

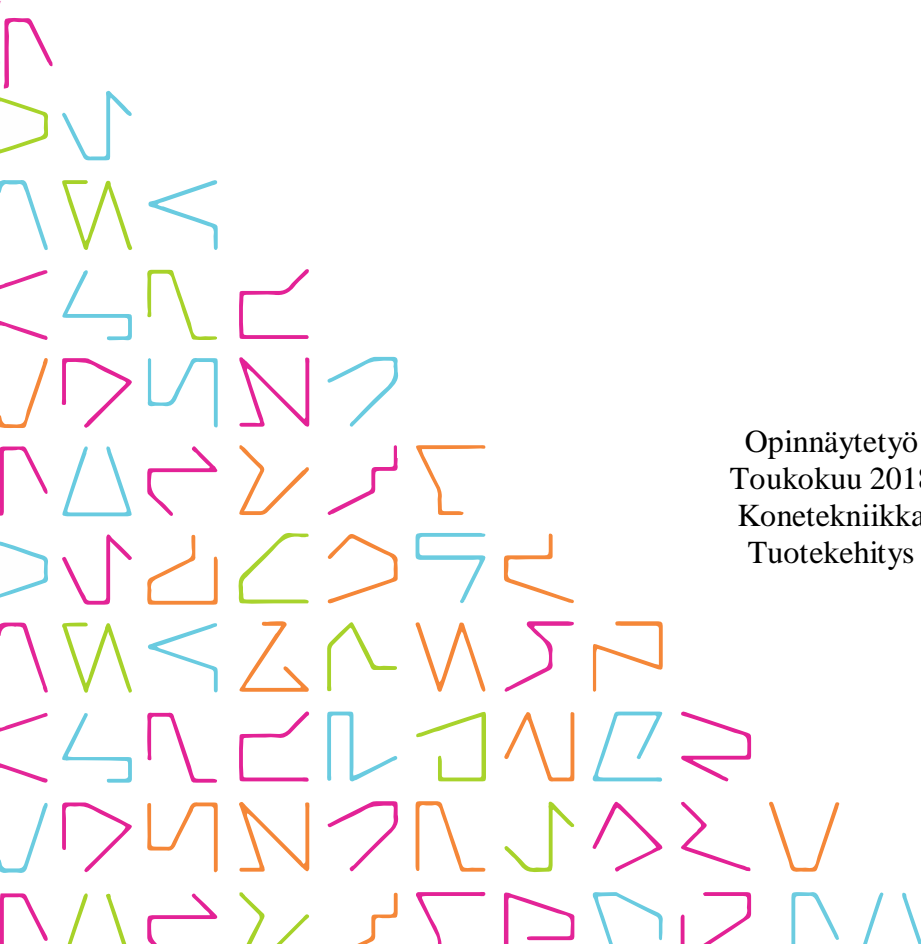


TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# EUROKOODI 3:N SOVELTUVUUS PAINEASTIAN MITOITUKSEEN

Sampo Uimonen

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2018  
Konetekniikka  
Tuotekehitys



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Konetekniikka  
Tuotekehitys

UIMONEN, SAMPO:

Eurokoodi 3:n soveltuvuus paineastian mitoitukseen

Opinnäytetyö 48 sivua, joista liitteitä 5 sivua  
Toukokuu 2018

---

Valmet on kiinnostunut kehittämään altatuettujen voimakattiloidensa mitoitusmenetelmää stabiiliuden osalta. Menetelmää voidaan kehittää, koska stabiiliuden mitoitukseen ei ole määrätty menetelmää painelaitestandardissa. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, soveltuuko Eurokoodi-järjestelmässä esitetty menetelmä laskuputken stabiiliuden mitoitukseen ja löytää mitoitukseen menetelmä, joka ei ylimitä niin paljon kuin aiemmin käytetty menetelmä. Laskuputken mitoitukseen kuuluu putken sisäisen paineen vaikutuksen huomioiminen. Opinnäytetyön tavoitteena oli saada tietoa Eurokoodi-järjestelmän soveltumisesta laskuputken mitoitukseen ja entistä parempi mitoitusmenetelmä laskuputken stabiiliustarkasteluun. Eurokoodi-järjestelmän soveltuvuutta ja menetelmiä tutkittiin lukemalla Eurokoodi-standardeja ja niitä selittäviä teoksia. Sisäisen paineen vaikutusta selvitettiin lukemalla asiasta tehtyjä tutkimuksia ja standardeja, joissa putken sisäinen paine otetaan huomioon.

Tuloksena saatiin, että Eurokoodi-järjestelmää voidaan soveltaa laskuputken nurjahdusmitoituksessa, jos sisäisen paineen, materiaalin, lämpötilan ja kuormien poikkeavuus Eurokoodi-järjestelmän oletuksista huomioidaan oikealla tavalla. Sisäinen paine ei merkittävästi vaikuta laskuputken stabiiliuteen, koska sisäisen paineen vaikutukset efektiiviseen aksiaaliseen voimaan kumoavat toisensa suljetussa ankkuroimattomassa putkessa. Poissonin efekti ja pyöreidenpalautumisen vaikutus eivät ole merkittäviä mitoituksen kannalta, ja niiden vaikutus on varmaan suuntaan. Stabiiliuden varmistamiseen tehtiin Eurokoodi 3:n mukainen alustava mitoituspohja. Kaavojen määrittäminen laskuputkikehän voimasuureille ei kuitenkaan onnistunut, koska kimmoteorian mukainen lineaarinen analyysi ei riitä epäsäännölliselle monikerroksiselle sivusiirtyvälle kehälle, vaan on käytettävä tarkkaa epälineaarista menetelmää, jonka oppimiseen ja käyttämiseen ei ollut riittävästi aikaa. Lisäksi vaakasuuntaisen tuennan ominaisuudet olivat epäselvät.

Eurokoodi-järjestelmä on laaja 58-standardia käsittävä kokonaisuus. Järjestelmään tutustuminen kannattaa aloittaa siitä kertovista teoksista sen vaikeaselkoisuuden ja laajuuden vuoksi. Jatkotoimenpiteinä ehdotetaan vaakatuennan kattilan rakenteisiin aiheuttamien rasiusten huomioimisen varmistamista ja kehän kokonaisanalyysin tekemistä FEM-ohjelmistolla, josta saatavia tuloksia voidaan käyttää opinnäytetyössä tuotetussa mitoituspohjassa.

---

Asiasanat: eurokoodit, kattilalaitteistot, vakaus, paineastiat, mitoitus

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering  
Product Development

UIMONEN, SAMPO:  
Suitability of Eurocode 3 for Dimensioning of a Pressure Vessel

Bachelor's thesis 48 pages, appendices 5 pages  
May 2018

---

The subject of this thesis came from Valmet's interest in finding better method to verify the stability of the pressurized and compressed pipes of their bottom supported boilers. The pressure vessel standards do not give guidelines on how to verify stability so it is up to the user to find a method.

The aim of this thesis was to find out if the method of verifying against global buckling given in Eurocode 3 can be applied to downcomer pipes of bottom supported power boilers. A second objective was to make an example design of a downcomer according to the method given in Eurocode 3.

The study was conducted by studying literature on the standards in Eurocode program and applying the Eurocode. Additionally, studies about the effects of internal pressure in a pipe were read along with books about structural analysis.

It was found that formulas given in the Eurocode program can be used to verify the stability of downcomers given that inside pressure, material properties, high temperature and loads that are unlike assumed ones are taken into account. It was also found that effects of internal pressure on global buckling of downcomers are be neglectable. Based on a method given in Eurocode 3, a Mathcad-file was made for global buckling verification. Equations for design axial forces and bending moments were not applied in this study because it was not possible to study and perform the required structural analysis in the available time and the effects of sideway supports were unclear.

The structural analysis of the downcomer is suggested to be made with a finite element analysis software because analytically it would be too difficult and time consuming. The results of the analysis can then be used in the Mathcad-file produced during this thesis.

---

Key words: eurocode, buckling, pressure vessel, boiler

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	8
2	VALMET .....	9
	2.1 Valmetin historia .....	9
	2.2 Valmet nykypäivänä .....	10
3	CYMIC-VOIMAKATTILA .....	13
4	SAUVAN NURJAHDUS .....	16
	4.1 Stabiilius eli vakavuus .....	16
	4.2 Eulerin nurjahdustapaukset .....	17
	4.3 Epätäydellisyydet ja epäelastinen käytös .....	18
5	PUTKEN SISÄPUOLISEN PAINEEN VAIKUTUS .....	20
	5.1 Normaalivoima putken päädyistä .....	20
	5.2 Efektiivinen aksiaalinen voima .....	20
	5.3 Poissonin efekti .....	23
	5.4 Pyöreiden palautumisen vaikutus .....	25
6	EUROKOODIEN KÄYTTÖ LASKUPUTKEN MITOITUKSEEN .....	26
	6.1 Eurokoodi-järjestelmästä .....	26
	6.2 Kuormien yhdistely .....	26
	6.3 Rakenteen sivusiirtyvyyden huomioiminen .....	29
	6.4 Rakenteen epätarkkuuksien huomioiminen .....	31
	6.5 Poikkileikkausten luokitus .....	32
	6.6 Paineen huomioiminen putkilinjojen standardissa .....	33
	6.7 Nurjahduskestävyys .....	34
7	SALLITUT MATERIAALIT .....	37
	7.1 Materiaalivaatimukset .....	37
	7.2 Vaatimusten täytyminen painelaiteteräksillä .....	37
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA .....	39
	LÄHTEET .....	41
	LIITTEET .....	44
	Liite 1. SFS-EN 1993-1-1:n mukainen putken mitoitusesimerkki .....	44

## ERITYISSANASTO

$A$	pinta-ala
$A_d$	onnettomuuskuorman mitoitusarvo
$A_e$	poikkileikkauksen koko pinta-ala
$A_{ek}$	maanjäristyskuorman ominaisarvo
$A_i$	poikkileikkauksen sisäpinta-ala
$d_e$	ulkohalkaisija
$d_i$	sisähalkaisija
$E$	kimmokerroin
$E_d$	kuormien vaikutuksen mitoitusarvo
ETA	European Technical Approval
ETAG	European Technical Approval Guideline
$e_0$	epätarkkuus alkukäyryydessä
$F$	ulkopuolinen normaalivoima
$F_{cr}$	koko rakenteen nurjahdusmuotoa vastaava nurjahdusvoima
$F_{Ed}$	rakenteen mitoituskuorma
FEM	Finite Element Method, Elementtimenetelmä
$f_y$	myötöraja
$G_{kj,sup}$	pysyvän kuorman ominaisarvon yläraja
$G_{kj,inf}$	pysyvän kuorman ominaisarvon alaraja
$H_{Ed}$	kerroksen yläpään vaakareaktivoimien summa
$h$	kerroksen korkeus
$I$	jäyhyysmomentti
$i$	jäyhyyssäde
$K_{FI}$	kuormakerroin
$k_m$	vaakakuormien kerroin, jolla epälineaariset vaikutukset voidaan huomioida lineaarisessa analyysissä
$k_{yy}$	yhteisvaikutustekijä
$k_{yz}$	yhteisvaikutustekijä
$k_{zy}$	yhteisvaikutustekijä
$k_{zz}$	yhteisvaikutustekijä
$L$	pituus

$L_n$	nurjahduspituus
$M_{y,Ed}$	taivutusmomentin mitoitusarvo y-suuntaan
$M_{y,pl,Rd}$	taivutusmomentin plastinen kestävyys y-suuntaan
$M_{z,Ed}$	taivutusmomentin mitoitusarvo z-suuntaan
$M_{z,pl,Rd}$	taivutusmomentin plastinen kestävyys z-suuntaan
$N_{b,Rd}$	nurjahduskestävyys normaalivoimalle
$N_{cr}$	kimmoteorian mukainen nurjahduskuorma
$N_{Ed}$	normaalivoiman mitoitusarvo
$N_m$	suurin tehollinen täysplastinen normaalivoima
$N_p$	paineen aiheuttama vetävä normaalivoima
$N_{Rd}$	normaalivoiman kestävyys
$P$	puristava voima
$P_{cr}$	nurjahdusvoima
$P_{po}$	Poissonin efektin aiheuttama puristava voima
$p_e$	ulkopuolinen paine
$p_i$	paine putken sisällä
$Q_k$	muuttuva kuorma
$q$	nettoviivakuorma
$r$	ulkosäde
$r_i$	sisäsäde
$T_e$	efektiivinen aksiaalinen voima
$T_{tw}$	todellinen normaalivoima
$V_{Ed}$	kerroksen alapäässä vaikuttavien pystykuormien summa
$X$	myötökestävyyden pienennystekijä nurjahduksessa
$X_y$	taivutusnurjahduksen pienennystekijä y-akselin suhteen
$X_z$	taivutusnurjahduksen pienennystekijä z-akselin suhteen
$X_{LT}$	kiepahduksen pienennystekijä
$\alpha_{cr}$	kuormasuhde
$\delta_{H,Ed}$	kerroksen ylä- ja alapään välinen vaakasiirtymä
$\varepsilon_l$	pituussuuntainen venymä
$\psi_0$	muuttuvan kuorman yhdistelykerroin
$\psi_2$	muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin
$\varphi$	kiertymäkulma
$\gamma_1$	maanjäristyskuorman merkityskerroin

$\lambda$	muunnettu hoikkuus
$\lambda_n$	reduoitu hoikkuusluku
$\lambda_t$	taivutusnurjahdusta vastaava muunnettu hoikkuus
$v''$	käyryys, taipuman toinen derivaatta
$\nu$	Poissonin vakio
$\sigma_c$	kehäjännitys
$\sigma_l$	pituussuuntainen jännitys
$\sigma_r$	radiaalinen jännitys

## 1 JOHDANTO

Valmetin voimakattilat suunnitellaan yleensä ylhäältä riippuviksi, jolloin voidaan olla varmoja kattilan stabiiliudesta. Myös lämpöliikkeiden ja maanjäristysten kestävyys ovat silloin kattilalla hyviä. Nämä edut eivät tule kuitenkaan ilmaiseksi vaan monimutkaisempi altatuennan suunnittelu on edullisempi vaihtoehto. Valmet on tehnyt altatuettuja kattiloita aikaisemminkin, mutta harvoin suuressa kokoluokassa. Nyt yritystä kiinnostaa voidaanko Eurokoodi-järjestelmää hyödyntää altatuetun voimakattilan tukipilareina toimivien laskuputkien suunnittelussa.

Opinnäytetyön tarkoituksena on Eurokoodi-järjestelmää tutkimalla selvittää sen soveltuvuus laskuputken mitoitukseen stabiiliuden osalta ja määrittää menetelmä laskuputken stabiiliuden mitoitukseen. Tavoitteena opinnäytetyössä on selvittää Eurokoodi-järjestelmän soveltuvuus laskuputken mitoitukseen ja paineen vaikutus nurjahduksessa sekä määrittää sellaiset käsinlaskentakaavat laskuputken stabiiliuden mitoitukseen, jotka ylittävät aiempaa vähemmän. Opinnäytetyön aihe rajataan putken sisäisen paineen vaikutuksen selvittämiseen, Eurokoodi-järjestelmään tutustumiseen, stabiiliuden mitoitusääntöihin ja eurokoodien soveltuvuuden arviointiin laskuputkien mitoituksessa.

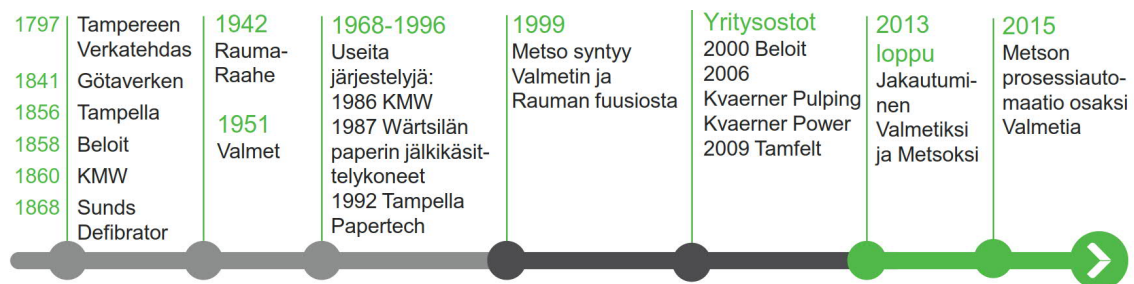
Opinnäytetyön tuloksena saadaan tietoa Eurokoodi-järjestelmän käytöstä nurjahdusmitoitukseen, kuinka standardin oletuksista eroavat paine, materiaali sekä lämpötila otetaan huomioon ja sellainen mitoitus pohja putken stabiilisuuden tarkastamiseen, jossa lähtöarvoiksi vaaditaan putken geometrian lisäksi Eulerin nurjahdusvoima, normaalivoima ja taivutusmomenttijakauma. Lisäksi selvisi laskuputkien kehän olevan niin monimutkainen, että sisäisten voimien ja momenttien laskeminen on hyvin raskasta käsin ja siihen kannattaa käyttää FEM-ohjelmistoa.

## 2 VALMET

### 2.1 Valmetin historia

Kun Suomessa juhliittiin 100-vuotisjuhlavuotta, juhliittiin Valmetilla 220-vuotisjuhlavuotta. Vanhin nykyisen Valmetin osana oleva yritys Tamfelt perustettiin vuonna 1797, ja sen toiminnot ovat nykyisin osana Valmetin Palvelut-liiketoimintalinjaa. Valmetin syntyminen aiheutui Neuvostoliitolle tavaratoimituksin maksetuista sotakorvauksista, joita Vesterisen (2012) mukaan valmistettiin vuosina 1944–1952. Sotakorvauksia valmistavat ase- ja metallitehtaat yhdistettiin vuonna 1946 Valtion Metalliksi, josta tuli osakeyhtiö Valmet Oy vuonna 1951. Sotakorvauksien päättymisen jälkeen Valmetin tuotevalikoima laajeni nopeasti. Paperikoneiden valmistuksen Valmet aloitti 1950-luvun alussa entisellä tykkitehtaallaan Rautpohjassa ja kohosi kansainvälisesti merkittäväksi paperikoinevalmistajaksi 1960-luvun puolivälissä. 1980- ja 1990-luvuilla Valmet alkoi keskittyä entistä enemmän paperikoneteknologiaan ja osti useita alan yrityksiä (kuvio 1). Lisäksi Valmet luopui kiskokaluston, hissien ja traktoreiden valmistuksesta sekä laivanrakennuksesta. (Valmet 2017.)

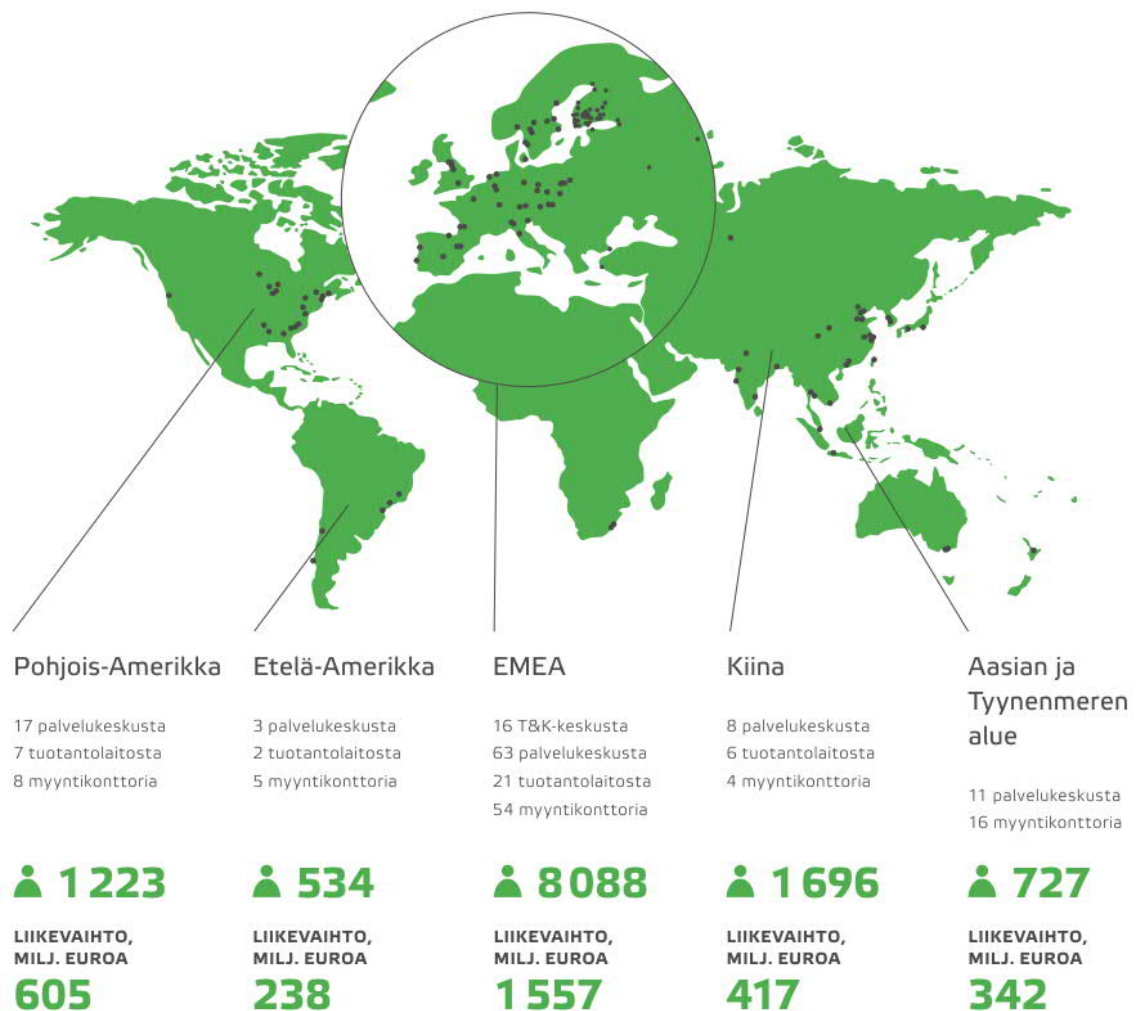
Vuonna 1999 Valmet fuusioitui kuituteknologiaan, kiven murskaukseen ja virtauksensäätöratkaisuihin keskittyneen Rauman kanssa ja syntyi Metso Oyj. Osana Metsoa Valmet teki vuosina 2000–2009 merkittäviä yritysostoja massa-, paperi- ja voimantuotantoliiketoiminnoissa (kuvio 1). Vuoden 2013 lopussa Metso jakautui Valmetiksi ja Metsoksi. Jakautumisen jälkeen Valmetiin kuului massa-, paperi- ja voimantuotantoliiketoiminnot, kun taas Metsoon kuului kaivos-, maarakennus- ja automaatioliiketoiminnot. Valmet osti prosessiautomaatioliiketoiminnan Metsolta tammikuussa 2015. (Valmet 2017.)



KUVIO 1. Valmetin yrityshistoria lyhyesti (Valmet 2017, 4).

## 2.2 Valmet nykypäivänä

Valmet Oyj on vastuullinen kansainvälinen (kuvio 2) suuryritys, joka on johtavin tai yksi johtavimpia toimijoita sellu-, energia-, kartonki-, pehmopaperi-, paperi-, palvelut-, ja automaatiomarkkinoillaan. Vuonna 2017 Valmetilla oli henkilöstöä 12268 ja sen kokonaisliikevaihto oli 3,2 miljardia euroa. Valmetin kannattavuus kasvaa vuosittain. Sen vertailukelpoinen EBITA eli tulos ennen rahoituseriä, veroja ja aineettomien hyödykkeiden poistoja kasvoi 6,2 %:sta 7,2 %:iin liikevaihdosta vuosina 2015–2017. Tuloveroja Valmet maksaa Suomeen kymmeniä miljoonia euroja, ja alihankintaa se ostaa suomesta noin 750 miljoonalla eurolla vuosittain. Valmetin neljän liiketoimintalinjan tarjoama on taulukossa 1. Pääkonttori Valmetilla on Espoossa. (Valmet 2018, 6, 10, 24, 29, 49.)



KUVIO 2. Valmetin maantieteellinen jakautuminen vuonna 2017 (Valmet 2018, 9).

TAULUKKO 1. Valmetin pääasiallinen tuote ja palveluvalikoima (Valmet 2018, 41)

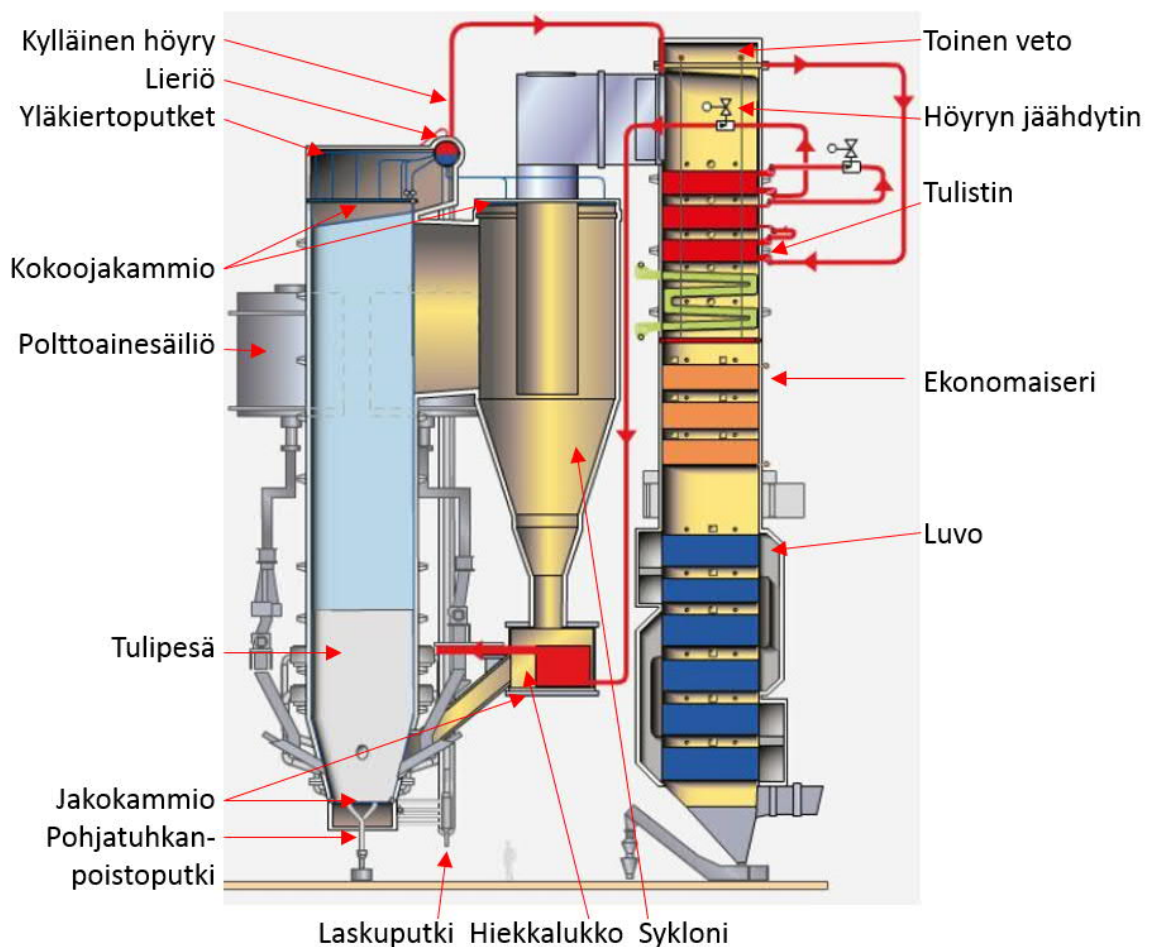
<b>LIIKETOIMINTALINJA</b>	<b>TUOTE/PALVELU</b>
<b>PAPERI</b>	Kierrätyskuitulinjat Räätälöidyt paperi- ja kartonkikoneet Modulaariset paperi- ja kartonkikoneet Pehmopaperin tuotantolinjat Modernisoinnit ja lajinvaihtouudistukset Erillisratkaisut
<b>SELLU JA ENERGIA</b>	Kokonaiset sellutehtaat Selluntuotannon laitteistot ja ratkaisut Monipolttoainekattilat Biomassan ja jätteen kaasutus Ilmansuojeluratkaisut Bioteknologiaratkaisut
<b>PALVELUT</b>	Varaosat ja komponentit Kunnossapito- ja seisokkipalvelut Ulkoistuspalvelut Tuotannon kulutusosat Prosessituki ja prosessien optimointi Prosessien parannukset Etäratkaisut ja -palvelut
<b>AUTOMAATIO</b>	Automaatiojärjestelmät Laadunhallintajärjestelmät Analysaattorit ja mittaukset Suorituskykyratkaisut Prosessisimulaattorit Turvaratkaisut Automaatiopäivitykset Teollisen internetin ratkaisut

Valmet on määrittänyt missiökseen eli toimintansa tarkoitukseksi uusiutuvien raaka-ainesten muuntamisen kestäviksi tuloksiksi. Lisäksi Valmetin toimintaa ohjaavat sen painopisteet, jotka ovat erinomainen asiakasosaaminen, johtajuus teknologioissa ja innovaatioissa, erinomaiset prosessit sekä voittajajoukkue. Valmetin toiminnasta painopisteidensä mukaisesti voi lukea vuoden 2017 vuosikatsauksesta. Siinä on esitelty kymmeniä vuonna 2017 saavutettuja tavoitteita eri painopisteissä ja vuonna 2018 tehtäviä toimenpiteitä. Valmetin visiona on tulla maailman parhaaksi asiakkaidensa palvelussa. (Valmet 2018, 16–21.)

Valmet valittiin vuonna 2017 jo neljättä kertaa peräkkäin kansainvälisesti arvostettuun Dow Jonesin kestävän kehityksen indeksiin, johon kuuluu noin 300 kestävän kehityksen edelläkävijäyrittäjästä. Lisäksi Valmet valittiin toista kertaa peräkkäin 200 eettisen sijoituskohteen joukkoon Ethibel Sustainability Index Excellence Europe –indeksiin. Valmetin vastuullisuusohjelma Sustainability360° kattaa viisi osa-aluetta. Ne ovat kestävä toimitusketju, terveys, turvallisuus ja ympäristö, ihmiset ja suorituskyky, kestävät ratkaisut, sekä yrityskansalaisuus. Valmet edellyttää myös alihankkijoiltaan vastuullista toimintaa arvioiden heitä liiketoiminnan etiikassa, vaatimustenmukaisuudessa, ihmisoikeuksissa, työntekijöiden perusoikeuksissa, työterveys- ja turvallisuusasioissa, ympäristönsäilytyksessä ja tuoteturvallisuuteen liittyvissä seikoissa. Puutteita havaittaessa Valmet tekee auditointeja yhdessä kolmannen osapuolen kanssa ja tukee toimittajia korjaustoimien tekemisessä, mutta jos toimittaja ei tee korjaustoimia, Valmet voi irtisanoa toimittajasopimuksen. (Valmet 2018, 4, 25–30.) Uudet työntekijät suorittavat Valmetilla verkkokursseja muun muassa turvallisuudesta, vastuullisuudesta ja yhteisöllisyydestä.

### 3 CYMIC-VOIMAKATTILA

CYMIC on Valmetin tuotenimi kiertoleijukattilalle eli CFB-kattilalle (Circulating fluidized bed). Kattilan nimi tulee siinä lentäen kiertävästä hiekasta sekä tulipesässä leijuvasta fluidisoidusta hiekkapedistä. Kattilalla tuotetaan vedestä höyryä, jonka paineella yleensä pyöritetään höyryturbiinia, joka tuottaa sähköä. Kiertoleijukattila on erinomainen huonolaatuisten ja monentyyppisten polttoaineiden polttamiseen, koska polttoaine sekoittuu kuumaan hiekkaan ja ilmaan, mikä mahdollistaa tehokkaan palamisen. Lisäksi kokonaan palamattomat partikkelit saadaan eroteltua syklonilla ja johdettua tulipesään uudestaan poltettavaksi (kuvio 3). Tulipesän alapuolelta saadaan myös eroteltua polttoprosessia häiritsevät kivet ja suuret kokkareet. Kiertoleijukattilalla voidaan polttaa esimerkiksi kivihiihtä, turvetta, puujätettä, lietteitä, sahanpurua, yhdyskuntajätettä ja puiden kuoria. Polttoainetta voidaan hienontaan murskaimilla ja poltettavaksi soveltumattomia epäpuhtauksia voidaan poistaa magneettien avulla. (Valmet n.d.)



KUVIO 3. CYMIC-kattilan layout (Valmet n.d, muokattu).

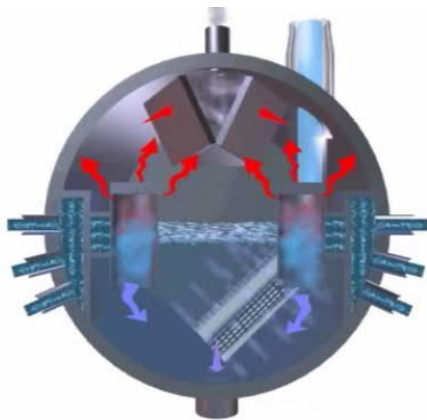
Polttoprosessi alkaa polttoaineen sytyttämällä ja leijupedin lämmittämällä tulipesässä olevilla starttipolttimilla. Polttoainetta syötetään hallitusti polttoaineensyöttö- ja jakolaitteilla. Tulipesän pohjalla olevilla leijutuslaitteilla puhalletaan primääri-ilmaa, jolla leijutetaan hiekkaa sekä hallitaan pedin lämpötilaa ja polttoaineen tasaista palamista. Lisäksi tulipesän kyljissä on sekundääriaukkoja useassa tasossa, joista puhalletaan sekundääri-ilmaa, joka viimeistelee polttoaineen palamisen. Tulipesästä palokaasut, pienet kokonaan palamattomat partikkelit ja osa hiekasta lentävät tulipesän yläosasta sykloniin. Syklonin muoto pakottaa palokaasut ja partikkelit pyörivään liikkeeseen, jolloin ne ajautuvat tiheysjärjestykseen ja vain kaikkein keveimmät partikkelit ja palokaasut nousevat syklonin keskeltä palokaasukanavaan, kun taas muut partikkelit painuvat reunojen läheltä alas hiekkalukkoon. Hiekkalukon tarkoitus on sulkea savukaasujen pääsy tulipesästä suoraan syklonin alaosaan sekä samalla mahdollistaa hiekan ja palamattomien hiukkasten uudelleen käyttö. (Valmet n.d.)

Palokaasut kulkevat palokaasukanavasta niinkutsuttuun toiseen vetoon, jossa kuumien palokaasujen lämpöenergia otetaan talteen. Palokaasut kulkevat toisessa vedossa useiden lämmönvaihtimien lävitse luovuttaen energiaa ja jäähtyen. Ensimmäiset lämmönvaihtimet, joihin kuumimmat kaasut osuvat, ovat tulistimia, joissa höyryä kuumennetaan. Höyryä tulistetaan useassa vaiheessa, joista viimeinen on hiekkalukossa sijaitsevassa tulistimessa, johon lämpöenergia siirtyy hiekasta. Jokaisen tulistusvaiheen välissä on höyryn jäähdytin, jolla höyryn lämpötila säädetään seuraavaan vaiheeseen sopivaksi. Höyryn jäähdytin jäähdyttää höyryä suihkuttamalla vettä höyryn sekaan. Toisessa vedossa tulistimien jälkeen on veden esilämmittimiä eli ekonomaisereita ja ilman esilämmittäjiä eli luoja. Lopuksi jäähtyneet palokaasut menevät puhdistukseen ja piipusta ulos. Lämmönvaihtimia puhdistetaan nuohoimilla, joka suihkuttavat niiden pintoja tulistetulla höyryllä. Noen puhdistuksella estetään lämmönsiirtokyvyn heikentymistä ja kanavan tukkeutumista. (Valmet n.d.)

Esilämmitetty syöttövesi johdetaan kammioon, jota kutsutaan lieriöksi. Lieriöltä lähtevää vettä kutsutaan kattilavedeksi. Kattilavesi kulkee laskuputkia pitkin jakokammioihin, jotka sijaitsevat tulipesän ja hiekkalukon alaosissa. Jakokammioista kattilavesi jakaantuu tulipesän, hiekkalukon ja syklonin seinät muodostaviin eväputkiin eli putkiin, joiden väleihin on hitsattu kapeat levyt. Seinien sisällä oleva vesi jäähdyttää seiniä ja lämpöenergia siirtyy seinistä kattilaveteen, jolloin sen tiheys pienenee ja laskuputkissa olevan veden hydrostaattinen paine saa seinissä olevan veden nousemaan ylöspäin. Tätä pumpaamalla

tapahtuvaa kattilaveden liikettä kutsutaan luonnolliseksi kierroksi. Kun seinissä olevan kattilaveden lämpötila saavuttaa kiehumispisteen, alkaa sen sekaan muodostua yhä enemmän höyryä. Höyrypitoinen kattilavesi nousee seiniä pitkin kokoojakammioihin ja niistä edelleen yläkiertoputkia pitkin takaisin lieriöön, jossa sen sisältämä höyry erotetaan syklonipuhdistimilla ja vesi sekoitetaan syöttöveeten uudelle kierrokselle (kuvio 4). Höyry johdetaan lieriöltä tulistimien läpi höyryn käyttökohteisiin kylmimmässä olevasta tulistimesta lähtien. (Valmet n.d.)

Suurten CYMIC-kattiloiden stabiiliusongelmat ja lämpöliikkeen aiheuttamat ongelmat on yleensä ratkaistu riiputtamalla kattilaa tangoilla sen päälle rakennetusta teräsrungosta. Tällöin kattilan osiin tulee vain vetojännitystä, eikä nurjahdusta voi silloin tapahtua. Tangot sallivat myös kulmanmuutoksellaan kattilan dimensioiden muutokset lämpölaajenemisestaan. Suuren altatuetun kattilan suunnittelu on mutkikkaampaa, mutta käytetyn materiaalin määrässä voidaan säästää varsinkin, jos kattilan osia pystytään käyttämään tukirakenteen osina niiden alkuperäisen käyttötarkoituksen lisäksi. Altatuetun kattilan lämpöliike sallitaan liukulaakereilla.

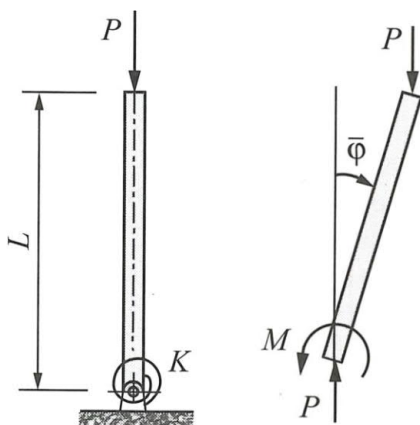


KUVIO 4. Lieriön poikkileikkauskuva (Valmet n.d.)

## 4 SAUVAN NURJAHDUS

### 4.1 Stabiilius eli vakavuus

Stabiiliudella tarkoitetaan kappaleen kykyä pysyä alkuperäisessä tasapainoasemassaan eli alkuperäisessä asennossaan, jossa siihen kohdistuvat voimat kumoavat toisensa ja kappale pysyy paikallaan. Stabiiliutta selitettäessä voidaan käyttää esimerkkinä kuvion 5 mukaista täysin jäykkää suoraa pilaria, joka on kiinnitetty toisesta päästään kiertojousella ja jota kuormitetaan puristavalla voimalla  $P$ . Jos pilarin asemaan tulee pieni häiriö  $\varphi$ , syntyy puristavasta voimasta momentti myötöpäivään ja tuennan jäykkyydestä momentti vastapäivään. Jos nyt alkuperäisen aseman palauttamiseen pyrkivä tukimomentti on momenteista suurempi, pilari palaa alkuperäiseen tasapainoasemaansa ja systeemin tasapainon laatua kutsutaan stabiiliksi eli vakaaksi. Jos sen sijaan puristava voima on niin suuri ja jousen jäykkyys niin pieni, että puristavan voiman aiheuttama momentti on suurempi, pilarin liike jatkuu pois päin alkuperäisestä tasapainoasemastaan, kunnes pilariin vaikuttavat voimat ovat taas tasapainossa. Tässä tapauksessa tasapainoa sanotaan labiiliksi eli horjuvaksi ja uutta tasapainoasemaa naapuritasapainoasemaksi. Näiden kahden tapauksen rajatilassa tasapainon laatua kutsutaan indifferentiksi eli epämääräiseksi. Silloin voimat ovat poikkeutetussa asemassa tasapainossa. Kuorman arvoa, jolla pilarin tasapaino muuttuu stabiilista indifferentiksi, kutsutaan nurjahduskuormitukseksi tai kriittiseksi kuormitukseksi. (Salmi & Pajunen 2010, 271–273.)



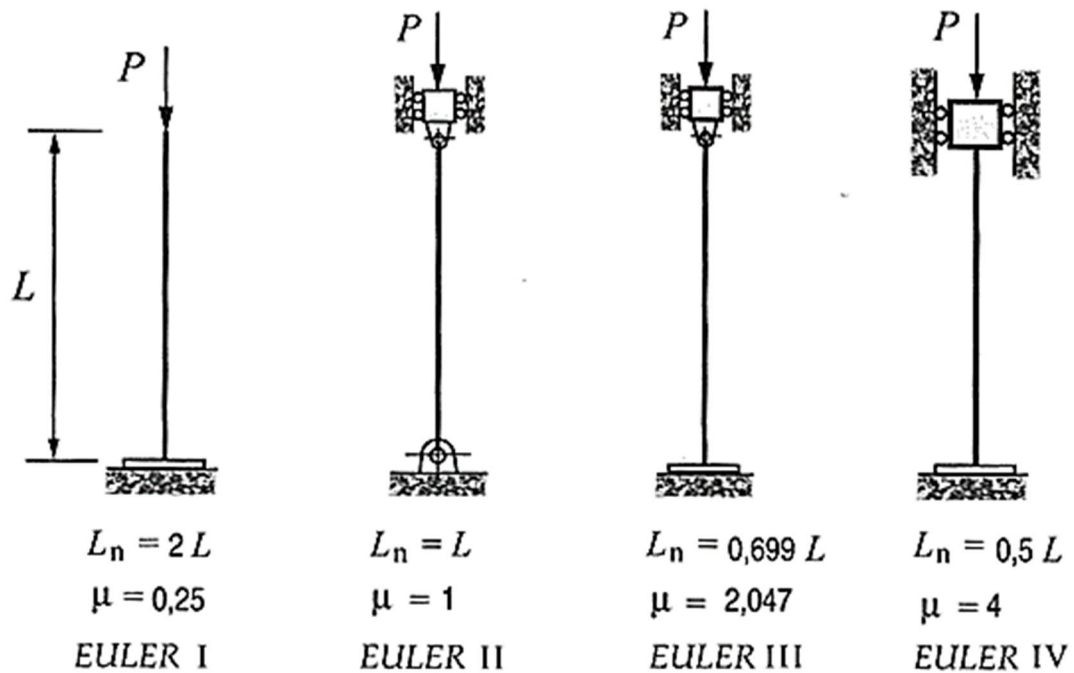
KUVIO 5. Jäykän pilarin puristaminen (Salmi & Pajunen 2010, 273).

## 4.2 Eulerin nurjahdustapaukset

Sveitsiläinen matemaatikko ja fyysikko Leonhard Euler esitti vuonna 1744, että ideaalisen suoran sauvan nurjahdusvoima  $P_{cr}$  voidaan laskea yhtälöstä

$$P_{cr} = \pi^2 \frac{EI}{L_n^2}, \quad (1)$$

jossa  $E$  on sauvan materiaalin kimmokerroin,  $I$  on sauvan poikkileikkauksen jäyhyysmomentti ja  $L_n$  on sauvan nurjahduspituus, joka riippuu sauvan tuennasta ja pituudesta. Euler on laskenut nurjahduspituuden sauvan pituuden funktiona neljälle erilaiselle ideaaliselle tuennalle. Niitä kutsutaan Eulerin nurjahdustapauksiksi ja ne on esitetty kuviossa 6. On huomioitava, että Eulerin nurjahdustapaukset kattavat vain ideaaliset suorat sauvat, jotka ovat keskeisesti päistään puristettuja ja joiden tuenta on ideaalinen. (Salmi & Pajunen 2010, 276–280.)



KUVIO 6. Eulerin nurjahdustapaukset (Salmi & Pajunen 2010, 280).

Nurjahdusongelmissa käytetään usein apumuuttujina poikkileikkauksen jäyhyysädettä  $i$  ja redusoitua hoikkuuslukua  $\lambda_n$ . Jäyhyysäde  $i$  määritetään yhtälöstä

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}, \quad (2)$$

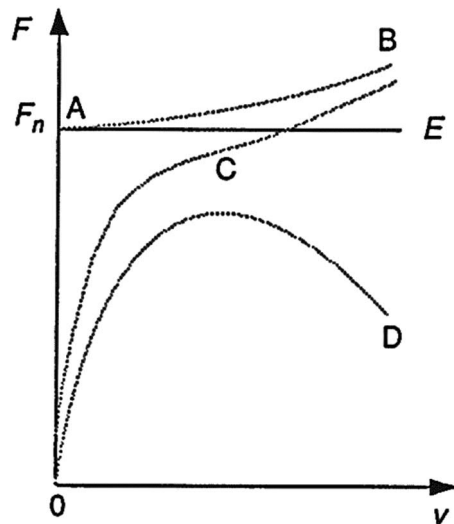
jossa  $I$  poikkileikkauksen jäyhyysmomentti ja  $A$  on poikkileikkauksen pinta-ala. Redusoitu hoikkuusluku  $\lambda_n$  saadaan yhtälöstä

$$\lambda_n = \frac{L_n}{i}. \quad (3)$$

(Salmi & Pajunen 2010, 279.)

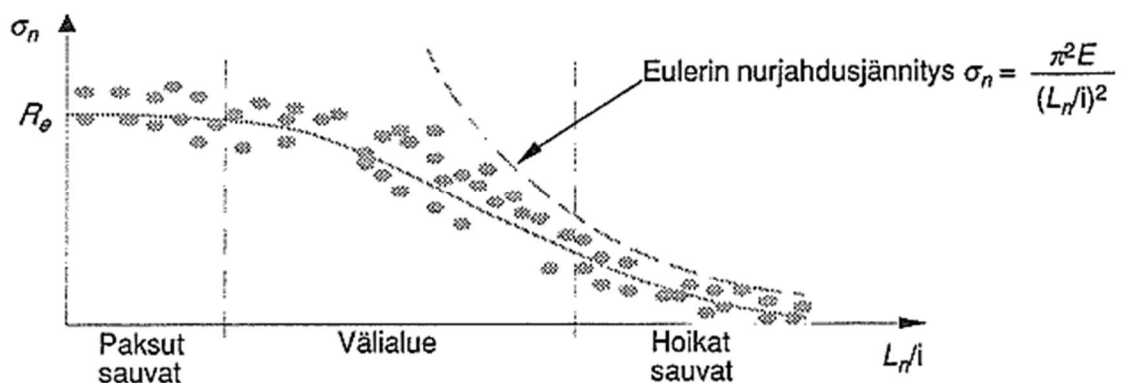
### 4.3 Epätäydellisyydet ja epäelastinen käytös

Ideaalisen kimmoisen sauvan nurjahtaminen alkaa vasta nurjahdusvoiman ylittyessä, mutta todellisessa sauvassa on aina virheitä, esimerkiksi alkukaarevuus, jotka saavat sauvan taipumaan jo pienestä puristusvoimasta lähtien. Kuviossa 7 esiintyvä käyrä B kuvaa ideaalisen kimmoisen sauvan taipuman kasvua puristusvoiman kasvaessa. Sauva pysyy suorana, kunnes puristusvoima ylittää nurjahduskuorman, ja sen jälkeen pienet puristusvoiman lisäykset aiheuttavat suuria taipumia. Todellinen eli epätäydellinen sauva noudattaa käyrää C eli sauva taipuu jo ennen nurjahduskuorman saavuttamista, ja taipuminen voimistuu, kun ollaan lähellä nurjahduskuormaa. Mitä suurempia sauvan epätarkkuudet ovat, sitä enemmän sauva taipuu sitä puristettaessa. Jos sauvalla on materiaalin suhteellisuusrajan nähden korkea nurjahdusjännitys, taipuman kasvu kiihtyy nopeasti suhteellisuusrajan ylittyessä, ja lopulta taipuma jatkaa kasvamistaan vaikka puristusvoimaa pienennettäisiin. Kuvio 7 on vain periaatepiirros, ja käyrien tarkka kulku riippuu sauvojen dimensioista ja materiaaliominaisuuksista. (Karhunen ym. 2006, 426–427.) Suhteellisuusrajalla tarkoitetaan jännityksen arvoa, jonka jälkeen materiaalin jännitys-venymäkäyttäytyminen muuttuu lineaarisesta epälineaariseksi.



KUVIO 7. Nurjahdussauvan taipuma puristusvoiman funktiona (Karhunen ym. 2006, 426).

Sauvoille on tehty nurjahduskokeita 1800-luvulta lähtien. Kokeiden tulokset ovat asettuneet Eulerin nurjahdusjännityksen ja myötörajan alapuolelle. Kuviossa 8 on esimerkki kokeiden tulosten jakautumisesta, kun muuttujana on sauvan redusoitu hoikkuus. Hoikilla sauvoilla nurjahdusjännitys on suhteellisen lähellä Eulerin nurjahdusjännitystä, mutta sauvan paksuuntuessa ero kasvaa. Paksun sauvan nurjahdus ei ole kimmainen nurjahdus vaan tyssääntyminen ja riippuu materiaalin myötörajasta. Kokeiden tulosten avulla on voitu määrittää eri materiaaleille ja poikkileikkauksille niin sanottuja nurjahduskäyriä. (Karhunen ym. 2006, 427–428.)



KUVIO 8. Nurjahduskokeiden tuloksia (Karhunen ym. 2006, 427).

## 5 PUTKEN SISÄPUOLISEN PAINEEN VAIKUTUS

### 5.1 Normaalivoima putken päädyistä

Putken sisäpuolinen paine vaikuttaa sen stabiiliuteen ainakin neljällä eri tavalla: Efektii-  
visellä aksiaalivoimalla, Poissonin efektillä, estämällä poikkileikkauksen soikiintumista  
ja putken päihin kohdistuvan paineen aiheuttamalla vetojännityksellä. Putken päihin koh-  
distuvasta sisäpuolisesta paineesta syntyy positiivinen normaalivoima  $N_p$  koko putken pi-  
tuudelle, jonka suuruus on

$$N_p = p_i A_i , \quad (4)$$

jossa  $p_i$  on putken sisäpuolinen paine ja  $A_i$  on putken poikkileikkauksen sisäpuolinen  
pinta-ala. Nurjahduskuorma on negatiivinen normaalivoima, joten paineella on tässä ta-  
pauksessa positiivinen vaikutus nurjahduskestävyyteen. Muut paineen vaikutukset put-  
ken stabiiliuteen esitetään niistä tehtyjen tutkimusten avulla.

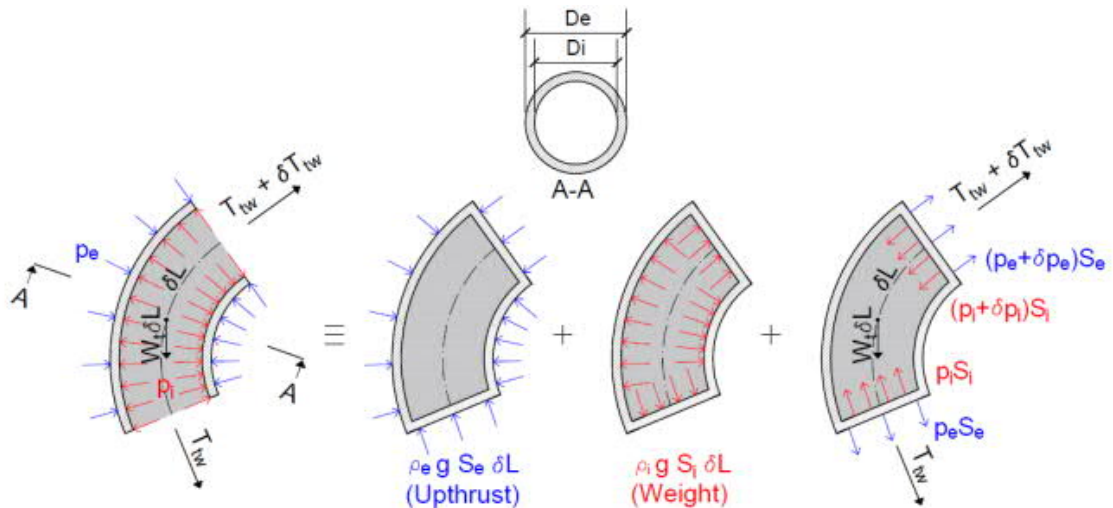
### 5.2 Efektiivinen aksiaalinen voima

Vuonna 2016 julkaistussa tutkimuksessa merenalaisten putkilinjojen nurjahtamisen syyn  
sanotaan yleensä olevan niin kutsutussa efektiivisessä aksiaalisessa voimassa, jota ei voi  
laskea putken poikkileikkaukseen vaikuttavista jännityksistä. Termi esitettiin ensimmäi-  
sen kerran vuonna 1984 ja siitä on sen jälkeen tehty muitakin tutkielmia. Efektiivisen  
akσιαalisen voiman perustan ymmärtämistä auttaa kuvio 9. Kuviossa vasemmalla on osa  
päistään avointa putkea, johon vaikuttaa sisäpuolinen paine, ulkopuolinen paine, putken  
oma paino ja todellinen normaalivoima, joka voi pitää sisällään esimerkiksi lämpövoi-  
man, kitkavoiman ja paineen aksiaaliset voimat, kuten päädyn vaikutuksen ja Poissonin  
efektin. Systemi on ekvivalentti kolmen sen oikealla puolella olevan systeemin summan  
kanssa. Ensimmäinen oikealla olevista systeemeistä on putki, jonka päät on suljettu ja  
siihen vaikuttaa alkuperäisen systeemin ulkoinen paine joka suunnalta. Ulkoinen paine  
vaikuttaa yhteensä nosteen kokoisella voimalla ylöspäin. Toinen oikealla oleva systemi  
on samanlainen kuin edellinen, mutta siinä vaikuttaa alkuperäisen kokoinen sisäpuolinen

paine, jonka yhteisvaikutus on sen sisällä olevan nesteen painon kokoinen voima alas-  
päin. Viimeinen systeemi on suljettu putki, johon vaikuttaa todellinen aksiaalinen voima  
sekä sen kokonaisuudessa ja jonka päihin vaikuttaa alkuperäiset sisä- ja ulkopuoliset pai-  
neet, mutta vastakkaisiin suuntiin. Nämä paineet kumoavat kahdessa aiemmassa systeemissä  
lisätyt paineet, jolloin systeemien voimien summasta tulee sama, kuin alkuperäisissä  
systeemissä. Efektiiviseksi aksiaaliseksi voimaksi  $T_e$  kutsutaan viimeisessä systeemissä  
olevien paineiden vaikutuksen ja todellisen normaalivoiman summaa. Se on siis

$$T_e = T_{tw} + p_e A_e - p_i A_i, \quad (5)$$

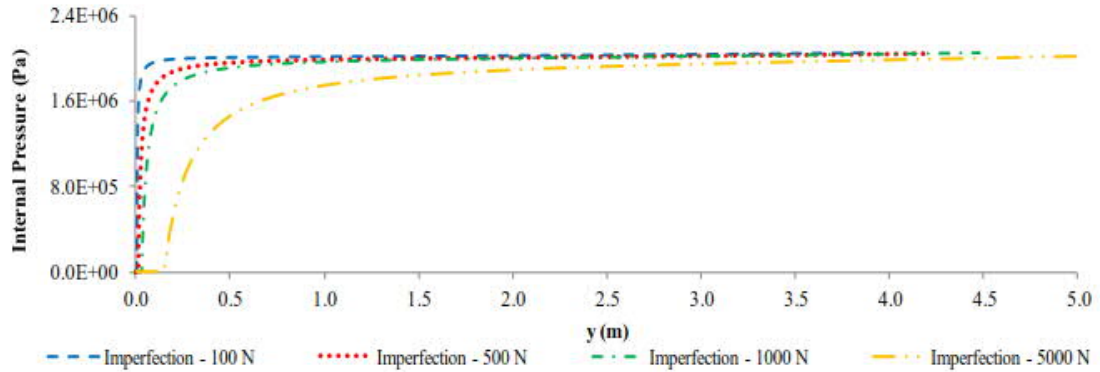
jossa  $T_{tw}$  on todellinen normaalivoima,  $p_e$  on ulkopuolinen paine ja  $A_e$  on päädyn ulko-  
puolinen pinta-ala. (Craveiro & Neto 2016.)



KUVIO 9. Putkeen vaikuttavien voimien laskentamalli (Craveiro & Neto 2016).

Tutkimuksen numeerisissa analyyseissä ulkoinen paine oli nolla ja poikkileikkaukset oletettiin jäykiksi, jolloin Poissonin efekti, joka vahvistaisi nurjahdusta, ei ollut mukana analyyseissä. Numeerisissa analyyseissä käytettiin São Paulon yliopiston jatkuvassa kehityksessä olevaa Giraffe-ohjelmistoa. (Generic Interface Readily Accessible for Finite Elements). Simulaatioissa käytettiin 100 m pituista putkea, jonka ulkohalkaisija oli 650 mm, seinämänpaksuus 30 mm ja kimmokerroin 200 GPa. Päistään avoimelle toisesta päästä jäykästi tuetulle ja toisesta päästä pituussuuntaan liukuvalla nivelellä tuetulle putkelle saatiin simulaation tuloksena kuvion 10 mukainen kuvaaja. Siinä on esitetty putken suurin taipuma sisäisen paineen funktiona eri alkuepätyydellisyyksillä. Epätyydellisyydet

tehtiin malliin putken keskelle sijoitetulla pistevoimalla. Kuvaajasta nähdään simulaatiossa käytetyn päädyttömän putken kriittisen paineen olevan noin 2 MPa ja taipuman lisäävän paineen vaikutusta. Tutkimuksessa todettiin myös kuorman vaikutuskohdan ja -suunnan seuraavan putkea eli pysyvän samassa asennossa poikkileikkauksissa niiden asentoihin nähden. (Craveiro & Neto 2016.)



KUVIO 10. Sisäisen paineen kuormittaman päistään avoimen putken siirtymä paineen funktiona ilman Poissonin efektiä.

CERNin tutkija Andrea Catinaccio (2009) tutki päistään avointa jäykästi molemmista päistä tuetun putken nurjahdusta sen sisäpuolisesta paineesta ja laski, että sisäinen paine aiheuttaa nettoviivakuorman  $q$ , jonka positiivinen suunta on kaarevuuden ulkosyrjää kohti. Nettoviivakuorma  $q$  syntyy, koska ulkosyrjän pituus ja siten myös pinta-ala on suurempi kuin sisäsyrjän, jolloin siihen kohdistuu enemmän painetta. Paineen aiheuttama nettoviivakuorma lasketaan yhtälöstä

$$q = -p_i \pi r_i^2 v'' , \quad (6)$$

jossa  $p_i$  on sisäinen paine,  $r_i$  on putken sisäsäde ja  $v''$  on putken käyryys. Myös Argentiinalaiset tutkijat Dvorkin ja Toscano (2001) johtivat saman yhtälön.

Catinaccion (2009) mukaan sisäinen paine vaikuttaa putken kimmoviivan muotoon samalla tavalla kuin aksiaalinen puristava voima

$$P = P_{po} + p_i A_i , \quad (7)$$

jossa  $P_{po}$  on Poissonin efektin aiheuttama aksiaalinen voima,  $p_i$  on putken sisäpuolinen paine ja  $A_i$  on poikkileikkauksen sisäpinta-ala. Yhtälöstä (7) huomataan, että tulos on sama kuin efektiivinen aksiaalinen voima aiemmassa yhtälössä (5). Tässä tutkimuksessa laskettiin siis sama asia eri tavalla, eikä käytetty termiä efektiivinen aksiaalinen voima.

### 5.3 Poissonin efekti

Poissonin efektin aiheuttama normaalivoima saadaan Hooken lain avulla. Hooken laista isotrooppisille sylintereille saadaan yhtälö

$$\varepsilon_l = \frac{1}{E} [\sigma_l - \nu(\sigma_c + \sigma_r)] , \quad (8)$$

jossa  $\varepsilon_l$  on pituussuuntainen venymä,  $E$  on kimmokerroin,  $\sigma_l$  on jännitys pituussuuntaan,  $\sigma_c$  on jännitys tangentin suuntaan,  $\sigma_r$  on jännitys säteen suuntaan ja  $\nu$  on Poissonin vakio. (Catinaccio 2009, 3.) Yhtälöstä huomataan, että pituussuuntainen jännitys kasvattaa venymää ja että tangentialinen sekä radiaalinen jännitys pienentävät venymää voimakkuudella, jonka määrää Poissonin vakio. Catinaccion (2009) mukaan, kun putki on pituussuunnassa tuettu,  $\varepsilon_l$  on 0 ja yhtälöstä (8) saadaan vetojännitys

$$\sigma_l = \nu(\sigma_c + \sigma_r). \quad (9)$$

Lisäksi tiedetään, että tangentialisen ja radiaalisen jännityksen summa on vakio putken poikkileikkauksen jokaisessa kohdassa ja sen suuruus on

$$\sigma_c + \sigma_r = \frac{2p_i}{\left(\frac{d_e}{d_i}\right)^2 - 1} , \quad (10)$$

jossa  $p_i$  on sisäpuolinen paine,  $d_e$  on ulkohalkaisija ja  $d_i$  on sisähalkaisija. Poissonin efektin aiheuttama jännitys voidaan ratkaista sijoittamalla summa (10) yhtälöön (9), ja kun jännityksen poikkipinta-alalle aiheuttama voima sijoitetaan yhtälöön (7) saadaan sisäpuolisen paineen avoimeen päistään jäykästi tuettuun putkeen aiheuttamaksi (efektiiviseksi) puristusvoimaksi

$$P = p_i A_i (1 - 2\nu). \quad (11)$$

Poissonin vakio on isotrooppisilla materiaaleilla, kuten teräksillä, aina pienempi kuin 0,5, joten paineesta aiheutuu avoimeen putkeen aina puristava voima. Joillain orthotrooppisilla materiaaleilla Poissonin vakio on suurempi kuin 0,5, jolloin putkeen syntyy sisäisestä paineesta venyttävä voima. Tutkimuksen tulokset on vahvistettu FEM-analyysillä. (Catinaccio 2009.) Orthotrooppisilla materiaaleilla lujuusominaisuudet ovat eri suuntiin erilaiset. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi komposiitit.

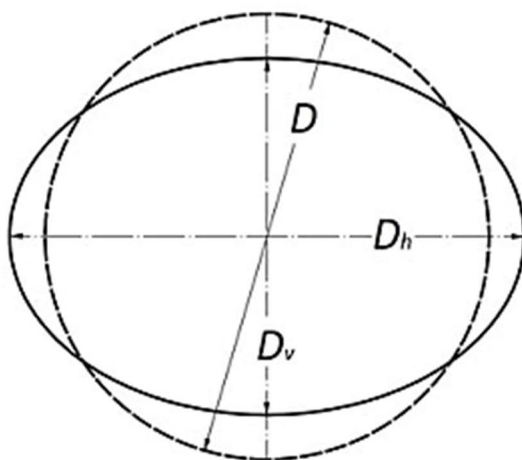
Poissonin efekti näyttäisi siis aiheuttavan teräksillä vetojännityksen, koska sisäinen paine venyttää putken poikkileikkausta, jolloin putki pyrkii lyhenemään, mutta lyheneminen on estetty. Mitä joustavampi putken tuenta on, sitä vähemmän lyheneminen estyy, kunnes putki pääsee lyhenemään vapaasti ja Poissonin efektillä ei ole enää jännitysvaikutusta. Yhtälöä (11) on jo käytetty ennen Catinaccion tutkimusta ainakin norjalaisessa putkilinjien suunnitteluohjeessa (DNV-RP-F110 2007, 21). Lisäksi samassa ohjeessa kerrotaan myös efektiivisestä aksiaalisesta voimasta ja esitetään sen yhtälö (5) (DNV-RP-F110 2007, 20).

Lukija saattaa ihmetellä, että eikö yhtälö (5) ole ristiriidassa sen yleisesti tunnetun tiedon kanssa, että ylipaine aiheuttaa päistään suljetun putken seinämään vetosuuntaisen normaalivoiman? Jos puristavasta voimasta  $P$  (7) vähennetään putken päihin kohdistuvan paineen aiheuttava vetävä voima (4) ja putkea ei ole merkittävästi tuettu pituudenmuutosta vastaan, saadaan putken efektiiviseksi aksiaaliseksi voimaksi (5) 0 N. Tämä ei tarkoita, etteikö putken seinämän jännitys olisi perinteinen vetojännitys, joka on todellista normaalivoimaa kuvaavassa termissä  $T_{tw}$ . Putken sisäinen ja ulkoinen paine vaikuttavat myös tavoilla, jotka eivät aiheuta jännityksiä putken seinämään, mutta kumoavat putken päihin kohdistuvan paineen vaikutuksen stabiiliuden kannalta (DNV-RP-F110 2007, 20). Sisäisen paineen kokonaisvaikutus päistään suljetun putken nurjahduksessa ei siis ole niin merkittävä, kuin aluksi pelkän seinämien jännitysvaikutuksen perusteella saattoi kuvitella.

#### 5.4 Pyöreiden palautumisen vaikutus

Putkea taivutettaessa tai sen kylkeä puristettaessa sen poikkileikkaus litistyy eli soikiutuu. Soikiutumisen pienentää putken jäyhyysmomenttia, koska keskimäärin putken seinämän etäisyys sen keskipisteestä pienenee sen taivutussuunnassa. Kuviosta 11 nähdään, kuinka soikean putken poikkileikkauksessa putken leveys on suurempi kuin sen korkeus. Sisäisen paineen aiheuttama kokonaisvoima ylös ja alas on siten suurempi kuin vasemmalle ja oikealle, koska paine kohdistuu suuremmalle alueelle ylä- ja alasuunnassa. Paineen aiheuttama nettovoima pyrkii siis muuttamaan poikkileikkauksen muotoa suuntaan, joka on lyhyempi.

Paineettoman putken taivutuksessa soikiutumisen määrä on kuitenkin hyvin vähäinen, koska putki käyristyy vain vähän ennen rikkoutumistaan. Siksi pyöreiden palauttamisen vaikutukseen ei ole merkittävä, jos lommahdus ei ole kestävyyttä rajoittava. Kun tutkittiin sisäisen paineen vaikutusta teräsputkien taivutuksessa, se aiheutti vain noin yhden prosentin keskimääräisen taivutusjäykkyyden kasvun verrattuna paineettomaan putkeen. Putkien  $D/t$ -suhde oli kylläkin yli 100 ja sisäinen paine 1,5 MPa ja tutkimus tehtiin FEM-analyysinä Ansys 14.5 –ohjelmistolla. (Polenta, Garvey, Chronopoulos, Long & Morvan 2015, 280.) Standardissa SFS-EN 1993-4-3 on laskentakaava pyöreiden palautumisen vaikutukselle. Pyöreiden palautumisen vaikutuksella on enemmän merkitystä putkilinjoille, koska niihin vaikuttaa taivutuksen lisäksi myös muita soikiuttavia kuormia kuten maanpaine ja niille lasketaan suurin sallittu soikiutumisen arvo lommahduksen välttämiseksi.



KUVIO 11. Putken poikkileikkauksen soikeus (Polenta ym. 2015, 282).

## 6 EUROKOODIEN KÄYTTÖ LASKUPUTKEN MITOITUKSEEN

### 6.1 Eurokoodi-järjestelmästä

Euroopan yhteisön komissio päätti Eurokoodi-ohjelman aloittamisesta vuonna 1975. Ohjelman tavoitteena oli poistaa kaupan tekniset esteet ja yhdenmukaistaa teknisiä vaatimuksia. Eurokoodi-standardit koskevat kantavien rakenteiden suunnittelua, ja niiden kanssa ristiriitaiset kansalliset standardit on kumottu vuonna 2010. (SFS-EN 1993-1-1 2005, 4.) Eurokoodit korvaavat aiemmat rakentamismääräykset ja niitä tulee käyttää yhdessä ympäristöministeriön vahvistamien kansallisten liitteiden kanssa (SFS 2014, 3).

Eurokoodi-standardijärjestelmässä on 58 osaa, joita ei saa ristiinkäyttää muihin järjestelmiin kuuluvien standardien kanssa, vaan osavarmuusluvut, rakenteiden kuormitukset ja kuormitusyhdistelmät tulee valita Eurokoodi-standardeja käyttäen (Kouhi 2006, 405). Eurokoodi 3:ssa on 20 osaa, ja sitä käytetään yhdessä kansallisten liitteiden sekä seuraavien standardien kanssa: SFS-EN 1090 Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus, SFS-EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet (Eurokoodi) sekä SFS-EN 1991 Rakenteiden kuormat (Eurokoodi 1). Lisäksi käytetään teräsrakenteissa kyseeseen tulevia rakennustuotteita koskevia EN-standardeja sekä ETA:a (European Technical Approval) ja ETAG:tä (ETA Guideline). Eurokoodi 3:n ensimmäistä osaa, SFS-EN 1993-1, voidaan käyttää myös referenssinä suunnittelutapauksissa, joissa käytetään sellaisia rakenteita, kuormituksia tai materiaaleja, joita Eurokoodit eivät koske. (SFS-EN 1993-1-1 2005, 6, 8.) Laskuputken suunnittelussa referenssinä käytettäviksi merkittävimmät Eurokoodi 3:n osat ovat SFS-EN 1993-1-1 Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, EN 1993-1-8 Liitosten suunnittelu ja EN 1993-4-3 Putkilinjat. Putkilinjojen standardissa on huomioitu sisäisen paineen vaikutus.

### 6.2 Kuormien yhdistely

Kun rakennetta mitoitetaan Eurokoodi 3:n mukaan, on käytettävä mitoituskuormana Eurokoodin, SFS-EN 1990, mukaista kuormayhdistelmää. Käytännössä kaikki mitoituksessa käytettävät osavarmuusluvut tulevat kuormayhdistelmän mukana. Mitoituskuormia

verrataan kestävyksiin, joiden laskennassa käytetään rakenteen nimellismittoja ja materiaalin varmuusluku on yleensä yksi. Siten esimerkiksi paksuuden negatiivisen toleranssin vaikutus myötökestävyyteen tulee otettua huomioon vain mitoituskuormassa. Kuormayhdistelmän määrittämiseen on ohje Eurokoodin kansallisessa liitteessä, jossa on esitetty Eurokoodissa esiintyvien kuormien yhdistelyssä käytettävät yhtälöt, joihin on sijoitettu Suomessa käytettävät kertoimet. Eurokoodin kansallisen liitteen (2016) mukaan käytettävä kuormien vaikutuksen mitoitusarvo lasketaan stabiiliusmitoituksessa yhtälöstä

$$E_d = 1,1K_{FI}G_{kj,sup} + 0,9G_{kj,inf} + 1,5K_{FI}Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i}Q_{k,i} \quad (12)$$

ja kestävyden mitoituksessa valitaan epäsuotuisampi seuraavasta kahdesta yhtälöstä

$$E_d = 1,15K_{FI}G_{kj,sup} + 0,9G_{kj,inf} + 1,5K_{FI}Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i}Q_{k,i}, \quad (13)$$

$$E_d = 1,35K_{FI}G_{kj,sup} + 0,9G_{kj,inf}, \quad (14)$$

joissa  $E_d$  on kuormien vaikutusten mitoitusarvo,  $K_{FI}$  on luotettavuuden tasoluokituksen käytettävä kuormakerroin,  $G_{kj,sup}$  on epäedullisen pysyvän kuorman ominaisarvon yläraja,  $G_{kj,inf}$  on edullisen pysyvän kuorman ominaisarvon alaraja,  $Q_{k,1}$  on suurimman vaikutuksen aiheuttava muuttuva kuorma,  $Q_{k,i}$  on muu muuttuva kuorma,  $\psi_{0,i}$  on muuttuvan kuorman yhdistelykerroin kyseiselle kuormalle. Yhdistelykertoimien arvot ovat välillä  $0 < \psi_{0,i} < 1$ , ja ne on määritelty tietyille kuorma-rakenne-yhdistelmille.

Eurokoodi-järjestelmässä on oletuksena, että käytetään eurokoodi 1:ssä määriteltyjä kuormia. Altatuetun CYMIC-kattilan syklonin ja hiekkalukon hiekan aiheuttama kuorma voidaan määrittellä pysyväksi kuormaksi käyttämällä sen maksimiarvoa. Kuormayhdistelmistä etsitään määräävä kuormitustapaus kullekin murtorajatilalle. Esimerkiksi eri kuormayhdistelmillä voi yhdellä saada suurimman normaalivoiman ja toisella suurimman taivutusmomentin, jolloin rakenteen mitoitus tarkistetaan molemmille kuormayhdistelmille. Kuormakerroin  $K_{FI}$  riippuu rakenteen luotettavuusluokasta, joka voidaan määrittää sen seuraamusluokan perusteella (SFS-EN 1990 2005, 136, 138). Seuraamusluokat, niihin liittyvät luotettavuusluokat ja kuormakerroimen arvot on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Seuraamusluokat, luotettavuusluokat ja kuormakertoimet (SFS-EN 1990 2005, 136, 138, muokattu).

Seuraamusluokka	CC3	CC2	CC1
Kuvaus	Suuret seuraamukset hengenmenetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Keskisuuret seuraamukset hengenmenetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Vähäiset seuraamukset hengenmenetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia
Luotettavuusluokka	RC3	RC2	RC1
Kuormakerroin $K_{FI}$	1,1	1,0	0,9

Onnettomuustilanteessa kuormien vaikutuksen mitoitusarvo on

$$E_d = G_{kj,sup} + G_{kj,inf} + A_d + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} , \quad (15)$$

ja maanjäristystilanteessa se on

$$E_d = G_{kj,sup} + G_{kj,inf} + \gamma_1 A_{ek} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} , \quad (16)$$

joissa  $A_d$  on onnettomuuskuorman mitoitusarvo,  $\gamma_1$  on maanjäristyskuorman merkityskerroin,  $A_{ek}$  on maanjäristyskuorman ominaisarvo ja  $\psi_{2,i}$  on muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin kyseiselle kuormalle. Muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin  $\psi_{2,i} < \psi_{0,i}$ . Yhtälö (15) on esitettyssä muodossa vain silloin, kun pääasiallinen muuttuva kuorma ei ole lumi-, jää- tai tuulikuorma. (Ympäristöministeriö 2016, 18, 20, 21.) Yhtälöissä (12-16) oletetaan käytettävän kuormia, jotka on määritelty Eurokoodissa 1, joten yhtälöiden soveltamista muille kuormille on harkittava tarkasti.

### 6.3 Rakenteen sivusiirtyvyyden huomioiminen

Rakenteen sisäiset voimasuureet voidaan määrittää kimmoteorian mukaan jättäen huomiotta rakenteen muodonmuutoksen vaikutukset, jos se määritellään sivusiirtymättömäksi. Rakenne määritellään sivusiirtymättömäksi, jos kuormasuhte  $\alpha_{cr}$  toteuttaa yhtälön

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10, \quad (17)$$

jossa  $F_{cr}$  on koko rakenteen ensimmäistä epäsymmetristä nurjahdusmuotoa vastaava kriittinen kuorma ja  $F_{Ed}$  on rakenteen mitoituskuorma. Muussa tapauksessa rakenne on sivusiirtävä. (SFS-EN 1993-1-1 2005, 30.) Yhtälön (17) mukaan mitoituskuorman on siis oltava alle 10 % rakenteen kriittisestä nurjahdusvoimasta, että muodonmuutoksen vaikutukset eli toisen kertaluvun vaikutukset voidaan jättää huomiotta.

Palkki-pilari-tyyppisen kehän, jonka palkeissa ei ole merkittäviä normaalivoimia, sisäiset voimasuureet voidaan määrittää kimmoteorian mukaan, jos kuormasuhte  $\alpha_{cr}$  toteuttaa kehän jokaisessa kerroksessa yhtälön

$$\alpha_{cr} = \frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{h}{\delta_{H,Ed}} \geq 10, \quad (18)$$

jossa  $H_{Ed}$  on kerroksen yläpäässä vaikuttavien vaakareaktioiden summa alkuepäätarkkuuksien vaikutukset mukaan otettuna,  $V_{Ed}$  on kerroksen alapäässä vaikuttavien pystykuormien summa,  $h$  on kerroksen korkeus ja  $\delta_{H,Ed}$  on kerroksen ylä- ja alapään välinen vaakasiirtymä. Palkkien puristavat normaalivoimat  $N_{Ed}$  ovat merkittäviä, jos

$$N_{Ed} \geq \left(\frac{0,3}{\lambda_t}\right)^2 Af_y, \quad (19)$$

jossa  $f_y$  on palkin materiaalin myötöraja ja  $\lambda_t$  on taivutusnurjahdusta vastaava muunnettu hoikkuus jäykemmässä suunnassa laskettuna ja olettaen  $L_{cr}$  samaksi kuin pilarien välimatka. (SFS-EN 1993-1-1 2005, 30-31.)

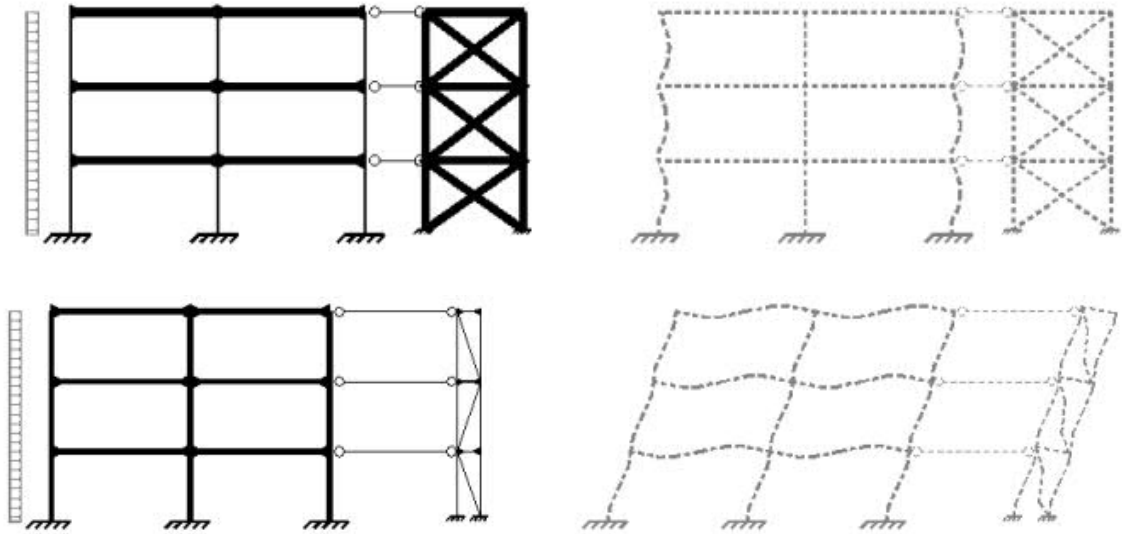
Sivusiirtyvien säännöllisten monikerroskehien ja yksikerroskehien toisen kertaluvun vaikutukset voidaan ottaa huomioon kertomalla lineaarisessa kimmoteorian mukaisessa analyysissä käytettäviä vaakakuormia kertoimella

$$k_m = \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \quad (20)$$

olettaen, että kuormasuhde on välillä  $3 \leq \alpha_{cr} < 10$ . Jos kuormasuhde  $\alpha_{cr} < 3$ , on käytettävä tarkkaa toisen asteen menetelmää sisäisten voimasuureiden määrittämiseen. (SFS-EN 1993-1-1 2005, 32.)

Laskuputkien muodostama pilari-palkki-kehä ei ole säännöllinen monikerroskehä, jossa kuormat jakautuvat samakaltaisesti kaikissa kerroksissa, joten edellistä menetelmää toisen kertaluvun vaikutuksien huomioimiseksi ei voida soveltaa. Jotta laskuputkien mitoituksessa voidaan käyttää yksinkertaista lineaarista analyysia, kannattaa laskuputkikehä suunnitella sivusiirtymättömäksi sivusuunnan tuennan avulla. Kehä on sivusuunnassa tuettu, jos sen vaakakuormista siirtyy yli 80 % jäykistysjärjestelmälle (Sivill 2016, 5). Toisin sanoen jäykistetyn kehän siirtymät ovat alle 20 % jäykistämättömän kehän siirtymistä (Chantrain, P. Schleich, J. Conan, Y. & Mauer T. 1996, 73). Sivusuunnassa tuetun kehän sivusiirtyvyys on silti tarkastettava, koska myös sivusuunnassa tuettu kehä voi olla sivusiirtävä. Kuvion 12 alemman kehän  $\alpha_{cr} < 10$ , joten toisen kertaluvun vaikutukset otetaan huomioon kehän kokonaistarkastelussa. (Kouhi 2009, Sivillin 2016, 6 mukaan.)

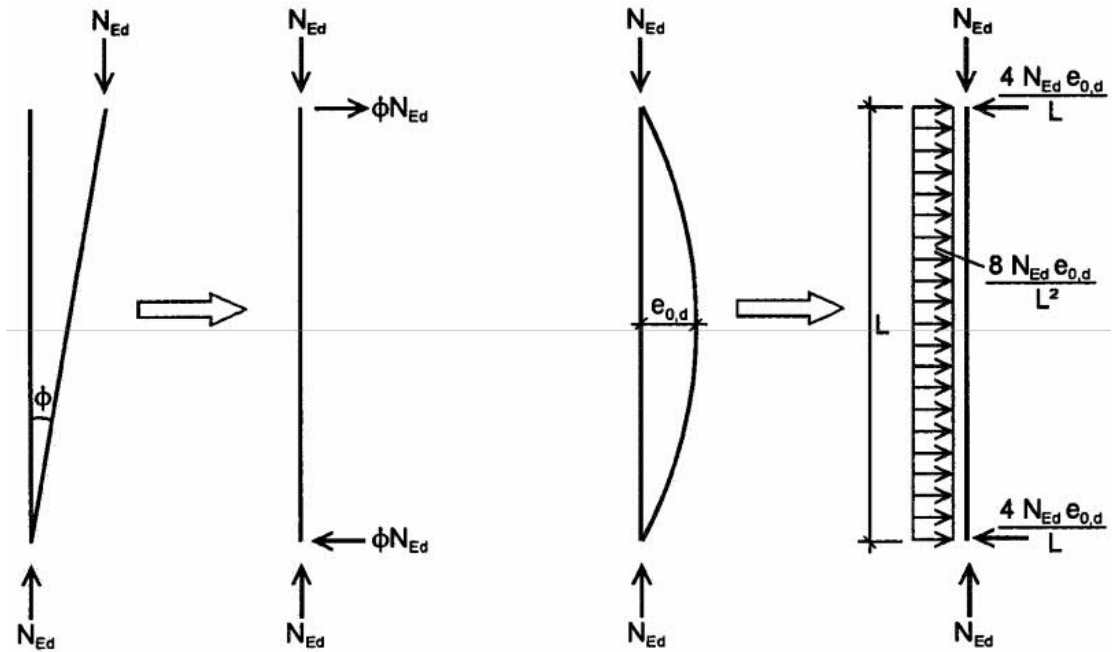
Yksi vaihtoehto laskuputkikehän jäykistysjärjestelmäksi voivat olla kehään yhdistetyt sykloni, hiekkalukko, tulipesä ja muut kattilan osat. Jäykistysjärjestelmäksi soveltuvuuden arvioimiseksi on tarkasteltava niiden jäykistävää vaikutusta ja omaa sivusiirtyvyyttä sekä kestävyyttä. Jos laskuputkikehältä siirretään vaakakuormia syklonille ja muille rakenneosille, on ne kuormat huomioitava niiden rakenneosien mitoituksessa ja kuormasuhde  $\alpha_{cr}$  voidaan laskea ottaen kaikki vaakavoimia siirtävät rakenteet osaksi kehää. Kehän ollessa sivusuunnassa tuettu kattilan rakenneosilla voi sisäisten voimasuureiden määrittäminen muuttua haastavaksi 3D-rakenteen analyysiksi. Kattilan rakenneosiin tukemisen sijasta voidaan myös tehdä palkkeihin pystyristikkorakenne tai erillinen jäykistysjärjestelmä, esimerkiksi mastojäykistyspukki, mutta lämpölaajenemisesta johtuvat siirtymät voivat muodostua esteeksi.



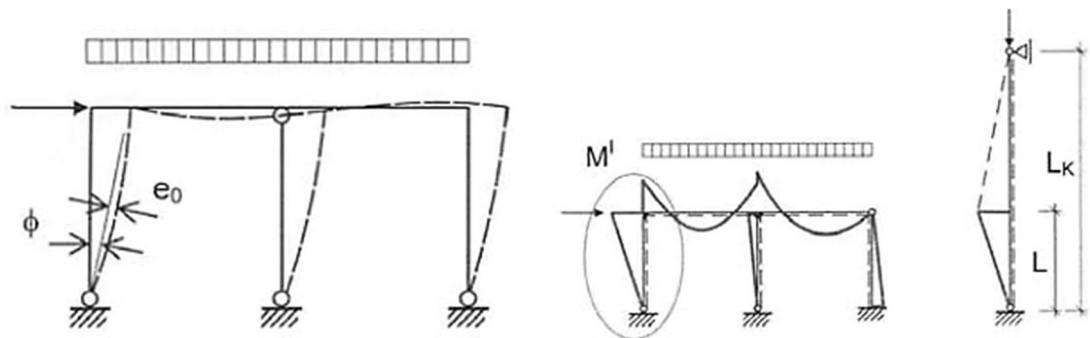
KUVIO 12. Sivusuunnassa tuettu sivusiirtymätön kehä ja sivusuunnassa tuettu sivusiirtyvä kehä. (Kouhi 2009, Sivillin 2016, 6 mukaan, muokattu).

#### 6.4 Rakenteen epätarkkuuksien huomioiminen

Riippuen mitoitukseen valitusta menetelmästä, epätarkkuudet joko otetaan tai niitä ei oteta huomioon. Käytettävät epätarkkuudet ovat alkusivusiirtymä ja alkukaarevuus, jotka voidaan korvata suoraan sauvaan vaikuttavilla ekvivalenteilla korvausvoimilla kuvion 13 mukaisesti. Suositellut epätarkkuuden  $e_0$  arvot ovat kuumavalssatuilla rakenneputkilla materiaalista riippuen välillä  $L/250$ – $L/350$ , jossa  $L$  on putken pituus (SFS-EN 1993-1-1 2005, 34). Jos esimerkiksi tarkastetaan avaruuskehän kokonaisstabiilius toisen kertaluvun menetelmällä, käytetään molempia epätarkkuuksia (kuvio 14). Sen sijaan Suomessa yleisimmin käytetyssä ekvivalentin pilarin menetelmässä lasketaan sauvanpäämomentit ensimmäisen kertaluvun teorian mukaan ja tarkastellaan erillissauvan nurjahdusta. (Kouhi 2006, 409.) Erillissauvojen nurjahduspituudessa on otettava huomioon mitoituskuormista aiheutuvat normaalivoimat, plastisten nivelien esiintyminen ja kehäsauvojen sekä -nurkkien jäykkyydet (Kaitila, Kumar, Martikainen, Saarinen, Leskelä, Heinisuo, Inha, Kemppi, Yrjölä, Jyrkäs, Pekkinen & Ilveskoski 2014, 60).



KUVIO 13. Alkuvinouden ja alkukaarevuuden ekvivalentit korvasuimat (EN 1993-1-1 2005, 36).



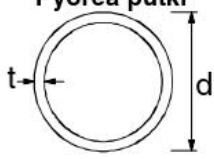
KUVIO 14. Vasemmalla avaruuskehän kokonaisstabiiliuden tarkistuksessa käytettävä menetelmä ja oikealla ekvivalentin pilarin menetelmä (Kouhi 2006, 409).

## 6.5 Poikkileikkausten luokitus

Eurokoodissa poikkileikkaukset jaotellaan luokkiin sen mukaan, kuinka paljon sauvan paikallinen lommahdus rajoittaa plastisen nivelen muodostumista. Eri poikkileikkausluokille on annettu omia sääntöjä. Poikkileikkausluokassa yksi pääsee muodostumaan riittävän kiertymiskykyinen plastinen nivel ilman, että tapahtuu paikallinen lommahdus (SFS-EN 1993-1-1 2005, 42). Se on paras poikkileikkausluokitus ja siinä luokassa laskut

ovat yksinkertaisimmat. Taulukossa 3 on pyöreän rakenneputken poikkileikkausluokituksen määrittämisehto. Siitä huomataan, että putken halkaisijan kasvattaminen, paksuuden pienentäminen tai lujuuden kasvattaminen vaikuttavat heikentävästi poikkileikkausluokkaan. Toisin sanoen plastinen nivel muodostuu ennen lommahdusta matalalujuuksisella putkella, jonka seinämä on paksu suhteessa sen halkaisijaan. Laskuputkissa päästään helposti poikkileikkausluokkaan yksi. Jos esimerkiksi käytetään 15NiCuMoNb5-6-4-painelaiteterästä, jonka lujuus on enintään 460 MPa, tarvitsee 500 mm leveän putken seinämänpaksuuden olla vain vähintään 20 mm.

TAULUKKO 3. Pyöreän putken poikkileikkausluokan määrittämisehto (SFS-EN 1993-1-1 2005, 47).

Pyöreä putki						
						
Poikkileikkausluokka	Taivutettu ja/tai puristettu poikkileikkaus					
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$					
<b>Huom.</b> Kun $d/t > 90\epsilon^2$ , ks. EN 1993-1-6.						
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460
	$\epsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	$\epsilon^2$	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

## 6.6 Paineen huomioiminen putkilinjojen standardissa

Standardissa SFS-EN-1993-1-1 ei ole huomioitu sisäisen paineen vaikutusta, joten sen huomioimiseksi on sovellettava esimerkiksi putkilinjojen standardia SFS-EN-1993-4-3. Standardissa SFS-EN-1993-4-3 normaalivoiman heikentämä taivutuskestävyys lasketaan kuitenkin paljon monimutkaisemmalla ja työlämmällä tavalla kuin standardissa SFS-EN-1993-1-1. Normaalivoimana kaavassa käytetään suurinta tehollista täysplastista normaalivoimaa

$$N_m = F - p_i \pi r^2, \quad (21)$$

jossa  $F$  on ulkopuolinen normaalivoima,  $p_i$  on putken sisäpuolinen paine ja  $r$  on ulkosäde (SFS-EN 1993-4-3 2007, 24). Yhtälö (21) on yhtäpitävä efektiivisen aksiaalisen voiman yhtälön (5) kanssa.

## 6.7 Nurjahduskestävyys

Sauvan nurjahduskestävyys normaalivoimalle  $N_{b,Rd}$  saadaan kertomalla sen poikkileikkauksen myötökestävyys pienennystekijällä  $X$  eli

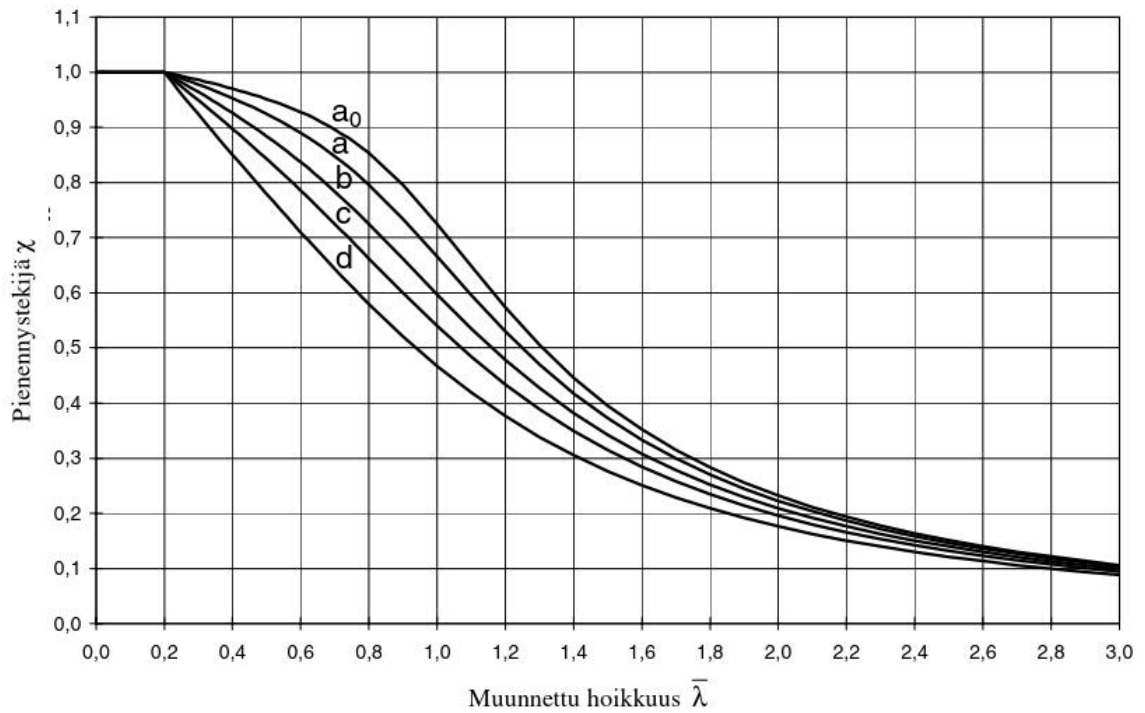
$$N_{b,Rd} = XAf_y, \quad (22)$$

jossa  $A$  on putken poikkileikkauksen pinta-ala ja  $f_y$  on materiaalin myötöraja (SFS-EN 1993-1-1 2005, 61). Ruostumattomille teräksille kestävyys jaettaisiin varmuusluvulla 1,1. Ruostumattomien terästen lisäohjstandardista 1993-1-4 saattaa selvitä, miksi käytetään suurempaa varmuutta ja kuuluuko samalla syyllä käyttää varmuuslukua painelaiteteräksille.

Pienennystekijä  $X$  voidaan laskea kaavasta tai lukea kuviosta 15. Käyristä voi huomata yhtäläisyyden nurjahduskokeiden tuloksia esittävän kuvion 8 kanssa. Kuumavalssatuille pyöreille rakenneputkille käytetään yleensä käyrää  $\lambda$  (SFS-EN 1993-1-1 2005, 63). Muunnetun hoikkuuden  $\lambda$  arvon saa yhtälöstä

$$\lambda = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}}, \quad (23)$$

jossa  $N_{cr}$  on kimmoteorian mukainen määräävän nurjahdusmuodon nurjahduskuorma (SFS-EN 1993-1-1 2005, 64, 70).



KUVIO 15. Muunnettu hoikkuus pienennystekijän funktiona (SFS-EN 1993-1-1 2005, 64).

Taivutuksen ja aksiaalisen puristuksen rasittamien poikkileikkausluokan yksi sauvojen stabiilius on hyväksytyllä tasolla, jos

$$\frac{N_{Ed}}{X_y N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} M_{y,pl,Rd}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl,Rd}} \leq 1, \quad (24)$$

jossa  $N_{Ed}$  on puristuksen mitoitusarvo,  $M_{y,Ed}$  ja  $M_{z,Ed}$  ovat taivutuksen mitoitusarvot eri akselien suhteen,  $N_{Rd}$  on puristuksen kestävyys,  $M_{y,pl,Rd}$  ja  $M_{z,pl,Rd}$  ovat taivutusmomenttien plastiset kestävydet,  $X_y$  on taivutusnurjahduksen pienennystekijä y-akselin suhteen,  $X_{LT}$  on kiepahduksen pienennystekijä sekä  $k_{yy}$  ja  $k_{yz}$  ovat yhteisvaikutustekijöitä, ja jos

$$\frac{N_{Ed}}{X_z N_{Rd}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{X_{LT} M_{y,pl,Rd}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl,Rd}} \leq 1, \quad (25)$$

jossa  $X_z$  on taivutusnurjahduksen pienennystekijä z-akselin suhteen ja  $k_{zy}$  sekä  $k_{zz}$  ovat yhteisvaikutustekijöitä. Kiepahduksen pienennystekijä  $X_{LT}$  on yksi, kun sauva ei ole altis vääntömuodonmuutoksille eli putken kestävyttä ei tarvitse pienentää kiepahduksen

vuoksi. Yhteisvaikutustekijöiden määrittämiseen tarvitsee määrittää ekvivalentin momentin kertoimet, jotka määritetään momenttipinnan perusteella. (SFS-EN 1993-1-1 2005, 70, 86, 87.) Liitteessä 1 on laskettu esimerkki SFS-EN 1993-1-1 mukaisesta mitoituksesta, kun kuvitellaan, että sauvaan vaikuttavat voimasuureet on laskettu määrävillä kuormayhdistelmillä ja sivusiirtyvyys on huomioitu.

## 7 SALLITUT MATERIAALIT

### 7.1 Materiaalivaatimukset

Eurokoodi 3:ssa on nimetty useita rakenneteräslajeja, joiden käyttö on sallittu Eurokoodi 3:n mukaisissa rakenteissa. Lisäksi Eurokoodi 3 sallii kansallisen valinnan muiden teräslajien osalta. (SFS-EN 1993-1-1 2005, 25.) Kansallisessa liitteessä sallitaan kaikkien sellaisten teräslajien käyttö, joiden ominaisuudet sekä ominaisuuksien yhteensopivuus Eurokoodi 3:n ja sen kansallisten liitteiden suunnitteluehtojen kanssa on luotettavasti selvitetty tai sen tuotehyväksynnässä todetaan sen soveltuvan SFS-EN 1993-1-1 mukaan käytettäväksi (Ympäristöministeriö 2017, 14).

Eurokoodi 3:ssa ja sen kansallisessa liitteessä on mainittu vaatimuksia ominaisuuksille ja ohjeita ominaisuuksien määrittämiseen vain rakenneteräksille. Näitä ominaisuuksia ja vaatimuksia ovat myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisarvot, sitkeysvaatimukset, murtumissitkeys, paksuussuuntaiset ominaisuudet, toleranssit, pienahitsien korrelaatiokerroin, mekaaniset ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa ja suurin sallittu paksuus hausrasmurtuman välttämiseksi. Lisäksi kiinnittimien sekä hitsausaineiden vaatimukset on esitetty standardissa SFS-EN 1993-1-8. Myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisinä arvoina voidaan käyttää suoraan tuotestandardin arvoja. Sitkeysvaatimuksina vaaditaan, että vetomurtolujuuden ja myötörajan minimiarvojen suhde on vähintään 1,1, murtovenymä on vähintään 15% ja kokonaistasavenymä eli murtovenymä on vähintään 15 kertaa suurempi kuin myötövenymä. (SFS-EN 1993-1-1 2005, 26–28.) Putkilinjojen standardissa SFS-EN 1993-4-3 on vaativampi murtovenymän vaatimus. Siinä vaaditaan murtovenymäksi vähintään 20 % ja myös hitseille on vaativammat vaatimukset. (SFS-EN 1993-4-3+AC 2007, 14–15.)

### 7.2 Vaatimusten täyttyminen painelaiteteräksillä

Laskuputkissa yleensä käytetyt painelaiteteräkset ovat 16Mo3 ja 15NiCuMoNb5-6-4. Tarkistetaan täyttävätkö ne rakenneputkille esitetyt vaatimukset. Vetomurtolujuuden ja myötörajan suhteen on oltava vähintään 1,1. Huoneenlämpötilassa 16–40 mm paksun 16Mo3-teräksen myötöraja on 270 MPa ja sen murtoraja on vähintään 450 MPa, joka on

selvästi enemmän kuin 1,1 kertaa sen myötöraja. Vastaavat arvot ovat 15NiCuMoNb5-6-4-teräkselle 440 MPa ja 610 MPa, joiden suhteeksi tulee 1,4 eli ehto toteutuu. Murtovenymäksi vaaditaan vähintään 20 % standardissa SFS-EN 1993-4-3. 16Mo3-teräksen murtovenymä on 22 % pitkittäin ja 20 % poikittain. Sen sijaan 15NiCuMoNb5-6-4-teräksen murtovenymä on vain 19 % pitkittäin ja 17 % poikittain, joten se ei täytä standardin SFS-EN 1993-4-3 rakenneteräksille asettamaa vaatimusta. Todennäköisesti pitkittäisellä venymällä on enemmän merkitystä kuin poikittaisella ja tämän pienen eron voinee korvata varmuusluvulla tai, jos valmistuserissä on eroja, voi valita valmistuserän, jossa murtovenymä on tarpeeksi suuri. Myötövenymät ovat molemmilla teräksillä enintään 0,2 %, joten niiden murtovenymät ovat paljon enemmän kuin 15 kertaa myötövenymä. (SFS-EN 10216-2 2014, 30.)

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyössä selvitettiin Eurokoodi-järjestelmän soveltuvuutta laskuputken mitoitukseen sekä paineen vaikutusta laskuputken nurjahdukseen ja nurjahduksen mitoitukseen tehtiin Mathcad-laskentapohja eurokoodi 3:a mukaillen. Eurokoodi-järjestelmää mukaillevalla mitoitusmenetelmällä tulee varmuuslukuista vain niin suuria kuin niiden tarvitsee olla, eikä rahaa tai luonnonvaroja mene hukkaan.

Kun mitoitus tehdään Eurokoodi-järjestelmän mukaan, se on tehtävä kokonaan ja täsmällisesti sen mukaisesti tai muuten mitoitus voi olla epävarmalla puolella. Eurokoodi-järjestelmään eivät kuitenkaan kuulu painelaiteteräkset eivätkä pilarit, joiden sisällä on paine ja lämpötila on 350°C. Eurokoodin referointi on kuitenkin sallittu, vaikka suunnittelutapaus ei kuulu eurokoodiin. Suunnittelijan on silloin oltava kokenut eurokoodin käyttäjä ja sen sisältöä ymmärtävä, jotta hän kykenee yhdistämään luotettavasti paineen, lämpötilan ja materiaalin vaikutukset palkki-pilari-kehän nurjahdusta koskevien kaavojen kanssa. Mitoituksen tekemiseksi on ymmärrettävä plastinen teoria, toisen kertaluvun analyysi, mitä eurokoodi 3:ssa tarkoitetaan kehärakenteen epäsäännöllisyydellä, miten koko kehän sivusiirtyvyys lasketaan, mikä on efektiivinen aksiaalinen voima ja miten rakenteen kuormat tulee luokitella ja yhdistellä.

Eurokoodi-järjestelmään tutustumista ei kannata tehdä lukemalla pelkästään itse standardeja, koska silloin tekee helposti eri tulkinnan asioista kuin asiantuntijoiden tulkinta, ja lisäksi sen ymmärtämiseen tarvitsee teoriapohjan kehärakenteiden mitoituksesta. Eurokoodin tulkinnan vaikeus johtuu siitä, että siinä annetaan aluksi yleisohje, joka saattaa kumoutua, jos jokin myöhemmin annetuista aiemman kanssa ristiriitaisista lisäohjeista soveltuu rakenteeseen. Lisäksi ohjeiden soveltaminen riippuu siitä, mikä analyysitapa on valittu ja omalle rakenteelle merkitykselliset ohjeet on etsittävä siihen liittymättömien ohjeiden seasta.

Sisäinen paine vaikuttaa laskuputkeen efektiivisen aksiaalisen voiman (5) kautta. Se aiheuttaa sekä efektiivisen puristavan voiman että yhtä suuren vetävän voiman putken päistä. Sen vuoksi sisäinen paine ei pienennä laskuputken puristuskuormaa, jolloin määräävä murtorajatila stabiiliuden menetyksen suhteen on korkeimmassa paineessa ja läm-

pötilassa, koska silloin materiaalin myötöraja ja kimmokerroin ovat pienimmillään. Poissonin efekti ei aiheuta putkeen merkittäviä jännityksiä, koska putki pääsee lähes vapaasti lyhenemään. Paineen aiheuttama pyöreidenpalautumisen vaikutus ei myöskään ole merkittävä, koska putken mahdollinen käyristymä, ja sitä myötä soikiutuminen, on niin vähäinen, että se ei juurikaan vaikuta jäyhyysmomenttiin, vaikka putkessa ei olisi painetta. Pyöreidenpalautumisen vaikutuksella olisi merkitystä, jos lommahdus rajoittaisi putken kestävyyttä.

Lämpötilan vaikutukset voidaan huomioida alennetun kimmokerroimen ja myötörajän avulla. Lisäksi paineen vaikutus on stabiiliuden suhteen merkityksetön. Kun lisäksi materiaalit toteuttavat niille asetetut ehdot, voidaan eurokoodin nurjahdusmitoitustietoa käyttää. Lisäksi vaaditaan, että kuormien yhdistely ja voimasuureiden ratkaisu kehän kokonaisanalyysillä on tehty Eurokoodi-järjestelmän vaatimusten mukaisesti. Materiaalit voivat vaatia myös suuremman varmuusluvun, kuten esimerkiksi nurjahduskestävyydessä käytettiin ruostumattomalle teräkselle varmuuslukua 1,1, vaikka muuten se oli 1,0.

Jatkotoimenpiteiksi ehdotetaan kehärakenteen kokonaisanalyysin tekemistä FEM-ohjelmistolla, koska kehän kokonaisanalyysi käsin olisi monimutkaista ja veisi liian kauan. Lisäksi kehän nykyinen rakenne tukeutuu sivusuunnassa lähes kokonaan sykloniin ja hiekkalukkoon, minkä aiheuttamat tukireaktiot ja vaikutukset niiden kestävyysiin ovat epäselviä, kun huomioidaan alkuepätkätkuudet ja sivusiirtävyys. Voi olla kannattavaa selvittää voidaanko laskuputkien tukijärjestelmä suunnitella toisella tavalla siltä varalta, että kaikkiin sivusuuntaisen voiman perustuksille asti siirtäviin rakenteisiin laskuputkista syntyviä rasituksia ei huomioida riittävästi.

## LÄHTEET

Bernuzzi, C. & Cordova, B. 2016. Structural Steel Design to Eurocode 3 and AISC Specifications. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.

Catinaccio, A. 2009. Pipes under Internal Pressure and Bending. CERN Notes. Experimental Physics Technical Notes 4/2009, 1–8.  
<http://cds.cern.ch/record/1224245/files/PH-EP-Tech-Note-2009-004.pdf>

Chantrain, P. Schleich, J. Conan, Y. & Mauer T. 1996. Design Handbook for Braced or Non-Sway Steel Buildings according to Eurocode 3. Luettu 9.3.2018.  
[http://sections.arcelormittal.com/fileadmin/redaction/4-Library/2-Steel\\_research\\_reports/1-Steel\\_structures\\_EC/Design\\_Handbook\\_EC3.pdf](http://sections.arcelormittal.com/fileadmin/redaction/4-Library/2-Steel_research_reports/1-Steel_structures_EC/Design_Handbook_EC3.pdf)

Craveiro, M. Neto, A. 2016. Buckling of Pipelines due to Internal Pressure. XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. Brasília.  
<http://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/viewFile/24432/17493>

DNV-RP-F110. 2007. Global Buckling of Submarine Pipelines. Structural Design due to High Temperature/High Pressure. Luettu 22.3.2018. Høvik: Det Norske Veritas DNV. <http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNV/codes/docs/2007-10/RP-F110.pdf>

Dvorkin, E. Toscano, R. 2001. Effects of internal/external pressure on the global buckling of pipelines. First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, 159–164. [http://www.simytec.com/docs/int\\_ext\\_pressure.pdf](http://www.simytec.com/docs/int_ext_pressure.pdf)

Galambos T. & Surovek, A. 2008. Structural Stability of Steel. Concepts and Applications for Structural Engineers. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.

Kaitila, O. Kumar, R. Martikainen, L. Saarinen, E. Leskelä, M. Heinisuo, M. Inha, T. Kemppi, M. Yrjölä, P. Jyrkäs, K. Pekkinen, T. & Ilveskoski, O. 2014. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3 –oppikirja. 2. painos. Helsinki: Teräsrakenneyhdisty ry.

Karhunen, J. Lassila, V. Pyy, S. Ranta, A. Räsänen, S. Saikkonen, M. & Suosara, E. 2006. Lujuusoppi. 10. muuttumaton painos. Helsinki: Hakapaino Oy.

Kouhi, J. 2006. Teräsrakenteiden mitoitus Eurocode 3:n (SFS-EN 1993) mukaan. Rakentajain kalenteri 102, 405–416.  
<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK060101.pdf>

Kouhi, J. 2009. Eurocode 3 käsikirja EN 1993-1-1. Versio 1.1.2009 Käsikirjoitus.

Polenta, V. Garvey, S. Chronopoulos, D. Long, A. Morvan, H. 2015. Effects of Pipe Curvature and Internal Pressure on Stiffness and Buckling Phenomenon of Circular Thin-Walled Pipes. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Materials and Metallurgical Engineering 9 (2), 278–282.  
<http://waset.org/publications/10000513/effects-of-pipe-curvature-and-internal-pressure-on-stiffness-and-buckling-phenomenon-of-circular-thin-walled-pipes>

Ruukki. 2012. Rakenneputket. EN 1993 –käsikirja 2012. [pdf]. Luettu 9.3.2018.  
[https://software.ruukki.com/Ruukki-Rakenneputket-Kasikirja-2012\\_PDF-versio.pdf](https://software.ruukki.com/Ruukki-Rakenneputket-Kasikirja-2012_PDF-versio.pdf)

Salmi, T. & Pajunen, S. 2010. Lujuusoppi. Tampere: Pressus Oy.

SFS. 2014. Eurokoodit. EN-standardit. Rakentamismääräyksistä eurokoodeihin. Luettu 9.3.2018. [https://www.sfs.fi/files/309/SFSEuroKesite27062014\\_\(2\)1.9.2014.pdf](https://www.sfs.fi/files/309/SFSEuroKesite27062014_(2)1.9.2014.pdf)

SFS-EN 10216-2. 2014. Saumattomat painelaiteteräsputket. Tekniset toimitusehdot. Osa 2: Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräsputket. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 9.3.2018. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN 1990. 2006. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 9.3.2018. Vaatii käyttöoikeuden.  
<https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN 1993-1-1. 2005. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 9.3.2018. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN 1993-1-8. 2005. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 9.3.2018. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN 1993-4-3+AC. 2007. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 4-3: Putkilinjat. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 25.3.2018. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

Sivill, A. 2016. Rakenneanalyysi. [pdf]. Luettu 9.3.2018.

[http://www.betoniyhdistys.fi/media/sivill\\_ec-1994-koulutus-rakenneanalyysi-2016.pdf](http://www.betoniyhdistys.fi/media/sivill_ec-1994-koulutus-rakenneanalyysi-2016.pdf)

Valmet. N.d. CFB-boiler. [online-opetussovellus]. Luettu 12.3.2018. Vaatii käyttöoikeuden. <https://myacademy.valmet.com/course/view.php?id=21>

Valmet. 2017. Valmet. Johtavaa prosessiteknologiaa, automaatiota ja palveluita, sellu-, paperi- ja energiateollisuudelle. [pdf]. Luettu 14.3.2018.

[http://www.valmet.com/globalassets/about-us/valmet-in-brief/general-presentation\\_2017\\_10\\_fin\\_final.pdf](http://www.valmet.com/globalassets/about-us/valmet-in-brief/general-presentation_2017_10_fin_final.pdf)

Valmet. 2017. Valmet lyhyesti. Historia. [www-sivu]. Luettu 14.3.2018.

<http://www.valmet.com/historia/>

Valmet. 2018. Vuosikatsaus 2017. Edistys rakentuu 220-vuotiselle historialle. [pdf]. Luettu 14.3.2018. <http://www.valmet.com/globalassets/investors/reports--presentations/annual-reports/2017/valmet-vuosikatsaus-2017.pdf>

Vesterinen, J. 2012. Maa, joka maksoi velkansa: Suomen sotakorvaukset 1944–1952. Helsinki: Alfamer

Ympäristöministeriö. 2016. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet. [pdf]. Luettu 9.3.2018. <http://www.ym.fi/download/noname/%7BC139DD68-CA4E-4363-AF62-50F939498433%7D/123827>

Ympäristöministeriö. 2017. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Teräsrakenteet. [pdf]. Luettu 9.3.2018. <http://www.ym.fi/download/noname/%7BD829E0A3-9D8E-4730-8E6C-EF076B4642F2%7D/126585>