



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Tommi Pulkkinen

Varavoimakoneen pakoputken suunnitteluohe

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

20.4.2020

Tekijä Otsikko	Tommi Pulkkinen Varavoimakoneen pakoputken suunnitteluohje
Sivumäärä Aika	39 sivua + 1 liite 20.4.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	osastopäällikkö Pekko Sinervo, Ramboll Finland Oy yliopettaja Jukka Yrjölä
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli luoda ohjeistus varavoimakoneen pakoputken suunnitteluun. Varavoimakone koostuu dieselmoottorista ja generaattorista, ja sen tarkoitus on varmentaa sähkön saanti kriittisiin toimintoihin siltä varalta, että sähköntoimitus katkeaa. Tässä insinööriyössä luotiin sanallisen ohjeistuksen lisäksi Excel-pohjainen mitoitustyökalu, jolla saadaan mitoitettua varavoimakoneen pakoputken koko, laskettua putkiosuuk-sien lämpölaajeneminen ja laskettua pakoputken vaatima eristyspaksuus.</p> <p>Työ toteutettiin tutustumalla varavoimakoneita ja niiden apulaitteita käsitteleviin ohjekortteihin, käsikirjoihin ja muihin verkkomateriaaleihin. Näiden lisäksi käytettiin apuna kirjallista materiaalia, toteutettuja suunnitelmia ja alan ammattilaisten haastatteluja.</p> <p>Opinnäytetyössä käytiin lävitse vaihe vaiheelta varavoimakoneen pakoputken suunnitteluun liittyvät asiat. Keskeisiksi asioiksi havaittiin pakoputken koon mitoittaminen, materiaallivalinta, suuri lämpölaajeneminen ja eristys. Muiksi merkittäviksi asioiksi havaittiin pakoputken reitti, pakokaasun ulospuhalluspaikka, kannakointi ja pakoputken vesitys eli sade- ja kondenssiveden poiston järjestäminen.</p> <p>Pakoputken koon määrittäväksi tekijäksi selvitettiin 3 kPa:n enimmäispainehäviö äänen- vaimentimen jälkeen. Eristyksen osalta määrittäväksi asiaksi selvitettiin eristeen pintalämpötilan vaatimus 70 °C. Pakokaasun korkeasta 600 °C:n lämpötilasta johtuvaa suurta lämpölaajenemista puolestaan hallitaan suorien putkiosuuk-sien välille asennettavilla paljetasaimilla.</p> <p>Insinööriyön lopputuloksena syntyi ohjeistus varavoimakoneen pakoputken suunnitteluun. Tämän lisäksi tuotettiin Excel-mitoitustyökalu, jolla pystyy mitoittamaan varavoimakoneen pakoputken koon, laskemaan putkiosuuk-sien lämpölaajenemiset ja laskemaan pakoputken vaatiman eristyspaksuuden.</p>	
Avainsanat	varavoimakone, pakoputki, mitoitus, eristys, paljetasain

Author Title	Tommi Pulkkinen Design Manual for Diesel Generator Exhaust Systems
Number of Pages Date	39 pages + 1 appendix 20 April 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Design
Instructors	Pekko Sinervo, Department Manager Jukka Yrjölä, Principal Lecturer
<p>The purpose of this final year project was to create a guideline and a dimensioning tool for the design of diesel generator exhaust systems, a task not mastered profoundly in the commissioning company. In addition, there were no integrated and complete guidelines for the design of diesel generator exhaust systems.</p> <p>The final year project was based on instruction cards for diesel generators and their auxiliaries. Furthermore, literature and online sources, interviews with experts, and implemented plans were used.</p> <p>As a result of this project, a written guideline for the design of diesel generator exhaust systems was created. In addition to the written guide, an Excel-based dimension tool was also created for the dimensioning of exhaust pipe sizes and required insulation thicknesses.</p> <p>The extensive guideline for the design of diesel generator exhaust systems created in this final year project combines information from various sources in a single document, making the design task easier. All in all, this final year project gives the company more know-how and resources.</p>	
Keywords	genset, exhaust, dimensioning, insulation, expansion joint

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Varavoimakoneet yleisesti	2
3	Varavoimakoneen sijainti	4
3.1	Pakokaasujen ulospuhallus	5
3.2	Pakoputkiston rakenne	8
3.3	Pakoputken reitti	10
3.4	Pakoputken vesitys	12
4	Varavoimakoneen pakoputken mitoitus	13
4.1	Pakoputken materiaali	13
4.2	Pakoputken koko	14
4.3	Pakoputken eristys	20
5	Lämpölaajenemisen hallinta	26
5.1	Putkimateriaalien lämpölaajeneminen	26
5.2	Paljetasaimet	26
5.3	Pakoputken kannakointi	30
5.4	Paisuntakaaret	33
6	Yhteenveto	34
	Lähteet	37

Liitteet

Liite 1. Varavoimakoneen pakoputken mitoitusyökalu

Lyhenteet

DN	Diameter Nominal, nimellinen halkaisija millimetreissä
ISO	International Organization for Standardization, kansainvälinen standardisoimisjärjestö
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
YMA	Ympäristöministeriön asetus

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena on laatia Ramboll Finland Oy:n käyttöön ohjeistus varavoimakoneen pakoputken suunnitteluun. Työn aihe valikoitui sen perusteella, että yrityksen sisällä aihealueeseen on haluttu perehtyä syvällisemmin ja laatia varavoimakoneen pakoputken suunnitteluun selkeä suunnitteluohje ja mitoituslasku. Koska pakoputken suunnittelu ei ole pelkästään putkikoon mitoittamista, on tarkoitus, että tätä kautta LVI-suunnittelija omaisi aiheeseen paremmat tiedot. Insinööriyö tuo arvoa ennen kaikkea itse tekijälle, josta on tarkoitus tulla tämän kyseisen aihealueen erityisasiantuntija. Tämä puolestaan luo arvoa yritykselle, kun osaamista tähän erikoisalaan löytyy talon sisäältä.

Työssä käydään läpi vaihe vaiheelta keskeisimmät pakoputkeen suunnitteluun vaikuttavat tekijät. Tarkasteltavia asioita ovat pakoputken materiaali, mitoittaminen, eristys, kannakointi ja hyvin keskeisenä osana putken lämpölaajeneminen. Lämpölaajenemisen osalta pyritään erityisesti käsittelemään paljetasaimia, joita käytetään talotekniikassa muuten hyvin harvoin. Lisäksi työssä käsitellään pakoputken mahdollisia reititysvaihtoehtoja ja pakokaasujen ulospuhallusta. Lämpölaajenemisen hallitsemisen osalta tässä opinnäytetyössä pääpaino on paljetasaimissa, mutta myös harvemmin käytettyjä lämpölaajenemiskaaria sivutaan ajatuksien herättämiseksi.

Työn tarkoituksena on sanallisen ohjeistuksen lisäksi luoda pakoputken mitoittamiseksi Excel-pohjainen mitoitus/suunnittelulasku. Työkalulla on tarkoitus pystyä laskemaan pakoputken aiheuttama painehäviö, jonka avulla saadaan mitoitettua kuhunkin tilanteeseen sopivan kokoinen pakoputki. Pakoputken eristykselle on asetettu vaatimuksia, jotka tulevat tässä työssä myöhemmin ilmi, joten mitoituslaskun tarkoituksena on myös laskea kuhunkin tilanteeseen riittävän paksu eristys. Työkalua voidaan käyttää apuna mitoittaessa keskeisimmät asiat vaativammassa mitoituslaskussa, joissa ei selvitä pelkän taulukkomitoituksen avulla. Tämän lisäksi työkalun tarkoituksena on kertoa suunnittelijalle näissä tapauksissa asiat, jotka suunnittelussa tulisi huomioida.

2 Varavoimakoneet yleisesti

Varavoimakoneen tarkoitus on varmentaa sähkön saanti siltä varalta, että sähköntoimitus katkeaa. Taloteknisissä sovellutuksissa varavoiman lähteenä käytetään dieselgeneraattoreita. Varavoimakone eli tässä tapauksessa dieselgeneraattori koostuu dieselmoottorista ja generaattorista, joka tuottaa sähköä kiinteistön kiinteään sähköverkkoon. Koneet voivat olla joko siirrettäviä tai kiinteitä. Kuvassa 1 näkyy kaksi konttimallista maisemoitua varavoimalaitosta. Varavoimakoneet ovat tyypillisesti teholtaan 50–2500 kW. [1, s. 3.] Varavoimakone käynnistyy automaattisesti muutamien sekuntien kuluttua sähköverkon katkettua. Siihen voidaan liittää sellaiset kuormat, jotka sallivat enintään 15 sekunnin katkot. Tällaiset varavoimakoneet ovat standardin ISO 8528-1 mukaisia long-break set -järjestelmiä. [1, s. 30.]



Kuva 1. Kaksi maisemoitua konttimallista varavoimalaitosta [1, s. 20]

Usein sähköverkon varmistaminen varavoimakoneella koko kiinteistöön tulisi ylimitoituksi ja kalliiksi. Tämän vuoksi varavoimaverkkoon kytketään tyypillisesti vain kiinteistön tärkeimmät sähkölaitteet. [2.] Vaatimus kiinteistön käyttövarmuustasolle vaihtelee tilanteen mukaan. Sähkönsaannin katkeamisesta ja toiminnan keskeytymisestä voi seurata

erilaisia vahinkoja riippuen kohteesta. Tämä vaikuttaa siihen, kuinka suuri osa kiinteistön sähkökuormasta on varmistettava varavoimakoneella. Lisäksi investoitava summa arvioidaan sähkönsaannin katkeamisesta aiheutuvien vahinkojen perusteella. Nämä sähkökatkoksen aiheuttamat vahingot voivat olla joko henkilö- tai yhteiskunnalliseen turvallisuuteen liittyviä tai tuotannollisia eli taloudellisia. [1, s. 29; 2.] Tyypillisesti varavoimalla varmennettavia asioita ovat esimerkiksi lämmönjakelu, ilmastointi ja valaistus. Näiden lisäksi julkisissa rakennuksissa varavoimalla varmennetaan tyypillisesti poistumistievalaistus, paloilmoitus- ja varashälytinjärjestelmät sekä savunpoistopuhaltimet. [2; 3.]

Varavoimalaitoksen suunnittelussa LVI-suunnittelija vastaa laitoksen apujärjestelmistä. Apujärjestelmiin kuuluvat ilmastointi, jäähdytys, pakoputkisto ja polttoainejärjestelmä. Suunnittelijan tehtäviin kuuluu niiden suunnittelu toimivaksi kokonaisuudeksi muiden järjestelmien kanssa. Suunnittelija määrittää apujärjestelmien tilantarpeen ja antaa muiden suunnittelualojen tarvitsemat lähtötiedot. [1, s. 14.] Tässä opinnäytetyössä käsitellään varavoimakoneen pakoputkiston suunnittelua. Taloteknisen suunnittelun tehtäväluettelosta TATE18, ohje ST 41.10 löytyvät taulukoituna kohteet, jotka pitää varustaa varavoimakoneella. Esimerkkinä tällaisista kohteista voidaan mainita sairaalat ja valtakunnalliset väestösuojat. [4, s. 30 & 32.] Kuvassa 2 näkyy tyypillinen varavoimahuone.



Kuva 2. Tyypillinen varavoimahuone [5]

3 Varavoimakoneen sijainti

Varavoimakoneen sijaintiin vaikuttavat seuraavat asiat:

- kuljetusreitti
- asennuksen helppous
- liittyminen kiinteistön sähköverkkoon
- häiritsevyys
- mahdollinen laajennusvara
- käyttövarmuus.

Tyypillisesti varavoimakone sijoitetaan kiinteistössä lähemmäksi sähköpääkeskuksen kanssa. Tämä muodostaa kiinteistössä painopisteen, josta kiinteistö saa sähkösyöttönsä normaali- ja varavoimatilanteessa. Asennuksen helppouden ja kustannusten kannalta on yksinkertaisinta, että varavoimalaitos sijoitetaan kiinteistön ensimmäiseen kerrokseen, jossa on vähintään yksi ulkoseinä. Tällöin pakoputken reitittäminen on helppoa, ja itse varavoimakoneen kuljetus sen sille varattuun tilaan on helppoa. [1, s. 49.]

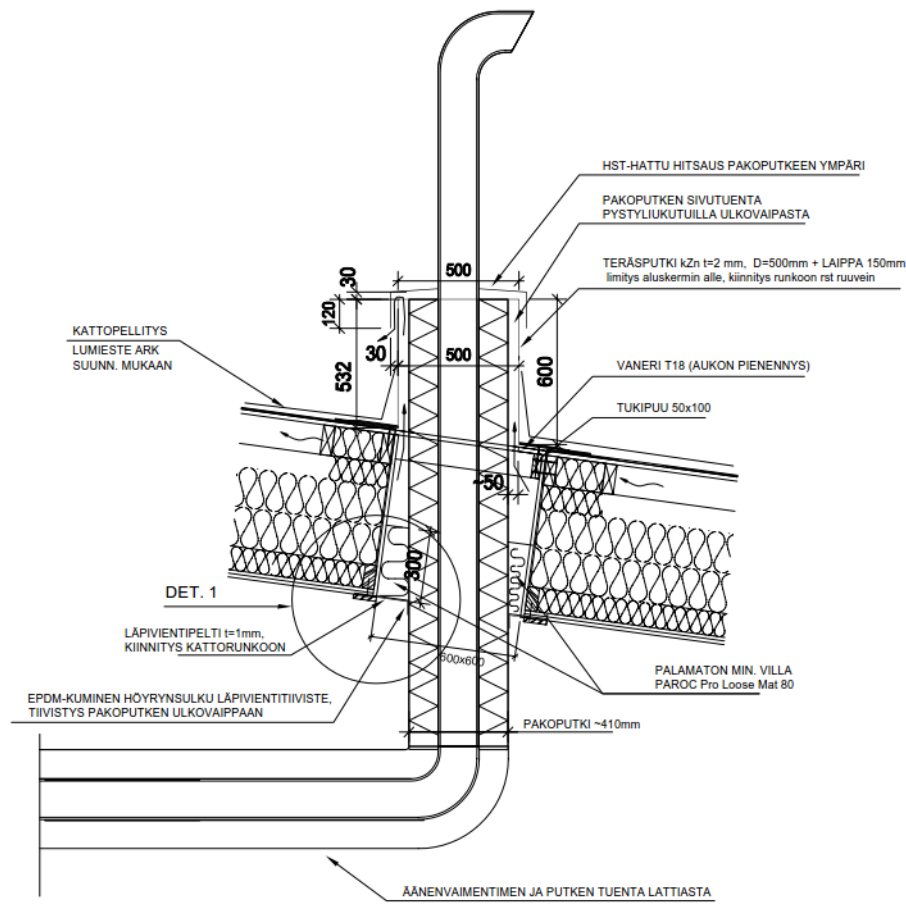
Varavoimakone voi olla joko siirrettävä tai kiinteä. Siirrettävän eli konttimallisen varavoimakoneen pakoputken suunnittelu muodostaa mitoituksen kannalta yksinkertaisen tilanteen. [1, s. 49.] Näissä tapauksissa pakoputki ohjataan kontin seinästä ulos, jolloin selvittää pelkällä taulukkomitoituksella. Tätä käsitellään luvussa 4.2. Vastaavanlaisen tilanteen muodostaa varavoimakone, joka on sijoitettu ensimmäiseen kerrokseen tilaan, jossa on vähintään yksi ulkoseinä. [6, s. 61.] Toisen ääripään muodostaa tilanne, jossa varavoimakone on sijoitettu keskelle rakennusmassaa. Tämänkaltaisessa tilanteessa pakoputki joutuu mutkittelemaan paljon, ja vastaavasti sen pituus saattaa olla useita kymmeniä metrejä pitkä. Näiden tapauksien osalta on tehtävä aina painehäviölaskelma ja putkiston kannakointiin sekä lämpölaajenemisen hallintaan on kiinnitettävä erityistä huomiota.

Häiritsevyyden kannalta varavoimakone voidaan sijoittaa mahdollisimman kauas tiloista, joissa oleskellaan jatkuvasti. Käydessään kone tuottaa melua, tärinää, lämpöä ja pako-kaasua, jotka voivat olla häiriöksi. [1, s. 49.]

3.1 Pakokaasujen ulospuhallus

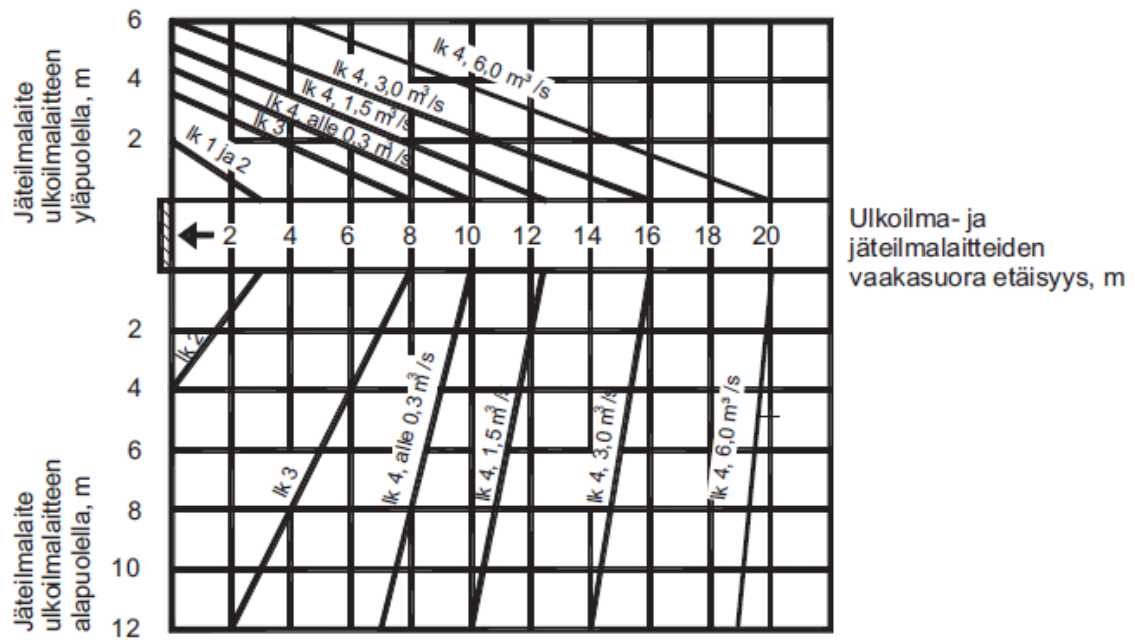
Pakokaasujen ulospuhalluspaikassa noudatetaan Suomen rakentamismääräyskokoelman osaa E3, Pienet savuhormit [7, s. 4]. Tämä kumottu rakentamismääräys on korvattu tätä vastaavilla ympäristöministeriön uusilla rakentamista koskevilla asetuksilla. Uusittuja asetuksia käsitellään esimerkiksi paloturvallisuuden osalta asetuksessa YMA 848/2017 ja pienten (<120 kW) tulisijojen savuhormien osalta asetuksessa YMA 745/2017. Tärkeimmät velvoitteet ilmenevät valtioneuvoston asetuksesta 1065/2017. [1, s. 59–60.] Rakentamismääräyskokoelman osa E3 määrää pakoputken osalta muun muassa, että sen on kestettävä oma painonsa ja muut ulkoiset kuormat. Edellä mainituilla ulkoisilla kuormilla tarkoitetaan tuuli- ja lumikuormia. Mahdollisissa lujuuslaskelmissa tuulikuormana voidaan käyttää arvoa $1,5 \text{ kN/m}^2$. [8, s. 6–7.]

Korkeuden osalta määrätään, että pakoputken on ulotuttava vesikaton yläpuolelle. Vaihtoehtoisesti pakoputken pää voidaan sijoittaa siten, että saavutetaan riittävä paloturvallisuus. [8, s. 6–7.] Tarkempi ohjeistus on, että pakoputki sijoitetaan mahdollisimman lähelle katon harjaa, jotta pakoputki on riittävän kaukana syttyivistä rakenteista tai paikoista, joihin pääsee kerääntymään puiden lehtiä ja muita roskia [6, s. 59]. Pakoputken pään korkeudesta annetaan lisäksi ohje, että sen pään tulisi olla vähintään 0,8 m:n etäisyydellä vesikaton kanteesta lyhimmältä puolelta mitattuna [8, s. 7]. Riittävällä korkeudella vältetään myös lumen kinostuminen. Lumen ja veden osalta on huolehdittava, että ne eivät pääse mahdolliseen eristeeseen. [1, s. 60.] Kuvassa 3 on detaljipiirustus vesikaton läpiviennistä, jolla pakoputki voidaan tuoda tiiviisti rakenteen läpi.



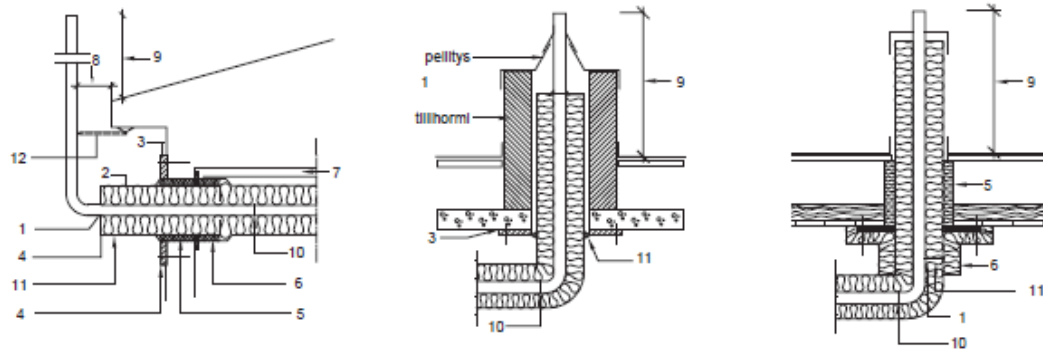
Kuva 3. Pakoputken kattoläpivienti [9.]

Pakokaasun ulospuhalluksen osalta on myös kiinnitettävä huomiota siihen, etteivät pakokaasut jää leijaillemaan ympäristöön tai aiheuta nokeentumista. Tämän vuoksi on suositeltavaa, että pakokaasut puhallettaisiin suoraan ylöspäin. [1, s. 59; 7, s. 4.] Pakokaasut eivät silloin jää ympäristöön leijaillemaan, jos pakoputken pää on sijoitettu riittävän korkealle tai etäälle muista rakennuksista ja ihmisistä [1, s. 49; 3]. Pakoputki on kuitenkin mahdollista suunnata sivuun 90°:n kulmalla, jolloin rajoitetaan lumen ja sadeveden pääsyä putkeen [1, s. 62–63; 3]. Tällöin pakoputki on hyvä lisäksi viistää 45°:n kulmaan, joka edistää tätä rajoittavaa vaikutusta [3]. Huomionarvoista on myös, että pakoputken ulospuhallus sijoitetaan ympäristöministeriön asetuksen 1009/2017 soveltamisen tueksi tehdyn Sisäilmasto ja ilmanvaihto -oppaan mukaan vähintään 8 m:n etäisyydelle ulkoilmalaitteista. Tarkempi vaadittu etäisyys selviää kuvasta 4. Kuvasta luetaan poistoilmaluokan 4 mukaisia viivoja. Poistoilmaluokka 4 kuvaa poistoilmaa, joka sisältää pahanhajuisia tai epäterveellisiä epäpuhtauksia huomattavasti enemmän kuin sisäilman hyväksyttävät pitoisuudet. Kuvassa viivojen väliarvot voidaan arvioida. [10, s. 28–32.]



Kuva 4. Jäte- ja ulkoilmalaitteiden väliset etäisyydet [10, s. 32]

Varavoimakoneen pakokaasujen lisäksi ulospuhalluspaikan suunnittelussa on lisäksi otettava huomioon pakoputken voimakas ääni. Käytettäessä yhtä vakioranteista äänen- vaimenninta, arvioidaan äänitason olevan noin 80–90 dBA 7 metrin etäisyydeltä pako- putkesta. [1, s. 60; 7, s. 4.] Meluhaittaa on mahdollista vähentää lisäämällä lisä-äänen- vaimennin pakoputken loppupäähän [1, s. 60; 3]. Lisä-äänenvaimentimen lisäyksessä on huomioitava kasvava virtausvastus, joka saattaa vaikuttaa myös pakoputken kokoon ja sitä kautta pakoputken tilavaraukseen [7, s. 6]. Lopullinen pakoputken paikka hyväk- sytetään paikallisilla viranomaisilla [7, s. 4]. Kuvassa 5 on esitetty esimerkkejä pakopu- ten seinä- ja kattoläpivienneistä ja luvun 3.3 kuvassa 7 on esimerkkejä pakoputken ulos- puhalluspaikoista.



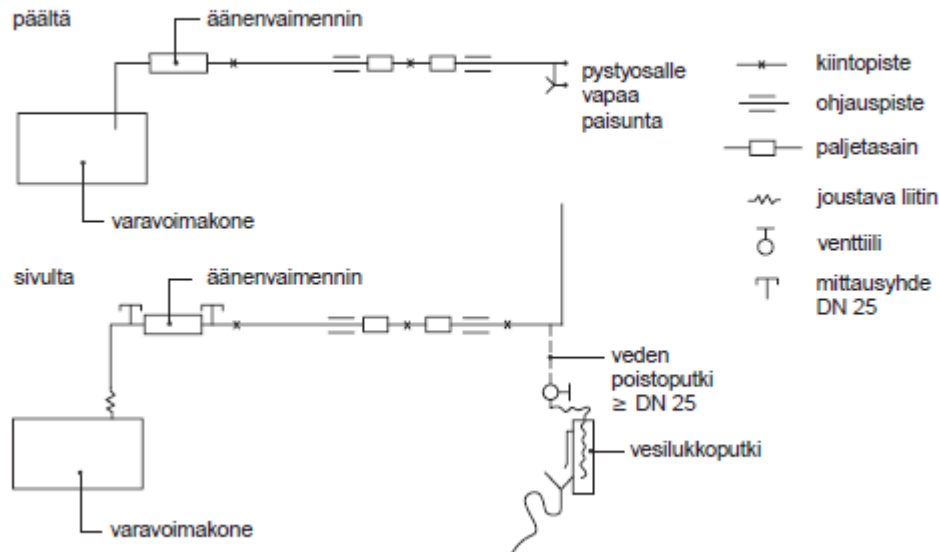
1. Sisäputken kiintopiste
2. Pitkä vaippa estää lämmön johtumisen seinään ja kuuman ilman nousun räystäään alle.
3. Tiiviste, sadevettä ja kuumaa kestävä
4. Nokka, joka ohjaa sadeveden tippumaan.
5. Eriste, joka estää kylmän johtumisen sisäseinään ja toimii palo-osastointia vastaavana eristyksenä
6. Palo-osastoinnin vaatima eristys
7. Puukattoa vasten mahdollisena lisäeristeenä mineraalilevy ja ilmarako *)

8. Etäisyys räystäästä *)
 9. Korkeus savuhormeja koskevien ohjeiden mukaan (RakMK E3, kohta 3.1.5, kuva 4)
 10. Hitsi- tai laippaliitos
 11. Vuotovesireikä
 12. Tuki katolta syöksyvää lunta ja jäätä vastaan
- *) Mitoitetaan RakMK E8 Muuratut tulisijat. Ohje 1985, kohdan 2.3, taulukon 1 mukaan.

Kuva 5. Esimerkkejä pakoputken seinä- ja kattoläpiviennistä [7, s. 5]

3.2 Pakoputkiston rakenne

Varavoimakoneen pakoputki voidaan reitittää usealla eri tavalla. Putkiston rakenne on kuitenkin aina lähes samanlainen. Kuvassa 6 näkyy pakoputkikaavio, josta voi nähdä varavoimakoneen pakoputken rakenteen. [6, s. 61.] Pakoputki lähtee varavoimakoneelta joustavalla liittimellä. Liittimen on kestävä pakokaasun korkea lämpötila, joka on yleensä noin 600 °C. Korkean lämpötilan lisäksi liittimen valinnassa on huomioitava varavoimakoneen aiheuttama käyntitärinä ja koneen käynnistyksestä sekä pysäytyksestä aiheutuva voimakas ravistelu. Joustava liitin on kiintopistekannakoitava siten, että lämpölaajenemisesta aiheutuva liike rajoittuu enintään 10 mm:iin sekä pysty- että sivusuunnassa. [1, s. 93.]



Kuva 6. Pakoputkikaavio [7, s. 4]

Joustavan liittimen jälkeen seuraava komponentti on äänenvaimennin, joka tulee kannakoida katosta. Nämä molemmat osat kuuluvat LVI-urakkaan varavoimakoneessa, joka on hajautettua mallia, sillä urakkaraja kulkee dieselmoottorin liitäntälaipassa. Ne on kuitenkin syytä sisällyttää varavoimakoneen valmistajan toimitukseen. [1, s. 62–64.] Tämä johtuu siitä, että äänenvaimentimien osalta valmistaja saa valittua juuri moottorin äänispektriin sopivan laitteen. Joustavan liittimen osalta puolestaan saadaan näin varmistettua, että se on oikean kokoinen ja tyyppinen. Tällä myös varmistetaan siitä, että joustava liitos tulee ylipäättänsä asennettua. [11.] Pakettimallisissa koneissa joustava liitäntäputki ja äänenvaimennin on luontevaa asentaa jo tehtaalla, jolloin urakkaraja alkaa äänenvaimentimen päästä [1, s. 64].

Seuraavana on pakoputken vesitys, josta kerrotaan lisää luvussa 3.4. Sitä seuraa lämmöneristetty läpivienti joko seinän tai katon läpi. Viimeisenä tulee mahdollinen lisääänenvaimennin, joka on yleensä tarpeen pidemmissä pakoputkistoissa. [6, s. 61.] Lisääänenvaimennin tulee myös tarpeeseen, mikäli pakoputki päättyy ihmisten oleskelualueen lähelle, jolloin sillä varmistetaan riittävän alhainen äänitaso [3].

Putkistossa on näiden lisäksi mahdolliset paljetasaimet lämpölaajenemisen hallitsemiseen [7, s. 4]. Putkisto sisältää myös suunnitellut kiintopiste- ja liukukannakoinnit, jotka

ohjaavat lämpölaajenemisen toivottuun suuntaan. Näin rakenteet eivät pääse rikkoutumaan. [12, s. 4.]

3.3 Pakoputken reitti

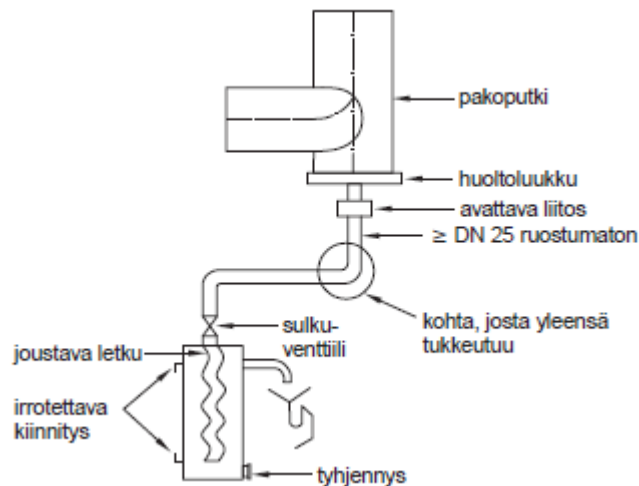
Pakoputki voidaan reitittää kiinteistön ulko- tai sisäpuolella, suoraan ulkoseinän läpi tai maan alta. Näistä yksinkertaisin tapa on suoraan ulkoseinän lävitse. Tässä reititysvaihtoehdossa on yleensä syytä suunnata pakoputki 45°:n kulmassa ylöspäin pakokaasun suuntaamiseksi. [6, s. 61.] Tällä vältetään, ettei pakokaasu jää leijaillemaan. Pakoputki kannattaa tässä tapauksessa kuitenkin viistää pystysuoraksi, jotta sadevettä ei pääsisi putkeen niin herkästi [3]. Katolle nostettujen pakoputkien osalta tulee huomioida edellisessä kappaleessa 3.1 käsitellyt E3:n mukaiset määräykset ja ohjeet koskien pakoputken sijaintia ja korkeutta [8, s. 6–7].

Kiinteistön julkisivulla kulkevan pakoputken tulee täyttää esteettiset vaatimukset [1, s. 61]. Tässä tapauksessa voi olla perusteltua käyttää eristämätöntä ohutseinämäistä haponkestävää teräsputkea, mikäli kuuma eristämätön pakoputki ei pääse aiheuttamaan tapaturmavaaraa [1, s. 61; 7, s. 6]. Tämän materiaalivalinnan etuna on asennuksen osalta sen keveys ja esteettisyyden osalta siistinä pysyvä ulkopinta [1, s. 61]. Vaikka pakoputki olisi tehty teräsputkesta, voidaan materiaali vaihtaa ulospuhalluspaikalle näkyviin jäävältä lyhyeltä osalta haponkestäväksi teräkseksi. Tässä tapauksessa materiaalivaihdos tehdään heti lisä-äänenvaimentimen jälkeen. [3.] Kuvassa 7 on esitetty pakoputken vaihtoehtoisia reittejä.

mitoitukset on suunniteltu vastaamaan suunnitelmia. Edellä mainittuihin vaikuttavat pakoputken reitti kuin myös pakoputken materiaali, sillä materiaalien lämpölaajenemisominaisuudet ovat erilaisia. Jos pakoputken materiaalia päätetään vaihtaa lennosta, se muuttaa paljetasaimia koskevat mitoitukset täysin uusiksi. [3; 13.]

3.4 Pakoputken vesitys

Pakoputkeen tulee asentaa vähintään yksi vedenpoistoputki. Sillä estetään nesteen pääsy varavoimakoneeseen [7, s. 6]. Pakoputkeen pääsee kerääntymään nestettä sadevedestä, lumesta ja varavoimakoneen käynnin jälkeen muodostuvasta kondenssivedestä. Nesteen kerääntyminen lisääntyy putkipituuden kasvaessa. [1, s. 61; 7, s. 6.] Kuvassa 8 näkyy pakoputken vedenpoistoputken periaate.



Kuva 8. Pakoputken vesitys [7, s. 6]

Vedenpoistoputki asennetaan pakoputkeen äänenvaimentimen jälkeen. Tältä osuudelta pakoputki tulee asentaa vähintään 5 %:n kallistuksella kohti vedenpoistopistettä. [7, s. 6.] Vaihtoehtoisesti vedenpoistoputki voidaan asentaa myös äänenvaimentimesta [3; 6, s. 60]. Tässä tapauksessa äänenvaimentimen tulee olla riittävän korroosionkestävä [6, s. 60]. Siinä tapauksessa, jos vettä pääsee kertymään äänenvaimentimeen, tulee vedenpoisto järjestää myös siitä [7, s. 6].

Veden poistoputken täytyy olla kooltaan vähintään DN25, ja sen tulee olla korroosiota kestävä materiaalia, esimerkiksi haponkestävää terästä tai kuparia. Vedenpoistoputki liitetään pakoputken kierrelitoksella. [3; 7, s. 61.] Liitoksen osalta on huomioitava, että tiivistämateriaalien tulee kestää 600 °C:n lämpötila [3]. Vedenpoistoputkeen asennetaan sulkuventtiili ja putkivesilukko, joilla estetään pakokaasun ulospääsy [7, s. 6]. Sulkuventtiili pidetään aina auki, jolloin vesi pääsee jatkuvasti poistumaan pakoputkesta. Sulkuventtiili on tarkoitettu mahdollista huoltoa varten, sillä huoltotilanteissa sen sulkeminen estää pakokaasujen leviämisen. [3.]

Putkivesilukko tehdään ruostumattomasta materiaalista, kuten vedenpoistoputkikin. Putkivesilukon vaadittu vesipatsaan korkeus määrittyy pakoputken kokonaispainehäviön mukaan. 1 kPa vastaa 10 senttimetrin vesipatsasta. Tämän lisäksi itse putkivesilukon korkeuteen lisätään noin 20 % marginaalia. [3.] Sulkuventtiilin jälkeinen putkiosuus voidaan tehdä joustavasta muoviputkesta, jolloin sen puhdistaminen on helpompaa. Putkivesilukon alaosaan tehdään tyhjennysyhde ja vesitysvedet puretaan putkivesilukon yläosasta metallisen putken kautta kaivoon. [3; 7, s. 6.] Vesitysputken alkuun on syytä asentaa avattava liitos, mikäli putki on liitetty hitsaamalla. Näin vesitysputki päästään puhdistamaan pienellä vaivalla, jos se tukkeutuu. [1, s. 61; 7, s. 6.] Putkivesilukko tulee täyttää vedellä ennen varavoimakoneen käynnistystä ja sen vedenpinnan korkeus tulee myöhemmin tarkastaa säännöllisesti [3].

4 Varavoimakoneen pakoputken mitoitus

4.1 Pakoputken materiaali

Pakoputken putkimateriaaleina käytetään joko terästä, ruostumatonta terästä tai haponkestävää terästä. Teräs on näistä yleisimmin käytetty materiaali. [7, s. 6.] Vaikka teräsputki on yleisimmin käytetty materiaali, on syytä miettiä pakoputken elinkaaren kannalta haponkestävän teräksen käyttöä. Pakoputkeen pääsee aina kerääntymään hiukan vettä sadevedestä ja lumesta. Polttoaineen sisältämän vedyn palamistuote on vesihöyry, joten pakokaasu on kostea. Siksi pakoputkessa syntyy kondenssivettä, jota pääsee synty-mään kuukausittaisissa varavoimakoneen koekäynnistyksissä ja käytössä, kun kuuma pakokaasu käynnin jälkeen jäähtyy voimakkaasti. Nämä aiheuttavat korroosiota teräsputkeen. [13.] Pakoputki joudutaan tekemään korroosiota kestävästä terässeoksesta,

mikäli se sijaitsee eristämättömänä ulkoilmassa tai mikäli se on vaikeasti uusittavissa tai korjattavissa [7, s. 6].

Hiiliteräksestä tehdyn putken on oltava seinämäpaksuudeltaan vähintään 3 mm. Vastavasti terässeoksista valmistetuilla putkilla on seinämäpaksuuden oltava vähintään 1,5 mm kokoon DN 125 asti ja sitä suuremmilla putkilla vähintään 2 mm. Palo- ja käryämisvaaran vuoksi sisätiloihin asennettavissa pakoputkissa ei saa olla maalaus- tai muuta suoja-pinnoitetta. [7, s. 6.]

Pakoputken liitostapana käytetään hitsausta. Saumojen on oltava kaasutiiviitä ja standardin SFS-EN25817 luokan C mukaisia. [7, s. 6.] Standardi sisältää kolme hitsausvirheisiin perustuvaa hitsiluokkaa, joiden tunnuksat ovat D, C ja B. Tunnuksat tarkoittavat vastaavassa järjestyksessä hitsiluokkaa tyydyttävä, hyvä ja vaativa. [14, s. 3.] Hitsiluokka C on tarkoitettu painelaitteille ja staattisesti kuormitetuille rakenteille [15].

4.2 Pakoputken koko

Pakoputken mitoitus voidaan tehdä taulukkomitoituksella tai painehäviölaskelman avulla. Taulukkomitoitus soveltuu vain yksinkertaisiin tapauksiin ja sisältää ehtoja putkistolle. Pakoputki saa olla enintään 10 metriä pitkä. Sen on oltava suhteellisen suora, jonka määritelmänä on enintään kolme 90°:n mutkaa. Näiden ehtojen täyttyessä voidaan käyttää taulukon 1 mukaista mitoitus-taulukkoa. [7, s. 6.]

Taulukko 1. Varavoimakoneen pakoputken taulukkomitoitus [7, s. 6]

Varavoima-teho kVA/kW	Pakokaasu- virta m ³ /s	Pakoputki DN
25/20	0,09	65
100/80	0,30	100
250/200	0,92	150
500/400	1,44	200
1000/800	2,53	250

Taulukossa 6 on tarkasteltu varavoimakoneen pakoputken taulukkomitoitusta. Tarkastelussa on tehdyn pakoputken mitoitusyökalun avulla laskettu, millaisiin pakokaasun virtausnopeuksiin ja painehäviöön päädytään taulukkomitoituksella. Laskennassa on käsitelty taulukkomitoituksen rajaksi määritettyä tilannetta, jossa pakoputki on 10 metriä pitkä

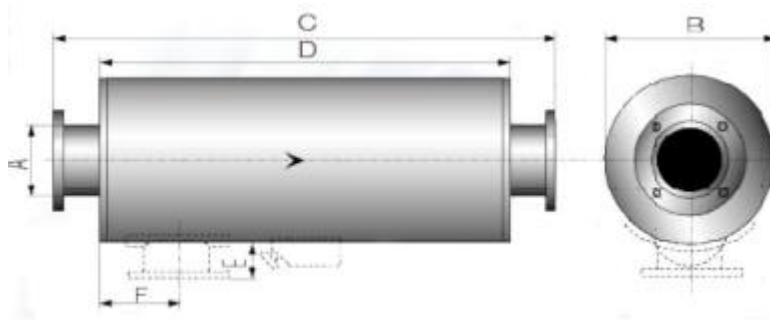
ja siinä on kolme 90°:n mutkaa. Pakokaasun lämpötilana on käytetty 600 °C:ta. Tarkastelussa havaittiin, että pakoputkelle määritetyt nopeus- ja painehäviövaatimukset täyttyvät. Lisäksi tehtiin havainto, että kokoa DN150 suuremmilla pakoputkilla voi olla perusteltua käyttää yhtä kokoa suurempaa putkea, jolloin nopeus putoaa läheltä sallittua ylärajaa hieman alhaisemmaksi. Kasvattamalla kokoa yhden koon saadaan nopeudeksi 26,54–32,92 m/s ja painehäviöksi 0,31–0,44 kPa. Suurempi pakokaasun virtausnopeus lisää ääntä.

Vaativammissa tapauksissa mitoitus tehdään painehäviölaskennan avulla. Sen perustana on sallittu painehäviö. Painehäviö saa olla enintään 3 kPa äänenvaimentimen jälkeen. [7, s. 6.] Painehäviö voi olla enemmänkin, mutta on huomioitava, ettei varavoimakoneen sallima kokonaispainehäviö ylitä. Kauppakeskus REDIn varavoimakoneen pakoputken painehäviö on esimerkiksi ilman äänenvaimentimia 4,7 kPa. Sen kokonaispainehäviö on 8,2 kPa, jolloin se on kuitenkin alle kyseisen varavoimakoneen salliman painehäviön 9,3 kPa. [3.] Mikäli varavoimakoneen sallima pakoputken aiheuttama kokonaispainehäviö ylittyy, moottorista ei saada irti sille ilmoitettua tehoa. Ahtimella puristetaan palamisilmaa korkeaan paineeseen, jotta saadaan enemmän ilman massavirtaa koneeseen. Moottorin tehon laskeminen johtuu siitä, että turhan suuri pakoputken vastapaine vastustaa moottorin ahtimen pyörimistä, joka pienentää moottorin palamisilman paineenkorotusta. [11.] Taulukossa 2 on erään äänenvaimenninvalmistajan äänenvaimentimen ominaisuuksia. Taulukon viimeisessä sarakkeessa lukee kunkin kokoisen äänenvaimentimen aiheuttama kertavastusluku. [16.]

Taulukko 2. Äänenvaimentimen ominaisuuksia [16, s. 2]

NB (nominal bore)	A (mm) outer pipe diameter	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)	weight (kg)	CW	
40	1½"	48,3	256	1000	850	50	50	20	6,25
50	2"	60,3	306	1000	850	50	50	27	5,57
65	2½"	76,2	356	1500	1270	75	75	43	5,81
80	3"	88,9	401	1500	1275	75	75	53	5,25
100	4"	114,3	482	1750	1506	100	150	120	6,01
125	5"	139,7	482	1750	1506	100	150	130	6,03
150	6"	168,3	558	2500	2256	100	200	205	5,40
200	8"	219,1	658	2500	2256	150	200	260	5,76
250	10"	273,0	858	3000	2760	150	250	485	6,17
300	12"	323,9	908	3250	3010	150	250	560	5,25
350	14"	355,6	960	3750	3510	150	250	690	5,98
400	16"	406,4	1060	4250	4010	150	270	1075	5,01
450	18"	457,2	1210	4750	4512	150	300	1400	6,17
500	20"	508,0	1310	5250	5012	150	325	1735	5,37

Kuvassa 9 on taulukkoon 2 viittaava äänenvaimennin. Kuvasta voi hahmottaa äänenvaimentimen kokoa edellisen taulukon avulla.



Kuva 9. Äänenvaimennin [16, s. 2]

Sallittu virtausnopeus pakokaasulle on 20–50 m/s. Tällöin virtaus on turbulენტista, jonka perusteella painehäviö voidaan laskea. Painehäviötä määritettäessä on otettava huomioon pakokaasun korkea lämpötila sekä siitä johtuvat tiheyden ja kinemaattisen viskositeetin muutokset. [7, s. 6.]

Pakoputken painehäviön laskemiseksi täytyy tietää pakokaasun virtaama ja pakokaasun lämpötila. Nämä tiedot saadaan laitevalmistajalta [17]. Näiden muuttujien avulla saadaan laskettua pakoputken aiheuttama painehäviö ja haarukoitua sopiva pakoputken koko. Pakoputken painehäviö on putkessa virtaavan pakokaasun virtauksen aiheuttamien kitkavastusten ja kertavastuksista eli putken osin aiheuttamien virtauksen pyörteilystä johtuvien painehäviöiden summa. Kitkasta johtuva painehäviö saadaan laskettua kaavalla 1. [18, s. 137–139.] Pakokaasun aineominaisuuksien osalta voidaan käyttää yksinkertaistetusti ilman ominaisuuksia, jolloin virheen arvioidaan olevan noin 2 % verrattuna laskemiseen pakokaasun täsmällisillä aineominaisuuksilla [17].

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

λ on kitkakerroin, -

L on putken pituus, m

d on pakoputken sisähalkaisija, m

ρ on ilman tiheys pakokaasun lämpötilassa, kg/m³

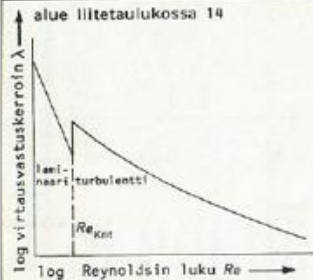
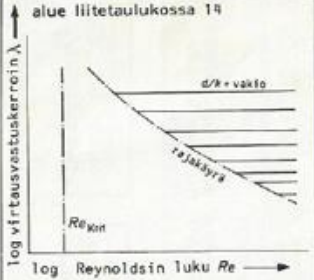

v on pakokaasun nopeus, m/s.

Kitkavastuskerroin λ riippuu virtauksen tyypistä eli Reynoldsin luvusta ja putkimateriaalin seinämän karheudesta. Reynoldsin luku määrittää pakokaasun virtauksen luonteen, joka on pakoputken osalta aina selkeästi turbulenttinen eli $Re \gg 2320$. [19, s. 96.] Tämä arvo saadaan jakamalla pakokaasun nopeuden ja pakoputken halkaisijan tulo pakokaasun kinemaattisella viskositeetilla pakokaasun lämpötilassa. (Kaava 2) [18, s. 138.]

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (2)$$

Reynoldsin luvun, putken halkaisijan ja putken karheuden avulla saadaan laskettua $Re \cdot k/d$. Tämän arvon ja Reynoldsin luvun perusteella valitaan sopiva yhtälö, jolla saadaan laskettua putken kitkakerroin λ . Nämä turbulenttisen virtauksen vastuskertoimen laskentakaavat näkyvät taulukossa 3. [19, s. 96–97.] Teräsputken karheus, k on 0,045 mm. Tämä arvo muuttuu ajan myötä korroosion vaikutuksesta. Ruostuneen teräsputken k -arvo on 0,15–1,0 mm ja hyvin ruostuneen putken 1,0–3,0 mm. [18, s. 139.]

Taulukko 3. Turbulenttisen virtauksen vastuskerroin [19, s. 96–97]

Taulukko 4.2 Turbulenttisen virtauksen vastuskerroin $Re = \frac{w \cdot d}{\nu} > 2320$		
hydraulisesti sileät putket	hydraulisesti karheat putket	ylimenoalue
rajoitus: $Re \cdot \frac{k}{d} < 65$	rajoitus: $Re \cdot \frac{k}{d} > 1300$	rajoitus: $65 < Re \cdot \frac{k}{d} < 1300$
 <p>log virtausvastuskerroin λ</p> <p>log Reynoldsin luku Re</p> <p>Kuva 4.54</p>	 <p>log virtausvastuskerroin λ</p> <p>log Reynoldsin luku Re</p> <p>Kuva 4.55</p>	 <p>log virtausvastuskerroin λ</p> <p>log Reynoldsin luku Re</p> <p>Kuva 4.56</p>
<p>λ:n lausekkeet</p> <p>a) Blasiusin yhtälö Alue $2320 < Re < 10^5$</p> <p>(4.58a)</p> $\lambda = 0,3164 \cdot Re^{-0,25}$ <p>b) Nikuradsen yhtälö alueelle $10^5 < Re < 5 \cdot 10^6$</p> <p>(4.58b)</p> $\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237}$ <p>c) Prandtlin ja v. Kármánin yhtälö alueelle $Re > 10^6$</p> <p>(4.58c)</p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \lg (Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,8$	<p>λ:n lausekkeet</p> <p>a) Nikuradsen yhtälö</p> <p>(4.59a)</p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{d}{k} + 1,14$ <p>b) Moodyn yhtälö</p> <p>(4.59b)</p> $\lambda = 0,0055 + 0,15 \left(\frac{k}{d} \right)^{1/4}$	<p>λ:n lausekkeet</p> <p>Prandtl-Colebrookin yhtälö</p> <p>(4.60)</p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{d} \cdot 0,269 \right]$

Kertavastuksista johtuva painehäviö saadaan laskettua kaavalla 3. Tämä painehäviö on kertavastuskertoimien ja dynaamisen paineen tulo. [18, s. 139.] Pakoputken käyrät saavat arvon 0,5 [18, s. 141]. Paljetasaimen kertavastus on 0,2 tasaimen poimua kohden ja sisäputkea käyttäessä lähes nolla [19, s. 115]. Sisäputkea eli virtausputkea käytetään noin puolessa paljetasaimista. Virtausputken rakenne riippuu paljetasaimen tyypistä. [20.] Virtausputken rakenne näkyy kuvassa 14.

$$\Delta p = \xi \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3)$$

ξ on kertavastuskerroin, -

ρ on ilman tiheys pakokaasun lämpötilassa, kg/m^3

v on pakokaasun nopeus, m/s .

Taulukoissa 4 ja 5 on havainnollistettu $Re \cdot k/d$:n, kitkakertoimen ja painehäviön suuruusluokkia erilaisissa mitoitustilanteissa. Näitä arvoja on laskettu taulukoihin kahdessa eri lämpötilassa 550 °C:ssa ja 600 °C:ssa. Näissä lämpötiloissa on myös laskettu arvot eri suuruusilla putkien karheuksilla – tyypillisellä karheudella, hieman ruostuneen putken karheudella ja hyvin ruostuneen putken karheudella. Arvot ovat laskettu tilanteessa, jossa pakokaasun virtaama on 2300 l/s ja pakoputken pituus on 20 metriä sekä siinä on yhteensä 4 kappaletta 90°:n käyrää. Taulukossa 4 on arvot putkikoolle DN250 ja taulukossa 5 putkikoolle DN300.

Taulukko 4. Arvojen suuruusluokat putkella DN250

Koko DN	Lämpötila °C	Karheus mm	Virtaama l/s	$Re \cdot k/d$	Kitkakerroin	Painehäviö Pa/m
250	600	0,045	2300	20	0,0171	23,28
250	550	0,045	2300	22	0,0168	24,24
250	600	1	2300	441	0,0289	39,30
250	550	1	2300	486	0,0289	41,57
250	600	3	2300	1323	0,0393	53,34
250	550	3	2300	1457	0,0393	56,57

Taulukko 5. Arvojen suuruusluokat putkella DN300

Koko DN	Lämpötila °C		Virtaama l/s	$Re \cdot k/d$	Kitkakerroin	Painehäviö Pa/m
300	600	0,045	2300	14	0,0179	10,23
300	550	0,045	2300	16	0,0174	10,55
300	600	1	2300	312	0,0279	15,94
300	550	1	2300	344	0,0278	16,85
300	600	3	2300	936	0,0380	21,70
300	550	3	2300	1030	0,0379	22,97

Liitteessä 1 näkyy Excel-laskentataulukkona toteutettu varavoimakoneen pakoputken mitoitustyökalu, jolla saa mitoitettua varavoimakoneen pakoputken koon edellä mainittuja mitoitustilanteita käyttäen. Mitoitustyökalu tarvitsee lähtötiedoikseen pakokaasun lämpötilan ja tilavuusvirran sekä suorien putkiosuuksien pituudet ja niiden putkistovarusteiden aiheuttamat kertavastukset. Laskennan putkiosuuksien määrää voidaan tarvitta-

essa lisätä tai vähentää makropainikkeita painamalla. Pakoputkiston tyypillisten putkistovarusteiden kertavastuskertoimet on esitetty laskentataulukon seuraavalla välilehdellä. Näiden jälkeen valitaan pudotusvalikosta arvioitu putkikoko projektissa määritetyllä materiaalilla. Myös putken karheuden arvoa voidaan muuttaa. Oletuksena on teräsputken karheus 0,045 mm. Karheuden arvoja löytyy taulukoituna samalta välilehdeltä kuin osien kertavastukset.

Putkivalinnan jälkeen työkalu laskee automaattisesti muun muassa pakokaasun virtausnopeuden, putkiosuukien painehäviöt ja pakoputken kokonaispainehäviön, johon tulee lisätä tilannekohtaisesti äänenvaimentimen/-vaimentimien painehäviöt. Näiden lisäksi työkalu ilmoittaa selkeästi sanallisesti ja värikoodilla pakokaasun nopeuden ja painehäviön kelpoisuuden. Pakoputken kokoa muutetaan laskennan antamien ohjeiden mukaan, kunnes löydetään sopivankokoinen pakoputki. Työkalu valitsee mitoituslanteeseen sopivan kitkavastuksen laskentakaavan taulukon 4 mukaisista kaavoista. Lopuksi on vielä painettava keltaista ”Tarkenna kitkavastus” -painiketta, joka suorittaa lopullisen kaavan valinnan iteroimalla Prandtl–Colebrookin yhtälön (kaava 4.60 taulukossa 3). Pakokaasun virtausnopeuden ja pakoputken painehäviön lisäksi työkalu laskee kunkin osuuden lämpölaajenemisen. Tämä tieto tarvitaan paljetasaimien valinnassa ja mitoituksessa.

Taulukko 6. Vertailu taulukkomitoitukseen

Pakokaasuvirta m ³ /s	Pakoputki DN	Nopeus m/s	Painehäviö kPa
0,09	65	23,19	0,58
0,30	100	33,30	0,80
0,92	150	45,59	1,11
1,44	200	41,54	0,81
2,53	250	46,57	0,92

4.3 Pakoputken eristys

Pakoputket eristetään sisätiloissa. Ulkotiloissa pakoputket eristetään niiltä osin, kuin se on tarpeellista tapaturma- ja palovaaran tai ulkonäön vuoksi. [7, s. 6.] Yleensä ulkona olevia putkiosuuksia ei kuitenkaan eristetä [1, s. 59]. Pakoputket eristetään eristesarjalla 26 ja pakoputkijärjestelmän äänenvaimentimien eristeen vähimmäispaksuus on 100 mm [21, s. 3].

Pakoputkijärjestelmissä eristeen pintalämpötila ei saa ylittää +70 °C:ta ja eristyspaksuus on aina mitoitettava erikseen. Eristemateriaalina käytetään ohjetiedoston LVI 50-10344 mukaisia tunnuksien Aa ja Ab eristeitä. Eristeiden materiaalit ja ominaisuudet näkyvät taulukosta 7. [21, s. 3.]

Taulukko 7. Pakoputken eristysmateriaalien teknisiä ominaisuuksia [23, s. 2]

Tunnus	Tunnus SFS 3976	Tuote	Tuote-ominaisuudet	Pääasiainen käyttökohde *)	Tunteen ominaisuudet Enimmäiskäyttölämpötila	Tunteen ominaisuudet Lämmönjohtavuus λ W/mK keskilämpötilassa				Nimellistiheys kg/m ³	Palo-ominaisuus	Sulamislämpötila °C	Huom! t ₁ = eristettävän kohteen sisällön lämpötila
						0 °C	10 °C	50 °C	100 °C				
Aa	K	mineraalivillakouru	päälylystämätön	LE	500	–	0,035	0,040	0,045		A2-s1, d0		
	K 4.1	lasivillakouru								40		680	
	K 5.1	vuori-/kivivillakouru		PE	750					80		1100	
Ab	S	mineraalivillakouru	alumiinilaminaatti	LE	250	–	0,035	0,040	0,045		B-s1, d0		Pääll. +80 °C
		vuori-/kivivillakouru								80		1100	
		lasivillakouru								40		680	

Näkyvällä osalla pakoputken eriste päälylystetään kuumasinkityllä ohutlevyteräksellä SFS-EN 10142. Kyseistä päälylystettä merkitään ohjetiedoston LVI 50-10344 mukaisella tunnuksella 10. Pellitys kasvattaa pakoputken pintalämpötilaa huomattavasti, joka lisää eristyspaksuuden vaatimusta. Taulukosta 9 näkee tämän vaikutuksen. Pellityksen tarkoitus on lisätä turvallisuutta, sillä se on eristyksen suojana, jolloin eristettä ei pääse niin herkästi vahingoittamaan. [3.] Pakoputkea, jonka sijainti ei ole näkyvä, ei tarvitse päälylystää [21, s. 3]. On suositeltavaa, että pakoputki pellitetään, sillä pellitys on eristeen päällä tukemassa eristystä [3]. Taulukossa 8 on esitetty tunnuksen 10 mukaisen eristeen päälylysteen ominaisuuksia.

Taulukko 8. Pakoputken päälylystemateriaalin teknisiä ominaisuuksia [23, s. 4]

Tunnus	Tunnus SFS 3976	Päälylysteen materiaali	Tiheys kg/dm ³	Lujuus R _{EL} tai R _p N/mm ²	Pinnan emissiivisyys	Vähimmäispaksuus mm	Pinta-alamassa kg/m ²	Huom! t = käyttölämpötila
10	P 1	Kuumasinkitty ohutlevyteräs SFS-EN 10142	7,85	265	0,3	0,5 ¹⁾ 0,6 ¹⁾	3,9 4,7	Znk 275g/m ²

Taulukossa 9 on esitetty eri putkikokojen mukaisia sarjan 26 eristyspaksuuksia. Lisäksi taulukkoon on laskettu Aa-tunnuksen eristeiden vaatimat eristyspaksuudet ilman pellitystä ja pellityksen kanssa, jotta vaadittu alle 70 °C:n pintalämpötila saavutetaan.

Taulukko 9. Sarjan 26 mukaiset eristyspaksuudet ja lasketut vaaditut eristyspaksuudet

Putkikoko DN	Ulkohalkaisija mm	Sarja 26 mm	Laskettu eristepaksuus mm	Laskettu eristepaksuus pellityksen kanssa mm
80	88,9	100	60	80
100	114,3	120	60	100
125	139,7	120	60	100
150	168,3	120	80	100
200	219,1	140	80	100+30
250	273	140	80	100+30
300	323,9	140	80	100+30
350	355,6	160	80	100+30
400	406,4	160	80	100+30
500	508	160	80	100+30

Laskettaessa pakoputken vaatimaa eristystä on ensin laskettava putken lämpöhäviö pituusyksikköä kohden. Lämpöhäviö metriä kohden lasketaan kaavalla 4. [24, s. 5.] Putkimateriaalin ja pinnoitteen lämmönsiirtovastukset sekä pakokaasun ja putken sisäpinnan välinen lämmönsiirtovastus ovat merkityksettömiä. Tämän vuoksi ne on jätetty kaavassa huomioimatta. Kaavassa käytettävä eristeen lämmönjohtavuus lasketaan sen keskilämpötilassa, joka saadaan laskettua riittävällä tarkkuudella pakokaasun lämpötilan ja pakoputken pintalämpötilan keskiarvolla $(T_i+T_e)/2$. Pakoputken pintalämpötilaa ei tässä vaiheessa tunneta, joten se iteroidaan. Iterointi tarkoittaa, että pintalämpötila arvataan ja arvoa tarkennetaan, kunnes yhtälö toteutuu. [24, s. 6.]

$$\phi_p = \frac{\pi \cdot (T_i - T_0)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda} \ln \frac{d_e}{d_i} + \frac{T}{\alpha_e \cdot d_e}} \quad (4)$$

ϕ_p on pakoputken lämpöhäviö, W/m

T_i on pakokaasun lämpötila, °C

T_0 on eristysympäristön lämpötila, °C

λ on eristysympäristön lämmönjohtavuus, W/Km

d_e on eristysympäristön ulkohalkaisija, m

d_i on eristysympäristön sisähalkaisija, m

α_e on ulkopinnan lämmönsiirtymiskerroin, W/m²K.

Kaavan 4 ulkopinnan lämmönsiirtymiskertoimen muuttuja α_e on säteilyn (α_r) ja konvektion lämmönsiirtymiskertoimien (α_k) summa.

Kaavalla 5 saadaan laskettua säteilyn lämmönsiirtymiskerroin [24, s. 5].

$$\alpha_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_e^4 - T_0^4}{T_e - T_0}, \quad (5)$$

ε on pinnan emissiivisyys, -

σ on Stefan-Boltzmannin vakio = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

T_e on eristyksen ulkopinnan lämpötila, K

T_0 on eristyksen ympäristön lämpötila, K.

Vapaan konvektion lämmönsiirtymiskerroin pakoputken ulkopinnalla lasketaan kaavalla 6 [24, s. 5].

$$\alpha_k = 1,32 \cdot \left(\frac{T_e - T_0}{d_e} \right)^{0,25} \quad (6)$$

Tilanteessa, jossa ilman havaitaan selvästi liikkuvan pakoputken pinnan läheisyydessä, lasketaan konvektion lämmönsiirtymiskerroin kaavalla 7 [24, s. 6].

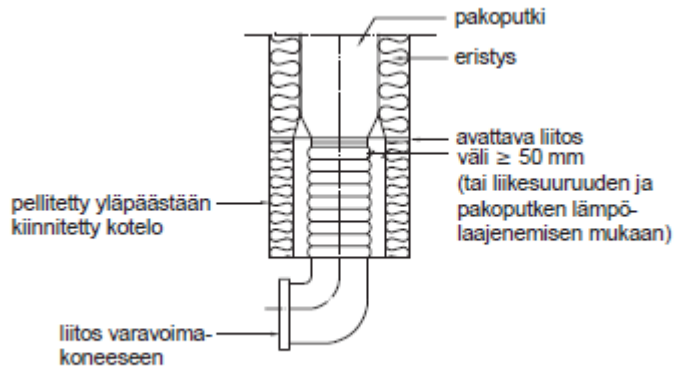
$$\alpha_k = 4,13 \cdot v^{0,8} \cdot d_e^{-0,2} \quad (7)$$

v on ilman nopeus, m/s.

Pakoputken eristeen pintalämpötila lasketaan kaavalla 8 [24, s. 6].

$$T_e = T_0 + \frac{\phi_p}{\pi \cdot \alpha_e \cdot d_e} \quad (8)$$

Paljetasaimien osalta on huomioitava, että niiden paljeosa on peitettävä kokonaan peltikotelolla ennen eristämistä, sillä paljepoimut tulee pitää vapaana vieraskappaleista. Tällaisia kappaleita ovat muun muassa eristysaineet ja lika. [22, s. 7.] Koteloa on oltava riittävän kokoinen liikkumistilan varmistamiseksi. Sen koon tulee olla vähintään 50 mm paljepoimuista ja riittävä vastaanottamaan pakoputken lämpölaajeneminen. Kotelo tehdään helposti avattavaksi. Kuvassa 10 on esitetty joustavan liittimen kotelo, jonka koteloinnin periaate on sama tasaimien ja mahdollisten puhdistusluukkujen osalta. [7, s. 6.]



Kuva 10. Joustavan liittimen kotelo [7, s. 6]

Työssä kehitetyllä laskentataulukolla voidaan laskea myös pakoputken vaatima eristyspaksuus halutun pintalämpötilan perusteella. Liitteessä 1 on esitetty laskennan lähtöarvot ja tulokset. Lähtötiedoikseen työkalu tarvitsee pakokaasun ja ympäristön lämpötilan sekä pudotusvalikoista valitun putken ja eristeen tyyppin. Näiden lisäksi arvioidaan, liikkuuko ilma selvästi pakoputken ympärillä, mikä vaikuttaa siihen, kumman lämmönsiirtymiskertoimen laskentakaavan se valitsee. Lisäksi on arvioitava ilman nopeutta, mikäli ilma liikkuu. Viimeiseksi valitaan, tuleeko pakoputkeen pellitys. Tämä valinta vaikuttaa oleellisesti tarvittavaan eristyspaksuuteen. Mikäli pakoputken eristeen päälle ei tule pellitystä, on todennäköistä, että pakoputkeen riittää yksi eristekerros. Pellitetyn pakoputken osalta on erittäin todennäköistä, että pakoputki vaatii toisen eristekerroksen, jotta sen pintalämpötila pysyy alle sallitun 70 °C:n. [3.]

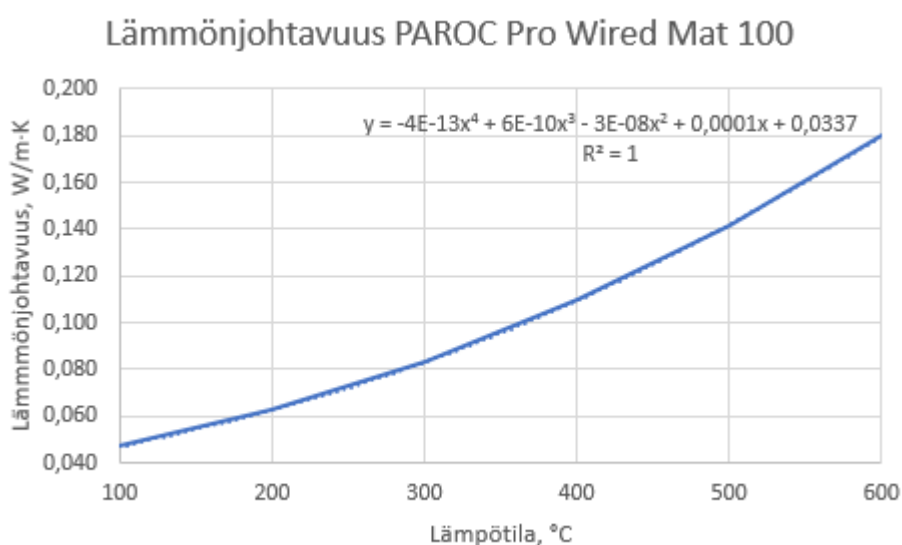
Tehdyn laskentatyökalun eristeen keskilämpötila on laskettu aiemmin mainittua tarkemmin. Keskilämpötila on määritetty kaavan 4 avulla. Kaavasta jätetään huomioimatta ulkopinnan lämmönsiirtymiskerroin, jolloin kaava saadaan muotoiltua muotoon:

$$T_m = - \left(\frac{In \frac{d_m}{d_i} \cdot \frac{\Phi}{l}}{\lambda 2\pi} - T_i \right)$$

T_m on eristeen keskilämpötila

d_m on putken eristyskerroksen halkaisija sen keskikohdassa.

Myös eristeen johtavuutta eri lämpötiloissa on tutkittu tarkemmin, koska eristeen lämmönjohtavuus on laskennassa eniten vaikuttava tekijä [3]. Eristevalmistajat ilmoittavat eristeiden lämmönjohtavuuden eristeen keskilämpötilan mukaan 100 °C:n välein. Lämmönjohtavuus on taulukoitu välillä 100–600 °C. Taulukkolaskennassa eristeiden lämmönjohtavuudesta on muodostettu kuvaaja, johon on luotu suuntaviiva. Tämän suuntaviivan ilmoittaman kaavan avulla on laskettu eristeiden lämmönjohtavuus myös edellä mainittujen lämpöasteiden väliltä. Kuvassa 11 näkyy erään eristemateriaalin lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona. Kuvasta nähdään, että eristeen keskilämpötilalla on suuri vaikutus eristeen lämmönjohtavuuteen. Kuvasta nähdään myös, ettei eristeen lämmönjohtavuus ole täysin lineaarista.



Kuva 11. Eristeen lämmönjohtavuus lämpötilan suhteen

Laskentatyökalu kertoo tarkan eristepaksuuden vaatimuksen. Työkalu kertoo tarkan eristepaksuuden lisäksi eristeen tai eristeiden vaaditun paksuuden eristevalmistajan todellisen valikoiman mukaan. Tämä pienentää virhemarginaalia, sillä se valitsee todellisen eristepaksuuden, joka täyttää laskennallisen arvon. Laskentatyökalun on tarkastettu saavuttavan eristevalmistajan mitoitusohjelman (PAROC Calculus) määrittelemät eristepaksuudet valituilla pakoputken pintalämpötiloilla.

5 Lämpölaajenemisen hallinta

5.1 Putkimateriaalien lämpölaajeneminen

Lämpölaajeneminen on otettava huomioon suunniteltaessa ja rakennettaessa putkistoa. Hallitsematon lämpölaajeneminen johtaa putkistossa lukuisiin ongelmiin. Se saattaa vahingoittaa putkia, niiden liitoksia ja kannakointia, rakenteita sekä muita putkistoon liittyviä osia. Hallitsematon lämpölaajeneminen saattaa myös aiheuttaa putkistossa ääniongelmia. Kaikki nämä hallitsemattoman lämpölaajenemisen aiheuttamat ongelmat johtavat putkiston käyttöikänsä lyhenemiseen. [12, s. 1.]

Pakoputkissa käytettävistä materiaaleista teräs on lämpölaajentumisominaisuuksiltaan haponkestävää terästä ja ruostumatonta terästä helpompi vaihtoehto, sillä sen lämpölaajeneminen on vähäisempää. Tyypillisesti pakoputken pintalämpötila on noin 600 °C. Tällaisella 600 °C:n lämpötilaerolla teräsputken lämpölaajeneminen on noin 7 mm/m ja haponkestävän sekä ruostumattoman teräksen noin 10 mm/m. Näiden materiaalien lämpöpiteneiskertoimet ovat vastaavassa järjestyksessä 0,012 mm/m°C ja 0,017 mm/m°C. Pakoputkien lämpölaajenemisen tasaamiseen käytetään paljetasaimia, sillä teräsputkillla on suuri taivutusvastus. [7, s. 4.] Putkiston lämpötilamuutoksen aiheuttama lämpölaajeneminen Δl saadaan laskettua millimetreissä kaavalla 9 [12, s. 1].

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t_{max} \quad [9]$$

α on putkimateriaalin lämpöpiteneiskerroin, mm/m°C

l on putkiosuuden pituus, m

Δt_{max} on putken ylimmän ja alimman lämpötilan ero, °C.

5.2 Paljetasaimet

Paljetasaimen toiminta perustuu poimutettuun, tyypillisesti haponkestävästä teräksestä valmistettuun paljeosaan, johon on hitsattu hitsauspäät liitosta varten. Paljeosan rakenteen ansiosta paljetasain kykenee puristumaan, venymään ja taipumaan. Oikeantyyppisen paljetasaimen valinnalla ja sen mitoituksella eli esijännitysarvon laskemisella halli-

taan putkiston lämpölaajenemisliike. [20.] Paljetasaimia on sekä hitsattavia että laipallisia [12, s. 4]. Pakoputkien osalta käytetään hitsattavia paljetasaimia [7, s. 6]. Paljetasaimien asennuksessa on otettava huomioon paljetasaimen suojaaminen hitsausroiskeilta ja liian korkeilta lämpötiloilta [12, s. 4]. Asennuksessa on myös estettävä paljetasaimen kiertorasitus [25, s. 1]. Tyypillisesti paljetasaimet toimitetaan valmiiksi esijännitettynä asennuspituuteensa [20]. Kuvassa 12 on hitsattava teräksinen paljetasain.

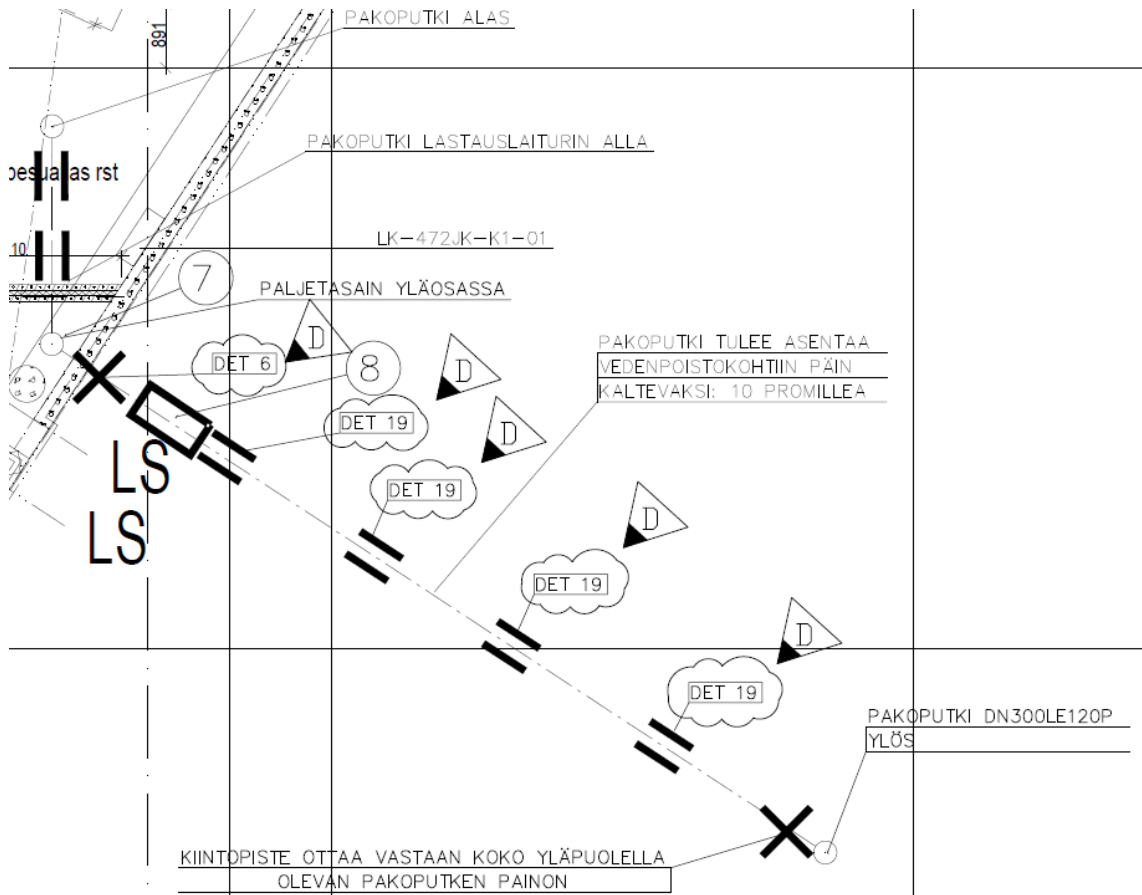


Kuva 12. Hitsattava teräksinen paljetasain DN150 [26]

Pakoputkissa käytettäviä paljetasaimia on kahdentyypisiä. Aksiaalipaljetasaimet on suunniteltu pituussuunnassa tapahtuvaa lämpölaajenemista varten. Lateraalipaljetasaimet ovat rakenteeltaan käytännössä samanlaisia, mutta ne on suunniteltu ottamaan vastaan suhteessa enemmän sivuttais- ja pystysuuntaista joustoa. Ne toimivat kuitenkin myös aksiaalisuuntaisesti. Samoin aksiaalipaljetasaimet kykenevät vastaanottamaan hieman lateraalisuuntaista joustoa. Lateraalipaljetasaimen mahdollisen virtausputken rakenne saattaa erota aksiaalipaljetasaimen virtausputkesta. Sen rakenne voi olla kartiomainen, joka mahdollistaa suuremman lateraalijouaston. Virtausputken eroavan rakenteen näkee kuvan 14 paljetasaimien leikkauksista. [20.]

Kuvassa 13 näkyy paikka, johon on täytynyt asentaa lateraalipaljetasain. Paikka on merkitty kuvaan ympyröidyllä numerolla 7. Tässä paikassa paljetasain on asennettu pakoputken pystyosalle, jolloin siihen kohdistuu sen alapuolella olevan pakoputken osuuden lämpölaajeneminen. Tämä alempi vaakaosuus työntää lämpölaajenemisen vaikutuksesta pakoputken pystyosuutta siivuun, joka on kiintopistekannakoitu heti pystyosuuden

jälkeen. Tällöin paljetasaimen on kyettävä joustamaan sivusuunnassa. Kyseisessä tapauksessa on selvitty lateraalipaljetasaimella sen sijaan, että olisi asennettu aksiaalipaljetasain sekä alemmalle vaakaosuudelle että ylemmälle pystyosuudelle. Kuvassa 13 numerot 7 ja 8 kuvastavat kuvan 14 mukaisia paljetasaimia PT7 ja PT8. Merkinnot (=) ovat ohjauskannakkeita ja X-merkinnot kiintopisteitä.



Kuva 13. Paikka, jossa paljetasaimelta on vaadittu lateraalijoustoa [3].

Tyypillisesti laitevalmistaja (esimerkiksi Sejo Oy) mitoittaa paljetasaimet pakoputkien osalta. LVI-suunnittelijan suunniteltavaksi paljetasaimien osalta jää niiden sijoittaminen pakoputkistoon ja putkisto-osuuksien pituuksien ilmoittaminen laitevalmistajalle. Paljetasaimien sijoitus on katsottava rakennesuunnittelijan kanssa ja suhteutettava rakenteiden mukaan. Putkisto-osuuksien pituuksien perusteella laitevalmistaja laskee niissä tapahtuvat lämpölaajenemiset. Lämpölaajenemisen ja sijainnin perusteella laitevalmistaja saa valittua oikeantyyppiset paljetasaimet ja mitoitettua niille sopivan asennuspituuden. Pal-

jetasaimissa rakennepituus tarkoittaa paljetasaimen pituutta esijännittämättä. Asennuspituus on puolestaan rakennepituuden ja esijännityksen summa. Paljetasaimen asennuspituus saadaan laskettua kaavan 10 mukaisesti. [20; 22, s. 4.]

$$\text{Asennuspituus} = L + \frac{\Delta l}{2} - \frac{\Delta l \cdot \Delta t_u}{\Delta t_{\max}} \quad (10)$$

L on paljetasaimen ilmoitettu pituus, m

Δl on putken kokonaislaajeneminen, m

Δt_u on lämpötila asennuksen aikana - putken alin mahdollinen lämpötila, °C

Δt_{\max} on putken ylin mahdollinen lämpötila – putken alin mahdollinen lämpötila, °C.

Esimerkiksi haponkestävän DN300-kokoisen pakoputken paljetasaimen asennuspituus, jonka ylin mahdollinen lämpötila on 600 °C saadaan laskettua seuraavasti. Ensin laskeaan kiintopisteiden välillä tapahtuva lämpölaajeneminen. Olkoon tämä pituus esimerkiksi 10 metriä, jolloin pakoputken lämpölaajeneminen on noin 0,099 m. Pakoputki asennetaan tässä esimerkissä sisälle, jolloin asennuslämpötilan ja alimman lämpötilan voidaan olettaa olevan sama +20 °C. Paljetasaimen pituus selviää laitevalmistajan tiedoista. Tällöin paljetasain, jonka ilmoitettu pituus on 0,34 m, asennuspituus saadaan laskettua seuraavalla tavalla:

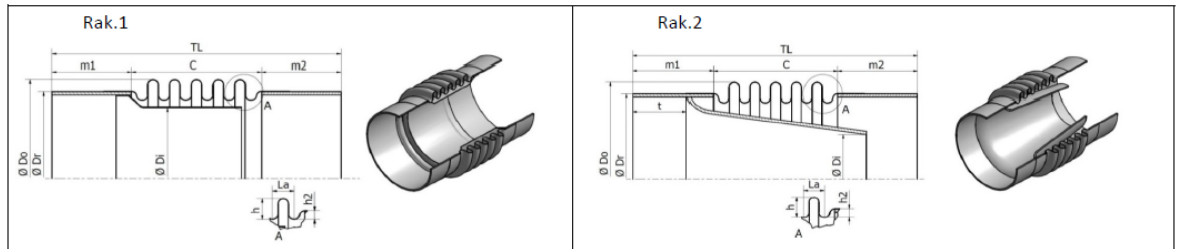
$$0,340\text{m} + \frac{0,099\text{m}}{2} - \frac{0,099\text{m} \cdot (20^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})}{(600^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})} = 0,389 \text{ m}$$

Pakoputken paljetasaimien osalta laitevalmistaja laatii paljetasainluettelon, josta selviää yksilöityjen paljetasaimien koko, tyyppi, kiintopisteiden välinen lämpölaajeneminen, paljetasaimen jousto, esijännitysarvo eli asennuspituus ja materiaali [12, s. 4]. Kuvassa 14 on esimerkki paljetasainluettelosta. Luettelo liitetään kohteen luovutuskansioon [27, s. 50].

Rev.C 12.5.2017

Redi kauppakeskus PP300 paljetasaimet:

Paljetasain	DN	Aks. Liike mm	Lat. Liike mm	Paljetasain piir.nro/koodi	Paljetasain aks.jousto mm	Paljetasain lat.jousto mm	Rakenne	Esijännitetty TL	Hittauspäätt S235JR G2	Paljeosa ja virtausputki	Aks.joustovakio N/mm	Lat.liik. taiv.jäykk. N/mm	Ap cm2	Paino kg
PT1	DN300	-45/+2	0	79997_040	-45/+5	5	Rak.1	377 mm	323,9 x 3,0	EN 1.4307	60	1043	611	11
PT2	DN300	-35/+2	7	79995_060	-40/+5	12	Rak.2	533 mm	323,9 x 3,0	EN 1.4307	30	143	611	16
PT3	DN300	-75/+3	0	79994_050	-90/+6	5	Rak.1	536 mm	323,9 x 3,0	EN 1.4307	32	185	855	15
PT4	DN300	-30/+2	5	79997_040	-45/+5	5	Rak.1	377 mm	323,9 x 3,0	EN 1.4307	60	1043	855	11
PT5	DN300	-20/+1	25	79995_060	-40/+5	30	Rak.2	533 mm	323,9 x 3,0	EN 1.4307	30	143	855	16
PT6	DN300	-70/+3	0	79994_050	-90/+6	5	Rak.1	536 mm	323,9 x 3,0	EN 1.4307	32	185	855	15
PT7	DN300	-35/+1	30	79995_060	-40/+5	30	Rak.2	533 mm	323,9 x 3,0	EN 1.4307	30	143	855	16
PT8	DN300	-90/+4	0	79994_050	-90/+6	5	Rak.1	536 mm	323,9 x 3,0	EN 1.4307	32	185	855	15



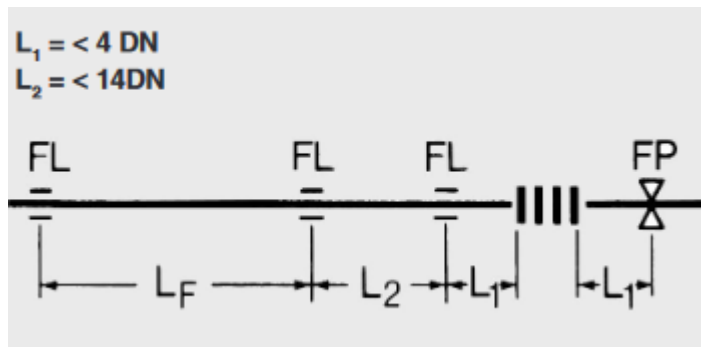
Kuva 14. Esimerkki paljetasainluettelosta [3]

Paljetasainluettelossa aksiaali- ja lateraaliliike tarkoittavat kyseisellä putkiosuudella niiden päihin asennettavien kiintopisteiden välillä tapahtuvaa pakoputken lämpölaajenemista. Kaaviossa joustot puolestaan tarkoittavat paljetasaimen suunniteltua joustovaraa. Pakoputkissa jousto suunnitellaan suuren lämpölaajenemisen vuoksi siten, että puristusominaisuutta on oleellisesti enemmän kuin venymistä. [20.] Tämä voidaan nähdä kuvasta 14, josta esimerkiksi ilmenee, että paljetasaimen PT1 joustosta 90 % on puristusta. Luettelossa esijännitetty tarkoittaa paljetasaimen esijännitettyä asennuspituutta. [3.]

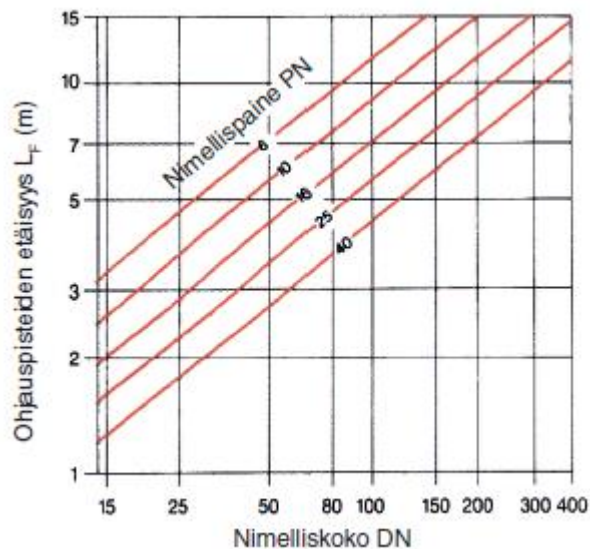
5.3 Pakoputken kannakointi

LVI-suunnittelija suunnittelee kannakkeiden paikat ja rakennesuunnittelija vastaa kannakkeiden tarkemmasta suunnittelusta [3; 13]. Suorilla putkiosuuksilla kiintopisteet asennetaan putken päihin. Kiintopisteet ovat kannakkeita, jotka pitävät putkea paikallaan. Paljetasaimet asennetaan näiden kiintopisteiden väliin, jolloin ne tasaavat putkiosuuden lämpölaajenemisen. Paljetasaimet tulee mielellään asentaa mahdollisimman lähelle jompaa kumpaa kiintopistettä. Tällöin saatetaan välttää ylimääräistä materiaalimenekkiä, sillä heti paljetasaimen jälkeen tulee asentaa ohjauskannake. Näin saadaan ohjattua

lämpölaajeneminen haluttuun suuntaan. Ohjauskannakkeet ovat puolestaan kannakkeita, joissa putki pääsee liikkumaan. Ohjauskannakkeen tarkoitus on ohjata lämpölaajeneminen haluttuun suuntaan. Mikäli tästä huolimatta paljetasain päätetään asentaa kiintopisteiden väliin, tulee ohjauskannakkeet asentaa paljetasaimen molemmin puolin. [12, s. 4.] Kuvassa 15 näkyy laitevalmistajan ohje aksiaalipaljetasaimilla varustettujen putkien ohjauspisteiden etäisyyksistä. FL kuvastaa ohjauskannakkeita, FP kiintopistettä ja L_F kuvastaa 2. ja 3. ohjauskannakkeen etäisyyttä. Etäisyys määrittyy kuvan 16 mukaisesti. Etäisyys riippuu pakoputken koosta ja paljetasaimen nimellispaineesta. Paljetasaimen nimellispaine löytyy valmistajan tuotetiedoista. [25, s. 2.]

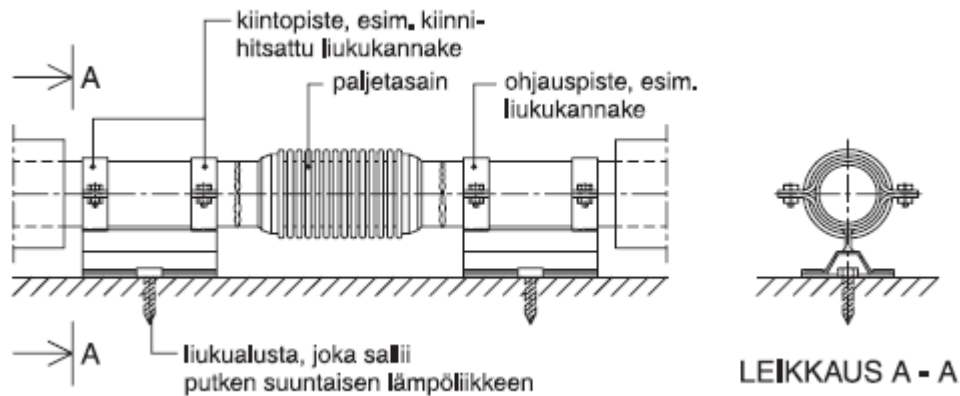


Kuva 15. Aksiaalipaljetasaimella varustettujen putkien ohjauspisteiden etäisyydet [25, s. 2]



Kuva 16. Ohjauspisteiden etäisyys L_F [25, s. 2]

Kiintopisteiden väliin saa asentaa vain yhden paljetasaimen. Jos putkiosuudelle joudutaan asentamaan toinen paljetasain, tulee niiden väliin asentaa välikiintopiste. [22, s. 6–7.] Lateraalipaljetasaimien kannakoinnissa tulee huomioida, että kannakointi pääsee liikkumaan sivuttaissuunnassa lämpölaajenemisen mukaisesti. Tällaisia kannakkeita kutsutaan liukukannakkeiksi. Sivuttaissuuntainen liikkuminen rajataan kynsiohjaimin. [3.] Kuvassa 17 näkyy paljetasaimen kannakoinnin periaate.



Kuva 17. Paljetasain ohjaus- ja kiintopisteinen [12, s. 4]

Pakoputken kannakoinnissa on otettava huomioon putken suuri lämpölaajeneminen. Käytettäviä kannakkeita ovat joko heiluri- tai liukukannakkeet. Heilurikannakkeille on ehtoja, joiden mukaan niiden ripustusvarren tulee olla halkaisijaltaan vähintään 6 mm ja pituudeltaan vähintään 10-kertaisesti se pituus, jonka pakoputki laajenee kannatuspisteen kohdalla. [7, s. 6.] Pakoputken kannakoinnissa on kiinnitettävä erityistä huomiota kiintopisteeseen, joka sijoitetaan juuri ennen pakoputken pystyosuutta. Tämä kiintopiste tulee sijoittaa mahdollisimman lähelle käyrää, sillä se ottaa vastaan koko pystyosuuden painon ja mahdollisen lisäänvaimentimen painon. Pystyosuudella pakoputken tulee päästä liikkumaan vapaasti pystysuuntaisesti. [3.] Kiintopisteen jälkeen pystyosalla käytetään liukukannakkeita, joita on oltava vähintään 5 metrin välein [7, s. 4]. Kuvassa 18 näkyy liukukannake.



Kuva 18. Liukukannake [3]

5.4 Paisuntakaaret

Paisuntalennkkejä käytetään varavoimakoneen pakoputken suunnittelussa hyvin harvoin, sillä ne vievät valtavasti tilaa [28]. Teräksisien paisuntakaarien koko mitoitetaan kaavojen 11 ja 12 avulla. Kaavalla 11 lasketaan paisuntakaaren pituus (a) ja kaavalla 12 lasketaan paisunnan vastaanottavan putken pituus (b). [12, s. 2.]

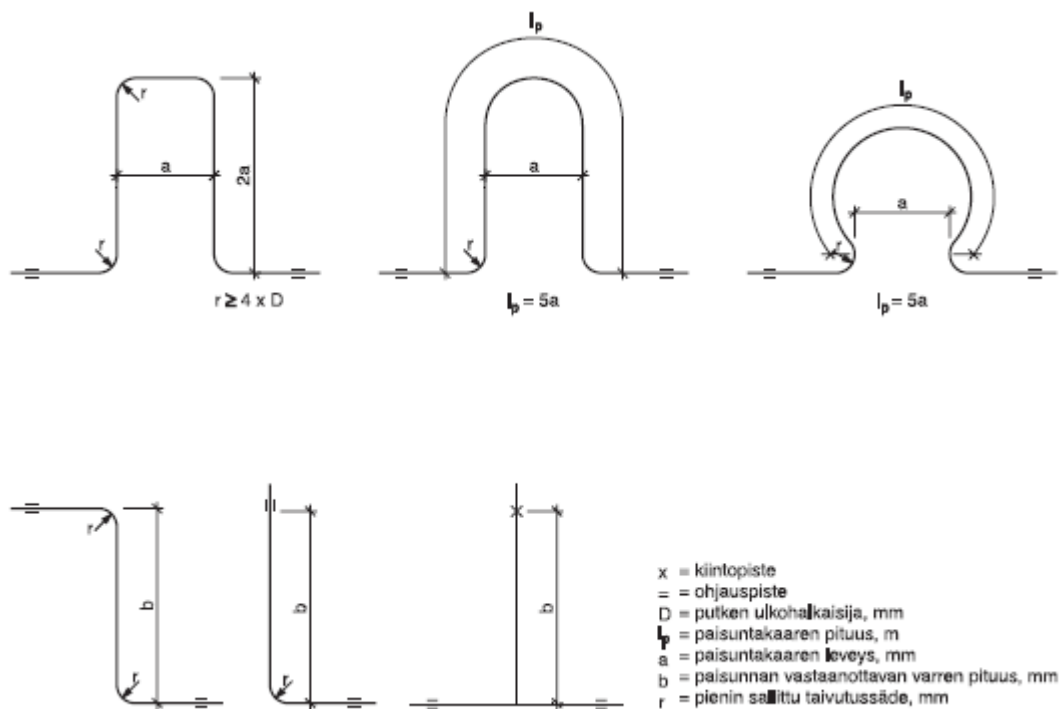
$$a = 16 \cdot \sqrt{D \cdot \Delta l} \quad (11)$$

$$b = 64 \cdot \sqrt{D \cdot \Delta l} = 4 \cdot a \quad (12)$$

D on putken ulkohalkaisija, mm

Δl on putkiosuuden lämpölaajeneminen, mm.

Esimerkkinä koon DN 150 teräsputken paisuntakaaren pituuden tulisi 10 m matkalla olla noin 1,7 m ja paisunnan vastaanottavan varren pituuden noin 7 m. Kuvassa 19 on esitetty paisuntakaarien mitoittamista.



Kuva 19. Metall- ja muoviputkien paisuntakaarien mitoittaminen [12, s. 3]

6 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tarkoituksen oli luoda ohjeistus Ramboll Finland Oy:lle varavoimakoneen pakoputken suunnitteluun. Opinnäytetyössä selvitettiin kokonaisvaltaisesti, mitkä tekijät ovat keskeisiä varavoimakoneen pakoputken suunnittelussa. Tutkittavia aiheita olivat pakoputken materiaali, mitoitus, eristys ja lämpölaajenemisen hallitseminen. Näiden lisäksi tutkittiin varavoimakoneen pakoputken erilaisia reititysmahdollisuuksia, pakokaasun ulospuhallusta, veden poistoa sekä kannakointia. Sanallisen ohjeistuksen lisäksi luotiin Excel-pohjainen mitoitusyökalu, jolla saadaan mitoitettua varavoimakoneen pakoputken koko sekä laskettua putkiosuuksien lämpölaajeneminen ja pakoputken vaatima eristyspaksuus. Mitoitusyökalun laskemien yksittäisten putkiosuuksien lämpölaajeneminen auttaa paljettasaimien mitoituksessa.

Työ toteutettiin tutustumalla varavoimakoneita ja niiden apulaitteita käsitteleviin ohjekortteihin, käsikirjoihin ja muihin verkkomateriaaleihin. Näiden lisäksi käytettiin apuna kirjallista materiaalia, toteutettuja suunnitelmia ja alan ammattilaisten haastatteluja. Näiden pohjalta luotiin ohjeistus ja mitoitusyökalu varavoimakoneen pakoputken suunnitteluun.

Pakoputken materiaaleina käytetään joko terästä, haponkestävää terästä tai ruostumattonta terästä. Teräs on näistä yleisimmin käytetty. [7, s. 6.] Haponkestävän teräksen käyttö on suositeltavaa, koska pakoputkeen pääsee kerääntymään vettä. Haponkestävän teräksen käytöllä saavutetaan pakoputkelle korkein elinikä. [13.]

Pakoputken koon määrittäväksi tekijäksi selvitettiin 3 kPa:n enimmäispainehäviö äänenvaimentimen jälkeen. Yksinkertaisissa mitoituslaskelmissa mitoitus tehdään käyttämällä taulukkomitoitusta, ja tällaisissa tapauksissa pakoputki saa olla enintään 10 m:n pituinen, ja se saa sisältää enintään kolme 90°:n mutkaa. Tätä vaativammat mitoitukset tehdään aina tekemällä painehäviölaskelma. [7, s. 6.]

Eristyksen osalta määrittäväksi tekijäksi selvitettiin pintalämpötilan vaatimus 70 °C. Pakoputken eristyspaksuus on aina laskettava tapauskohtaisesti. [21, s. 3.] Pakokaasun korkeasta 600 °C:n lämpötilasta johtuvaa suurta lämpölaajenemista puolestaan hallitaan pääosin suorien putkiosuuksien välille asennettavilla paljetasaimilla [7, s. 4]. LVI-suunnittelija määrittää niiden paikat ja myös kannakkeiden paikat. Laittevalmistaja mitoittaa paljetasaimet LVI-suunnittelijan antamien lämpölaajenemisien perusteella. Rakennesuunnittelija puolestaan suunnittelee kannakoinnit. [13.]

Pakoputken reitityksen osalta on olemassa useita erilaisia ratkaisuja. Pakoputki voidaan reitittää kiinteistön sisällä, ulkopuolella, suoraan ulkoseinän lävitse tai maan alta maan pinnalle. [7, s. 61.] Reitityksessä huomioidaan aina henkilö- ja paloturvallisuus. Sama pätee myös pakokaasun ulospuhallukseen. Ulospuhalluksessa noudatetaan ympäristöministeriön asetuksia 848/2017 ja 745/2017. Tärkeimmät velvoitteet ilmenevät valtioneuvoston asetuksesta 1065/2017. Vastaavat tiedot löytyvät myös kumotusta Suomen rakentamismääräyskokoelman osasta E3, Pienten savupiippujen rakenteet ja paloturvallisuus. [1, s. 59–60; 3; 7, s. 4.] Pakoputken reitityksessä on huomioitava, että sinne kertyvä vesi päästään poistamaan putkistosta. Vesi kertyy pakoputkeen siihen pääsevistä sateesta, lumesta ja kondenssivedestä. Tämän vuoksi pakoputki asennetaan vähintään 5 %:n kallistuksella kohti vedenpoistopistettä. Vedenpoistopiste eli vesitys on vähintään

DN 25:n suuruinen korroosiota kestävä putki, josta nämä vedet päästään viemäroimään putkivesilukon kautta. [7, s. 6.]

Työtä voi jatkaa tästä aiheesta esimerkiksi tutkimalla tarkemmin varavoimakoneen pakoputken synnyttämää ääntä. Kuinka kaukana tarkalleen ottaen pakoputken ulospuhalluspaikan tulee olla ikkunoista ja oleskelualueista, jotta äänitaso on sopivalla tasolla? Samoin nousi esille seuraava kysymys: Kuinka hormissa kulkeva ja paksusta eristekerroksesta huolimatta pinnaltaan kuuma pakoputki huomioidaan rakennusteknisesti?

Tehtyä opinnäytetyötä voidaan hyödyntää ohjeena suunniteltaessa varavoimakoneen pakoputkea. Lisäksi työntekijä on itse onnistunut sisäistämään nämä asiat ja pystyy jatkossa valjastamaan oppimansa asiat yrityksen hyväksi.

Lähteet

- 1 Hakanen, Pertti; Hakala, Paavo; Kortelainen, Tero; Kousa, Pertti; Laaksonen, Matti; Nurmi, Marko & Piippo, Esa. 2013. Varavoimakoneet ja -laitokset. 4., uudistettu painos. Espoo: Sähkötieto ry.
- 2 Yleistä. 2016. Verkkoaineisto. CT Industrial Oy / FinGen. <<https://www.fingen.fi/yleista/>>. Luettu 5.2.2020.
- 3 Lilja, Markku. 2017. JOLA-yksikön päällikkö. Äyräväinen Oy. Kauppakeskus REDI:n varavoimakoneen pakoputken suunnitelmat. Yrityksen sisäinen dokumentti. Ramboll Finland Oy.
- 4 Taloteknisen suunnittelun tehtäväluettelo TATE18. 2017. ST 41.10. RAKLI ry & Rakennustietosäätiö RTS.
- 5 Dieselgeneraattorit. Verkkoaineisto. AGCO Power Oy. <<https://www.agco-power.com/fi/tuotteet/voiman-tuotanto/dieselgeneraattorit/>>. Luettu 12.4.2020.
- 6 Sandback, Ismo. 2000. Varavoimalaitokset. 3., uudistettu painos. Espoo: Sähkötieto ry.
- 7 Varavoiman apujärjestelmät. 2002. LVI 66-10346. Rakennustietosäätiö RTS ja LVI-Keskusliitto.
- 8 Pienten savupiippujen rakenteet ja paloturvallisuus. 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa E3. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 9 Kauppinen, Kalevi. 2019. Rakennesuunnittelija. A-Insinöörit Oy. Pakoputken kattoläpivienti. Yrityksen sisäinen dokumentti. Ramboll Finland Oy
- 10 Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas. 2019. Verkkoaineisto. Talotekniikka info. <<https://www.talotekniikkainfo.fi/sisailmasto-ja-ilmanvaihto-opas>>. Päivitetty 11.6.2019. Luettu 27.3.2020.
- 11 Ala-Maakala, Pentti. 2020. Tuotekehityspäällikkö. AGCO Power Oy, Nokia. Puhelinkeskustelu. 16.4.2020.
- 12 Putkistojen lämpölaajeneminen. 2001. LVI 12-10330. Rakennustietosäätiö RTS ja LVI-Keskusliitto.
- 13 Makovy, Martin. 2020. Projektipäällikkö. Ramboll Finland Oy, Espoo. Keskustelu. 9.3.2020.

- 14 SFS-EN ISO 5817. Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sula-hitsaus (paitsi sädehitsaus). 2014. Hitsiluokat. Helsinki: Suomen standardisoi-misliitto SFS.
- 15 Hitsausluokat ja hyväksymisrajat. Verkkoaineisto. 2016. Metalliteollisuuden standardisointiyhdistys ry. <<https://www.slideshare.net/SFSedu/hitsausluokat-ja-hyvksymisrajat>>. 1.4.2016. Luettu 20.2.2020.
- 16 LH45 and LHCP45. Verkkoaineisto. Discom B.V. <http://en.discom.eu/files/discom_stand_aard_producten/006_lh45cp45.pdf>. Luettu 16.4.2020.
- 17 Jääskeläinen, Hannu. 2018. Diesel Exhaust Gas. Verkkoaineisto. DieselNet. <https://dieselnet.com/tech/diesel_exh.php>. Päivitetty 25.1.2018. Luettu 24.2.2020.
- 18 Seppänen, Olli. 1995. Rakennusten lämmitys. Helsinki: Suomen LVI-liitto SULVI.
- 19 Bohl, Willi & Krannila, Matti. 1984. Teknillinen virtausoppi. Tampere: Sonator Oy.
- 20 Arminen, Juuso. 2020. Tekninen myyjä. Sejo Oy, Vantaa. Puhelinkeskustelu. 5.3.2020.
- 21 Taloteknisten eristysten mitoitus ja käyttö. 2002. LVI 50-10345. Rakennustie-tosäätö RTS ja LVI-keskusliitto ry.
- 22 Sejo® -paljetasaimien suunnittelu, esimerkkilaskelmat ja asennus. Verkkoai-neisto. Sejo Oy. <https://www.masino.fi/wp-content/uploads/2018/02/Sejo_paljetasaimien_suunnittelu-_ja_asennusohje.pdf> Luettu 5.2.2020.
- 23 Talotekniikassa yleisesti käytettävät eristysmateriaalit ja niiden asennus. 2003. LVI 50-10344. Rakennustietosäätö RTS & LVI-keskusliitto ry.
- 24 SFS 3977. Putki-, säiliö- ja laite-eristykset. 2008. Mitoitus. Helsinki: Suomen standardisoi-misliitto SFS.
- 25 Sejo® -paljetasaimien yleiset käyttö- ja asennusohjeet. Verkkoaineisto. Sejo Oy. <<https://verkkokauppa.sejo.fi/sejo-adeona-file/2753/fi/master>>. Luettu 31.1.2020.
- 26 Paljetasain DN150 hits.±35 PN16. Verkkoaineisto. Sejo Oy. <<https://verkkokauppa.sejo.fi/tuote/v14568/1401153/paljetasain-dn150-hits-35-pn16/12647422/1>>. Luettu 31.1.2020.

- 27 TalotekniikkaRYL 2002 Talotekniikan rakentamisen yleiset laatuvaatimukset Osa 1. 2002. LVI 01-10355. Rakennustietosäätiö RTS, LVI-Keskusliitto ry & Sähkötieto ry.
- 28 Lilja, Markku. 2017. Pakoputken sielunelämää. Verkkoaineisto. Äyräväinen Oy. <<https://www.ayravainen.fi/2017/09/pakoputken-sielunelamaa/>>. 01.09.2017. Luettu 17.1.2020.

Varavoimakoneen pakoputken mitoitusyökalu

Pakoputken painehäviöiden laskentataulukko = Täytä putkiston tiedot

Pakokaasun lämpötila **550 °C**
 Tiheys 0,42 kg/m³
 Kinemaattinen viskositeetti 0,000087 m²/s

Virtaama **2300 l/s**

Lisää rivi

Poista rivi

VALITSE PUTKI
 10: TERÄSPUTKI; DN250, s=5,0

Putken karheus 0,045 mm

Putkiosuus nro	Virtaus l/s	ds mm	A m ²	v m/s	Re	Re-k/d	λ	P _{dyn} Pa	R Pa/m	Pituus m	ΔP _{putk} Pa	Kertavastus	ΔP _{putk} Pa	ΔP _{putk} kPa
1	2300	263	0,054	42,3	127693	21,8	0,016822	378,9	24,24	10,0	242,37	0,5	189,46	0,43
2	2300	263	0,054	42,3	127693	21,8	0,016822	378,9	24,24	10,0	242,37	0,5	189,46	0,43
3	2300	263	0,054	42,3	127693	21,8	0,016822	378,9	24,24	5,0	121,18	0,5	189,46	0,31
4	2300	263	0,054	42,3	127693	21,8	0,016822	378,9	24,24	9,0	218,13	0,5	189,46	0,41

42,34 m/s
NOPEUS OK

1,58 kPa
PAINEHÄVIÖ OK

Bohl, Willi & Krannila, Matti. 1984. Teknillinen virtausoppi, s. 96-97. Tampere: Sonator Oy.

λ	Tavoitteenhaku	Prandtl, 4.60	Moody, 4.59b	Lambdasileä	Blasius, 4.58a	Nikuradse, 4.58b	Laminaari
0,0168	0,0181	0,0000	0,0138	0,0168	0,0167	0,0168	0,0005
0,0168	0,0181	0,0000	0,0138	0,0168	0,0167	0,0168	0,0005
0,0168	0,0181	0,0000	0,0138	0,0168	0,0167	0,0168	0,0005
0,0168	0,0181	0,0000	0,0138	0,0168	0,0167	0,0168	0,0005

Pakoputken eristyspaksuuden laskentataulukko

Lämpöhäviö metriä kohden, qpp		
Pakokaasun lämpötila, T ₁	873	K
Eristyksen ympäristön lämpötila, T ₂	293	K
Eristeen keskilämpötila	298	°C
Eristyksen lämmönjohtavuus, λ	0,074	W/m·K
Eristyksen ulkoalkaisija, d ₂	0,546	m
Eristyksen sisäalkaisija, d ₁	0,324	m
Ulkopinnan lämmönsiirtymiskerroin, α ₂	6,13	W/m ² ·K
Lämpöhäviö metriä kohden	473,19	W/m

Säteilyn lämmönsiirtymiskerroin, α _r		
Pinnan emissiivisyys, ε	0,3	
Stefan-Boltzmannin vakio, σ	5,67E-08	W/(m ² ·K ⁴)
Säteilyn lämmönsiirtymiskerroin, α _r	2,15	W/m ² ·K

Konvektion lämmönsiirtymiskerroin, α _k		
Vapaassa konvektiossa	3,98	W/m ² ·K
Ilman liikkeessä	11,22	W/m ² ·K

Eristeen pintalämpötila, T _e	338,15	K
	65,00	°C

Pakokaasun lämpötila °C = Täytä putkiston tiedot

Ympäristön lämpötila °C

Putki

Eriste

Liikkuuko ilma selvästi pakoputken ympärillä?

Arvioitu ilman nopeus m/s

Pellitys?

Eristeen ulkopinnan tavoitelämpötila, T_e °C
338,15 K

LÄMPÖTILA OK

Vaadittava eristeen paksuus mm

Käytettävä eristyspaksuus mm

LASKE ERISTYSPAKSUUS
(Pro Wired Mat 100)

LASKE ERISTYSPAKSUUS
(Pro Wired Mat 130)