista ja rakenteen nykyaikaistamista lähdettiin toteuttamaan systemaattisesti käyttäen tuotekehityksen perustana Pahlin ja Beitzin standardin VDI-2221 mukaista tuotekehitysprosessia. Pahlin ja Beitzin tuotekehitysprosessia pyrittiin soveltuvien osin täydentämään Ulrichin ja Eppingerin tuotekehityssoppia apuna käyttäen.

Diplomityö alkoi tuotekehitysmetodien mukaisesti omaan ja kilpailijoiden tuotteisiin tutustumisella, sekä markkina-analyysin tekemisellä. Markkina-analyysissa on perehdytty painotetusti nopeimmin kasvaviin markkina-alueisiin, Eurooppaan, Venäjään, Kaukoitään ja Kiinaan.

Palloventtiilin kehityksessä painopisteinä ovat palloventtiilin kalleimmat osat eli runko- ja jatkeputket, pallo, kara ja pallontiiviste. Luvussa 3 mainitut painelaitedirektiivi sekä kaukolämpöventtiilistandardi EN 488 ja palloventtiilistandardi EN 1983 asettavat merkittävimmät reunaehdot edellä mainittujen osien muokkaamiselle, mutta jättävät toki vapausiakin suunnitteluun. Oheisessa taulukossa 7.1 on esitelty venttiilin osien omakustannehinnan näkökulmasta projektin onnistumista.

Taulukko 7.1. *Esitettyjen osamuutosten vaikutukset omakustannehintoihin*

	DN65	DN80	DN100	DN125	DN150
Pallo	-6 %	-10 %	-9 %	-	-3,6 %
Pallontiiviste	-5 %	-4 %	-4 %	-	-
Kara	-11 %	-	-6 %	-15 %	-
Karaholkki	-12 %	-	-5 %	-	-
Runkoputki	-	-	-26 %	-	-10 %
Palloventtiili	-5,5 %	-3,7 %	-7,7 %	-2 %	-2,3 %

Taulukossa 7.1 vihreät luvut ovat todellisia säästöjä vastaavia ja mustat luvut ovat materiaalin säästön perusteella tehtyjä säästöarvioita. Karojen osalta kustannussäästöt perustuvat siihen, että raaka-aineeksi on valittu nykyiseen karaan verrattuna yhtä standardikokoa pienempi aihiotanko. Mitoittamalla pallojen virtausaukot standardin SFS-EN1983 sallimalle alarajalle saataisiin huomattavasti taulukossa esitettyä suurempia säästöjä aikaan. Venttiilin hyvien virtausominaisuuksien säilyttämiseksi palloja ei voida kuitenkaan merkittävästi pienentää. Runkoputkikoon valintaa rajoittavat suuret erot eri putkikokojen kilohintojen välillä. Kilohinta on sitä halvempi mitä yleisemmästä

putkikoosta on kyse. DN100:n pallon pienentämisen myötä voitaisiin valita myös pienempi standardikokoinen runkoputkikoko.

DN65 koon karalle tehtyjen lujuuslaskujen ja FE-analyysin perusteella näyttäisi olevan mahdollista ohentaa DN65 karan halkaisijaa 12 %. Diplomityössä on keskitytty läpikäymään nimenomaan DN65 karan kestävyyttä, mutta vastaavien lujuuslaskujen ja FEM-asetusten perusteella voidaan toki laskea myös muiden kokoluokkien karojen kestävyudet. Diplomityössä laskettuja karan lujuuksia tai käytettyjä FEM-asetuksia ei voida kuitenkaan pitää valideina ennen virallisen tahon suorittamia vertailevia lujuuslaskelmia. Ollakseen valideja, karan lujuuslaskut tulisi suorittaa standardin SFS-EN 13445-3 tai SFS-EN 12516 mukaisesti.

Monien luonnosvaiheessa esillä olleiden suurempien rakennemuutosten kannattavuus riippuu kysynnän kehittymisestä tulevina vuosina. Esimerkiksi yhdestä putkesta puristettu venttiilin runko vaatisi käytännössä kokonaan uuden tuotantolinjan sisältäen ainakin robotti- ja puristininvestointeja. Tuotantomäärien kasvaessa tarpeeksi suuriksi tällainen saumaton venttiilirunko tulisi kuitenkin ottaa uudestaan harkintaan.

Vastaavasti valamalla valmistettavien venttiilin kahvojen kannattavuus riippuu tuotantomääristä. Kahvan muotoilulla pystytään vaikuttamaan huomattavasti venttiilin tyylikkyyteen ja käyttäjäturvallisuuteen. Valamalla valmistettu kahva vaatii alkuinvestointina valumallin, mutta toisaalta tuo paljon mahdollisuuksia kahvan muotoiluun.

LÄHTEET

Energiateollisuus ry. Kaukolämmön toimintaperiaate. [WWW]. [Viitattu 31.5.2014]. Saatavilla <http://energia.fi/koti-ja-lammitys/kaukolammitys/toimintaperiaate>

Energiateollisuus ry. Kaukolämpö maailmalla. [WWW]. [Viitattu 6.6.2014]. Saatavilla <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/kaukolampo-maailmalla>

Felsmann, C., Tvärne, A., Frohm, H., Rubenhag, A. 2012. EU District Cooling Market and Trends. Capital Cooling. 64 p.

Juhola, J., Välimaa, K. Tuotevarioinnista kilpakykyä - tarjouksesta toimitukseen. Helsinki 1997, Metalliteollisuuden keskusliitto, MET. 80 s.

Kaukolämmön asema Suomen energiajärjestelmässä tulevaisuudessa. 2011. Vantaa. Pöyry Management Consulting Oy. 58 s.

Kauranne, H. & Kajaste, J. & Vilenius, M. 2008. Hydrauliteknikka. 1. painos. Helsinki, WSOY. 487s.

Kenneth Crow. DRM Associates. Design for Manufacturability [WWW]. [Viitattu 01.06.2014.] Saatavissa: <http://www.npd-solutions.com/dfm.html>.

Koskelainen, L., Saarela, P., Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki, Energiateollisuus ry. 566 s.

L1. 2010. Kiinnivaahdotetut kaukolämpöjohdot. Energiateollisuus ry. 38 s.

L4. 2012. Kaukolämpöjohdoissa käytettävät sulkulaitteet. Energiateollisuus ry. 23 s.

L7. 2003. Kaukolämpöjohdoissa käytettävät teräsputket ja teräskäyrät. Energiateollisuus ry. 14 s.

Laiho, E-M. 2009. Putkijohtojen virtausteknisen mitoituksen perusteet. Mikkelin teknillinen oppilaitos. Luentomoniste. 55 s. [WWW]. [Viitattu 12.5.2014]. Saatavilla <http://koti.mbnet.fi/goofiax/Putkijohtojen%20virtausteknisen%20mitoituksen%20perusteet.pdf>

Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2007. Mekatroniikan peruskurssin luentomoniste. [WWW]. [Viitattu 17.5.2014]. Saatavilla <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bk60a0001/>

- Lempiäinen, J., Savolainen, J. Hyvin suunniteltu - puoliksi valmistettu. 1. painos. Helsinki 2003, Suomen robotiikkayhdistys Ry. 180 s.
- Lidegaard, M. 2013. District heating – Danish and Chinese experience. DBDH. 16 s. [WWW]. [Viitattu 27.9.2014]. Saatavilla http://www.ens.dk/sites/ens.dk/files/energistyrelsen/Nyheder/district_heating_danish-chinese_experiences.pdf
- Lähtenmäki, L. 2009. Johdanto lujuusopin elementtimenetelmään. Luento.
- Metropolia ammattikorkeakoulu. 2011. Koneautomaation opetusmateriaali. [WWW]. [Viitattu 4.5.2014]. Saatavilla <https://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/Hydrauliikka>
- Niemelä, I. 1989. Virtaustekijät. INSKO 25-89.
- Pahl, G., Beitz, W. Koneensuunnitteluoppi. 2. painos. Porvoo 1990, Metalliteollisuuden keskusliitto MET. 608 s.
- Palloventtiilin käyttöohje. Sastamala. 2014. Vexve Oy. Käyttöohje. 32 s.
- Pesonen, T., Heikkinen, M., Liljebloom, P., Nuutinen, M., Riipinen, M., Syrjälä, M., Tiitinen, M. Kaukojäähdytys. 2004. Suomen Kaukolämpö ry. 36 s.
- Ruukki. Tuotteet ja ratkaisut. [WWW]. [Viitattu 18.7.2014]. Saatavilla http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Ruostumaton-teras-ja-alumiini/Ruostumattomat-terastangot/1_4305-Drawn-and-Polished-Round-Bar
- Salmi, T., Pajunen, S. 2010. Lujuusoppi. Tampere, Klingendahl Paino Oy. 462 s.
- Sarraf, G., Fayad, W., El Sayed, T., Monette, S. 2012. Unlocking the Potential of District Cooling. Booz & Company. 14 p.
- SFS-EN 488 + A1. 2014. District heating pipes - Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks - Steel valve assembly for steel service pipes, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene. Helsinki, Suomen standardoimisliitto. 30 p.
- Steen, W.M., Mazumder, J. 2010. Laser Material Processing. 4. painos. Lontoo. Springer-Verlag. 558 s.

Ulrich, K., Eppinger, S. Product Design and Development. 1995. Singapore. McGraw-Hill Book Co. 289 p.

Valtanen, E. 2009. Tekniikan taulukkokirja. Mikkeli, Genesis-Kirjat Oy. 1100 s.

Vinha, J. 1998. Säätoventtiilin toiminta neste- ja kaasuvirtauksessa. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. Vexve venttiilikoulutus. 2002. Sastamala, Vexve Oy. Koulutusmateriaali. 74 s.

Vinha, J. 2002. Vexve venttiilikoulutus. Sastamala, Vexve Oy. Koulutusmateriaali. 74 s.

Vink Finland Oy. PTFE tekniset tiedot. [WWW]. [Viitattu 24.5.2014]. Saatavilla <http://www.tuotteet.vink.fi/tuotteet/ptfe.html>

Zappe, R.W. 1998. Valve Selection Handbook. 4th edition. Houston, Gulf Publishing Company. 337p.

LIITE 1: KARAN LUJUUSLASKUT

Mathcad-dokumentti

Karan vääntölujuuden laskenta

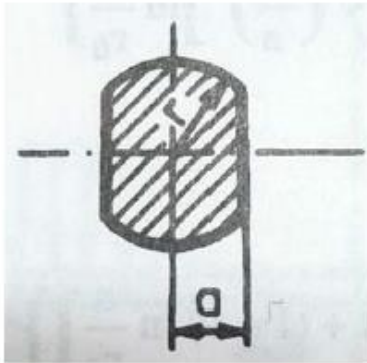
Käsinlaskennan tavoitteena on selvittää karan heikoin kohta väännön suhteen. Lasketaan millä vääntömomentilla saavutetaan myötöraja kussakin karan osiossa. Laskenta suoritetaan karan kolmelle poikkileikkaukseltaan erilaiselle osiolla: Vääntöille, pyöreälle varrelle ja neliskanttiselle karan yläpäälle. Lisäksi lasketaan vastaava maksimi vääntömomentti pallon vääntöreiälle.

Karan rakenteeseen liittyviä muuttujia merkitään merkeillä X1..X10.

Alkuarvot

Materiaali	Ruostumaton teräs, AISI 303 / EN 1.4305
Materiaalin myötöraja	Vaihtelee välillä 230MPa..310MPa $R_e := 230\text{MPa}$
Materiaalin murtoraja	Vaihtelee välillä 500MPa..700MPa $R_m := 500\text{MPa}$
Suunnittelun varmuusluku [-]	$n := 1.5$
Materiaalin liukumoduuli [MPa]	$G_{\text{liukumod}} := 7.885 \cdot 10^4 \text{MPa}$

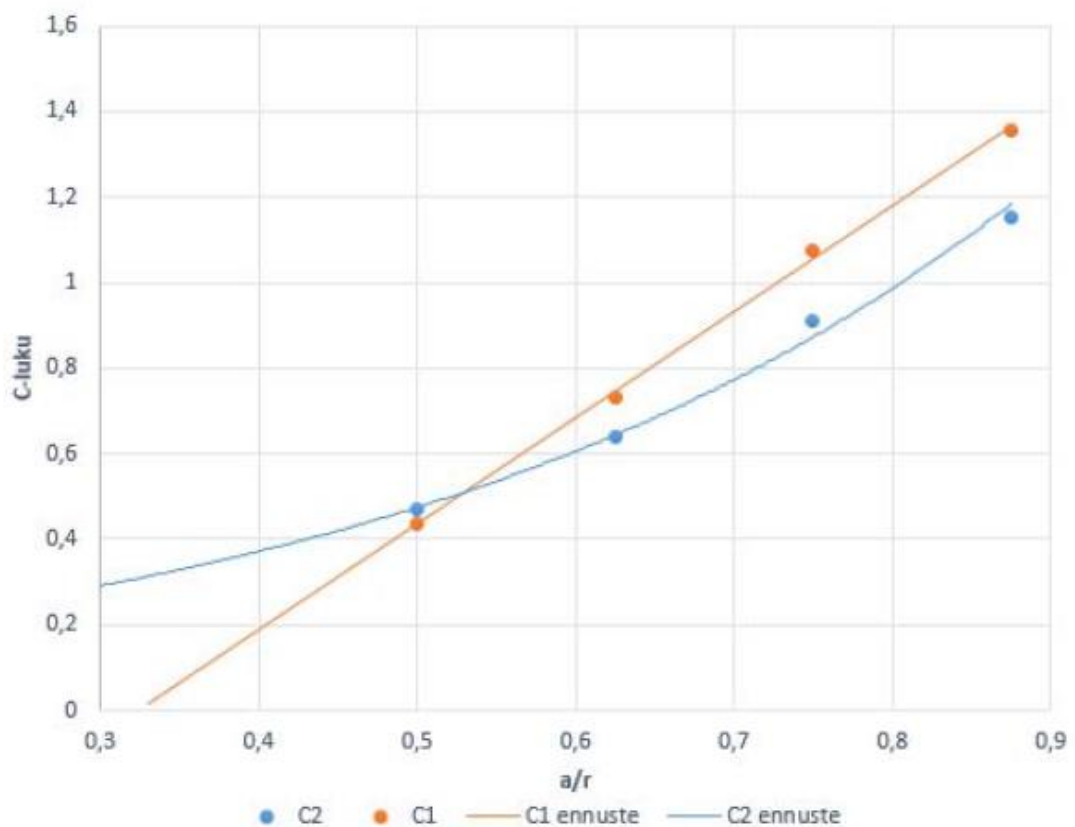
Karan vääntiö



Kuva 1. Vääntiön poikkileikkaus.

vääntiön säde [mm] $r_v := X1$

vääntiön a-mitta [mm] $a_v := X2$



Kuva 2. Apuluvut C1 ja C2 perustuen tekniikan taulukkokirjaan (Valtanen 2009, s.422).

Määritetään kuvan 2 avulla lähin C2-arvo edellä lasketulle suhteelle.

Suurin sallittu vetojännitys [MPa] $\sigma_{sall} := \frac{R_e}{n}$

Suurin sallittu leikkausjännitys [MPa] $\tau_{sall} := 0.6 \cdot \sigma_{sall} = 92 \cdot \text{MPa}$

Käyttökertamäärä, joka karan täytyy kestää (kymmenpotenssin tarkkuus) $n_{käyttökerrat} := 10000$

Taulukko 2. HCF-varmuuskertoimet (Salmi et al. 2010, s.361.)

käyttökerrat	1000	10000	100000	1000000
varmuuskerroin	0,9	0,78	0,65	0,5

HCF-varmuuskerroin taulukon mukaan [-] $n_{hcf} := 0.78$

Suurin sallittu leikkausjännitys huomioon ottaen väsymisen. Perustuen High Cycle fatigue -menetelmään (HCF). [MPa] (Salmi et al. 2010, s.361.) $\tau_{hcf} := \tau_{sall} \cdot 0.78 = 71.76 \cdot \text{MPa}$

Kappaleen leikkausjännitys [MPa] $\tau_{teoreettinen} = r \cdot G \cdot \theta$

Poikkileikkauksen vääntömomentti [Nm] $T_{kara} = G \cdot I_p \cdot \theta$

Edelliset yhdistämällä saadaan [MPa] $\tau_{kara} = \frac{T_{kara}}{I_p} \cdot \frac{d}{2} = \frac{T_{kara}}{W_v}$

Vääntövastus karan vääntön muotoiselle poikkileikkaukselle (Valtanen s.422) [mm³] $W_{v.vääntö} = C_2 \cdot r^3$

$$W_{v.vääntö} := C_2 \cdot r_v^3$$

Vääntön kestävä vääntömomentti [Nm] $T_{sall.vääntö} := \tau_{hcf} \cdot W_{v.vääntö}$

Karan varsi (ympyräpoikkileikkaus)

Suurimman sallitun vääntömomentin laskenta annetulle karan varren halkaisijalle.

Materiaalin myötöraja [MPa] $R_e = 230 \cdot \text{MPa}$

Suurin sallittu leikkausjännitys [MPa] $\tau_{\text{sall}} = 92 \cdot \text{MPa}$

Suurin sallittu leikkausjännitys huomioon ottaen väsymisen. [MPa] $\tau_{\text{hcf}} = 71.76 \cdot \text{MPa}$

Karan varren halkaisija [MPa] $d_{\text{varsi}} := X3$

Ympyräpoikkileikkauksen vääntövastus [mm³] $W_v = \frac{\pi \cdot d^3}{16}$

$$W_{v.\text{varsi}} := \frac{\pi \cdot d_{\text{varsi}}^3}{16}$$

Suurin sallittu vääntömomentti, jossa α on loven vaikutusluku [Nm]

$$T_{\text{sall}} = \frac{\tau_{\text{hcf}} \cdot W_v}{\alpha}$$

Loven vaikutusluvun laskenta

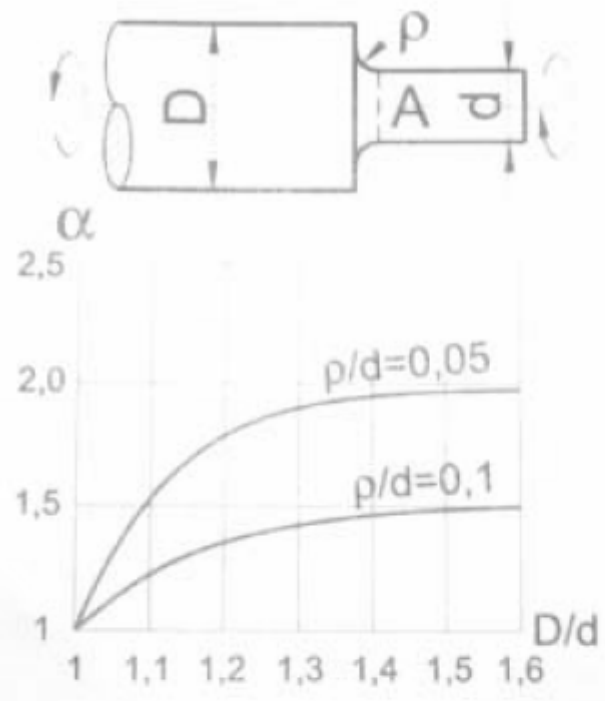
Loven vaikutusluku lasketaan lovenmuotoluvun avulla. Toisin kuin lovenmuotoluku, vaikutusluku ottaa huomioon käytetyn teräksen loviherkkyyde η .

Kulman pyöristyksen säde on tässä tapauksessa sama kuin teräpalan nirkonsäde [mm] $\rho_{\text{nirkonsäde}} := X4$

Olakkeen paksumman puolen halkaisija [mm] $D_{\text{iso}} := X5$

Suhdeluvut lovenmuotoluvun selvitykseen [-] $N1 := \frac{D_{\text{iso}}}{d_{\text{varsi}}}$ $N2 := \frac{\rho_{\text{nirkonsäde}}}{d_{\text{varsi}}}$

Olake väännössä / akseli



Kuva 3. Lovenmuotolukukuvaaja (Valtanen 2009, s.422).

Loven muotoluvun likiarvo
kuvaajasta [-]

$$\alpha := X6$$

Loven vaikutusluku [-]

$$\beta = 1 + \eta \cdot (\alpha - 1)$$

Lovenherkkyysluku η ,
materiaalin 34CrNiMo6 mukaan

$$\eta := 0.85$$

$$\beta := 1 + 0.85 \cdot (\alpha - 1)$$

Karan
ympyräpoikkileikkauksen
muotoisen kohdan kestävä
vääntömomentti [Nm]

$$T_{\text{sall.varsi}} := \frac{\tau_{\text{hcf}} \cdot W_{\text{v.varsi}}}{\beta}$$

Karan yläpään nelikantti (monikulmio pyörityksillä)

Muun kuin ympyräpoikkileikkauksen vääntövastuksen likimääräinen arvo voidaan laskea suurimman ympyrän halkaisijan perusteella, joka mahtuu poikkileikkauksen sisään. (Valtanen 2009, s.451)

Materiaalin myötöraja [MPa]

$$R_e = 230 \cdot \text{MPa}$$

Suurin sallittu leikkausjännitys [MPa]

$$\tau_{\text{sall}} = 92 \cdot \text{MPa}$$

Suurin sallittu leikkausjännitys huomioon ottaen väsymisen. [MPa]

$$\tau_{\text{hcf}} = 71.76 \cdot \text{MPa}$$

Vääntövastus
ympyräpoikkileikkaukselle [mm³]
(Valtanen s.422)

$$W_{\text{v.nelikantti}} = \frac{\pi \cdot d^3}{16}$$

Suurimman poikkipinnan sisälle
mahtuvan ympyrän halkaisija [mm]

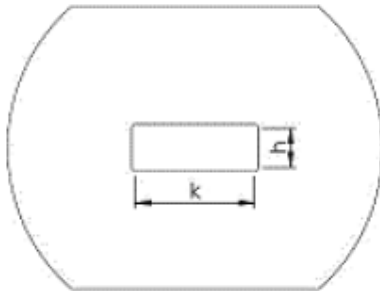
$$d_{\text{nelikantti}} := X7$$

$$W_{\text{v.nelikantti}} := \frac{\pi \cdot d_{\text{nelikantti}}^3}{16}$$

Karan nelikulmiopoikkileikkauksen
muotoisen kohdan kestävä
vääntömomentti [Nm]

$$T_{\text{sall.nelikantti}} := \tau_{\text{hcf}} \cdot W_{\text{v.nelikantti}}$$

Pallon vääntöreikä



Kuva 4. Pallon vääntöreikä.

Materiaalin myötöraja [MPa]

$$R_e = 230 \cdot \text{MPa}$$

Suurin sallittu leikkausjännitys huomioon ottaen väsymisen. [MPa]

$$\tau_{\text{hcf}} = 71.76 \cdot \text{MPa}$$

Reiän kuormituspinnan sivunpituus k [mm]

$$k := X8$$

Pallon seinämän paksuus s [mm]

$$s_{\text{pallo}} := X9$$

hcf-leikkausjännitystä vastaava vääntömomentti [Nm]

$$T_{\text{sall.pallo}} := X10$$

Pistevoiman vaikutusetäisyys x kiertokeskiöstä [mm]

$$x := \frac{k}{2} \cdot \frac{3}{4}$$

Reiän seinämään aiheutuva pistevoima F [N]

$$F_{\text{seinämä}} := \frac{T_{\text{sall.pallo}}}{2 \cdot x}$$

Reiän seinämän painepinta-ala [m²]

$$A_{\text{seinämä}} := \frac{k}{2} \cdot s_{\text{pallo}}$$

Aiheutuva reiän seinämän puristusjännitys [MPa]

$$\sigma_{\text{pallo}} := \frac{F_{\text{seinämä}}}{A_{\text{seinämä}}}$$

LIITE 2: KUVIA KARAN VÄÄNTÖKUORMITUSTESTAUKSESTA

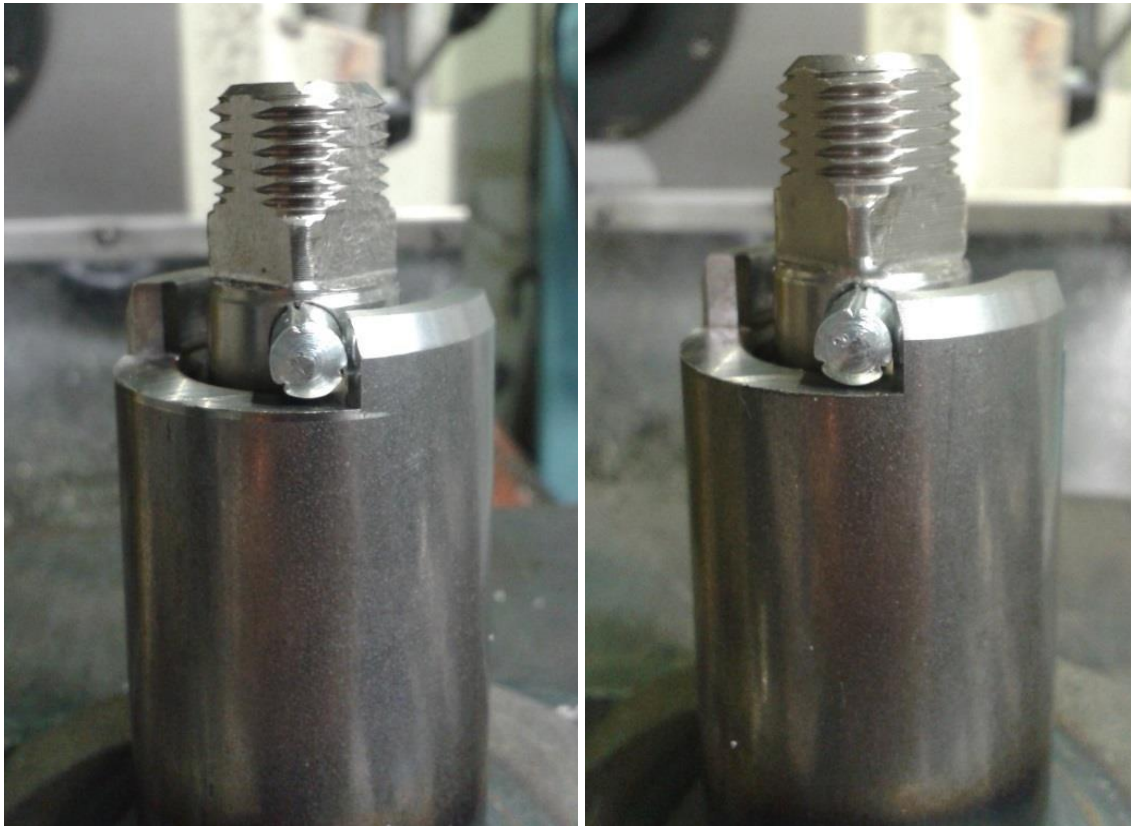
Kuva 1. Väätökuormituksen 1. vaiheen karat 1 ja 2.



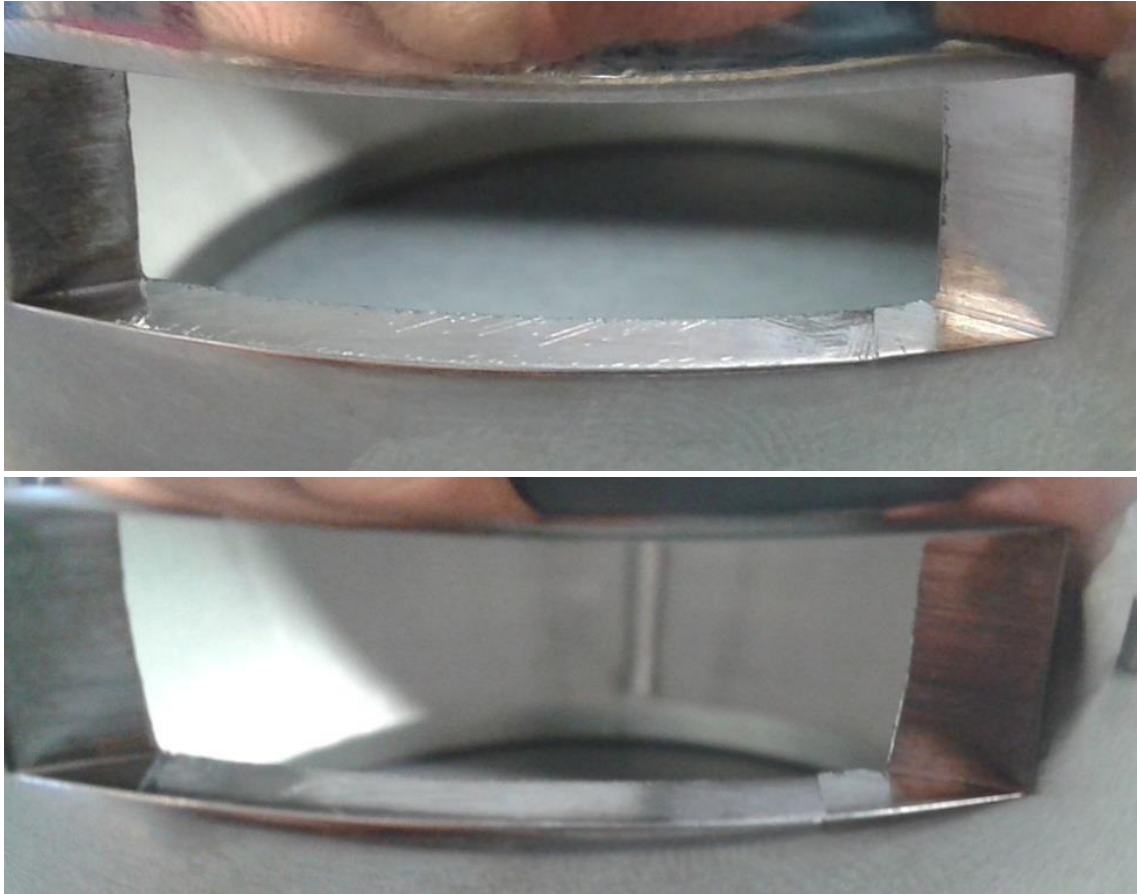
Kuva 2. Karan väätökuormitustestauksen 2. vaiheessa mukana olleet venttiilin osat.



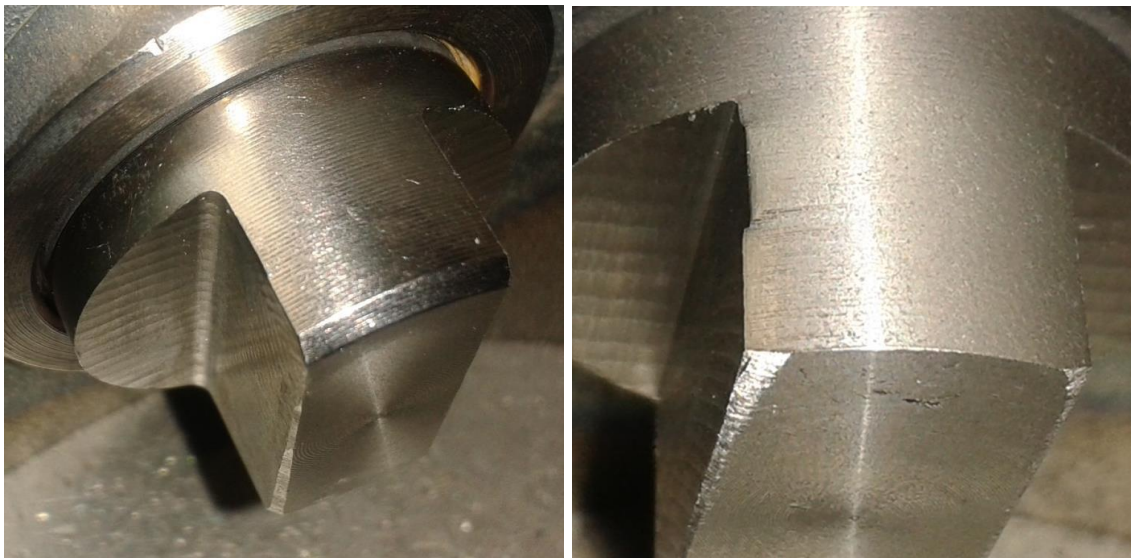
Kuva 3. Kuvan 2 testauskoonpano kiinni testipenkissä.



Kuva 4. Vas. kara 3 nykyisellä vääntiöllä ja oik. kara 4 12% pienennetyllä vääntiöllä testauksen jälkeen.



Kuva 5. Yllä pallo 3 ja alla pallo 4 vääntötestin jälkeen.



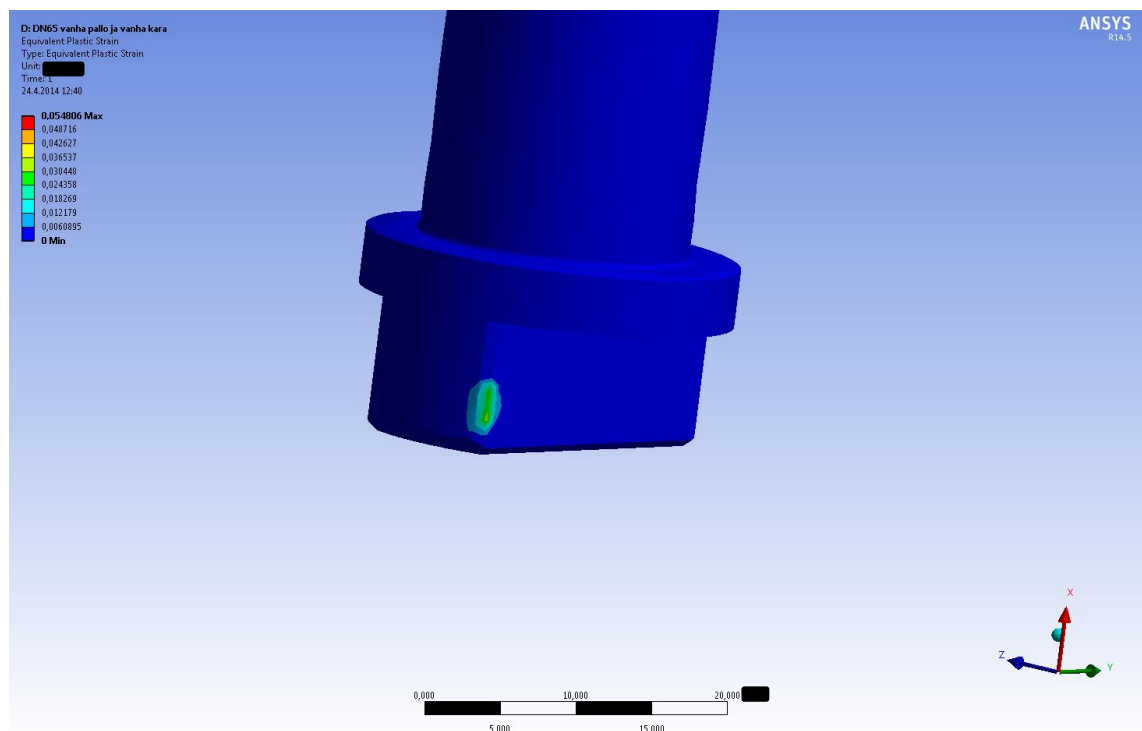
Kuva 6. Vas. kara 3 ja oik. kara 4 vääntötestin jälkeen.

LIITE 3: KARAN FE-ANALYYSIN TULOKSIA

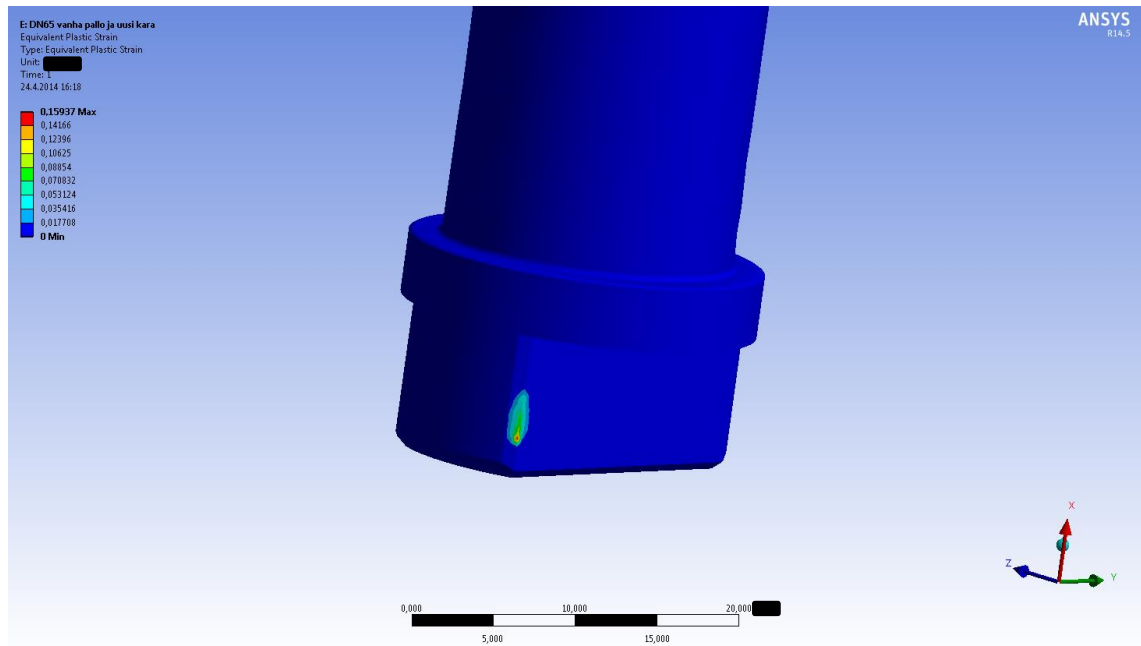
Tässä liitteessä esitellään kuvien avulla palloventtiilin karalle ja pallolle suoritetun FE-analyysin tuloksia. Liitteessä keskitytään kokoluokkien DN65 ja DN80 tulosten läpikäymiseen. Kuvien 1-7 tapauksissa on käytetty epälineaarista mallia ja kuvien 8-13 tapauksissa on käytetty lineaarista mallia.

Kuvatekstien vääntömomentit DN65: $M=85\text{Nm}$ ja DN80: $M=130\text{Nm}$ vastaavat Vexven ilmoittamia vääntömomenteja, jotka maksimissaan tarvitaan venttiilin avaamiseen ja sulkemiseen.

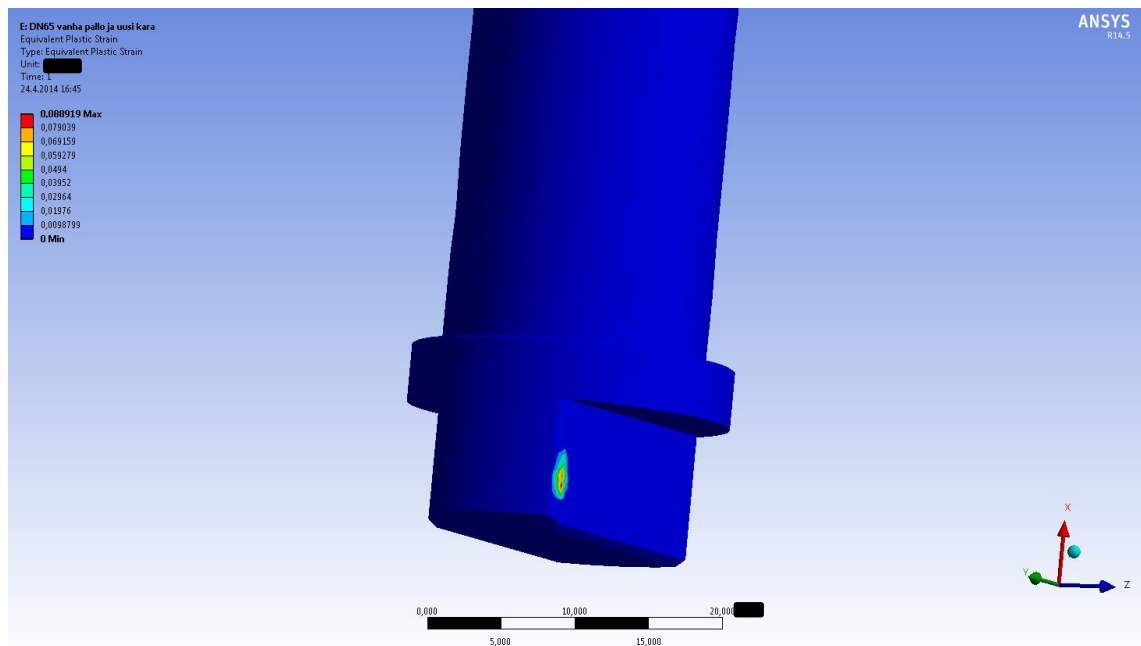
Plastinen muodonmuutos, epälineaarinen malli



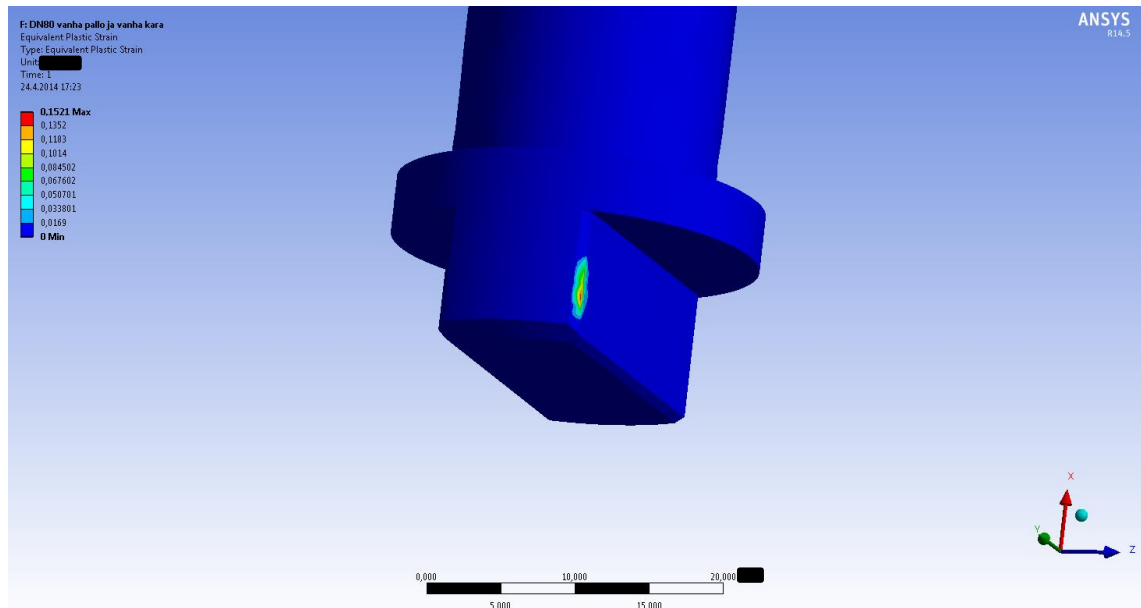
Kuva 1. DN65 nykyisen karan plastinen muodonmuutos, kun vääntömomentti M vastaa Vexven ilmoittamaa DN65 kokoluokan maksimia.



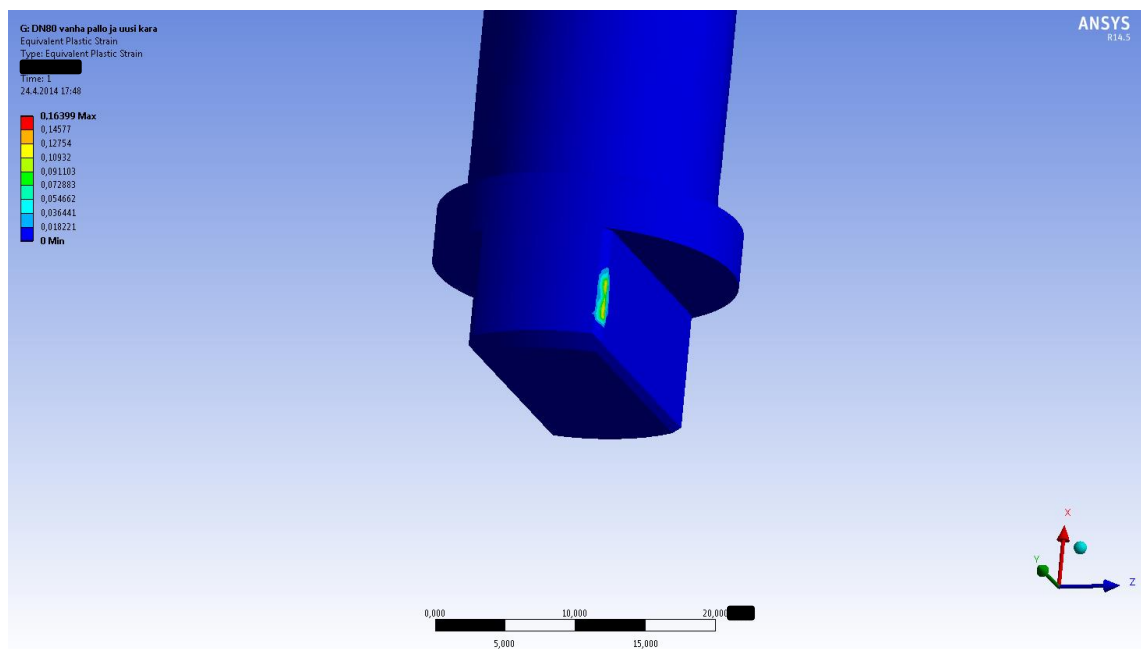
Kuva 2. Plastinen muodonmuutos, kun karalla 12 % ohuempi halkaisija kuin kuvassa 1, *M* sama kuin kuvassa 1.



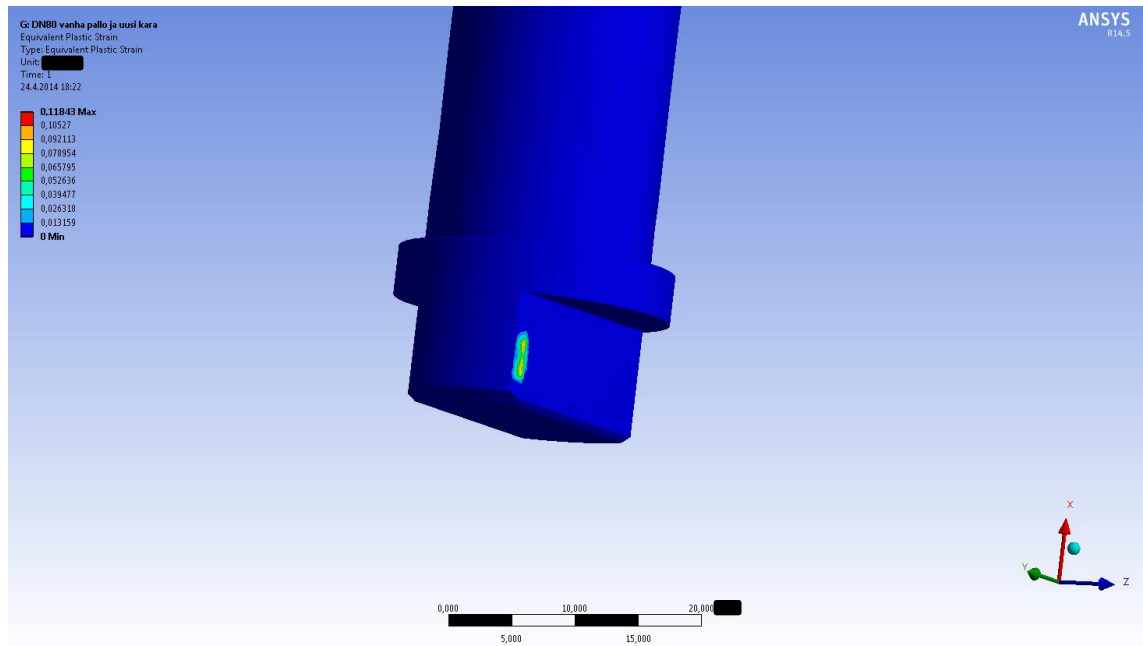
Kuva 3. Plastinen muodonmuutos, kun karalla 12 % ohuempi halkaisija kuin kuvassa 1 ja *M* 36 % pienempi kuin kuvassa 1.



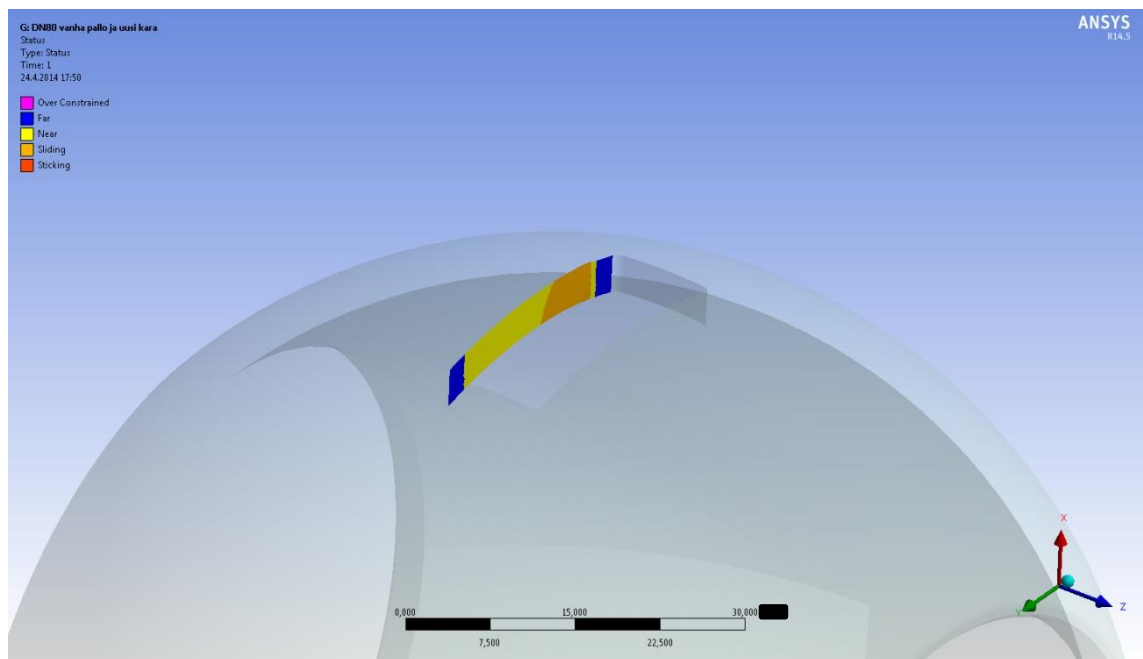
Kuva 4. Plastinen muodonmuutos, kun karan halkaisija kuvan 1 mukainen ja M vastaa Vexven ilmoittamaa DN80 kokoluokan maksimia.



Kuva 5. Plastinen muodonmuutos, kun karalla 12 % ohuempi halkaisija kuin kuvassa 1 ja M vastaa Vexven ilmoittamaa DN80 kokoluokan maksimia.

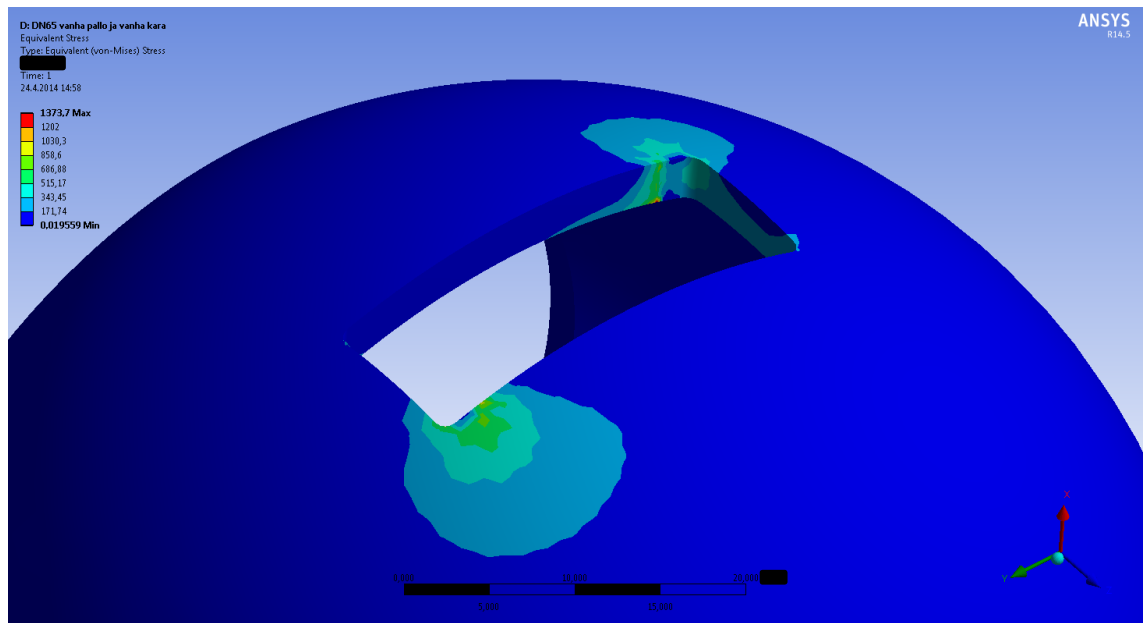


Kuva 6. Plastinen muodonmuutos, kun karalla 12 % ohuempi halkaisija kuin kuvassa 1 ja M 22 % pienempi kuin kuvassa 4.

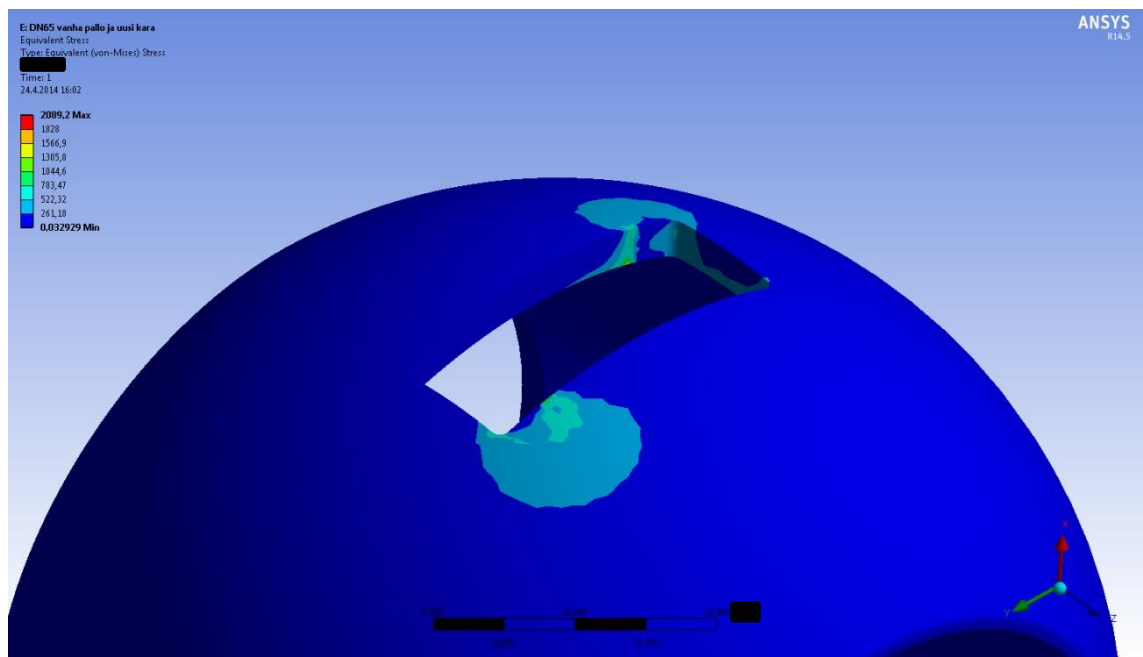


Kuva 7. Karan ja pallon välinen kontakti, kun karalla 12 % ohuempi halkaisija kuin kuvassa 1 ja kuvan 4 mukainen.

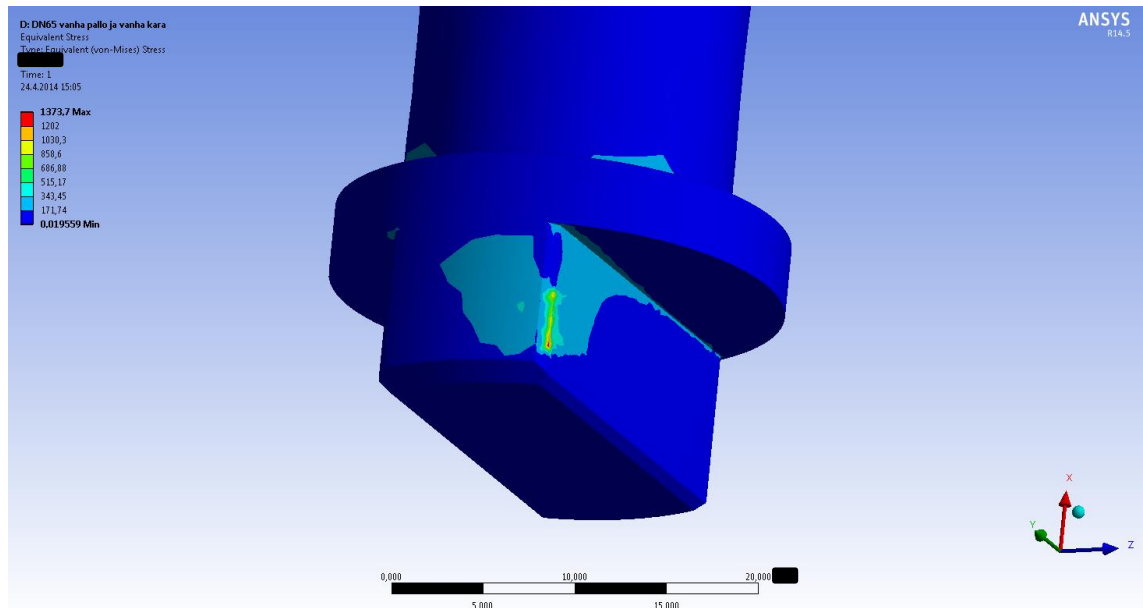
Vertailujännitykset, lineaarinen malli



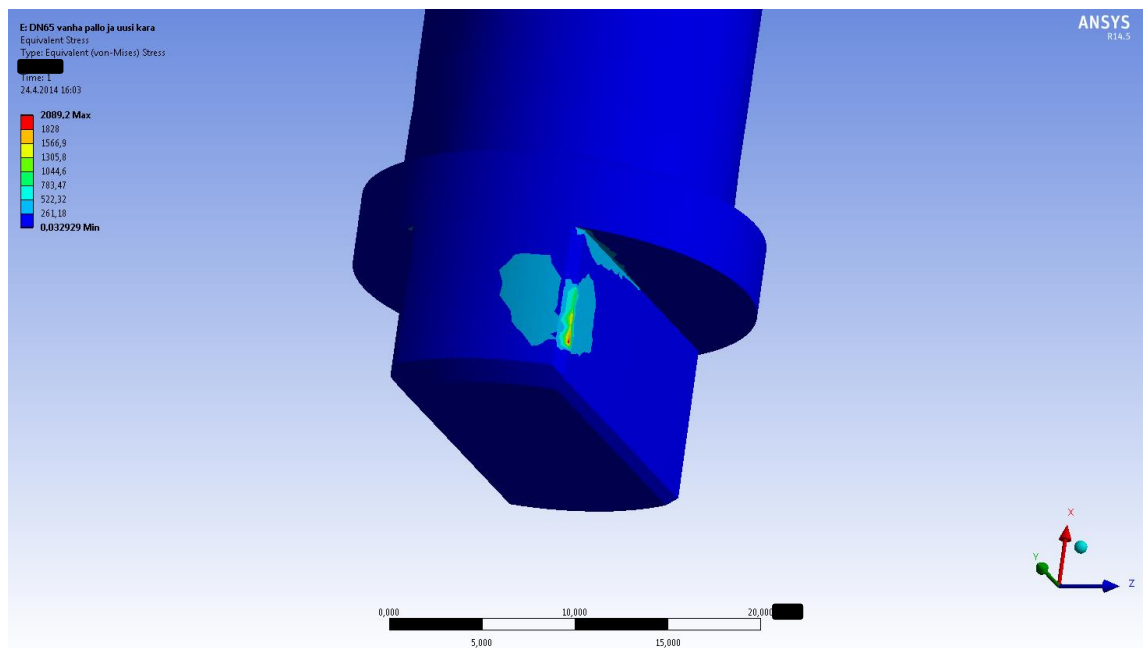
Kuva 8. Von Mises-vertailujännitys kuvan 1 mitoilla ja vääntömomentilla M .



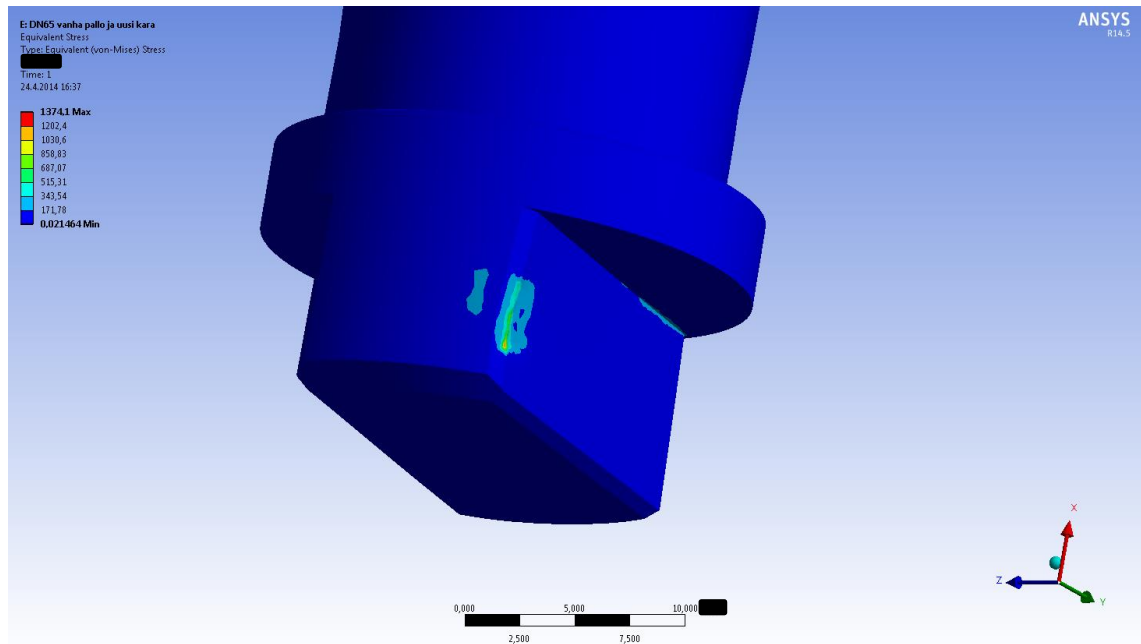
Kuva 9. Von Mises-vertailujännitys, kun karalla 12 % ohuempi halkaisija kuin kuvassa 1, M sama kuin kuvassa 1.



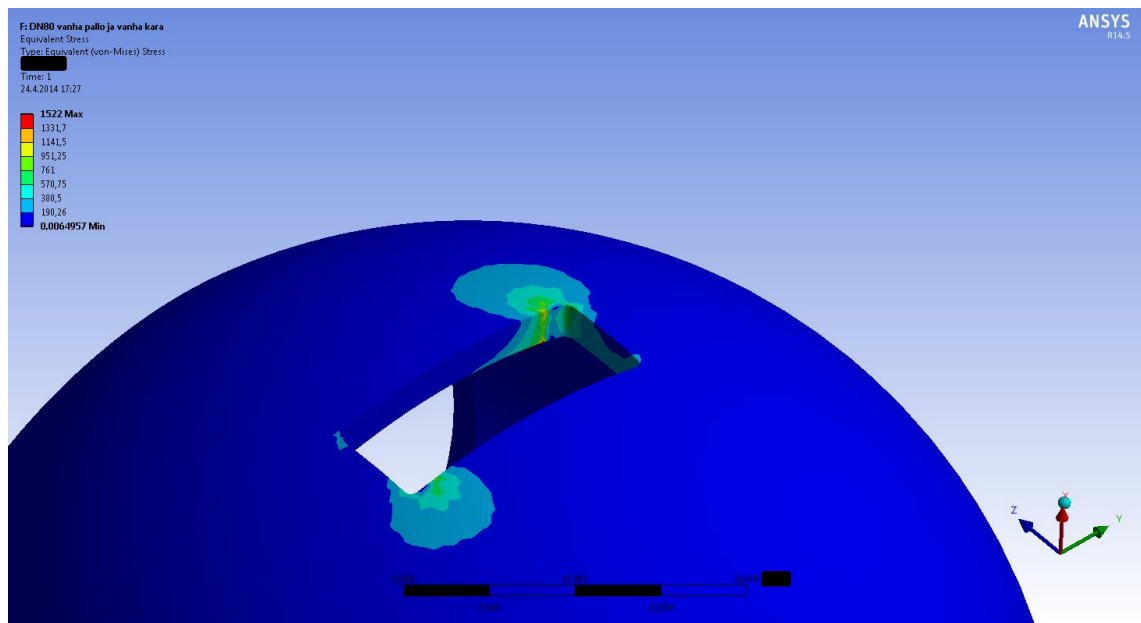
Kuva 10. Von Mises-vertailujännitys kuvan 1 mitoilla ja vääntömomentilla M .



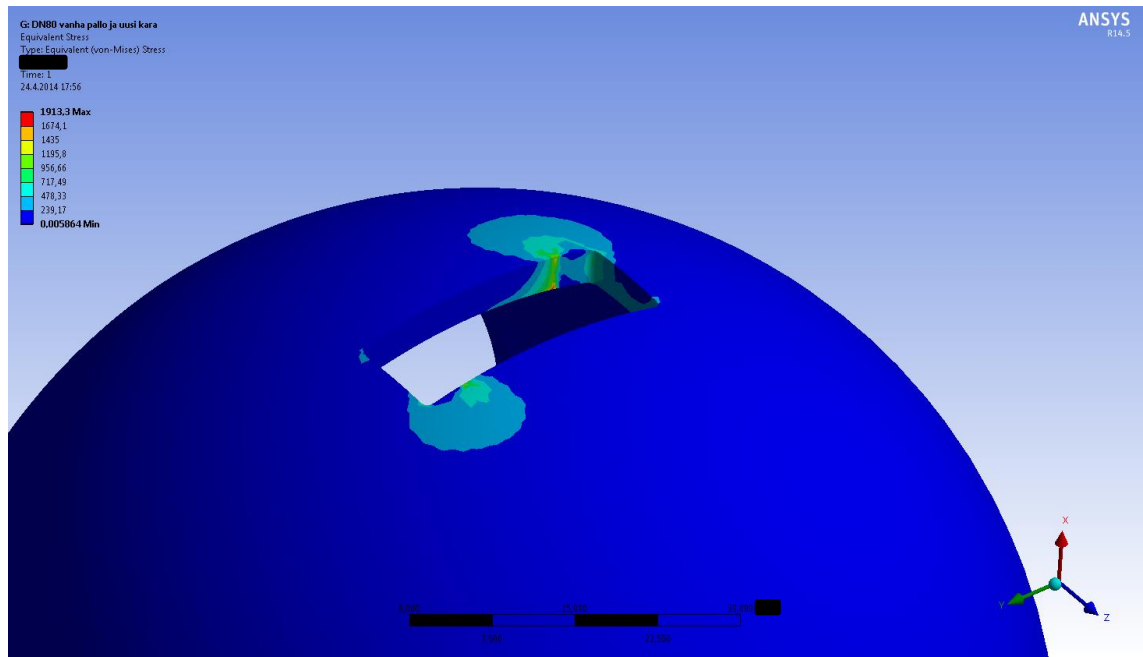
Kuva 11. Von Mises-vertailujännitys, kun karalla 12 % ohuempi halkaisija kuin kuvassa 1, M sama kuin kuvassa 1.



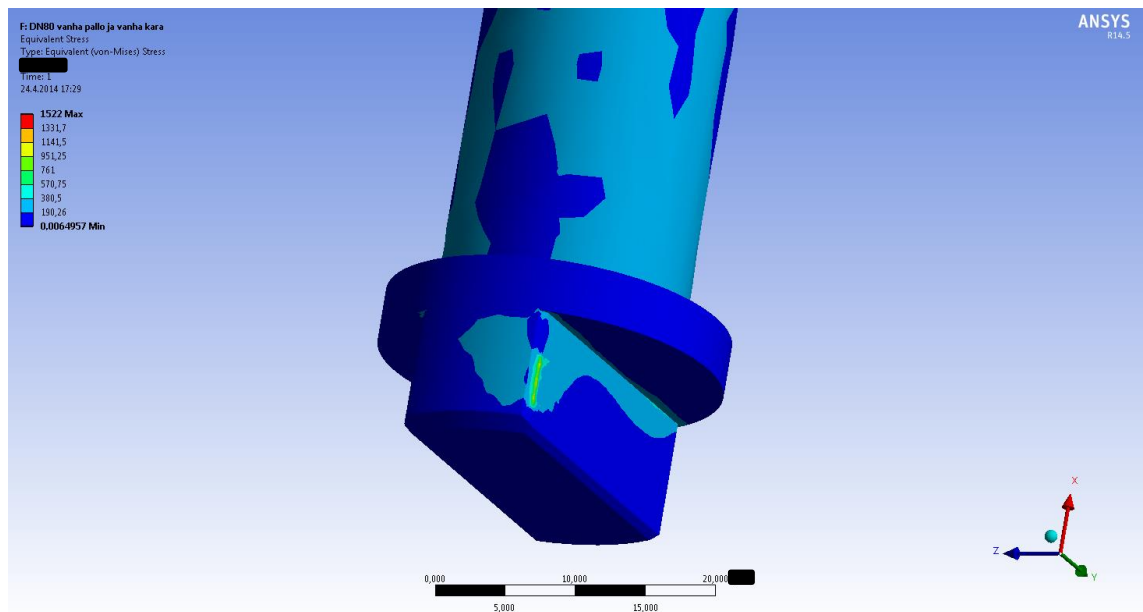
Kuva 12. Von Mises-vertailujännitys, kun karalla 12 % ohuempi halkaisija kuin kuvassa 1 ja M 36 % pienempi kuin kuvassa 1.



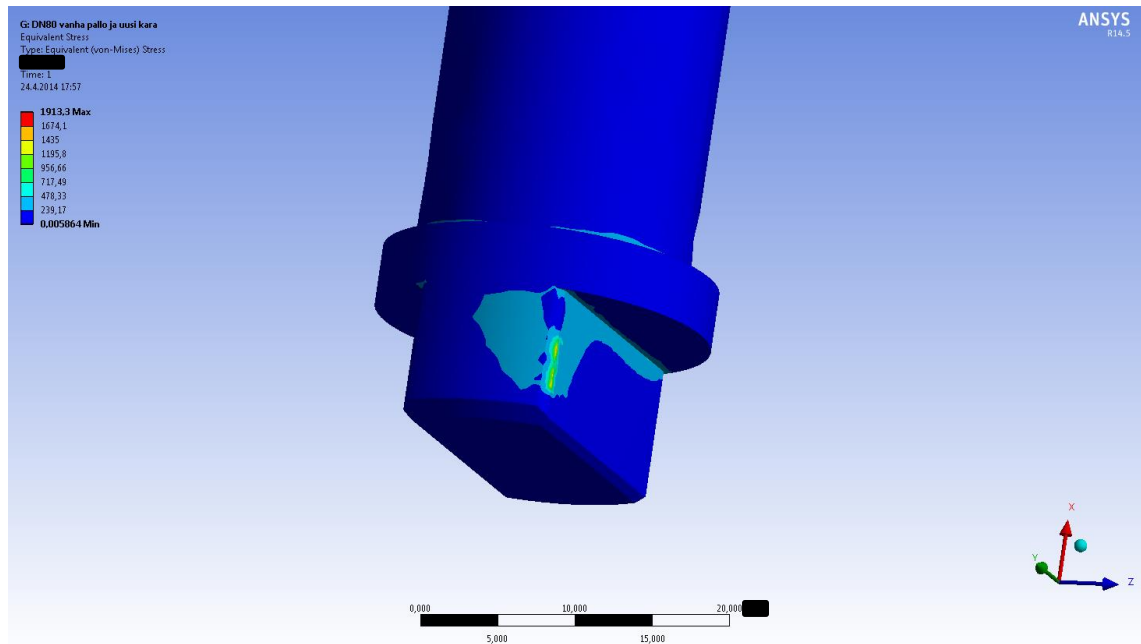
Kuva 13. Von Mises-vertailujännitys, kun karan halkaisija kuvan 1 mukainen ja M vastaa Vexven ilmoittamaa DN80 kokoluokan maksimia.



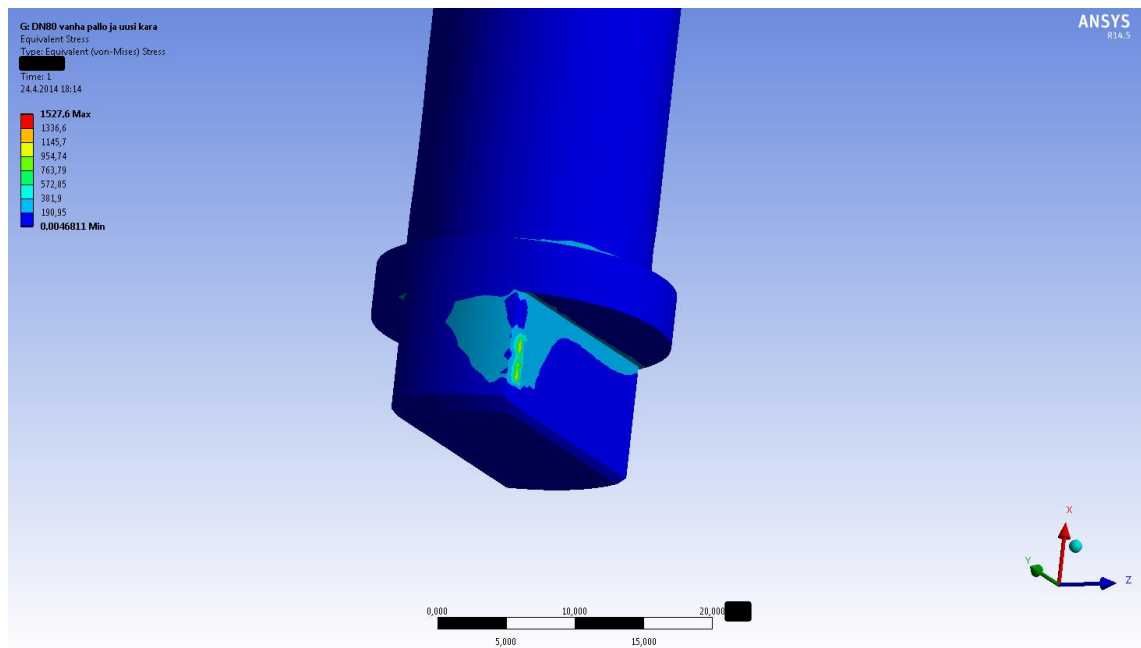
Kuva 14. Von Mises-vertailujännitys, kun karalla 12 % ohuempi halkaisija kuin kuvassa 1 ja M vastaa Vexven ilmoittamaa DN80 kokoluokan maksimia.



Kuva 15. Von Mises-vertailujännitys, kun karan halkaisija kuvan 1 mukainen ja M vastaa Vexven ilmoittamaa DN80 kokoluokan maksimia.



Kuva 16. Von Mises-vertailujännitys, kun karalla 12 % ohuempi halkaisija kuin kuvassa 1 ja M vastaa Vexven ilmoittamaa DN80 kokoluokan maksimia.



Kuva 17. Von Mises-vertailujännitys, kun karalla 12 % ohuempi halkaisija kuin kuvassa 1 ja M 22 % pienempi kuin kuvassa 4.

LIITE 4: LIUKULEVYTESTIN TULOKSIA



Kuva 1. Päällä hitsauksessa mukana ollut liukulevy ja alla uusi liukulevy.



Kuva 2. DN125 kara ja liukulevy karaholkin hitsauksen jälkeen.