



Dityppioksidin (N_2O) ja metaanin (CH_4) päästökertoimia Suomen voimalaitoksille, lämpökeskuksille ja pienpoltolle

Eemeli Tsupari, Kauko Tormonen, Suvi Monni, Tuula Vahlman,
Aimo Kolsi & Veli Linna

VTT

ISBN 951-38-6595-9 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)
ISSN 1459-7683 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © VTT 2006

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT, Biologinkuja 7, PL 1000, 02044 VTT
puh. 020 722 5261, faksi 020 722 7026

VTT, Biologgränden 7, PB 1000, 02044 VTT
tel. 020 722 5261, fax 020 722 7026

VTT, Biologinkuja 7, P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 5261, fax +358 20 722 7026

Tekijä(t) Tsupari, Eemeli, Tormonen, Kauko, Monni, Suvi, Vahlman, Tuula, Kolsi, Aimo & Linna, Veli		
Nimeke Dityppioksidin (N₂O) ja metaanin (CH₄) päästökertoimia Suomen voimalaitoksille, lämpökeskuksille ja pienpoltolle		
Tiivistelmä Ilmastopimuksen ja Kioton pöytäkirjan velvoitteiden mukaisesti Suomen on arvioitava ja raportoitava kasvihuonekaasupäästönsä vuosittain. Polttoaineen polton metaani- (CH ₄) ja dityppioksidipäästöt (N ₂ O) arvioidaan käyttäen polttoaine- ja polttotekniikkakohtaisia päästökertoimia. Nämä päästöt ovat voimakkaasti riippuvaisia tulipesän olosuhteista, esimerkiksi lämpötilasta. Leijukerroskattiloilla lämpötila on alhaisempi kuin muilla polttotekniikoilla ja laskee yleensä kuorman laskiessa, mikä vaikuttaa erityisesti N ₂ O-päästöön. Jotta tästä ilmiöstä ja sen vaikutuksesta vuosittaisiin päästöihin saataisiin lisää tietoa, tehtiin mittauksia seitsemästä leijupetikattilasta eri kuormituksilla ja polttoaineilla. Lisäksi mitattiin yksi öljykäyttöinen lämpökeskus, sillä tämä tekniikka on Suomessa yleinen ja näitä kattiloita käytetään usein säätävässä roolissa kaukolämpöverkossa. Tämän lisäksi kerättiin tietoa voimalaitosten ja lämpökeskusten kuormitusjakaumista. Julkaisussa esitetään menetelmä, jolla voidaan arvioida laitoksen päästöjä kuormitustietoon perustuen, ja esitetään tutkimustuloksiin perustuen suosituksia CH ₄ - ja N ₂ O-päästökertoimiksi tutkituille polttoaineille ja -tekniikoille. Lisäksi tutkimuksessa mitattiin CH ₄ - ja N ₂ O-päästöjä tyypillisimmistä suomalaisista tulisija- ja pienkattilatyypeistä. Mittauksiin perustuen esitetään suosituksia myös puun pienpolton päästökertoimiksi.		
Avainsanat power plants, heating plants, small-scale combustion, methane, nitrous oxide, emission factor, partial load, mixed combustion, fluidised bed combustion, emission measurements		
Yhteystiedot VTT, Biologinkuja 7, PL 1000, 02044 VTT		
ISBN 951-38-6595-9 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Projektinnumero 32FACTORS
Julkaisu-aika Tammikuu 2006	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivuja 94 s. + liitt. 7 s.
Projektin nimi Energiantuotannon ja teollisuuden kattiloiden dityppioksidin (N ₂ O) ja metaanin (CH ₄) päästöt	Toimeksiantaja(t) Tilastokeskus, Energiateollisuus ry, Metsäteollisuus ry, kauppa- ja teollisuusministeriö, ympäristöministeriö, Foster Wheeler Oy, Kvaerner Power Oy	
Avainnimeke ja ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)	Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	

Published by



Series title, number and
report code of publication

VTT Working Papers 43
VTT-WORK-43

Author(s) Tsupari, Eemeli, Tormonen, Kauko, Monni, Suvi, Vahlman, Tuula, Kolsi, Aimo & Linna, Veli		
Title Emission factors for nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄) from Finnish power and heating plants and small-scale combustion		
Abstract According to the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol, Finland is liable to estimate and report greenhouse gas emissions annually. Methane (CH ₄) and nitrous oxide (N ₂ O) emissions from stationary fuel combustion are estimated using fuel and technology specific emission factors. These emissions depend strongly on combustion conditions, e.g. temperature. In fluidised bed combustion, temperatures are typically lower than in other combustion techniques, and temperature decreases further with decreasing load, resulting in increasing N ₂ O emissions. In this study, measurements were carried out in seven fluidised bed boilers using different fuels and in different loads, in order to be able to estimate annual emissions. In addition, emissions of one oil burner were measured, because this technology is typically used in Finnish district heating networks to adjust supply with demand. A survey was also made regarding annual loading of Finnish boilers. This publication presents recommendations for Finnish CH ₄ and N ₂ O emission factors for the fuels and combustion technologies studied. In addition, CH ₄ and N ₂ O emissions were measured from the most typical small-scale combustion devices used in Finland, and recommendations for emission factors were given based on the results.		
Keywords power plants, heating plants, small-scale combustion, methane, nitrous oxide, emission factor, partial load, mixed combustion, fluidised bed combustion, emission measurements		
Contacts VTT, Biologinkuja 7, P.O.Box 1000, FI-02044 VTT, Finland		
ISBN 951-38-6595-9 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Project number 32FACTORS
Date January 2006	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 94 p. + app. 7 p.
Name of project Nitrous oxide (N ₂ O) and methane (CH ₄) emissions from boilers	Commissioned by Statistics Finland, Association of Finnish Energy Industries, Finnish Forest Industries Federation, Ministry of Trade and Industry, Ministry of Environment, Foster Wheeler Ltd, Kvaerner Power Ltd	
Series title and ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Publisher VTT P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374

Alkusanat

Tässä julkaisussa esitetään projektin ”Energiantuotannon ja teollisuuden kattiloiden dityppioksidin (N₂O) ja metaanin (CH₄) päästöt” tulokset. Projektin rahoittajina olivat Tilastokeskus, Energiateollisuus ry, Metsäteollisuus ry, kauppaja- ja teollisuusministeriö, ympäristöministeriö, Foster Wheeler Oy sekä Kvaerner Power Oy, joille esitämme lämpimät kiitoksemme.

Haluamme kiittää kaikkia projektiin osallistuneita tahoja sekä niitä henkilöitä, jotka ovat antaneet tietoja ja asiantuntemustaan projektin käyttöön: Riitta Pipatti ja Kari Grönfors Tilastokeskuksesta, Jukka Leskelä, Matti Nuutila, ja Pia Oesch Energiateollisuus ry:stä, Reijo Huhta ja Janne Nästi Fingrid Oyj:stä, Antti Rokka Foster Wheeler Oy:stä, Juha Roppo Kvaerner Power Oy:stä, Stefan Sundman Metsäteollisuus ry:stä, Timo Ritonummi kauppaja- ja teollisuusministeriöstä, Jaakko Lehtovaara VAPOsta ja Markku Hietämäki ympäristöministeriöstä.

Lämpimät kiitokset kuuluvat myös kaikille projektiin osallistuneille henkilöille mittauskohteissa sekä kaikille niille laitoksille ja yhtiöille, joilta saimme tietoa kuormitustutkimusta varten.

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	5
Lyhenneluettelo	8
1. Johdanto	10
2. Energiantuotannon ja teollisuuden kattilat.....	12
2.1 Osakuormien, häiriötilanteiden sekä alas- ja ylösajojen yleisyys	12
2.1.1 Lauhdelaitokset	12
2.1.2 Metsäteollisuuden laitokset.....	16
2.1.3 Kaukolämpöä tuottavat laitokset.....	18
2.1.4 Keskimääräiset kuormitukset ja epävarmuusarviot	23
2.2 Mittaukset.....	26
2.2.1 Mittauslaitteisto.....	26
2.2.2 Tutkitut laitokset	27
2.2.2.1 Laitos A (CFB: kivihiili).....	28
2.2.2.2 Laitos B (BFB: turve, biomassa).....	29
2.2.2.3 Laitos C (CFB: turve, biomassa).....	30
2.2.2.4 Laitos D (poltin: POR).....	31
2.2.2.5 Laitos E (CFB: turve, biomassa, kivihiili, REF).....	32
2.2.2.6 Laitos F (BFB: biopolttoaineet, turve, REF).....	32
2.2.2.7 Laitos G (BFB: turve, biomassa, REF).....	32
2.2.2.8 Laitos H (BFB: biopolttoaineet, turve)	33
2.2.3 Mittaustulokset ja prosessitiedot.....	33
2.2.3.1 Prosessitiedot	33
2.2.3.2 Laitos A (CFB: kivihiili).....	35
2.2.3.3 Laitos B (BFB: turve, biomassa).....	37
2.2.3.4 Laitos C (CFB: turve, biomassa).....	39
2.2.3.5 Laitos D (poltin: POR).....	41
2.2.3.6 Laitos E (CFB: turve, biomassa, kivihiili, REF).....	43
2.2.3.7 Laitos F (BFB: biopolttoaineet, turve, REF).....	45
2.2.3.8 Laitos G (BFB: turve, biomassa, REF).....	47
2.2.3.9 Laitos H (BFB: biopolttoaineet, turve)	49
2.2.4 Mittaustulosten epävarmuus.....	51
2.3 Lämpötilan ja kuormituksen vaikutus N ₂ O-päästöön.....	51
2.3.1 N ₂ O-päästön määrittäminen kuormituksen perusteella.....	56
2.4 Polttoaineseoksen vaikutus päästöön	57
2.5 Laitoskohtaiset ominaispäästöt.....	60
2.5.1 Ominaispäästöt mittausjaksolta.....	60

2.5.2	Ominaispäästöt eri kuormituksilla	61
2.6	Päästökertoimet	64
2.6.1	Mitattujen laitostyyppien päästökertoimet.....	64
2.6.2	Päästökertoimien yleistäminen muihin kokoluokkiin.....	65
2.6.3	Suositukset KHK-inventaarion päästökertoimiksi.....	67
2.6.4	Epävarmuusarviot	71
2.7	Jatkotutkimustarpeet.....	72
3.	Pienpoltto	75
3.1	Taustaa.....	75
3.1.1	Puun pienkäyttö.....	75
3.1.2	Lämmityslaitteet.....	75
3.2	Laboratoriomittaukset.....	76
3.2.1	Tulisijojen ja kattiloiden valinta.....	76
3.2.2	Mittausympäristö ja -laitteet	76
3.2.3	Tutkitut laitteet	77
3.2.3.1	Puulämmitteinen saunankiuas.....	77
3.2.3.2	Varaava takka, rakoarina.....	78
3.2.3.3	Varaava takka, uudentyyppinen arina.....	78
3.2.3.4	Stokerikattila 300 kW	78
3.2.3.5	Yläpalokattila 40 kW	79
3.2.4	Mittaustulokset.....	79
3.3	Kenttämittaukset.....	84
3.4	Tulosten tarkastelu.....	85
3.4.1	Laboratoriomittaukset	85
3.4.2	Kenttämittaukset	86
3.4.3	Ehdotukset päästökertoimiksi	86
4.	Yhteenvedo ja johtopäätökset.....	88
	Lähdeluettelo	92

Liitteet

Liite A: Kuormitustutkimuksen kyselykaavake

Liite B: Mittaustuloksia muista tutkimuksista

Liite C: CH₄-pitoisuuden määrittäminen CO-pitoisuuden perusteella

Lyhenneluettelo

BFB	bubbling fluidised bed, kupliva leijupeti
CFB	circulating fluidised bed, kiertoleijupeti
CHP	combined heat and power, yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto
CH ₄	metaani
CO	hiilimonoksidi, häkä
CO ₂	hiilidioksidi
EF	emission factor, päästökerroin
FID	flame ionisation detector (liekki-ionisaatioon perustuva mittaustekniikka)
FTIR	fourier transform infrared (Fourier-muunnokseen perustuvat infrapuna-tekniikka)
HCl	vetykloridi
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, Hallitustenvälinen ilmasto-paneeli
KHK	kasvihuonekaasu
LHV	polttoaineen alempi/tehollinen lämpöarvo
LULUCF	Land-use, land use change and forestry, Maankäytön muutos ja metsätalous
N ₂ O	dityppioksidi, typpioksiduuli, ilokaasu
NDIR	non-dispersive infrared technique (ei-dispesiivinen infrapunatekniikka)
NO	typpimonoksidi
NO ₂	typpidioksidi
NO _x	typen oksidit NO ₂ ja NO (ilmoitetaan yleensä NO ₂ -ekvivalentteina)
O ₂	happi
OGC	organic bound carbon
P	teho
pa	polttoaine
POR	raskas polttoöljy
ppm _{vol}	parts per million, miljoonasosa tilavuudesta
R	korrelaatiokerroin
REF	recovered fuel, lajitelluista polttokelpoisista jätteistä valmistettu polttoaine

SCR	selective catalytic reduction
SK	soodakattila
SNCR	selective non-catalytic reduction
SO ₂	rikkidioksidi
t	lämpötila
TOC	orgaaninen kokonaishiili (total organic carbon)
U	epävarmuus
WET	kosteissa kaasuissa (savukaasujen pitoisuuksista)

1. Johdanto

Ilmastopimuksen ja Kioton pöytäkirjan osapuolena Suomen on raportoitava kasvi-huonekaasupäästönsä vuosittain Ilmastopimuksen sihteeristölle nk. kasvihuonekaasuinventaariolla. Energiantuotannon ja teollisuuden kattiloiden CH₄- ja N₂O-päästöt vastasivat vuonna 2003 noin 1 %:a Suomen koko KHK-päästöistä, ja pienpolton CH₄- ja N₂O-päästöt vastasivat noin 0,5 %:a kokonaispäästöistä (ilman LULUCF-sektoria) [Tilastokeskus 2005]. Päästöarvioihin sisältyy kuitenkin merkittävä epävarmuus.

Kaikkien päästöjen jatkuva ja tarkka mittaaminen vaatisi investointeja mittalaitteistoihin, ja siksi polton KHK-päästöt arvioidaan nykyisin käytännössä päästökertoimilla. CH₄- ja N₂O-päästöjen osalta erilaisille polttotekniikoille ja -aineille on omat päästökertoimensa, mutta näihin päästöihin vaikuttavat myös monet muut tekijät, kuten laitospöytäkirjan lämpötilat, laitoksen kuorman muutokset ja polton ilmakertoimen vaihtelut.

Suomen KHK-inventaariossa käytettävät CH₄- ja N₂O-päästökertoimet pistelähteille olivat aluksi lähinnä Sture Boströmin 1990-luvun alkupuolella julkaisemista tutkimuksista [Boström 1994; Boström et al. 1992; Boström et al. 1990]. Boströmin tutkimuksissa päästökertoimien perustana ovat kirjallisuustutkimukset sekä teoreettiset tutkimukset ominaispäästöihin vaikuttavista tekijöistä. Päästökertoimia päivitettiin myöhemmin joihinkin mittaustuloksiin ja asiantuntija-arvioihin perustuen. Myös KHK-inventaariossa käytettävät pienpolton päästökertoimet pohjautuvat Boströmin tutkimuksiin [Boström 1994] sekä IPCC:n oletuskertoimiin [IPCC 1997].

Päästökertoimien päivitystä varten valmistui vuonna 2005 VTT:n selvitys CH₄- ja N₂O-päästökertoimista [Tsupari et al. 2005]. Selvityksessä verrataan Suomessa käytettyjä päästökertoimia kansainvälisiin suosituskertoimiin, kirjallisuudessa esiintyneisiin päästökertoimiin, asiantuntijoiden arvioihin sekä uusimpiin mittaustuloksiin. Selvityksessä esitetään myös tekijöiden ehdotus kansallisessa laskennassa käytettäväksi päästökertoimiksi. Kyseisessä selvityksessä havaittiin, että mm. häiriötilanteilla voi olla suurempi vaikutus päästöihin kuin polttotekniikalla tai polttoaineella. Julkisia mittaustuloksia todellisen mittakaavan voimalaitoksista on ollut tähän mennessä saatavissa vähän, ja mittaukset on yleensä tehty täydellä kuormalla ja optimaalisissa olosuhteissa. Tällaiset mittaustulokset kuvaavat siis paremminkin laitosten minimipäästöjä kuin todellisia päästöjä. Lisäksi havaittiin, että tietoa pienpolton päästökertoimien tarkentamiseksi oli saatavilla hyvin vähän.

Tiedon lisäämiseksi aloitettiin projekti ”Energiantuotannon ja teollisuuden kattiloiden dityppioksidin (N₂O) ja metaanin (CH₄) päästöt”, jonka tulokset esitetään tässä julkaisussa.

Julkaisun luku 2 käsittelee teollisuuden ja energiantuotannon kattiloita. Projektin tämän osan tarkoituksena oli selvittää häiriötilanteiden, kuormituksen ja polttoaineseosten vaikutuksia CH₄- ja N₂O-päästöihin energiantuotannon ja teollisuuden kattiloista. Työ keskittyi näiden kaasujen kannalta tärkeimpiin laitostyyppeihin (CFB, BFB) sekä polttoaineisiin (hiili, turve, biomassa). Myös öljykäyttöinen lämpökeskus oli mittauskohteiden joukossa. Projektin puitteissa suoritettiin mittauksia kahdeksalta laitokselta. Osa mittauksista tehtiin aiempia CH₄- ja N₂O-mittauksia pidempikestoisina. Laitokset ja mittausjärjestelyt kuvataan tarkemmin luvussa 2.2. Myös muiden mitattujen komponenttien (mm. CO, NO_x, SO₂, HCl) pitoisuuksia esitetään, mutta niitä ei ole analysoitu tarkemmin tämän projektin puitteissa. Jotta mittaustuloksia voitaisiin soveltaa kansallisella tasolla keskimääräisiksi päästökertoimiksi, selvitettiin laitosten kuormitustasoja sekä häiriötilanteiden yleisyyttä kuormitustutkimuksessa, joka kuvataan luvussa 2.1. Kuormitustutkimuksessa käytetty kyselykaavake on esitetty liitteessä A. Luvuissa 2.3–2.5 tarkastellaan kuormituksen ja lämpötilan sekä polttoaineseoksen vaikutusta päästöihin ja esitetään mitattujen laitosten ominaispäästöt. Luvussa 2.6 lasketaan keskimääräiset kansalliset päästökertoimet epävarmuuksineen yhdistämällä mittausten ja kuormitustutkimuksen tiedot toisiinsa ja esitetään suosituksia KHK-inventaariossa käytettäviksi päästökertoimiksi. Ehdotettuja päästökertoimia verrataan myös käytössä oleviin päästökertoimiin ja saatavilla olevaan mittaustietoon muista lähteistä. Muista lähteistä saatuja mittaustietoja on koottu liitteeseen B. Liitteessä C esitetään menetelmä laitokohtaisen CH₄-päästön arvioimiseen CO-päästön perusteella.

Luku 3 käsittelee pienpolttua. Pienpolton päästöjä tutkittiin mittauksin, joita tehtiin sekä laboratoriossa että kentällä. Näiden mittausten perusteella esitetään suositukset puun pienpolton päästökertoimiksi. Luvussa 4 esitetään yhteenveto ja johtopäätökset.

2. Energiantuotannon ja teollisuuden kattilat

2.1 Osakuormien, häiriötilanteiden sekä alas- ja ylösajojen yleisyys

Tätä tutkimusta edeltäneessä päästökertoimien tarkennusprojektissa [Tsupari et al. 2005] huomattiin kattilan polttoainekuorman vaikuttavan voimakkaasti joidenkin laitos-tyyppien N_2O -päästöön. Tästä syystä päätettiin selvittää erilaisten kuormitustilanteiden esiintyminen Suomen voimalaitoksissa ja lämpökeskuksissa, jotta mittaustuloksia voitaisiin yleistää koko laitostyyppiä kuvaavaksi päästökertoimeksi. Päästöjen riippuvuus kuormituksesta (hetkellisestä polttoainetehosta) johtuu pääasiassa tulipesän lämpötiloista ja ilmakertoimesta ja on N_2O :n osalta ennakkoon arvioituna merkittävämpää leijupe-deillä kuin muilla kattilatyypeillä. Erilaiset kuormitustilanteet, erityisesti häiriöt, voivat vaikuttaa merkittävästi myös metaanipäästöihin. Myös erilaisten häiriötilanteiden yleisyydestä pyrittiin saamaan tietoa, mutta se osoittautui erittäin haastavaksi. Tästä johtuen häiriötilanteiden yleisyyttä arvioidaan tässä työssä yhdessä käynnistysten kanssa, koska katkoja polttoaineen syötössä voidaan arvioida laitosten hetkellisistä tehotiedoista.

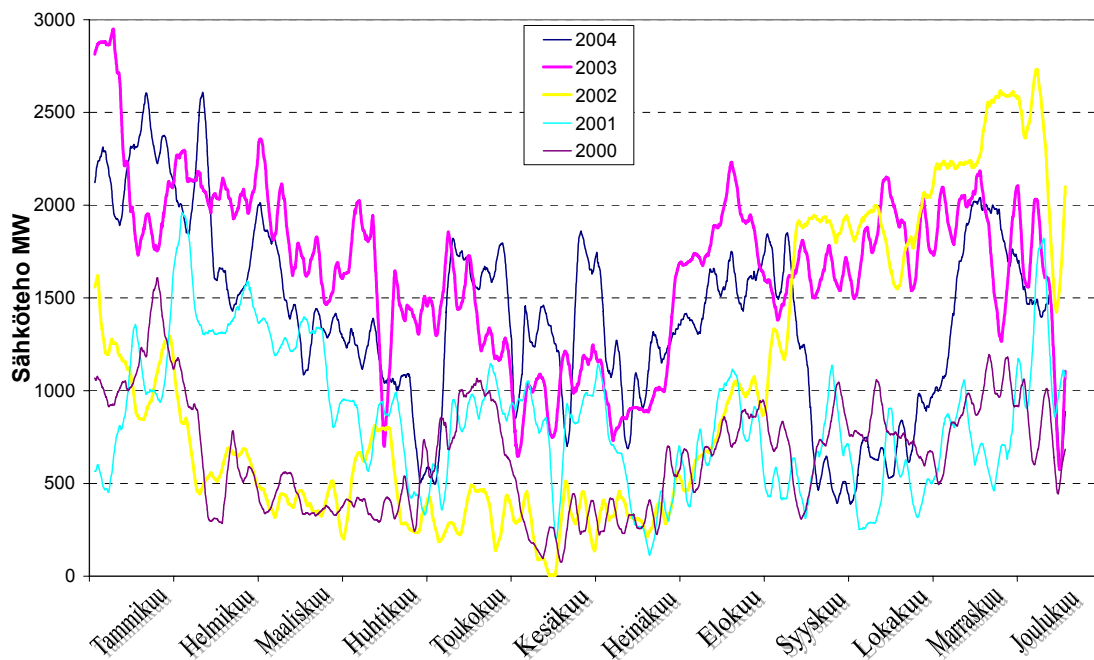
Tässä kuormitustutkimuksessa laitokset jaettiin kolmeen ryhmään: lauhdelaitoksiin, metsäteollisuuden laitoksiin ja kaukolämpöä tuottaviin laitoksiin. Kaukolämpöä tuottaviin laitoksiin laskettiin sekä CHP-laitokset että lämpökeskukset. Myös höyryturbiinin lauhdeperällä varustettuja kaukolämpöä tuottavia laitoksia on käsitelty tässä tutkimuksessa CHP-laitoksina. Metsäteollisuuden laitosten ja kaukolämpölaitosten välillä rajat eivät aina ole selviä, sillä useat laitokset tuottavat sekä kaukolämpöä yhteiskunnan käyttöön että höyryä teollisuudelle.

2.1.1 Lauhdelaitokset

Lauhdelaitokset ovat Suomessa ydinvoimaa ja reservikaasuturbiineja lukuun ottamatta pääasiassa suuria, sähköteholtaan yli 100 MW:n hiilipölykattiloita. Vaikka Suomessa käytetään lauhdesähkön tuotantoon myös esimerkiksi öljykattiloita, CHP-laitosten lauhdeperiä, polttomootoreita ja kaasuturbiineja, tässä luvussa käsitellään pääasiassa hiilipölykattiloita, sillä laitostyypeillä tuotetaan valtaosa Suomessa polttoprosesseilla tuotetusta lauhdesähköstä.

Tyypillisten lauhdelaitosten tiedot saatiin Suomen sähköverkoista vastaavan Fingrid Oyj:n kautta. Tietojen luottamuksellisuuden vuoksi sähkötehotiedot saatiin muodossa, josta yksittäisiä laitoksia ei voitu tunnistaa. Tiedoissa on hiilipölykattiloiden lisäksi mukana turvepölykattila, öljykattila ja kaasuturbiineja.

Lauhdesähkön tuotanto vaihtelee vuosittain muun muassa sähkön ja päästöoikeuksien hinnan, sähkön kysynnän ja tarjonnan sekä polttoaineiden hintojen mukaan. Kuva 1 kertoo, kuinka tässä työssä tutkittujen lauhdelaitosten yhteenlasketut sähkötehot ovat vaihdelleet vuosina 2000–2004. Kuvassa esitetyissä käyrissä on otettu Fingridiltä saaduista tuntikeskiarvoista neljän vuorokauden liukuvat keskiarvot kuvaajien selkeyttämiseksi. Tämä poistaa kuvaajasta ääripäät ja loiventaa muutoksia.

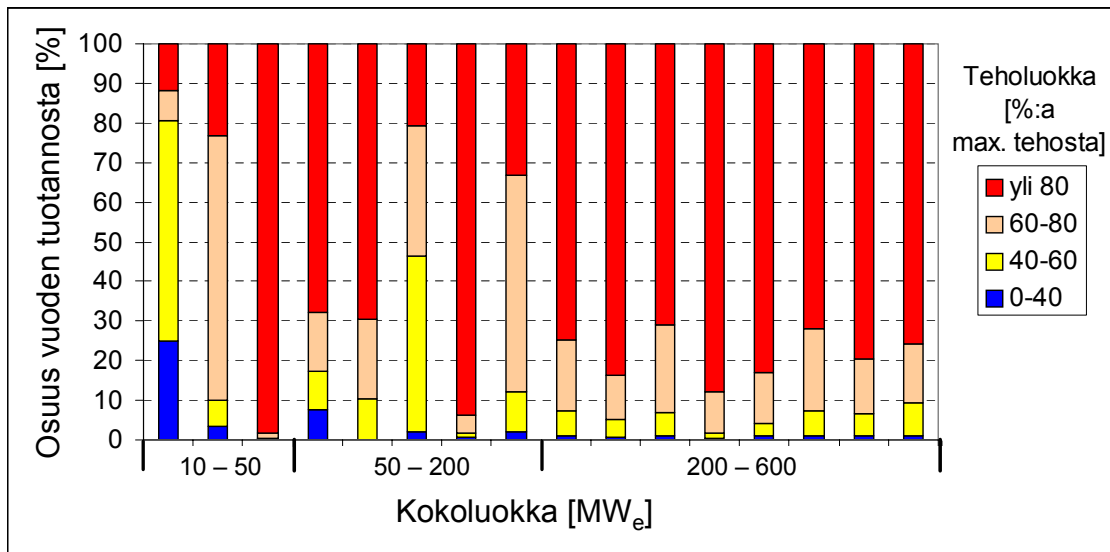


Kuva 1. Tutkittujen lauhdelaitosten yhteenlaskettu sähköteho [MW] eri vuosina.

Kuva 2 esittää tutkimuksessa mukana olleiden lauhdelaitosten kuormitusjakaumat vuoden 2004 sähkötehoista laskettuna. Reservikaasuturbiinien tiedot on jätetty tästä kuvasta pois ja esitetty myöhemmin kuvassa 3. Tietojen luottamuksellisuudesta johtuen kuormitusjakaumat on jaettu kolmeen kokoluokkaan. Kuvassa olevat jakaumat on laskettu sähkötehojen [MW] tuntikeskiarvoista. Lähtöarvojen yksikkönä voidaan siis pitää tunnin aikana tuotettua sähköä [MWh].

Kuvasta 2 voidaan todeta, että pienimmässä kokoluokassa kuormitukset vaihtelevat huomattavasti laitoksesta toiseen. Suurilla laitoksilla näyttäisi olevan pienempää kokoluokkaa vähemmän osakuormia. Tämän otoksen mukaan kaikki sähkötehoiltaan yli 200 MW:n kattilat tuottivat yli 90 % sähkötehostaan yli 60 %:n kuormalla. Useista kuormituskuvaajista näkyi täyden kuorman lisäksi toinenkin yleinen kuormitustaso. Tämä taso oli yleensä välillä 50–80 % täydestä kuormasta. Kuvasta 1 nähtiin, että tutkimuksessa mukana olleiden lauhdelaitosten yhteenlasketut tuotannot vaihtelivat jonkin verran vuosittain. Oletettavasti myös yksittäisten laitosten kuormitusjakaumat muuttuvat vuosittain, mutta voidaan olettaa, että vuosittaisten vaihtelujen merkitys on lauhde-

laitosten keskimääräistä kuormitusta tarkasteltaessa vähäinen verrattuna yksittäisten laitosten välisiin eroihin.

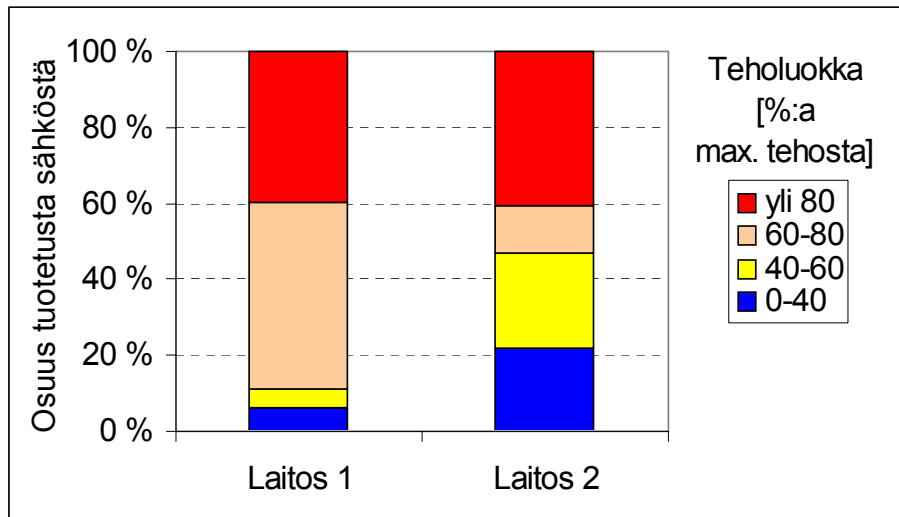


Kuva 2. Eri kuormitustasojen osuudet lauhdelaitoksilla.

On hyvä muistaa, että kuva 2 näyttäisi aivan erilaiselta, jos pystyakselilla olisi käyttöaika tunteina. Tällöin osakuormien osuudet olisivat paljon suuremmat ja varsinkin aika, jolloin laitos on alas ajettuna, näkyisi voimakkaasti 0–40 %:n osuudessa. Tällainen kuva voisi kuitenkin olla harhaanjohtava, sillä päästömäärät riippuvat syötetystä polttoainemäärästä eivätkä ajasta. Päästökertoimetkin määritetään juuri syötettyä energiayksikköä kohti.

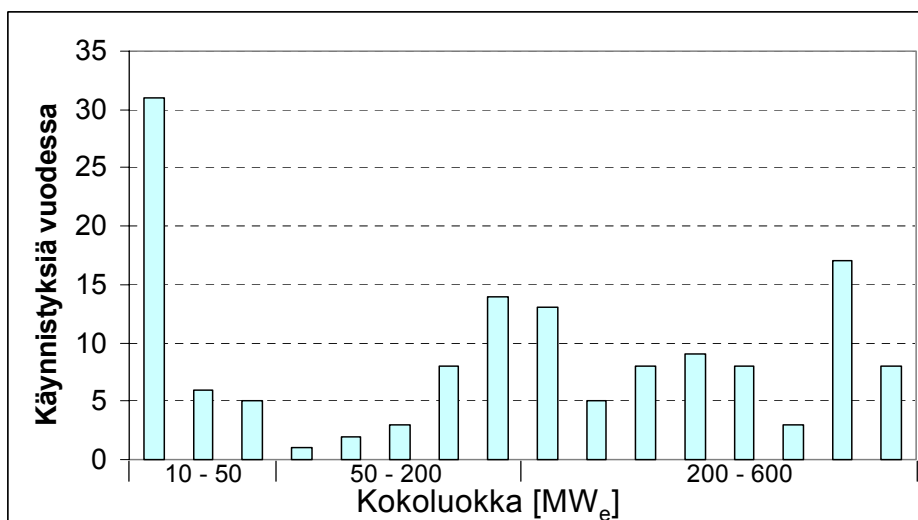
Kuormitusjakaumat ovat riippuvaisia myös valitusta 100 %:n tehosta. Koska lauhdelaitosten kohdalla ei tiedetty kaikkien laitosten nimellistehoja tai tunnistetietoja, käytettiin arvioissa suurinta sähkötehoa, joka saadussa datassa esiintyi. Jos vuoden tilastoissa oli kuitenkin muutama selkeästi muita suurempi arvo, valittiin maksimitheoksi tuotantotiedoissa seuraavaksi suurin, edellisiä useammin esiintyvä luku. Näin saatiin vähennettyä esimerkiksi tehomittauksesta johtuvien virheiden vaikutusta kuormitusjakaumiin.

Reservikaasuturbiinien kuormitusjakaumat esitetään kuvassa 3. Tässä käsitellyt kaasuturbiinit ovat sähköteholtaan alle 20 MW, ja niitä käynnistetään 10–20 kertaa vuodessa. Reservikaasuturbiinien käynnistystilanteen kesto on kuitenkin lyhyt, normaalisti vain noin 5 minuuttia, joten pienimmän kuormitusluokan (0–40 %) osuus kokonaistuotannosta jää suhteellisen pieneksi. Laitokset edustavat tyypillisiä suomalaisia reserviturbiineja, vaikkakin Suomessa on myös muutama sähköteholtaan yli 100 MW:n reserviturbiini.



Kuva 3. Reservilaitoksina toimivien kaasuturbiinien kuormitusjakaumat.

Koska käynnistykset ja häiriöt voivat vaikuttaa voimakkaasti hetkelliseen ominaispäästöön ja mahdollisesti merkittävästi jopa vuotuisen päästöön, esittää kuva 4 aiemmin kuormituskuvaajissa (kuva 2) esitettyjen laitosten käynnistysten ja häiriöiden määrät vuonna 2004. Laitokset ovat molemmissa kuvissa samassa järjestyksessä. Käynnistys- ja häiriötilanteet on määritelty tässä tarkastelemalla tilanteita, joissa sähköteho on ollut nolla yli kymmenen tunnin ajan. Kymmenen tunnin aikaraja on otettu käyttöön, jotta esim. sähkötehon mittausten ja generaattorien häiriöt saataisiin suodatettua pois. Myöskään olosuhteet kattilassa (esimerkiksi lämpötila) eivät muuttune yhtä nopeasti kuin sähköteho, vaikka sähkötehosta olisikin lyhytaikaisia heilahteluja.



Kuva 4. Lauhdelaitosten käynnistysten ja häiriötilanteiden arvioidut määrät vuodessa (käynnistykset ja häiriöt esitetään yhteenlaskettuna samassa pylväässä).

Vertailtaessa osakuorma- ja käynnistyskuvia (kuvat 2 ja 4) voidaan huomata, että käynnistysten määrä vaikuttaa myös osakuorman osuuteen. Toisaalta käynnistysten määrä ei selvästikään ole ainoa osakuormia lisäävä tekijä. Myöskään aika, jonka laitokset vuosittain ovat seisokissa, ei korreloi selvästi osakuormien osuuksien kanssa. Lauhdelaitosten osalta vaikuttaakin siltä, että kuormitus- ja käynnistysjakaumat ovat täysin laitoskohtaisia, joskin karkeasti riippuvaisia laitoksen kokoluokasta.

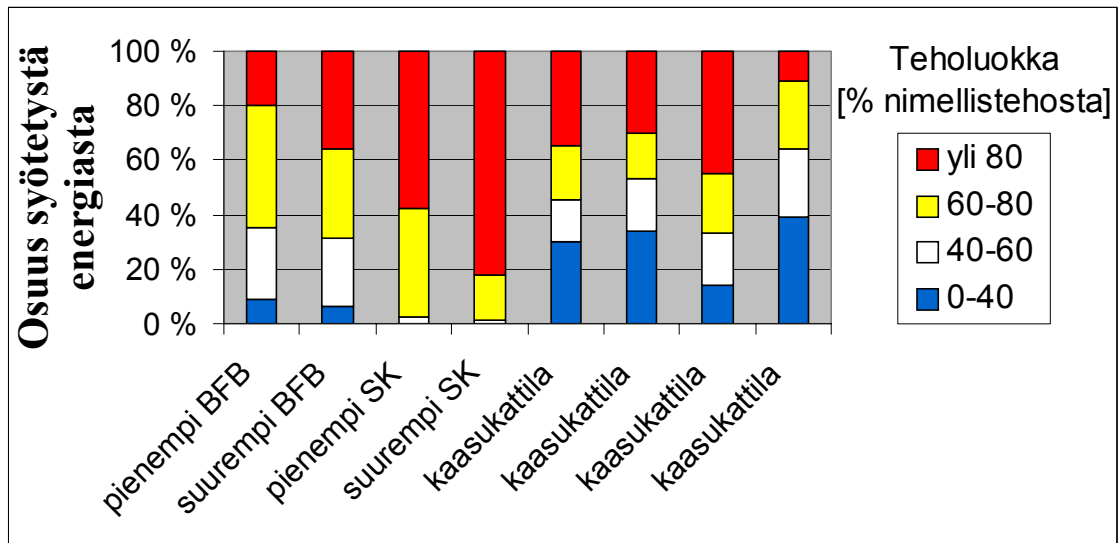
Metsäteollisuuden ja kaukolämpölaitosten kuormitukset on määritetty polttoainetehoon perustuen (kohdat 2.1.2 ja 2.1.3). Lauhdelaitosten kohdalla voidaan kuitenkin olettaa, että sähkötehon jakauma on likimain sama kuin polttoainetehon jakauma. Koska hyötysuhde on osakuormalla huomattavasti pienempi kuin täydellä kuormalla, tarvitaan sähköntuotantoon suhteessa hieman enemmän polttoainetta. Tämä aiheuttaa pientä epätarkkuutta sovellettaessa kuormitusjakaumia mittaustuloksiin. Hyötysuhde laskee kuitenkin vain muutamia prosentteja lähes koko kuormitusalueella, joten jakaumia laskettaessa tämä epätarkkuus on merkityksetön verrattuna esimerkiksi laitoskohtaisiin vaihteluihin ja vuosittaiseen kuormitustilanteiden vaihteluun. Myös höyryn käyttö nuohouksiin aiheuttaa virhettä, kun sähkötehon jakaumia tulkitaan suoraan polttoainetehon jakaumina. Tämäkin virhe on tässä työssä merkityksettömän pieni, sillä sähkötehon hetkellisiä vaihteluita on tasoitettu ottamalla tiedoista kymmenen tunnin liukuva keskiarvo.

2.1.2 Metsäteollisuuden laitokset

Metsäteollisuuden polttolaitosten kuormitus riippuu lähinnä tuotannon tarpeista. Sellutehtailla soodakattilat ajavat täydellä tai lähes täydellä teholla melkein koko vuoden. Jos sellutehtaan yhteydessä on paperitehdas, soodakattila tai -kattilat ajavat halutun sellun tuotannon mukaan, eli niiden kuormitus vaihtelee. Kuorikattilat toimivat yleensä säätävinä kattiloina. Lisäksi tehtailla on lukuisia pieniä kattiloita ja polttimia, kuten hajukaa-supolttimet [Vakkilainen 2005].

Tutkimus rajattiin metsäteollisuuden osalta tehtaisiin, joissa on paperin ja kartongin valmistusta, koska näillä tehtailla on enemmän tämän työn kannalta olennaisia polttolaitoksia kuin erillisillä sahoilla tai muilla puutuotteita valmistavilla tehtailla. Pelkästään sellua valmistavia tehtaita ei ole Suomessa montaa, ja nekin tuottavat lähes kaiken energiansa täydellä teholla ajavan soodakattilan avulla.

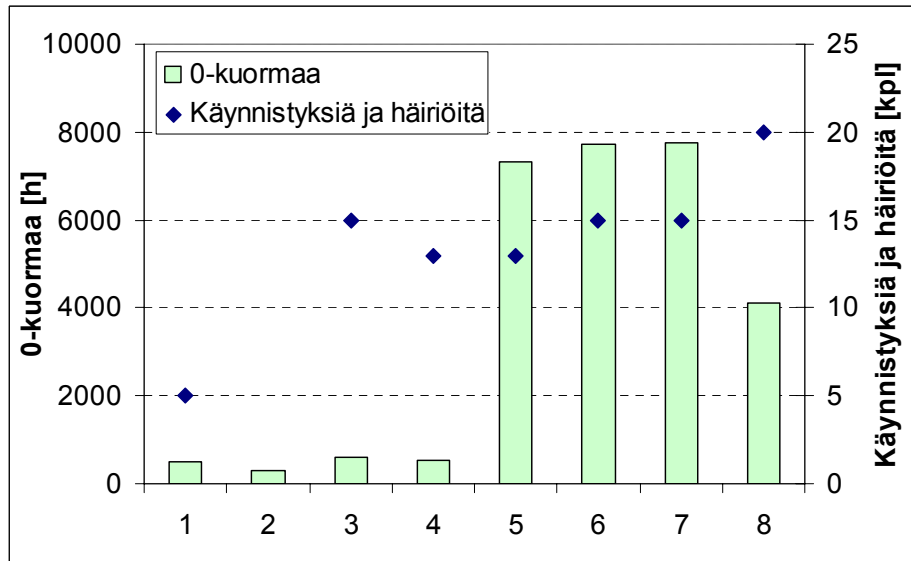
Metsäteollisuuden kuormitustietoja selvitettiin Metsäteollisuus ry:n kautta. Tietoja saatiin ainoastaan kahden integraatin kattiloista. Tästä syystä kuvassa 5 esitetyt kuormitusjakaumat ovat vain esimerkkejä siitä, millaisia jakaumia metsäteollisuuden laitoksissa voi esiintyä, ja ne voivat poiketa merkittävästi keskiarvoisesta metsäteollisuuden kattilan kuormitusjakaumasta.



Kuva 5. Sellu- ja paperitehtaiden polttolaitosten kuormitusjakaumia.

Yksittäisen kattilan kuormitusjakauma saattaa olla riippuvainen esim. tehtaan iästä, koneiden ja kattiloiden lukumäärästä, massan valmistustavasta ja tehtaan tuotteista. Kuormitusjakauma voi myös muuttua vuosittain mm. tuotannon, sään ja sähkön hinnan mukaan. Kuvassa 5 esitetyt jakaumat ovat suurista tehtaista, joissa on sekä mekaanisen että kemiallisen massan valmistusta ja useita paperikoneita. Ainakin toisesta tehtaasta myydään lisäksi lämpöä kaupungin kaukolämpöverkkoon, mikä osaltaan vaikuttanee kuormitusjakaumiin.

Kuormitusdatasta voitiin myös laskea aika, jonka kattila on vuosittain seisokissa, sekä arvio käynnistysten ja häiriötilanteiden määrästä. Käynnistykseksi tai häiriötilanteeksi on määritetty tilanne, jossa polttoaineteho on yli tunnin 0 MW. Kuva 6 esittää seisonta-aikaa, käynnistyksiä ja häiriöitä tutkituissa kattiloissa. Kattilat esitetään numeroina, ja ne ovat samassa järjestyksessä kuin kuvassa 5. Kattilan 2 (suurempi BFB-kattila) käynnistysten määrää ei voitu luotettavasti arvioida, sillä kattilan osalta saatiin tietoja vain pysyvyyskäyrän muodossa.



Kuva 6. Esimerkki seisonta-ajan, käynnistysten ja häiriötilanteiden yleisyydestä metsäteollisuuden kattiloissa.

2.1.3 Kaukolämpöä tuottavat laitokset

Kahteen edelliseen ryhmään verrattuna suurin ja heterogeenisin ryhmä ovat kaukolämpöä tuottavat laitokset. Ryhmään kuuluu paljon pieniä (alle 5 MW_{pa}) lämpökeskuksia mutta myös yli $300 \text{ MW}_{\text{pa}}$:n CHP-laitoksia, joiden polttotekniikat vaihtelevat. Ryhmään kuuluu satoja laitoksia ympäri Suomea, joten kuormitustietojen etsiminen aloitettiin sähköpostikyselyllä yhteistyössä Energiateollisuus ry:n kanssa (kyselykaavake on liitteessä A).

Kyselyn vastausprosentti jäi alle 10 %:iin energiayhtiöistä, joten sen perusteella ei voitu arvioida luotettavasti keskimääräisiä kuormituksia. Polttolaitoskohtaisesti vastausprosentti oli vielä huonompi, sillä erityisesti suurilta energiayhtiöiltä saatiin vain vähän vastauksia. Tähän lienee useita syitä; eräs merkittävä syy on se, että suuri osa lämpökeskuksista säilyttää tuntitason kuormitustietojaan vain vähän aikaa tai niiden tulostaminen automaatiojärjestelmästä on hankalaa.

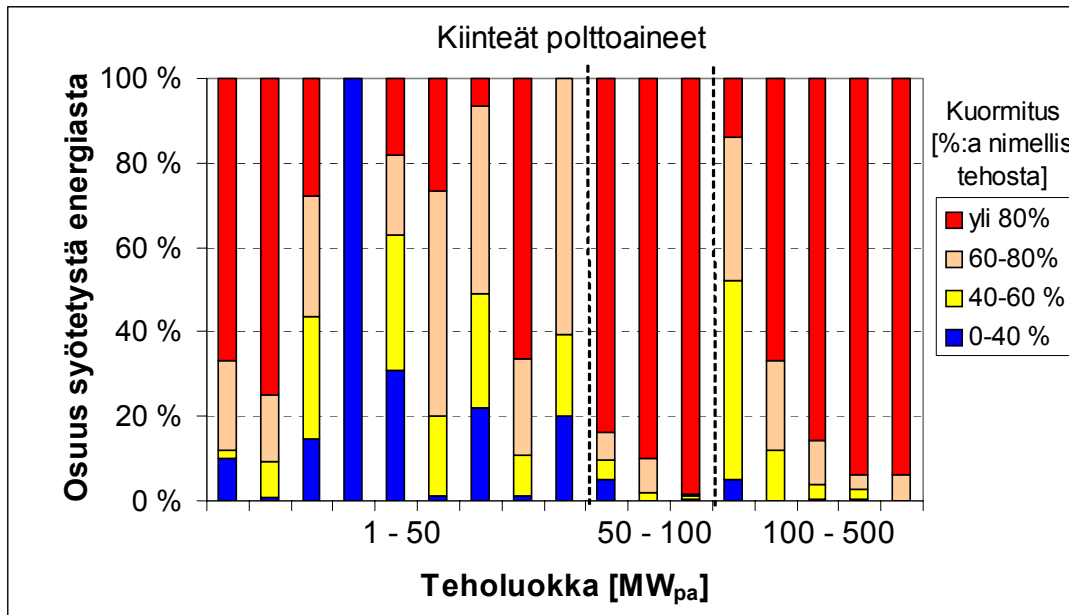
Huonon vastausprosentin vuoksi päätettiin jatkaa kyselyä kohdistettuna tietyille laitoksille. Aluksi määritettiin yhdessä Energiateollisuus ry:n kanssa tyypilliset, mahdollisimman hyvin keskiarvoa kuvaavat laitostyyppit erityyppisistä kaukolämpöverkoista ja etsittiin näistä esimerkkilaitoksia. Yhteensä näin saatiin 24 laitostyyppiä, joiden kuormitukset voivat ennalta arvioiden poiketa selvästi toisistaan. Laitostyyppit esitetään taulukossa 1.

Taulukko 1. Kaukolämpöä tuottavien laitosten kategoriat. K tarkoittaa liitteen A kyselyyn vastannutta laitosta tai laitoksia ja M tarkoittaa myöhemmin tiedusteluihin vastannutta laitosta. Tyhjiin kohtiin ei saatu vastausta tai Suomesta ei löytynyt kohtaan sopivaa laitosta. Joihinkin kohtiin sen sijaan tuli useitakin vastauksia.

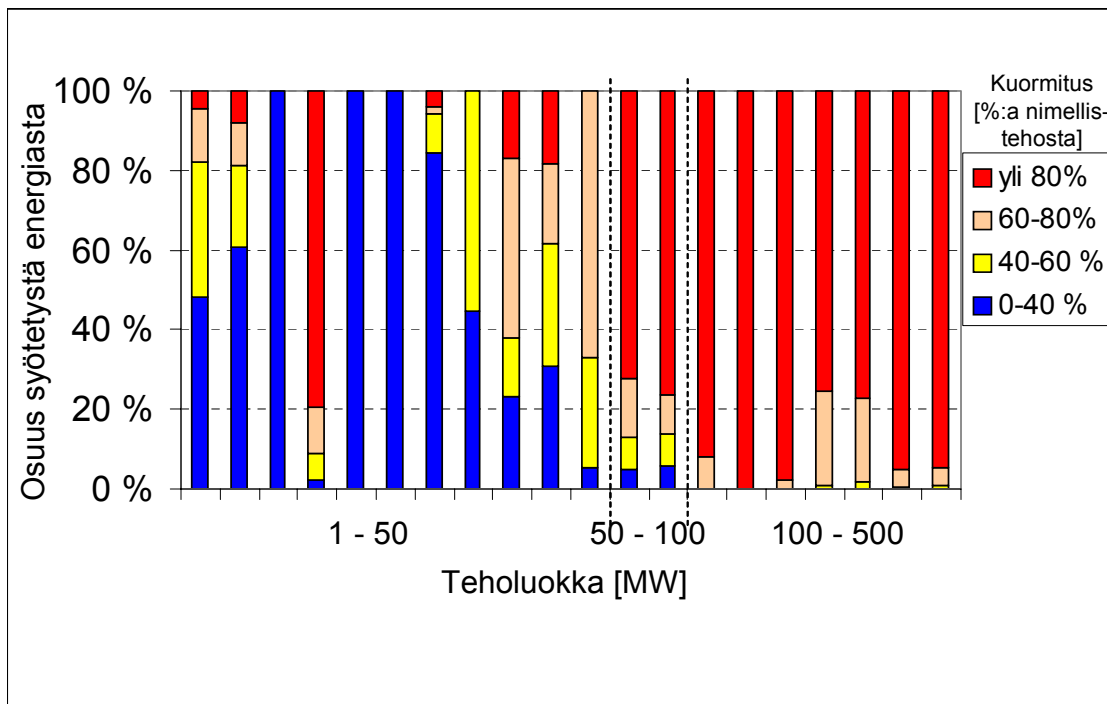
Polttolaitos		Kaukolämpöverkko		
Rooli verkossa	Polttoaine	Suuri kaupunki	Pieni kaupunki	Kylä
Peruskuorma	Kiinteä	M	K, M	M
Peruskuorma	Neste tai kaasu	M	M	
Säätävä	Kiinteä	M	M	K, M
Säätävä	Neste tai kaasu	M	K, M	
Huippukuorma	Kiinteä			
Huippukuorma	Neste tai kaasu		K, M	K, M
Varalaitos	Kiinteä		M	
Varalaitos	Neste tai kaasu		M	M

Taulukon avulla tärkeiksi havaittuihin laitoksiin soittamalla saatiin kuormitustietoja huomattavasti paremmalla vastausprosentilla kuin alkuperäisellä kyselyllä. Lisäksi laitoksilta, joissa tämän projektin mittauksia suoritettiin, pyydettiin kuormitustietoja sekä mittausjaksolta että pidemmältä aikaväliltä. Näin saatiin kattavasti kuormitustietoa suomalaisista voimalaitoksista ja lämpökeskuksista.

Yhteenveto tutkimuksen tuloksista on kuvissa 7 ja 8. Laitokset esitetään kokoluokittain, jolloin luottamuksellista tietoa ei voida yhdistää kuormitustietoja luovuttaneisiin laitoksiin. Kuvaajissa esitetyt jakaumat on laskettu laitosten lähettämistä polttoainetehon tuntikeskiarvoista suhteessa nimellistehoon. Joissain vastauksissa polttoaineteho laskettiin lämmöntuotannosta tai CHP-laitoksilla sähkön ja lämmön yhteenlasketusta tuotannosta. Näissä laskelmissa käytettiin laitoksien antamia hyötysuhteita tai niiden puuttuessa vastaavien laitosten hyötysuhteita. Useimmista laitoksista tiedot saatiin noin vuoden ajalta, mutta osassa vastauksista oli useamman vuoden tehotiedot, joista käytettiin keskiarvoa. Laitoksia, joista saatiin huomattavasti alle vuoden tehotiedot, ei yleensä liitetty mukaan, sillä ne vääristäisivät jakaumia ulkoilman lämpötilojen ja lämmitystarpeen vaihtelun takia. Kuitenkin mukana on myös vastauksia, joista puuttuu esimerkiksi koko kesän tiedot, mutta henkilökohtaisten haastattelujen perusteella voitiin todeta kyseisen laitoksen olleen alas ajettuna suurimman osan kesästä. Vastauksista jätettiin pois myös sellaiset laitokset, joissa kahdella tai useammalla kattilalla oli yhteinen polttoainetehon mittausta eikä kattiloiden osuuksia voitu erottaa toisistaan. Jos tällaisesta datasta laskisi kuormitusjakauman, tulisi siihen luultavasti vähemmän sekä pienimpiä että suurimpia kuormia, kuin mitä kyseisillä kattiloilla on erikseen tarkasteltuna.

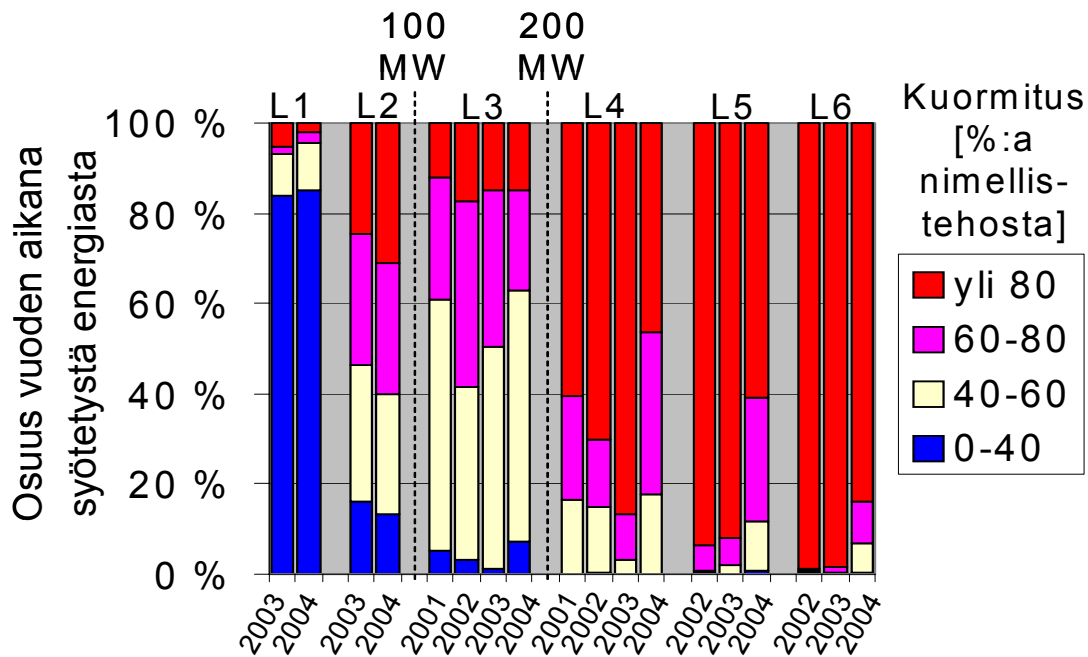


Kuva 7. Kuormitusjakaumia kiinteitä polttoaineita käyttävistä CHP-laitoksista ja lämpökeskuksista.



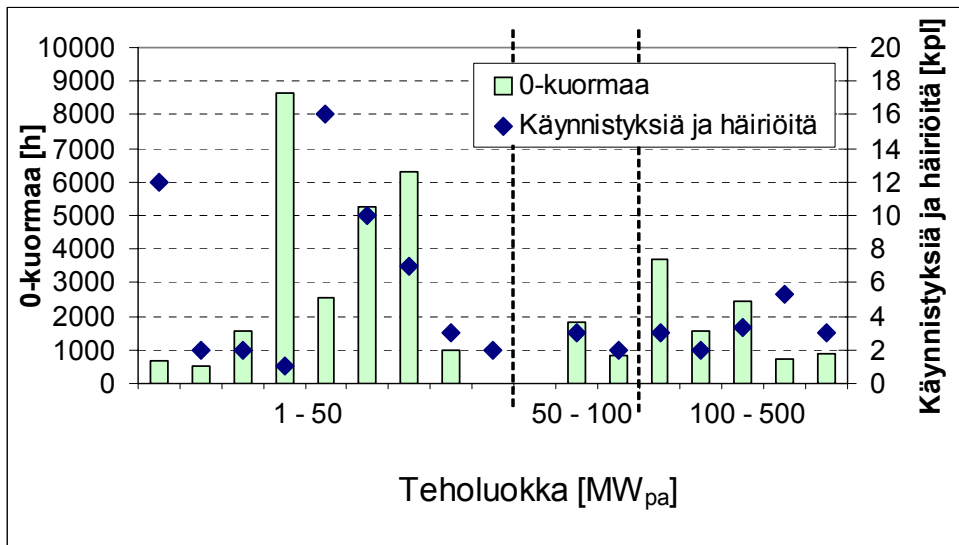
Kuva 8. Kuormitusjakaumia nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita käyttävistä CHP-laitoksista ja lämpökeskuksista.

Kuormitusjakaumat vaihtelevat myös samalla laitoksella vuosittain. Kuvassa 9 on useamman vuoden kuormitusjakaumat niiden laitosten osalta, jotka lähettivät monen vuoden tehotiedot. Merkinnät L1–L6 tarkoittavat kutakin laitosta.

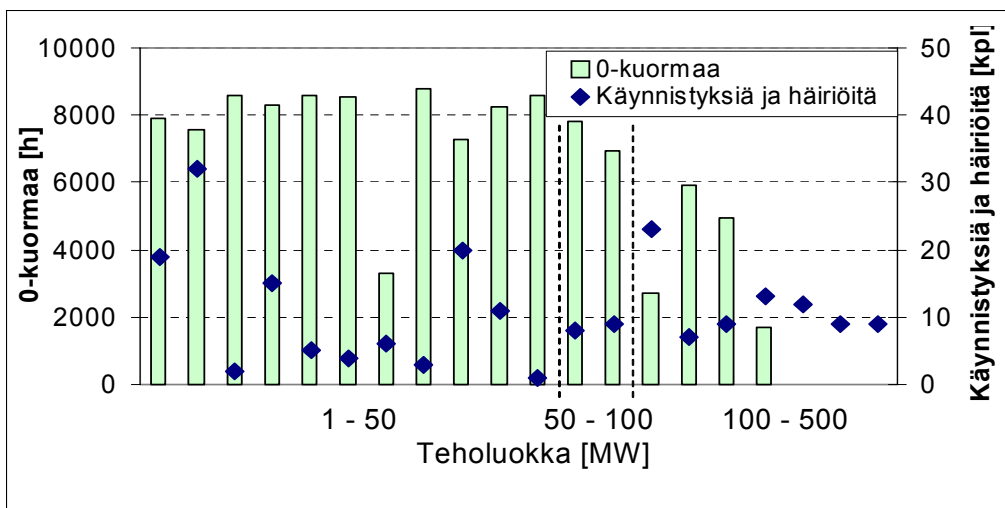


Kuva 9. Kuormitusjakaumien vaihtelu vuosittain kuudella laitoksella.

Kuvissa 10 ja 11 on kyselyyn vastanneiden laitosten käynnistysten ja häiriöiden määriä niiden laitosten osalta, joiden vastauksista tiedot pystyttiin arvioimaan riittävällä tarkkuudella. Käynnistykseksi tai häiriöksi on määritetty tilanteet, joissa polttoaineteho menee nolaksi yli tunnin ajaksi ja palaa sitten korkeammalle tasolle. Mikäli pääpolttoaineen syötössä on yli tunnin katkos mutta tulipesän lämpötilaa pidetään korkeampana tukipolttoaineella, tilannetta ei ole laskettu mukaan. Laitokset ovat samassa järjestyksessä kuormituskuvaajissa (kuvat 7 ja 8) ja käynnistyskuvaajissa (kuvat 10 ja 11). Vaikka käynnistyskuvaajissa ei näy 0-kuormaa kaikille laitoksille, jokaisella laitoksella lie-nee vuodessa ainakin yksi seisokki. Yhden kiinteitä polttoaineita polttavan laitoksen osalta tietoja käynnistyksistä ja nolakuormasta ei ollut saatavilla. Muutamassa muussa tapauksessa 0-kuormaa on niin vähän, ettei kuvaajien tarkkuus riitä näyttämään sitä. On huomattava, että useilla nesteitä ja kaasuja polttavista laitoksista vuosittainen käyttöaika on hyvin lyhyt.



Kuva 10. Seisonta-ajan, käynnistysten ja häiriötilanteiden yleisyys kiinteitä polttoaineita käyttävissä CHP-laitoksissa ja lämpökeskuksissa.



Kuva 11. Seisonta-ajan, käynnistysten ja häiriötilanteiden yleisyys nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita käyttävissä CHP-laitoksissa ja lämpökeskuksissa.

Kuvissa 10 ja 11 käytetty häiriöiden arviointitapa on hyvin epätarkka, sillä se ei huomioi mitenkään esimerkiksi sekoittumista kattilassa tai käytettyä ilmakerrointa, mikäli nämä tilanteet eivät johda polttoainetehon putoamiseen. Käytännössä kuvissa käytetty tapa on kuitenkin ainoa, jolla voidaan arvioida kymmenien kattiloiden häiriötilanteita systemaattisesti ja päästölaskennan vaatiman tarkkuuden kannalta järkevästi.

2.1.4 Keskimääräiset kuormitukset ja epävarmuusarviot

Kohdissa 2.1.1, 2.1.2 ja 2.1.3 esitetyistä kuvaajista nähdään, että laitosten kuormitustavat poikkeavat huomattavasti toisistaan. Koska päästölaskennassa ei ole mahdollista tarkastella jokaista laitosta erikseen, täytyy kuormitusjakaumia tarkastella ryhmittäin. Lauhdelaitoksien kohdalla tekniikoita ei ole syytä erotella, sillä suurin osa laitoksista on polttimiin perustuvia, yleensä hiilipölykattiloita. Reservikäytössä olevat lauhdelaitokset ovat asia erikseen, ja niitä edustavatkin tässä kahden kaasuturbiinin kuormitusjakaumat. CHP-laitosten osalta erilaisten polttotekniikoiden kesken ei juuri näyttänyt olevan selkeitä eroja. Sen sijaan polttoaineiden kesken eroja löytyi, ja siksi kiinteät polttoaineet erotettiin nesteistä ja kaasuista. Metsäteollisuuden osalta vastauksia tuli niin vähän, että kokoluokkia ja polttoainetyyppejä ei voitu erotella.

Taulukko 2 esittää yhteenvedon kuormitustutkimuksen tuloksista. Taulukossa X_n tarkoittaa kyseisellä tehoalueella syötetyn energiamäärän osuutta koko tarkasteluaikana syötetystä energiamäärästä. Esimerkiksi X_{80+} tarkoittaa yli 80 %:n polttoaineteholla (nimellistehosta) syötettyä energiaa ja X_{60-80} tarkoittaa 60–80 %:n polttoaineteholla syötettyä energiaa. Keskiarvot on laskettu painottamalla jakaumia kyseisen laitoksen tarkasteluvuonna käyttämällä polttoaineen määrällä (energialla, yksikkönä MWh). Näin vähäisestä kuormituksesta johtuvat poikkeukselliset jakaumat eivät vääristä tuloksia. Useamman vuoden perusteella tehtyjen jakaumien tapauksessa on käytetty energiamäärän vuosikeskiarvoa. Mukaan hyväksytyjen alle vuoden kuormitustietojen tapauksissa on jakaumia painotettu sillä energiamäärällä, jonka osalta tiedot ovat. Näin alle vuoden tiedoille tulee suhteessa hieman muita pienempi painoarvo, vaikka vuosituotanto olisi-kin kyseisissä laitoksissa samaa luokkaa. Jos keskiarvot laskettaisiin luvuista suoraan ilman painotuksia, tulisi pienille mutta yleisille kattilatyypeille liian suuri osuus jakau-
mista. Päästöt lasketaan polttoaineen kulutuksen mukaan, joten jakaumienkin on oltava painotettu kulutuksen, ei kattiloiden lukumäärän mukaan.

Taulukko 2. Kuormitusjakaumien keskiarvot ja niille arvioidut 95 %:n luottamusvälit.

	Laitostyyppi	Kokoluokka	X_{80+}	X_{60-80}	X_{40-60}	X_{0-40}
Lauhdevoima	Kaasuturbiinit	< 20 MW _e	40 (25–55) %	34 (20–50) %	13 (5–20) %	13 (5–20) %
		< 50 MW _e	72 (60–85) %	22 (10–35) %	4 (1–7) %	2 (1–5) %
	Muut	50–200 MW _e	73 (65–80) %	17 (10–25) %	9 (5–13) %	1 (1–3) %
		> 200 MW _e	79 (75–83) %	14 (10–20) %	6 (3–9) %	1 (1–3) %
Paperiteollisuus	BFB	Kaikki	29 (10–50) %	38 (25–55) %	25 (15–35) %	8 (1–15) %
	Soodakattilat ¹	Kaikki	74 (65–85) %	24 (15–35) %	2 (1–4) %	0 (0–2) %
	Kaasukattilat	Kaikki	19 (5–40) %	23 (5–40) %	23 (5–40) %	35 (10–50) %
Kauko- lämpö ja CHP	Kiinteät polttoaineet	< 50 MW _{pa}	33 (20–45) %	39 (30–50) %	17 (7–27) %	11 (3–20) %
		50–100 MW _{pa}	93 (75–95) %	4 (3–20) %	1 (1–20) %	1 (1–20) %
		> 100 MW _{pa}	84 (78–98) %	10 (5–18) %	5 (2–15) %	0 (0–10) %
	Nesteet ja kaasumaiset polttoaineet	< 50 MW _{pa}	16 (5–35) %	28 (10–50) %	16 (5–30) %	41 (10–55) %
		50–100 MW _{pa}	76 (60–90) %	12 (5–30) %	8 (3–20) %	6 (1–20) %
		> 100 MW _{pa}	91 (80–96) %	8 (3–15) %	1 (1–5) %	0 (0–5) %

¹ Integroiduille sellu- ja paperitehtaille.

Yhteenvetona kuormitustutkimuksesta voidaan sanoa, että kuormitusjakaumat ovat erittäin laitoskohtaisia. Suuria laitoksia käytetään pääsääntöisesti enemmän suurella teholla kuin pienempiä laitoksia. Tästä on kuitenkin lukuisia poikkeuksia, esimerkiksi kun saman kaukolämpöverkon alueella on useita suuria laitoksia. Juuri tällaiset ”vierekkäiset” suuret laitokset selittävät joitain edellisissä kuvaajissa esiintyviä suuria osakuormien osuuksia. Esimerkiksi kiinteitä polttoaineita käyttävien CHP-laitosten ja lämpökeskusten (kuva 7) teholuokasta 1–50 MW oikean puoleisimman ja teholuokan 100–500 MW vasemman puoleisimman laitoksen suuret osakuormaosuudet johtuvat laitosten vieressä sijaitsevien, vielä suurempien laitosten tuotannoista. Tällaisia ”poikkeuksia” ei kuitenkaan voida jättää pois tarkasteluista, kun haetaan koko Suomen keskiarvoisia päästökertoimia eri kattilatyypeille, sillä otanta on pidettävä mahdollisimman paljon koko kattilakantaa edustavana. Myöskään erillisten päästökertoimien määrittäminen tällaisille tapauksille ei olisi laskennan kannalta järkevää.

Nestemäisiä ja kaasumaisia polttoaineita käyttävien CHP-laitosten osalta voidaan melko yleispätevästi todeta suurten, yli 100 MW_{pa}:n yksiköiden pyörivän lähes täydellä teholla suurimman osan tuotannostaan. Käytännössä tämä tarkoittaa suuria kaasuturbiineja. Myös käynnistysten, häiriöiden ja seisokkiaikojen voidaan todeta olevan todella laitoskohtaisia, mutta ainakin CHP-laitoksilla ne tyypillisesti vähenevät hieman laitokseen kasvaessa. Joka tapauksessa kuvista 10 ja 11 nähdään selvästi, että joidenkin kattiloiden polttoaineensyöttö katkaistaan yllättävän usein yli tunniksi, mikä on huomioitava laitoskohtaisia päästöjä arvioitaessa. Häiriötilanteiden ja polttoaineen syötössä tapahtuneiden katkosten vaikutus kansallisiin KHK-päästöihin voidaan kuitenkin olettaa melko pieneksi. Koska häiriöt useimmiten johtavat juuri polttoainetehon putoamiseen, tulee niiden vaikutus jo osittain näkyviin kuormitusjakaumiin perustuvissa päästökertoimissa. Sen lisäksi mittaustulosten pohjalta laskettuja päästökertoimia on tämän työn suosituksissa pyöristetty konservatiivisesti ylöspäin, joten häiriöiden aiheuttama lisäys N₂O- ja CH₄-päästökertoimiin tulee riittävän hyvin huomioitua kansallisella tasolla. Voimalaitosten metaanipäästöjen merkitys Suomen kasvihuonekaasupäästöihin on kaiken lisäksi hyvin pieni, joten pelkkä kuormitusjakaumien tarkastelukin olisi voinut antaa tarpeeksi tietoa kansallisiin päästökertoimiin. Yksittäisten laitosten päästöjä arvioitaessa häiriötilanteiden tarkempi tarkastelu on tärkeämpää.

Metsäteollisuuden osalta kuormitustietojen määrä jäi vähäiseksi, joten kuvassa 5 ja taulukossa 2 esitetyt jakaumat ovat ainoastaan esimerkkejä, ja todellisuudessa metsäteollisuuden kattiloiden keskimääräiset jakaumat voivat poiketa näistä huomattavasti. On kuitenkin selvää, että metsäteollisuuden kattiloita käytetään hyvinkin merkittäviä määriä osakuormalla. Tästä poikkeuksena ovat soodakattilat, joiden käyttö painottuu enemmän täyden kuorman ajoon.

Kuormitustutkimuksen tuloksille määritettiin myös epävarmuudet, jotka esitettiin taulukossa 2 kuormitusjakaumien yhteydessä. Arvioissa käytettiin 95 %:n luottamusväliä. Epävarmuutta aiheuttavia tekijöitä ovat

- laitoksilta saadun tiedon oikeellisuus ja sen oikea tulkinta
- jakaumien soveltuvuus kaikille vuosille
- tutkimukseen vastanneiden laitosten edustavuus koko Suomen tasolla.

Osassa laitosten lähettämistä tiedoista oli niin sanottua pohjanäyttöä, eli myös esimerkiksi kesäseisokin aikana kuormitusdatassa oli pientä kuormaa. Tällaisissa tapauksissa on oletettu, että sama virhe toistuu koko datassa, ja kaikista kyseisen laitoksen tuntikeskiarvoista on vähennetty tämä seisokin aikana esiintynyt tehollisuus. Myös muut virheet laitoksilta saadussa datassa ovat mahdollisia. Lisäksi jakaumia laskettaessa esimerkiksi nimellistehon valinta saattaa aiheuttaa virhettä jakaumiin, mikäli nimellisteho ei tiedetä varmasti.

Vuosittaisten vaihteluiden arvioiminen on mahdollista esimerkkilaitosten perusteella. Kuvan 9 perusteella voidaan todeta, että vaihtelut ovat lähes kaikissa laitoksissa melko pieniä, mutta useamman vuoden tietoja lähettäneitä laitoksia on vähän, mikä lisää epävarmuutta. Vuosittaisen edustavuuden epävarmuutta lisäävät mahdolliset päästökaupan ja polttoaineiden hintojen tulevaisuuden energiamarkkinoilla aiheuttamat muutokset, joita ei ole voitu huomioida epävarmuusarviossa.

Laitosten edustavuudelle koko Suomen tasolla on hankalaa arvioida epävarmuutta. Tutkimuksen otannasta voitaisiin laskea virhearvioita myös satunnaisotannan kaavoilla, mutta käytettyjä tiedonkeruumenetelmiä ei voida pitää satunnaisotantana, koska on mahdollista, että tietoja on saatu vain tietyn tyyppisistä laitoksista. Virhettä voi tulla esimerkiksi siitä, ettei kaikilla laitoksilla ole samanlaisia tiedonkeruujärjestelmiä. Näin vastaukset voivat painottua suuriin ja uusiin laitoksiin. Myös huono vastausprosentti ja tarkemmin suunnattu puhelinkysely voivat aiheuttaa virhettä vastausten edustavuuteen koko Suomen laitoksia ajatellen. Osa energiayhtiöistä vastasi vain joidenkin laitostensa osalta, mikä voi myös vääristää jakaumia.

Vaikka epävarmuudet ovat suuria, ja niitä voi aiheutua monista muuttujista, on muistettava, että yhden laitostyyppin kaikki kuormitusosuudet eivät voi esimerkiksi kasvaa 10 % vaan yhden kasvaessa toisen täytyy pienentyä. Kunkin laitostyyppin kuormitusosuudet ovat siis negatiivisesti korreloituneita. Eri lähteistä aiheutuvat epävarmuudet voivat olla myös toisiaan kompensoivia. On syytä myös korostaa, ettei tässä käsitellä jollekin toiselle, yksittäiselle laitokselle käytettävää kuormitusjakaumaa vaan keskiarvoista jakaumaa laitostyyppille koko Suomen tasolla. Kuten esimerkiksi kuva 8 osoittaa, voi yksittäisen laitoksen jakauma poiketa paljonkin keskiarvosta.

2.2 Mittaukset

2.2.1 Mittauslaitteisto

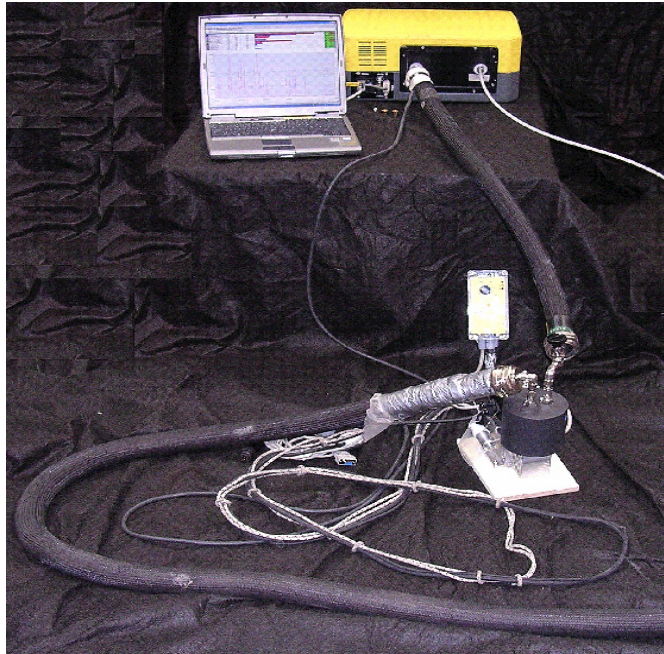
Mittauksissa käytettiin VTT:n FTIR-analysointilaitteita. Laitteilla on mahdollista mitata lähes kaikkia kaasumaisia päästöjä. Niillä ei kuitenkaan voida mitata kaksiatomisia, samanytimisiä molekyyliä, kuten happea tai typpeä, eikä jalokaasuja [Vahlman 1994]. FTIR-laitteeseen voidaan kuitenkin integroida myös esim. happea mittaava laite. Happimittaus olikin käytössä kattiloiden B, C, E, F, G ja H mittauksissa sekä laitos A:n mitausten alussa.

FTIR perustuu siihen, että kaasut absorboivat infrapunasäteilyä kullekin kaasulle ominaisella aallonpituusalueella. Laitteessa käytetään interferometriä, jossa infrapunasädettä jaetaan ja heijastetaan tietyllä tavalla liikkuvien ja kiinteiden peilien avulla näytteen läpi detektorille. Tulokseksi saadaan interferogrammi, josta tehdään Fourier-muunnoksella spektri. Spektristä voidaan lukea kunkin yhdisteen absorptiovoimakkuus, joka on verrannollinen yhdisteen pitoisuuteen savukaasussa [Vahlman 1994].

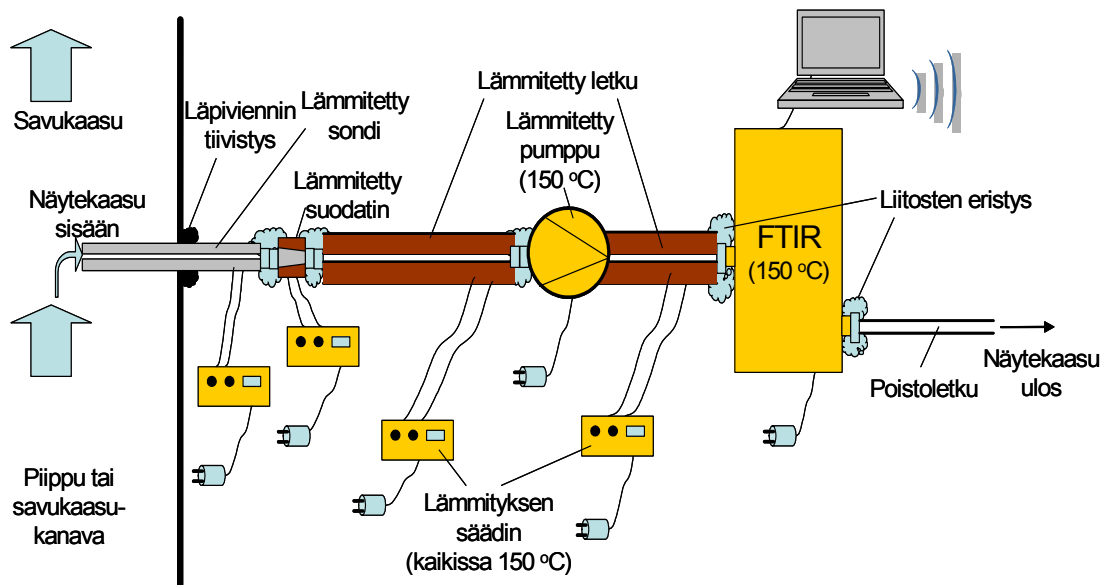
Kuva 12 esittää yhden mittauksissa käytetyn FTIR-analysointilaitteen. Keltainen laite on FTIR, paksut letkut ovat lämmitettyjä näytteenottolinjoja, ja FTIR:stä lähtevä vaalea linja on poistolinja. Etuoikealla on pumppu ja sen takana yhden linjan lämmityksen säädin. Mittausjärjestelyjen periaatekuva esitetään myöhemmin (kuva 13).

Referenssien avulla voidaan sopivilla metodeilla saada FTIR:n antamista spektreistä eri kaasujen pitoisuudet savukaasuissa. Metodeilla tarkoitetaan tässä analyysimalleja, joilla voidaan erottaa kaasujen pitoisuudet spektristä. FTIR-mittausten tarkkuus ja mahdolliset epätarkkuudet riippuvatkin käytännössä pääasiassa juuri käytetyistä metodeista. CH₄- ja N₂O-pitoisuuden [ppm] epävarmuus on noin ±10 %, mutta pienimmillä pitoisuuksilla (alle 10 ppm) suhteellinen epävarmuus on suurempi, noin ±1 ppm:n suuruusluokkaa sekä metaanille että dityppioksidille.

FTIR:llä mitattujen päästöjen lisäksi käytettiin korrelaatiotarkasteluissa sekä tulosten muuntamisessa päästökertoimiksi tutkittujen laitojen mittaustietoja esimerkiksi tulipesän lämpötiloista, polttoainevirroista ja happimääristä.



Kuva 12. Yksi käytetyistä FTIR-savukaasuanalysaattoreista.



Kuva 13. Periaatteellinen kuva mittausjärjestelyistä.

2.2.2 Tutkitut laitokset

Projektin mittauskohteet valittiin Suomen N_2O - ja CH_4 -päästöjen kannalta olennaisimmista kattilatyypeistä. Leijukerrospolton osuus tutkitusta sektorista (teollisuuden ja energiantuotannon kattilat pois lukien pienpoltto) on noin 20 % energiassa mitattuna.

Leijukerros poltto aiheuttaa kuitenkin sektorin N₂O-päästöistä yli 60 % vuodelle 2002 tehdyn päästöarvion mukaan. Mittauksia päätettiin suorittaa useammalla BFB- ja CFB-tyyppisellä laitoksella ja pidempiaikaisena kuin aikaisemmissa julkisissa mittausprojekteissa, jotta tulokset kuvaisivat mahdollisimman hyvin keskimääräistä päästöä. Kohteen valinnassa pyrittiin myös tyyppilliseen laitostyyppiin ja kokoluokkaan.

Energiassa mitattuna yleisin polttotekniikka Suomessa on poltinpoltto, jonka yhteenlaskettu osuus on noin 30 % tarkastellusta sektorista. Suurin osa suomalaisista lämpökeskuksista on voimalaitoksiin verrattuna pieniä poltinpoltoon perustuvia öljykattiloita. Lämpökeskuksilla osakuormatilanteita ja käynnistyksiä esiintyy verrattain usein, mikä voi aiheuttaa huomattavasti suuremmat ominaispäästöt kuin suurissa öljykattiloissa. Tästä syystä mittauksiin sisällytettiin myös öljykäyttöinen lämpökeskus, josta mitattiin myös käynnistyksen ja alasajon päästöt.

Seuraavassa taulukossa (taulukko 3) on yhteenveto mitatuista laitoksista. Taulukossa mainittujen polttoaineiden lisäksi kattiloissa poltetaan käynnistystilanteissa ja tukipolttoaineena yleensä öljyä.

Taulukko 3. Yhteenveto mittauskohteista. Käyttötarkoitus-sarakkeen ”CHP” tarkoittaa yhdistettyä lämmön ja sähkön tuotantoa yhteiskunnalle. ”Biomassa” tarkoittaa kiinteää biomassaa, ja ”biopolttoaineet” sisältää myös lietettä.

Laitos	Teho- luokka [MW _{pa}]	Tyyppi	Polttoaineet	Käyttö- tarkoitus	Kesto [vrk]	Muuta
A	50–100	CFB	Kivihiili	Kauko- lämpö	15	Mitattiin myös käynnistys
B	> 100	BFB	Turve, biomassa	CHP	1	Mitattiin > 80 % kuormaa
C	> 100	CFB	Turve, biomassa	CHP	50	Ei tarkkaa tietoa polttoaineseok- sista
D	< 50	Poltin	POR	Kauko- lämpö	1	Kuormitusta vaihdeltiin mittausta varten
E	> 100	CFB	Turve, biomassa, hiili, REF	CHP + teollisuus	4	Kokeita eri polttoaineseoksilla, laitoksella SNCR
F	> 100	BFB	Biopolttoaineet, turve, REF	CHP + teollisuus	5	Kattilaa ajettiin koko ajan osa- kuormalla
G	< 50	BFB	Turve, biomassa, REF	CHP + teollisuus	6	Mitattiin myös käynnistys
H	> 100	BFB	Biopolttoaineet, turve	CHP + teollisuus	3	Mitattiin kuoren ja turpeen poltto erikseen sekä eri seoksilla

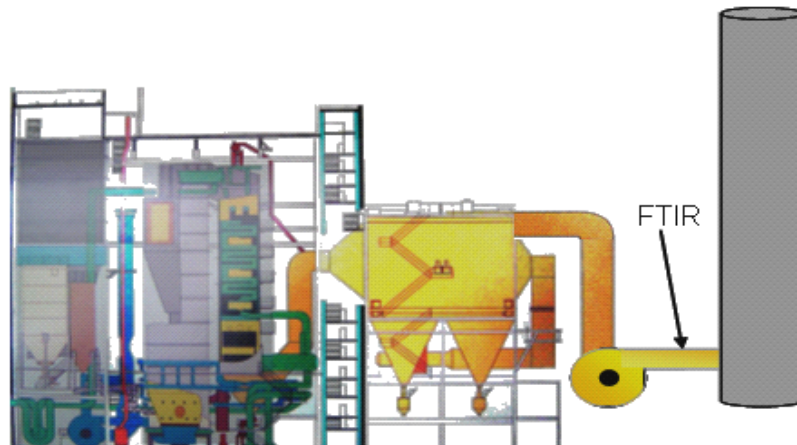
2.2.2.1 Laitos A (CFB: kivihiili)

Laitos A on kivihiiltä pääpolttoaineenaan käyttävä, polttoaineteholtaan alle 100 MW_{pa}:n CFB-kattila. Laitoksella ei tuoteta sähköä, vaan kyseessä on ainoastaan kaukolämpöä tuottava laitos. Tästä syystä ulkolämpötilat vaikuttavat laitoksella paljon kuormitukseen, ja kuorman muutosten lisäksi mittauksiin saatiinkin mukaan yksi käynnistystilanne.

Käynnistyksissä laitos käyttää ensin kevyttä ja sitten raskasta polttoöljyä ennen siirtymistä kivihiilen polttoon.

Tarkoituksena tässä mittauksessa oli tarkastella kuorman muutosten vaikutusta N_2O -päästökertoimeen. Hiili soveltui hyvin tähän tarkoitukseen, sillä sen N_2O -päästöt ovat polttoaineista yleensä suurimmat leijukerroskattilassa, joten erilaisten tilanteiden vaikutusten arvioitiin näkyvän selvimmin. Tekniikkana hiilen CFB-polttot ei ole kovin yleistä Suomessa, mutta sen osuus sektorin N_2O -päästöistä on merkittävä – vuoden 2002 KHK-inventaarion mukaan noin 11 %.

Mittauslaitteisto asennettiin laitoksen savukaasukanavaan, savukaasupuhaltimen jälkeen (kuva 14). Laitoksella on savukaasujen puhdistuslaitteena sähkösuodatin, ja kattilan tulipesään syötetään kalkkia rikkipäästöjen vähentämiseksi. Kalkinsyöttö oli käytössä myös mittausten aikana.

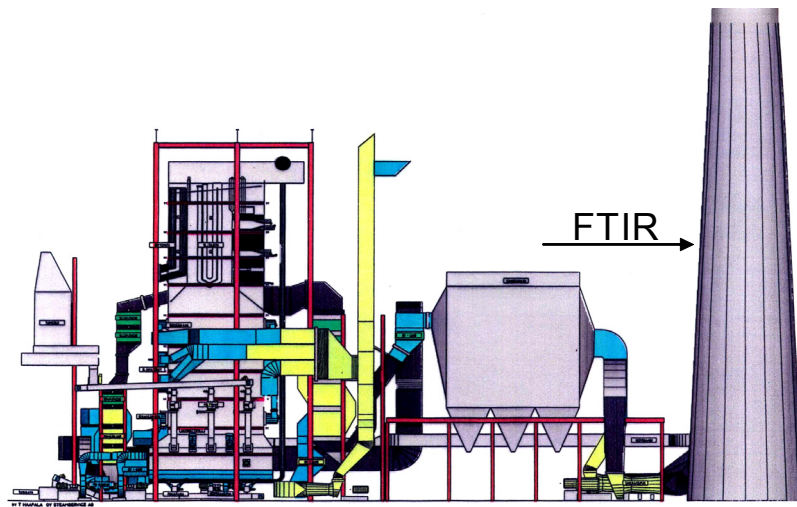


Kuva 14. Laitos A:n periaatekuva ja mittauspaiikka.

2.2.2.2 Laitos B (BFB: turve, biomassa)

Polttotekniikaltaan laitos B on noin $250 \text{ MW}_{\text{pa}}$:n BFB-kattila, jossa poltetaan pääasiassa turvetta mutta myös hieman biomassa (puuta). Mittausten aikana biomassan osuus syötetystä energiasta vaihteli 0 ja 12 %:n välillä. Osakuormilla biomassan osuus usein kasvaa, sillä sitä poltetaan yleensä niin paljon kuin sitä on saatavilla. Hetkittäinen tulipesään menevä osuus saattaa poiketa mainituista prosenteista, sillä raportoidut osuudet perustuvat tuotuihin kuormiin ja poltettava seos voi muuttua välivarastossa, sekoituksessa, kuljettimilla tai muissa vaiheissa ennen polttoa. Varsinaista polttoon menevää seosta ei laitos B mitata. Laitos soveltuu tekniikkansa ja polttoaineseoksensa puolesta hyvin kuvaamaan tyypillistä suomalaista kattilaa. Laitos B lämmittää alueen kaukolämpöverkkoa yhdessä toisen suuren kattilan ja lämpökeskusten kanssa. Laitoksella B

mittauslaitteisto asennettiin piippuun, valmiina olevalle mittaustasolle noin 30 metrin korkeuteen. Kuva 15 esittää voimalaitoksen periaatekaavion ja mittauspaikan.

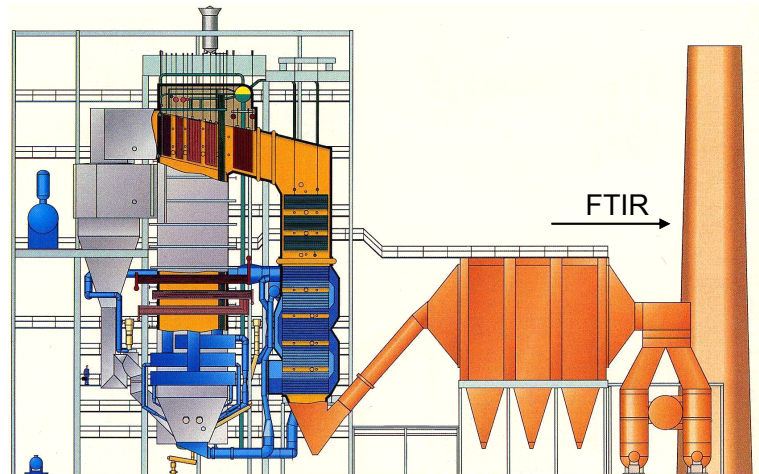


Kuva 15. Laitos B:n periaatekaavio ja mittauspaikka.

2.2.2.3 Laitos C (CFB: turve, biomassa)

Laitos C on kokoluokaltaan yli 300 MW_{pa}:n CFB-kattila. Myös laitos C polttaa suomalaiselle polttolaitokselle tyypillisesti turvetta ja biomassaa (puuta). Laitoksella C biomassan osuus vaihtelee paljon. Esimerkiksi lyhyen tarkastelujakson aikana ennen savukaasumittauksia biomassan osuus vaihteli 0 ja 47 %:n välillä saapuneiden polttoainekuormien perusteella arvioituna. Myös laitoksella C polttoaineet menevät välivarastoon sekoitukseen ja sieltä kuljettimia pitkin kattilaan. Pidemmän jakson tuntitietoja polttoaineiden osuuksista ei ole saatavilla. Mittausjaksolla huhti-toukokuussa biomassan osuus oli keskimäärin 29 % huhtikuussa ja 24 % toukokuussa. Mittausjakson aikana esiintyikin runsaasti toivottuja kuorman muutostilanteita. Laitoksella C FTIR-laite yhdistettiin etävalvontaan Otaniemeen.

Myös laitoksella C mittauslaitteisto sijoitettiin piippuun, valmiina olevalle mittaustasolle noin 30 metrin korkeuteen. Järjestelyt hoidettiin kuten laitos B:n kohdalla. Kuva 16 esittää voimalaitoksen periaatekaavion ja mittauspaikan.

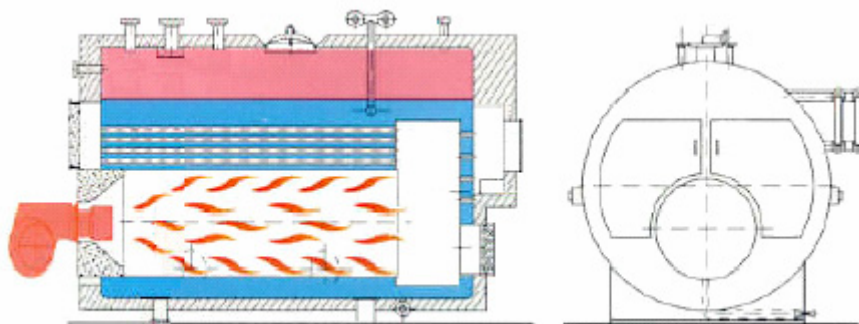


Kuva 16. Laitos C:n periaatekaavio ja mittauspaikka.

2.2.2.4 Laitos D (poltin: POR)

Laitos D on moderni lämpökeskus, jossa on erillinen kattila biopolttoaineelle ja varakatila polttoöljylle. Tässä projektissa mitattiin vain laitoksen öljykattila, joka on polttoaineteholtaan 4 MW_{pa} ja jossa on raskasta polttoöljyä käyttävä painehajotteinen poltin.

Pienen lämpökeskuksen tapauksessa mittausten tärkein tavoite oli saada päästötietoa usein toistuvien alas- ja ylösajojen ajalta. Laitoksella D tämä onnistuikin helposti, sillä mittausten aikana voitiin kokeilla erilaisia kuormia. Kuva 17 esittää laitoksen D kaltaista polttotekniikkaa. Laitoksella ei ole savukaasujen puhdistuslaitteita ennen savupiippua. Mittaukset tehtiin savupiippuun menevästä kanavasta sisätiloissa.



Kuva 17. Laitos D:n toimintaperiaate (muokattu lähteestä [Teir 2003]).

2.2.2.5 Laitos E (CFB: turve, biomassa, kivihiili, REF)

Laitos E on suuri, yli 300 MW_{pa}:n CFB-kattila, jolla tuotetaan sähköä, höyryä ja kaukolämpöä teollisuuden ja yhteiskunnan käyttöön. Laitos on suunniteltu turpeen, kivihiilen ja biomassan sekapolttoon ja edustaa uudehkoa tekniikkaa. Käytännössä polttoaineseokset vaihtelevat hetkittäin huomattavasti, mutta keskimäärin kaikkia edellä mainittuja polttoaineita poltetaan vuosittain merkittävästi (yli 10 %). Pääpolttoaineena laitoksella on turve. Laitoksen savukaasut puhdistetaan SNCR-laitteella ja sähkösuodattimella. Lisäksi kattilaan syötetään tietyissä olosuhteissa kalkkia.

Mittausten aikana kokeiltiin erilaisia polttoaineseoksia likimain vakioteholla. Kokeiden välissä laitos ajoi normaalisti vaihtelevilla seoksilla ja kuormilla, ja myös näiden jaksosten päästöt mitattiin. Mittausjakson aikana kalkinsyöttö ei ollut käytössä.

2.2.2.6 Laitos F (BFB: biopolttoaineet, turve, REF)

Laitos F on suuri, lähes 200 MW_{pa}:n metsäteollisuuden BFB-kattila, joka tuottaa myös kaukolämpöä. Kattilassa poltetaan pääasiassa kiinteää biomassaa mutta myös biolietettä ja turvetta sekä hieman kierrätyspolttoaineita (REF). Laitoksen savukaasut puhdistetaan sähkösuodattimella. Laitos F on rakennettu 2000-luvulla, ja se on tyypillinen metsäteollisuuden kattila. Laitos F valittiin mittauskohteeksi säätävän roolinsa, maantieteellisen sijaintinsa ja riittävän hyvän tiedonkeruujärjestelmänsä takia.

Mittausten aikana biomassan osuuden tuntikeskiarvo vaihteli välillä 45–83 % (energiasta), biolietteen osuus välillä 0–19 % ja turpeen osuus välillä 1–45 %. REF:ää poltettiin mittausten aikana keskimäärin 4 % (energiasta), mutta sen osuus vaihtelee hetkittäin jonkin verran. Mittausten aikana laitoksella F ei syötetty kalkkia tulipesään.

2.2.2.7 Laitos G (BFB: turve, biomassa, REF)

Laitos G on noin 30 MW_{pa}:n BFB-kattila, joka tuottaa kaukolämpöä ja sähköä sekä höyryä teollisuudelle yhdessä laitosalueella olevien muiden laitosten kanssa. Pääpolttoaineena kattilassa on turve, mutta myös biomassaa poltetaan paljon turpeen seassa (yli 40 %). Niiden lisäksi poltetaan jonkin verran kierrätyspolttoaineita (REF). Kattilan savukaasut puhdistetaan sähkösuodattimella ennen niiden puhaltamista ulkoilmaan. Laitoksella ei ole kalkinsyöttöä tulipesään.

2.2.2.8 Laitos H (BFB: biopolttoaineet, turve)

Laitos H on moderni BFB-kattila, jonka nimellisteho on noin 250 MW_{pa}. Laitos tuottaa sähköä, lämpöä ja höyryä paperitehtaalte sekä lämpöä kaukolämpöverkkoon. Pääpolttoaineena on biomassa, lähinnä kuori, jonka osuus vuositasolla on noin 70 % energiassa mitattuna. Turpeen osuus on noin 25 %, ja lisäksi laitoksella poltetaan lietettä, öljyä, maakaasua ja REF:ää. Laitoksen savukaasut puhdistetaan sähkösuodattimella.

2.2.3 Mittaustulokset ja prosessitiedot

Kohdissa 2.2.3.2–2.2.3.9 esitetään mittaustuloksia edellisessä kohdassa kuvattujen laitojen päästöistä (CH₄ ja N₂O, joistain laitoksista myös CO, NO_x, SO₂, HCl). Päästöt esitetään kunkin laitoksen kohdalla pitoisuutena [ppm] sekä muunnettuna muotoon [mg/MJ_{pa}] käyttäen kohdassa 2.2.3.1 esitettyjä menetelmiä. Mittaustuloksia ppm-muodossa esittämissä kuvissa pitoisuudet savukaasuissa esitetään kosteissa kaasuissa ja tekemättä happimuunnoksia eli siinä tilassa, missä kaasut olivat mittaushetkellä. Kuvia tarkasteltaessa on syytä huomioida, että pitoisuudet on usein jaettu kahdelle pystyakselille, jotta yhdellä kuvalla voisi kertoa mahdollisimman havainnollisesti eri päästökomponenteista. Kuvaajissa esitetään mitattuja arvoja tuntikeskiarvoina tai minuutin välein, mittauksien keston mukaan.

2.2.3.1 Prosessitiedot

Laitoksilla tehtyjen mittausten tulokset saatiin pitoisuusyksikkönä [ppm_{vol, wet}]. Jotta pitoisuudet saatiin muunnettua hetkelliseksi ominaispäästöiksi [mg/MJ_{pa}], tarvittiin laitoksilta prosessidataa, jota käytettiin kaavassa [1]:

$$Om.päästö = \frac{c \cdot \dot{V}_{NTP} \cdot \rho}{P}, \quad [1]$$

missä c on tarkasteltavan kaasun pitoisuus [ppm_{vol, wet}], \dot{V}_{NTP} on savukaasun tilavuusvirta [m³_{wet}/s], ρ on tarkasteltavan kaasun tiheys [kg/m³_n] ja P on alempaan lämpöarvoon perustuva polttoaineteho tarkasteluhetkellä [MW_{pa}]. Kunkin kaasun tiheys saatiin ideaalikaasun tilanyhtälöstä kaavalla [2]:

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}, \quad [2]$$

missä p on paine normaalitilassa (noin 101,3 kPa), M on tarkasteltavan kaasun moolimassa [g/mol] (taulukko 4), R on yleinen kaasuvakio (noin 8,314 J/mol K) ja T on lämpötila normaalitilassa (273,15 K). Taulukko 4 esittää kaavalla [2] lasketut kaasujen tiheydet.

Taulukko 4. Savukaasujen komponenttien tiheyksiä normaalitilassa.

Kaasu	Moolimassa [g/mol]	Tiheys [kg/m ³ n]
N ₂ O	44,02	1,96
CO	28,01	1,25
NO ₂	46,01	2,05
SO ₂	64,07	2,86
NO	30,01	1,34
CH ₄	16,05	0,72
HCl	36,46	1,63

Laitoksilta saadun tiedon käyttö analysoinnissa osoittautui haastavaksi laitosten erilais-
ten käytäntöjen ja tiedonkeruujärjestelmien takia. Tästä syystä lähes kaikilta laitoksilta
(muilta paitsi laitokselta H) tarvittiin vielä lisätietoja yksikkömuunnoksen tekemiseksi.

Laitos A:n (CFB, kivihiili) antama polttoaineteho perustui ylempään lämpöarvoon, jo-
ten alempi lämpöarvo piti arvioida. Tämä tehtiin siten, että laitokselta kysyttiin tarkem-
mat polttoaineanalyysit yhden polttoaine-erän osalta ja oletettiin, ettei ylempään ja
alempaan lämpöarvon suhde muuttunut kevään aikana, koska laitoksella on käytetty
samaa kivihiililaatua samalta alueelta toimitettuna ja käytettävissä olleiden tietojen mu-
kaan kivihiilen käyttökosteus pysyi vakiona (9,2 m-%). Tehon tuntikeskiarvot voitiin
siten kertoa tällä lämpöarvojen suhteella. Muiden laitosten tehotiedot perustuivat alem-
paan eli teholliseen lämpöarvoon.

Laitosten B, C ja E savukaasun tilavuusvirta laskettiin piipun pinta-alan ja savukaasun
nopeusmittauksen tulona. Tämä tilavuusvirta oli kuitenkin todellista virtausta, ja se
muutettiin vielä yksikköön m³n/s kaavalla [3]:

$$\dot{V}_{NTP} = \dot{V}_{tod} \cdot \frac{T_{NTP}}{T_{MIT}} \cdot \frac{p_{MIT}}{p_{NTP}}, \quad [3]$$

missä \dot{V}_{tod} on savukaasun nopeudesta laskettu savukaasun virtaus [m³/s], T_{NTP} ja p_{NTP}
ovat kaasun lämpötila ja paine normaalitilassa ja T_{MIT} ja p_{MIT} ovat mitatut savukaasun
lämpötila ja paine nopeusmittauksen kohdalla. Myös laitokselta F saatu tilavuusvirta
normeerattiin kaavalla [3].

Laitoksen D (öljypoltin) savukaasuvirta laskettiin kaavalla [4] polttoainetehosta, mita-
tusta hiilidioksidipitoisuudesta sekä stökiometrisen palamisen savukaasuvirrasta ja hiili-
dioksidipitoisuudesta. Hiilidioksidipitoisuus on kääntäen verrannollinen käytettyyn yli-

ilmamäärään. Oletus on riittävän tarkka, kun palaminen on hallinnassa ja CO-päästöt pienet. Stökiometrisen palamisen savukaasuvirtana ja hiilidioksidipitoisuutena käytettiin maakaasukäsikirjassa olevia taulukkoarvoja [Maakaasuyhdistys 2005].

$$\dot{V} = \frac{v \cdot P}{3600} \cdot \frac{c_{CO_2,STÖK}}{c_{CO_2,MIT}}, \quad [4]$$

missä v on taulukoista saatu stökiometrisen palamisen savukaasuvirta $1\,000\text{ m}^3\text{n/MWh}$, P on polttoaineteho [MW] ja c tarkoittaa mitattua tai stökiometrisen polton savukaasujen hiilidioksidipitoisuutta. Stökiometrisen polton hiilidioksidipitoisuus on hiilidioksidipitoisuuden maksimi kyseisellä polttoaineella. Raskaan polttoöljyn tapauksessa maksimi on $14,1\%_{\text{vol, wet}}$ [Maakaasuyhdistys 2005].

Laitokselta G ei saatu riittävän yksityiskohtaisia prosessitietoja tulosten analysoimiseen edellä kuvatuilla tavoilla. Tästä syystä mittaustulokset [ppm] muunnettiin ominaispäästöiksi [mg/MJ] kertomalla ne vakiolla $0,4\text{ m}^3\text{n/MJ}$ [BAT 2003] ja tutkittavan kaasun tiheydellä (taulukko 4). Käytetty kerroin $0,4\text{ m}^3\text{n/MJ}$ on lähteessä [BAT 2003] esitetty turpeen poltolle, mutta koska biomassan ja jätteenpolton kerroin $0,38$ ei poikkea tästä merkittävästi, käytettiin tässä pääpolttoaineen eli turpeen kerrointa. Kertoimet on annettu kuiville savukaasuille 6% :n happipitoisuudessa, joten mittaustulokset redusoitiin mitatun happipitoisuuden mukaan kaavalla [5] ja laskettiin kuivia kaasuja kohti kaavalla [6]:

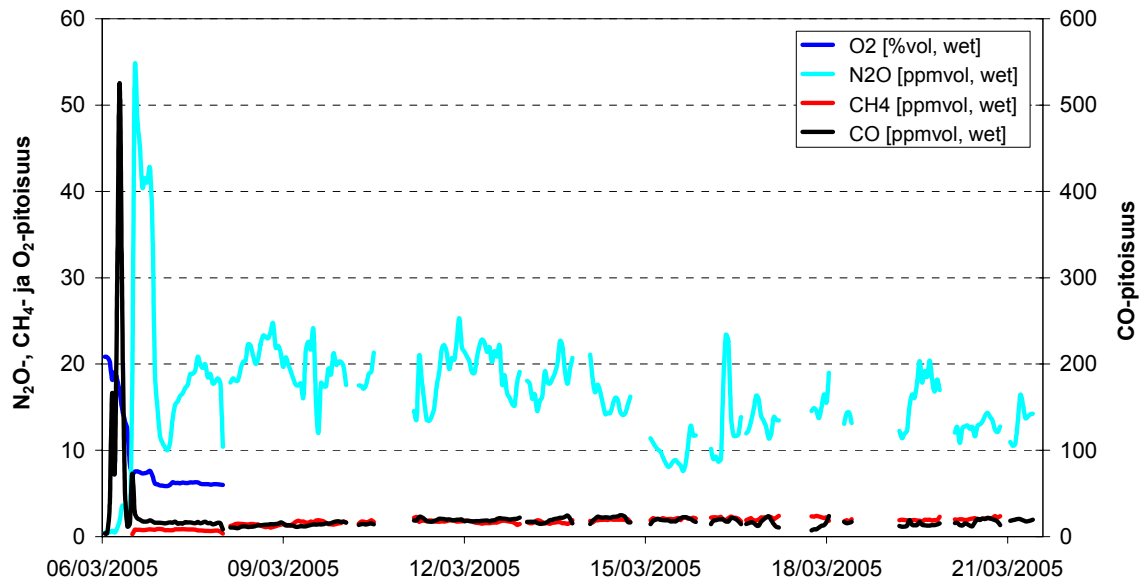
$$c_{red} = c_{mit} \cdot \frac{20,9 - 6}{20,9 - O_{2,mit}} \quad [5]$$

$$c_{dry,6\%} = \frac{c_{red}}{1 - \frac{H_2O_{mit}}{100}} \quad [6]$$

c_{red} tarkoittaa 6% :n happipitoisuuteen redusoitua pitoisuutta (CH_4 tai N_2O) ja $c_{dry,6\%}$ pitoisuutta kuivissa kaasuissa redusoituna 6% :n happipitoisuuteen. c_{mit} [ppm], $O_{2,mit}$ [%], kuivissa kaasuissa] ja H_2O_{mit} [%] tarkoittavat mitattuja pitoisuuksia.

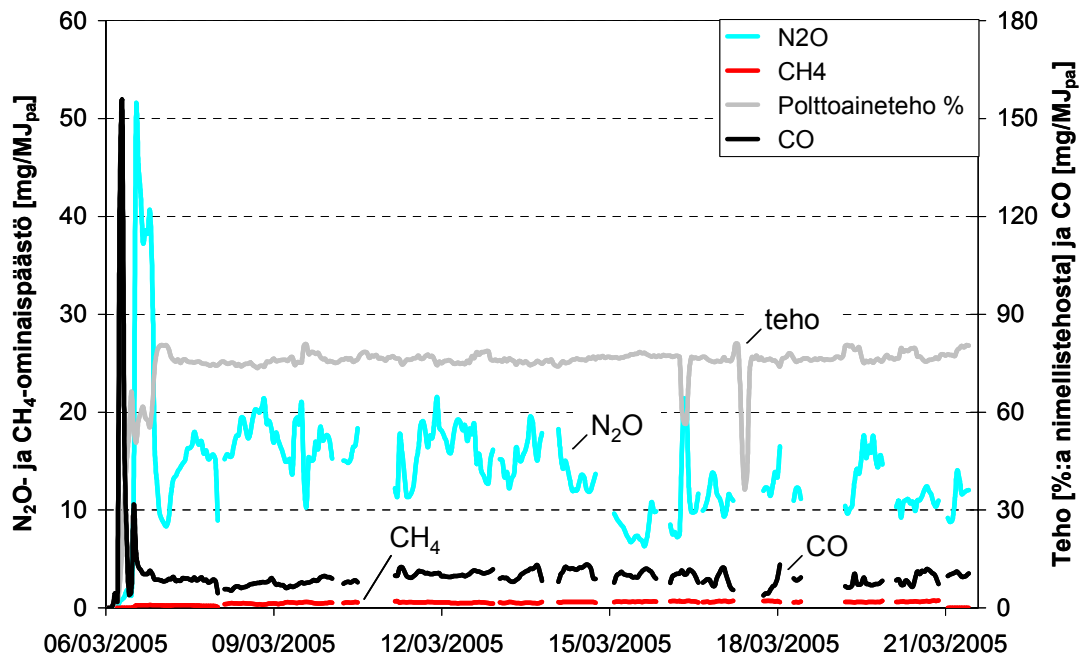
2.2.3.2 Laitos A (CFB: kivihiili)

Laitoksen A mittaustulokset (CO , CH_4 ja N_2O) esitetään seuraavissa kuvissa pitoisuuksina [ppm] (kuva 18) ja laskettuina ominaispäästöinä [mg/MJ] (kuva 19). Laitokselta A saatiin mittauksiin mukaan myös kattilan ylösajotilanne. Mittausten loppuosan data on katkonaista, koska silloin käytössä ollut FTIR ei tallentanut kaikkia tietoja.



Kuva 18. CH_4 -, N_2O -, CO - ja O_2 - pitoisuuksia tuntikeskiarvoina kivihiiiltä polttavassa CFB-kattilassa (laitos A).

Kuvien 18 ja 19 vasemmassa reunassa nähdään laitos A:n käynnistyksen vaikutus savukaasujen pitoisuuksiin. Mittaustieto on kuitenkin katkonaista mittauksen myöhemmissä vaiheissa, eikä siksi voida päätellä varmasti, miten suuri käynnistyksen N_2O -pitoisuus on verrattuna muunlaisen osakuormatilanteen N_2O -pitoisuuteen. Joka tapauksessa käynnistyksen osuus korostuu myöhemmin laskettavassa keskiarvoisessa kertoimessa, koska mittausdataa muilta osakuormilta on vähän. Käynnistystilanne (öljyteho > 0 MW) kesti noin 11 tuntia eli noin 3 % mittauksen kestosta. Poltetusta energiasta osuus on kuitenkin selvästi pienempi. Mittausten aikana laitoksella oli ajoittain käytössä kalkin-syöttö tulipesään. Tulipesään syötetyn kalkin määrällä ei havaittu suoraa vaikutusta laitoksen N_2O -ominaispäästöihin, vaikka joissain kirjallisuuslähteissä on esitetty sen mahdollisesti vähentävän niitä.

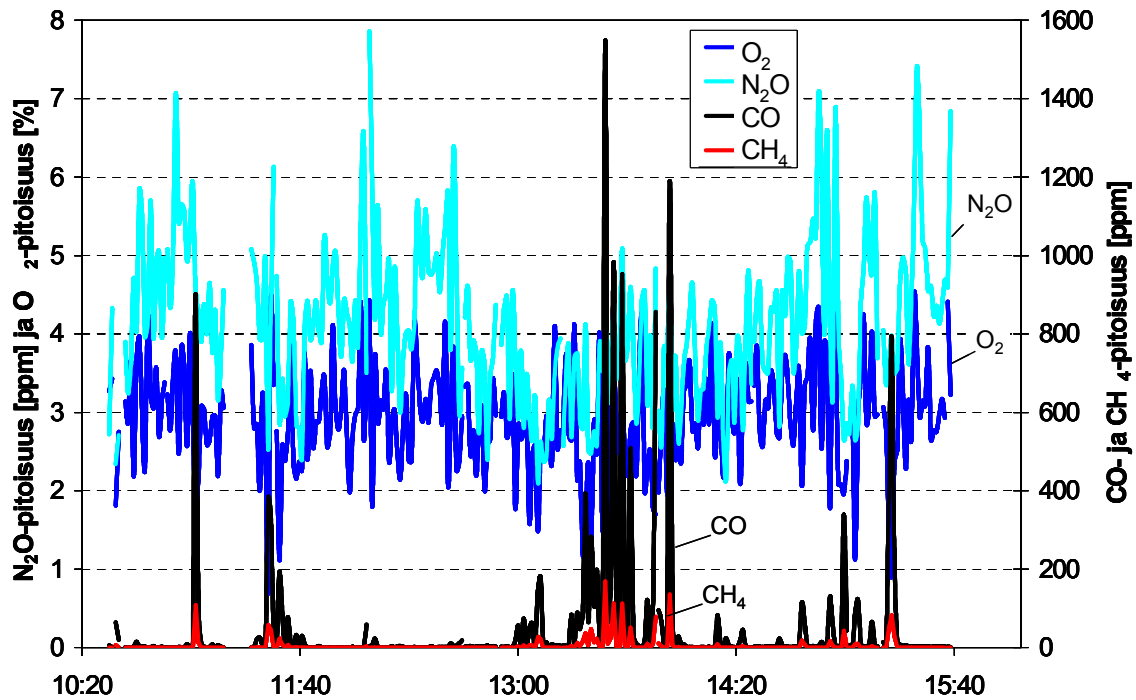


Kuva 19. Laitoksen A (CFB, kivihiili) ominaispäästöt tuntikeskiarvoina (CH_4 , CO , N_2O) sekä polttoaineteho (% nimellistehosta).

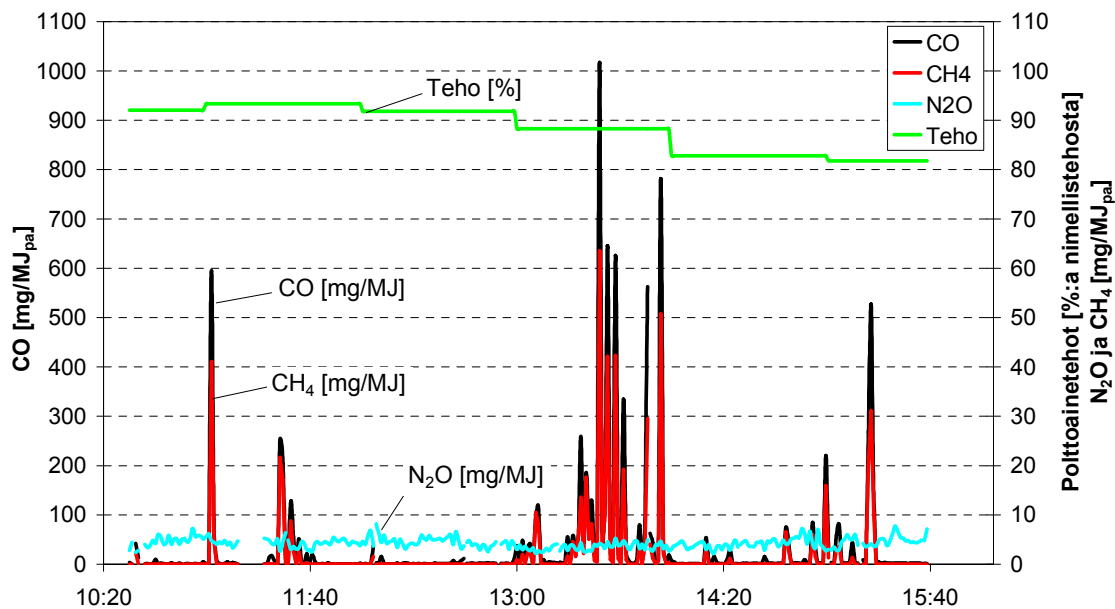
2.2.3.3 Laitos B (BFB: turve, biomassa)

Laitos B:n osalta mittausdataa on 6 tuntia. Koska useimpien kuormitustilanteiden tai polttoaineseosten vaikutuksia ominaispäästöön ei mitattu, eivät tulokset ole yhtä hyvin keskiarvoa kuvaavia kuin pidemmissä mittauksissa muilta laitoksilta (A, C, E, F, G ja H).

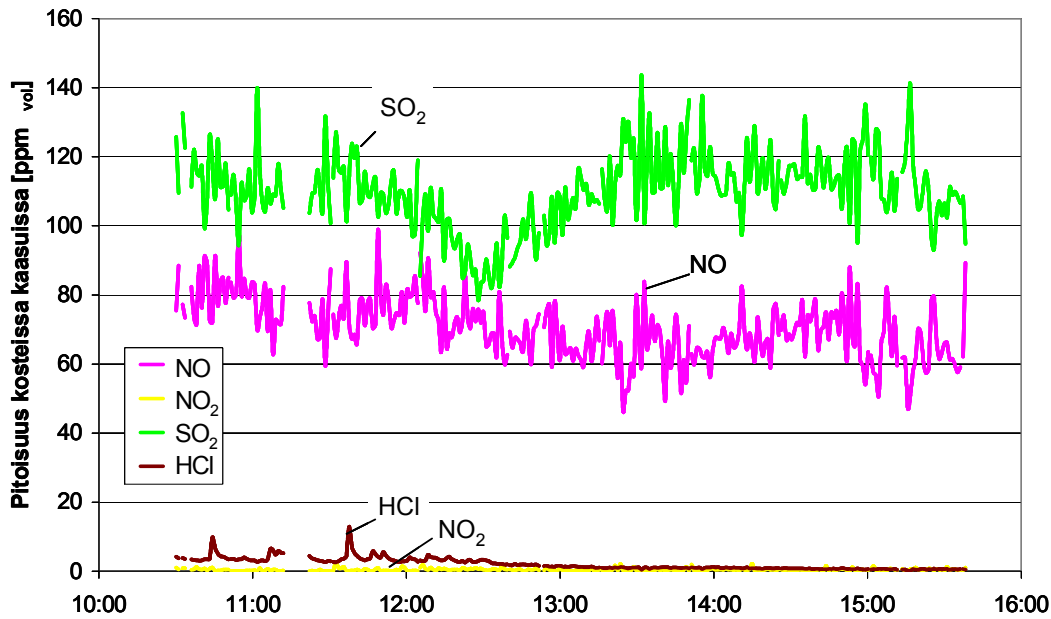
Laitoksen B mittaustulokset (CO , CH_4 ja N_2O) esitetään seuraavissa kuvissa pitoisuuksina [ppm] (kuva 20) ja laskettuina ominaispäästöinä [mg/MJ] (kuva 21). Päästöjen yksikkömuunnokset on laskettu pitoisuuksien minuuttikeskiarvoista käyttämällä tehon ja savukaasuvirran tuntikeskiarvoja, koska minuuttitason dataa ei ollut saatavilla. Kattilassa ei poltettu öljyä mittauksen aikana. Kuva 22 esittää NO_x -, SO_2 - ja HCl -pitoisuuksia laitoksen savukaasuissa.



Kuva 20. Tutkittujen päästökomponenttien (N_2O , CO , CH_4) ja hapen (O_2) pitoisuudet minuuttikeskiarvoina turvetta ja biomassaa polttavan BFB-kattilan savukaasuissa (laitos B).



Kuva 21. Laitoksen B (BFB: turve, biomassa) CO -, CH_4 - ja N_2O - ominaispäästöt minuuttikeskiarvoina sekä laitoksen teho (% nimellistehosta) tuntikeskiarvona.

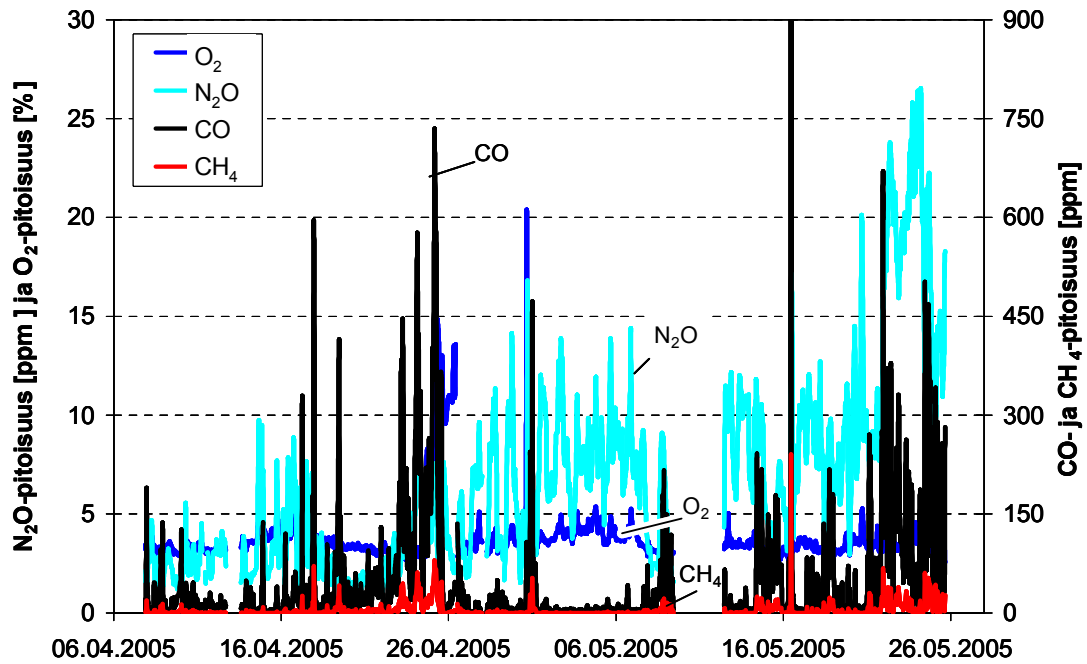


Kuva 22. NO-, NO₂-, SO₂- ja HCl-pitoisuudet turvetta ja biomassaa polttavan BFB-kattilan (laitos B) savukaasuissa minuuttikeskiarvoina.

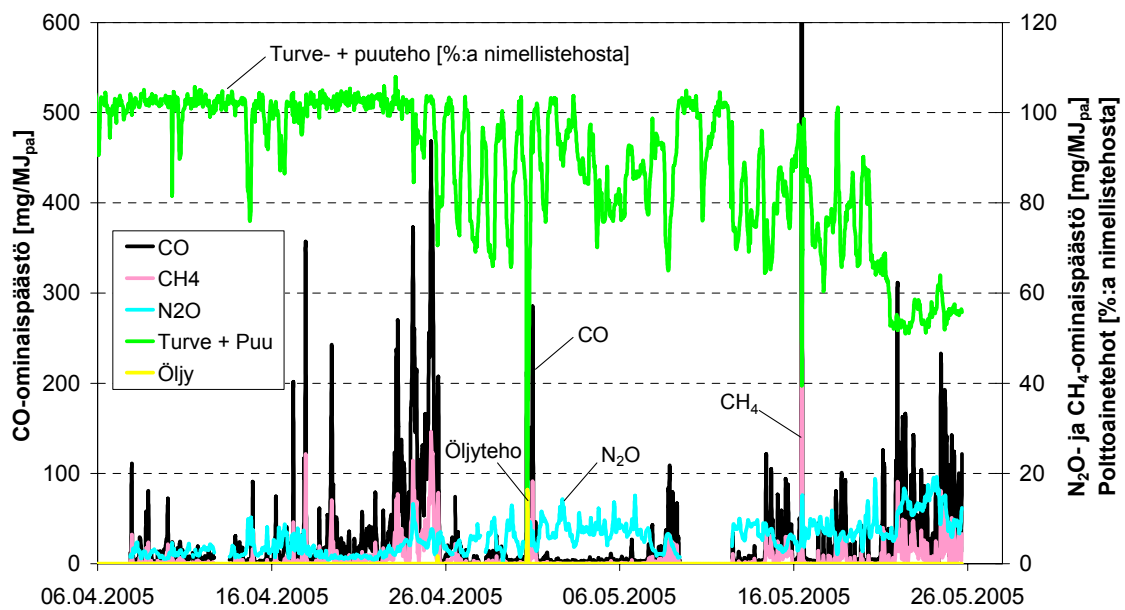
2.2.3.4 Laitos C (CFB: turve, biomassa)

Laitoksen C savukaasujen CO-, CH₄-, N₂O- ja O₂-pitoisuudet [ppm_{vol, wet}] esitetään kuvassa 23 ja laskettuina ominaispäästöinä [mg/MJ_{pa}] kuvassa 24. Kuvan 23 tarkkuuden parantamiseksi muiden kaasujen osalta siitä leikattiin pois CO-pitoisuuden huippu, joka oli noin 3 440 ppm. Korkea tuntikeskiarvo on seurausta todella suurista minuuttitaso pitoisuuksista, jotka vaihtelivat muutaman minuutin ajan välillä 20 000–40 000 ppm. Samaan aikaan happipitoisuus on mennyt muutamaksi minuutiksi lähes nolnaan. Tämä johtuu ilmeisesti polttoaineen syötössä tapahtuneesta häiriöstä, sillä polttoaineteho on CO-piikin kohdalla huomattavasti alhaisempi kuin ennen ja jälkeen sen (kuvassa 25 tehon kuvaaja jää osittain päästökuvaajien alle). Mitattujen happipitoisuuksien tuntikeskiarvo on kyseisessä tilanteessa hieman normaalia korkeampi, vaikka se sisältääkin edellä mainitut pienet pitoisuudet.

Edellä kuvattu tapahtuma on johtanut myös selvästi alhaisempiin tulipesän lämpötiloihin, pienempään savukaasuvirtaan, NO- ja SO₂-pitoisuuksien laskuun sekä N₂O-pitoisuuden kasvuun. Myös N₂O-ominaispäästön kasvu CO-piikin kohdalla jää kuvassa CO-käyrän taakse, mutta mittaustiedoista nähdään, että pitoisuus on noin kolminkertainen edellisiin pitoisuuksiin nähden (n. 15 ppm) ja jää korkealle tasolle vielä seuraavan tuntikeskiarvon kohdalla (n. 17 ppm) ennen palautumista piikkiä edeltäneelle tasolle (< 10 ppm). On syytä korostaa, että kyseessä ovat tunnin keskiarvot, joten hetkelliset muutokset näissäkin pitoisuuksissa ovat suurempia.



Kuva 23. CO-, N₂O-, CH₄- ja O₂-pitoisuuksien tuntikeskiarvoja turvetta ja biomassaa polttavan CFB-kattilan savukaasuissa.



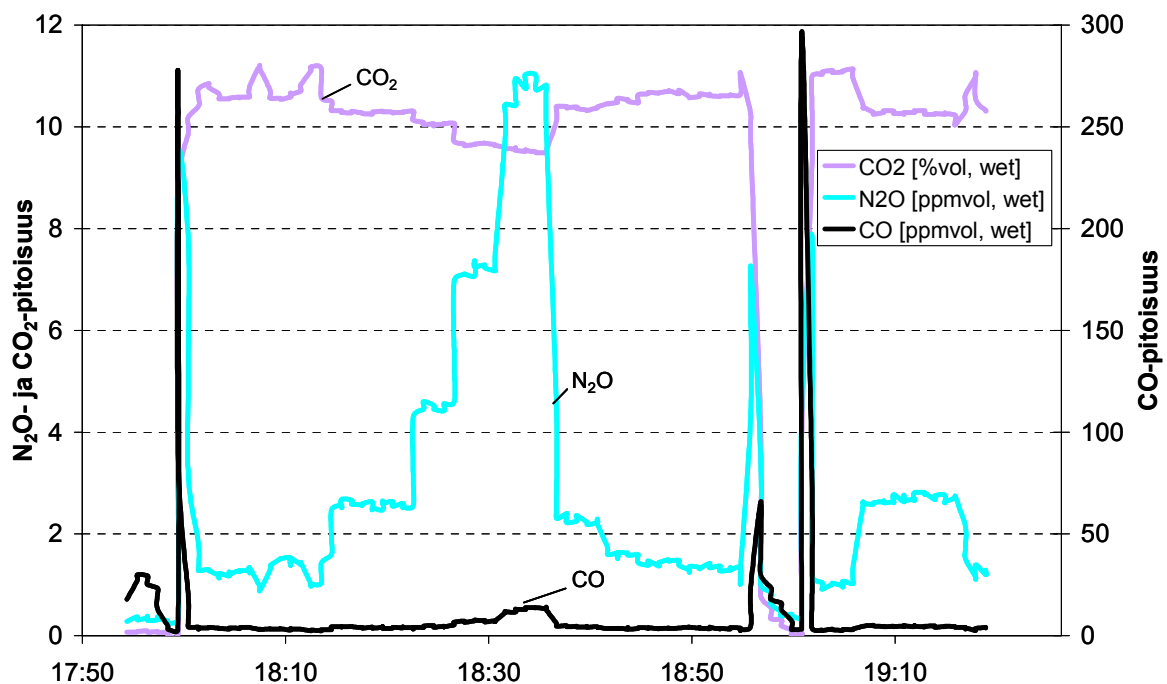
Kuva 24. Laitoksen C (CFB, turve, biomassa) CO-, CH₄- ja N₂O-ominaispäästöt tuntikeskiarvoina [mg/MJ_{pa}] sekä teho (% maksimitehosta).

Kuvasta on tarkkuuden parantamiseksi leikattu pois CO-päästön piikki, joka yltyä noin 2 000 mg/MJ_{pa} tasolle. Minuuttitasolla tarkasteltuna ominaispäästö oli joinain minuutteina jopa 10-kertainen.

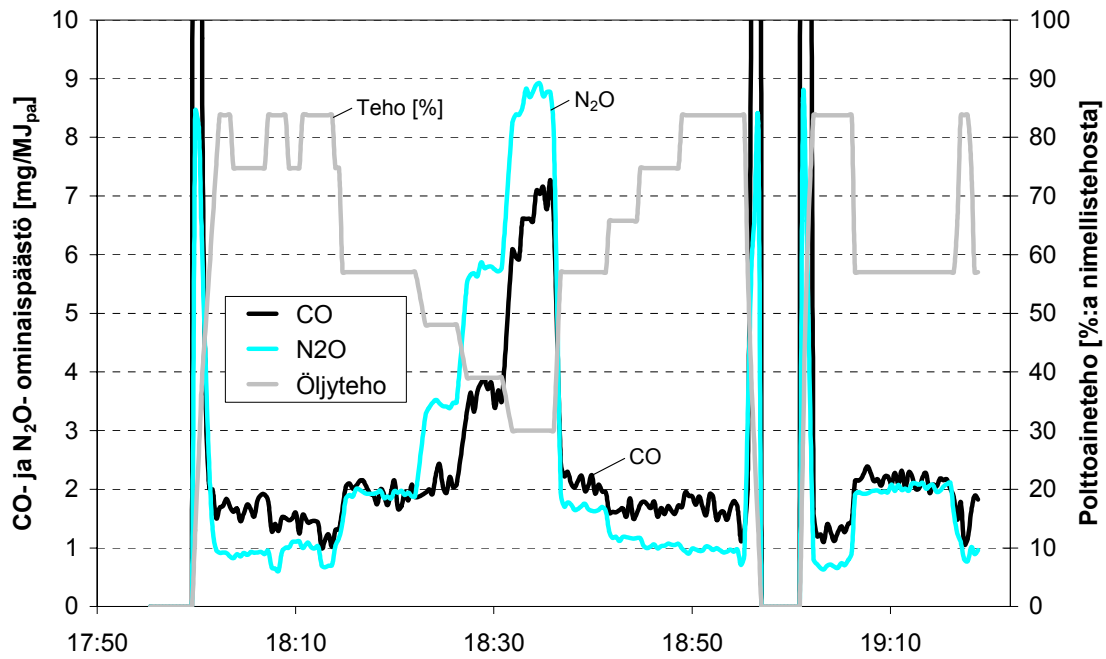
2.2.3.5 Laitos D (poltin: POR)

Laitoksen D mittaustulokset (CO ja N₂O) esitetään seuraavissa kuvissa pitoisuuksina [ppm_{vol, wet}] (kuva 25) ja laskettuina ominaispäästöinä [mg/MJ_{pa}] (kuva 26). Kuva 27 esittää mitattuja NO_x- ja SO₂-pitoisuuksia [ppm_{vol, wet}].

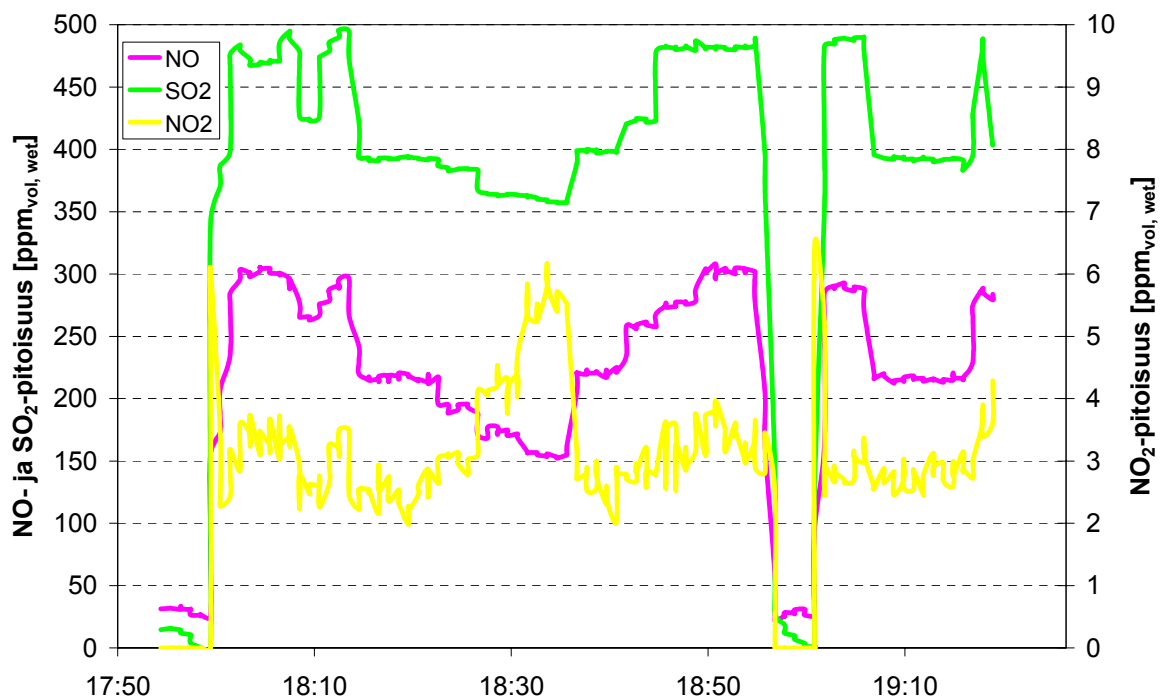
Esitetyt pitoisuudet ovat tilanteista, joissa kattilaa ajettiin eri kuormilla. Laitoksella D ei mitattu savukaasujen happipitoisuutta. Happipitoisuutta voidaan kuitenkin arvioida esimerkiksi hiilidioksidipitoisuudesta (kuva 25), sillä muutokset hiilidioksidin prosenttisuudessa savukaasuissa johtuvat pääasiassa yli-ilman osuudesta. Mittausdatasta lähinnä käynnistysten ajalta puuttuneet öljytehot (kuva 26) on arvioitu mitatuista CO₂-pitoisuuksista olettaen, että teho on nostettu tunnetulle tasolle tasaisesti 0-tasolta, mikä voi aiheuttaa pientä virhettä myös muunnokseen ppm => mg/MJ_{pa}. Arvioihin perustuvia lukuja ei ole kuitenkaan käytetty keskimääräisten päästökertoimien laskemisessa myöhemmin tässä työssä, sillä käynnistysten N₂O-ominaispäästö on likimain sama kuin osakuormien N₂O-ominaispäästö.



Kuva 25. CO₂-, N₂O- ja CO- pitoisuuksia minuuttikeskiarvoina öljyä polttavan lämpökeskuksen (laitos D) savukaasuissa eri suutinpaineilla (eli kuormituksilla).



Kuva 26. Laitoksen D (poltin, POR) CO- ja N₂O-ominaispäästöt [mg/MJ_{pa}] ja käytetyt polttoainetehot (% maksimitehosta) minuuttikeskiarvoina.



Kuva 27. NO-, NO₂- ja SO₂-pitoisuuksia öljyä polttavan lämpökeskuksen (laitos D) savukaasuissa minuuttikeskiarvoina eri suutinpaineilla (eli kuormituksilla).

Kuva 26 osoittaa N₂O-päästön pysyvän normaalien osakuormatilanteiden tasolla myös käynnistyksissä. Käynnistyksiä ei siksi välttämättä tarvitsekaan tarkastella erikseen, vaikka tällä laitostyyppillä kyseiset tilanteet toistuvatkin usein. Tuloksista voidaan havaita niiden toistettavuus, eli tehon muutosten jälkeen palattaessa edelliselle kuormitustasolle myös päästöt palaavat samalle tasolle kuin ennen muutoksia.

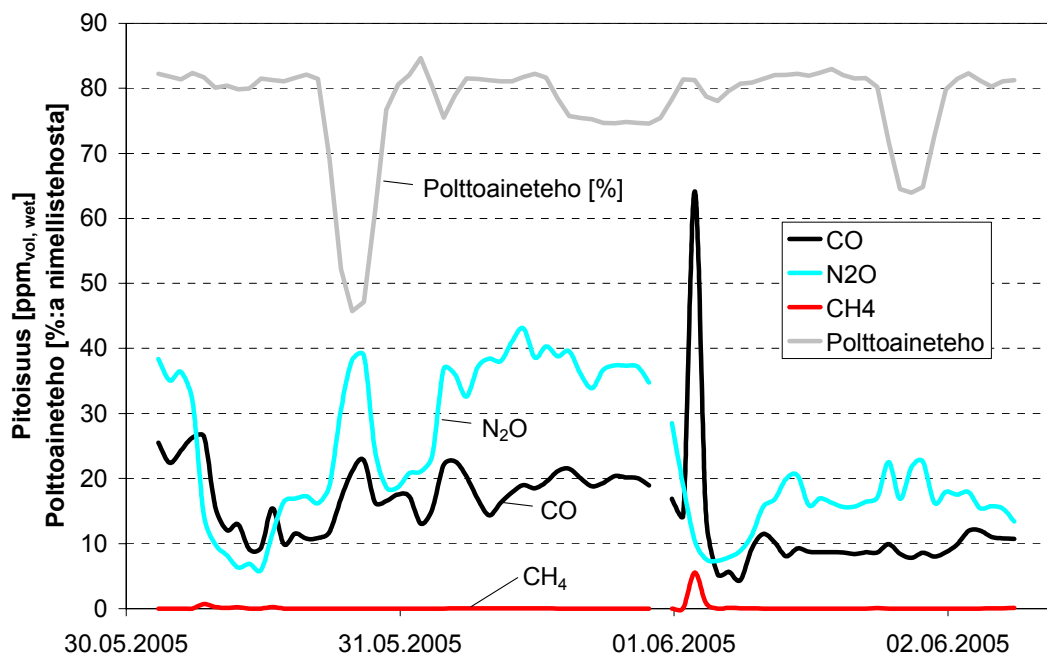
Edellä esitettyjen osakuormamittausten lisäksi laitoksella D tehtiin mittaus, jossa kattilan olosuhteet pyrittiin pitämään vakiona useamman tunnin ajan. Suutinpaineena pidettiin tällöin noin 28 bar, joka vastaa laitoksen omien mittareiden mukaan noin 2,3 MW:n polttoainetehoa (noin 60 %:n teho). Tasaisen ajon pitoisuuksista laskettiin keskiarvot (taulukko 5).

Taulukko 5. Tasaisella kuormalla (noin 60 %:n osakuorma) ajetun lämpökeskuksen savukaasujen pitoisuuksia (laitos D, öljypoltin, POR).

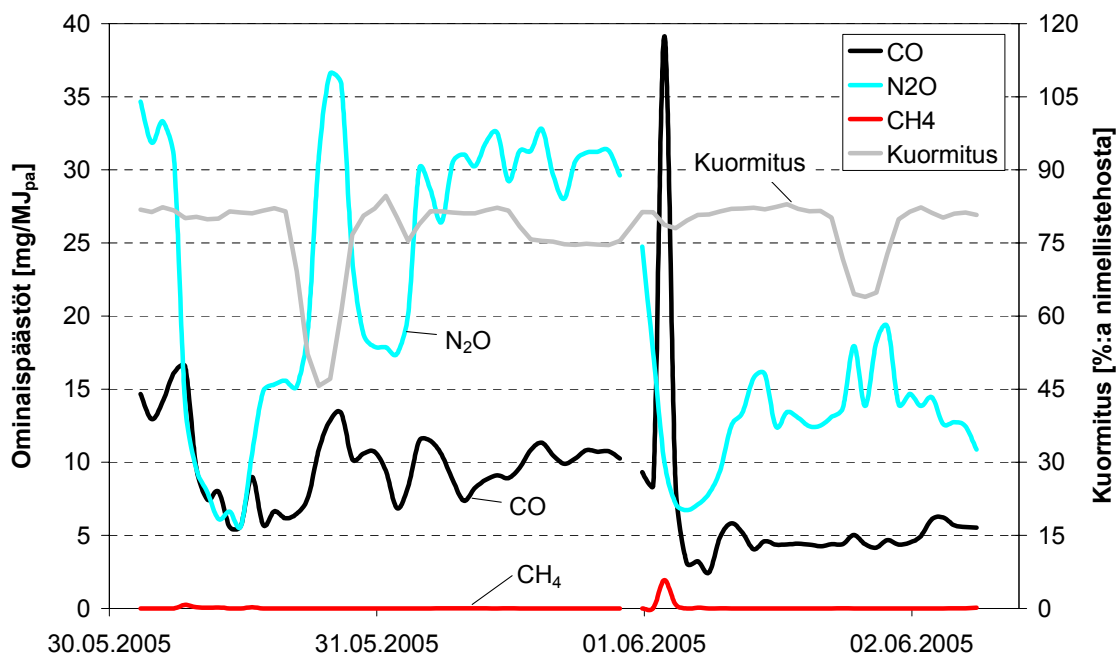
Kaasu	H ₂ O	CO ₂	CO	NO	NO ₂	N ₂ O	SO ₂	CH ₄
Pitoisuus	7,5 %	10,1 %	3 ppm	207 ppm	3 ppm	2,4 ppm	385 ppm	0 ppm

2.2.3.6 Laitos E (CFB: turve, biomassa, kivihiili, REF)

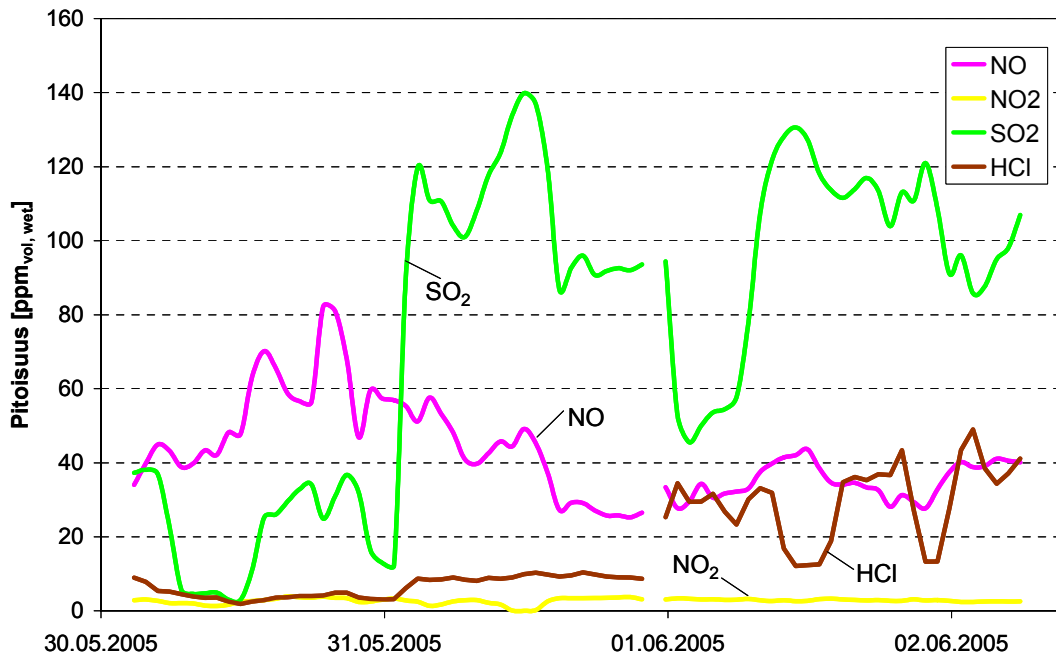
Kuvissa 28 ja 30 on esitetty savukaasuista mitattuja eri komponenttien (CO, CH₄, N₂O, SO₂, HCl, NO_x) pitoisuuksia laitokselta E. Kuvassa 29 esitetään N₂O-, CO ja CH₄-ominaispäästöjä. Laitoksella poltettiin mittausten aikana merkittävästi toisistaan poikkeavia polttoaineseoksia, joten pelkästään näistä kuvista ei voida päätellä keskimääräistä vuosittaista päästötasoa tälle laitokselle.



Kuva 28. CO-, N₂O- ja CH₄-pitoisuuksien tuntikeskiarvoja laitoksen E (CFB: turve, biomassa, kivihiili, REF) savukaasuissa sekä polttoaineteho (% nimellistehosta).



Kuva 29. Laitoksen E (CFB: turve, biomassa, kivihiili, REF) CO-, CH₄- ja N₂O-ominaispäästöt [mg/MJ_{pa}] ja teho (% nimellistehosta) tuntikeskiarvoina.

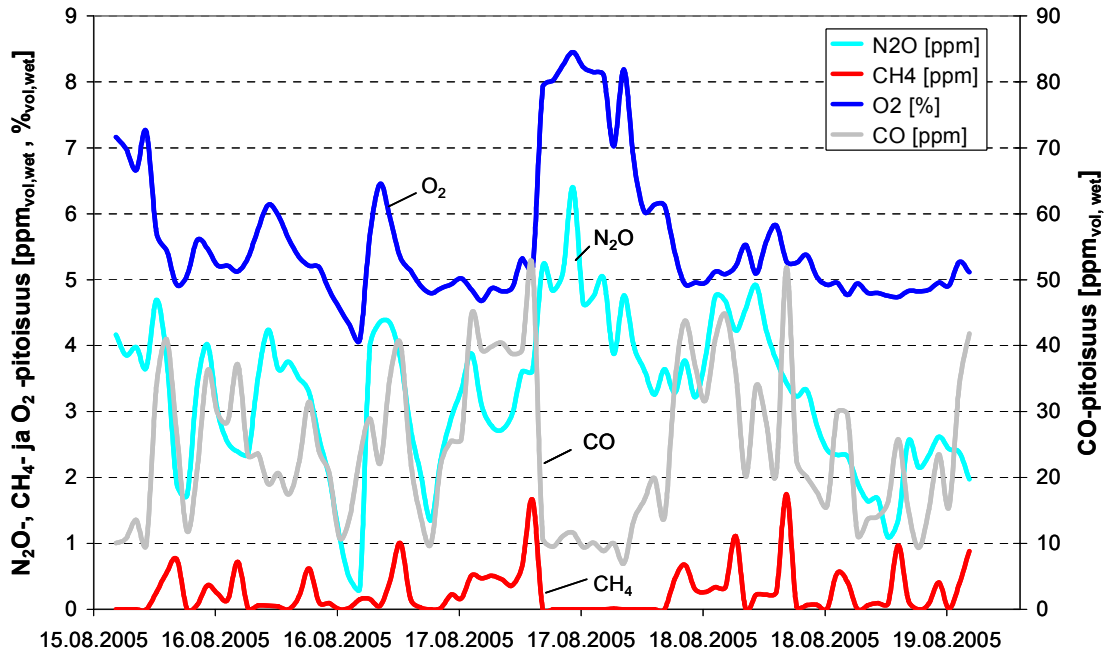


Kuva 30. SO_2 -, NO -, NO_2 - ja HCl -pitoisuudet [ppm] tuntikeskiarvoina laitoksen E (CFB: turve, biomassa, kivihiili, REF) savukaasuissa.

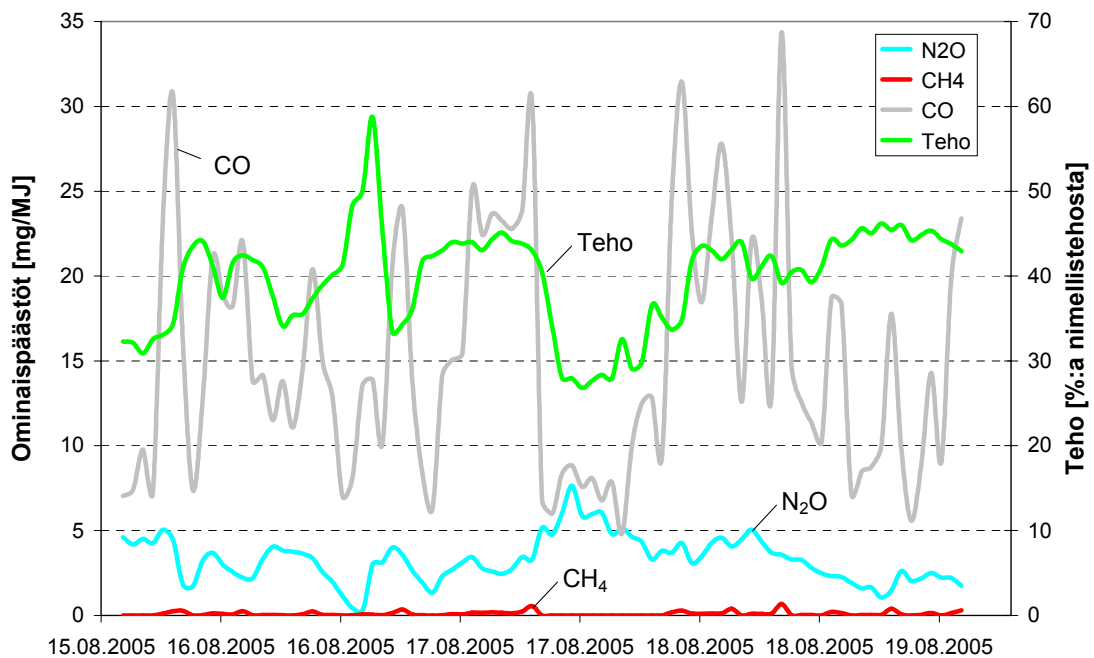
2.2.3.7 Laitos F (BFB: biopolttoaineet, turve, REF)

Seuraavissa kuvissa esitetään CO -, CH_4 - ja N_2O -pitoisuudet (kuva 31) ja niistä lasketut ominaispäästöt (kuva 32) laitoksella F. Kuten ominaispäästöjä esittävästä kuvasta nähdään, on laitoksen F polttoaineteho ollut alhainen koko mittauksen ajan. Näin myös BFB-kattilan savukaasuista näkyi selvästi, kuinka N_2O -pitoisuus muuttui kuorman muuttuessa. SO_2 -, NO -, HCl - ja NO_2 -pitoisuudet esitetään kuvassa 33.

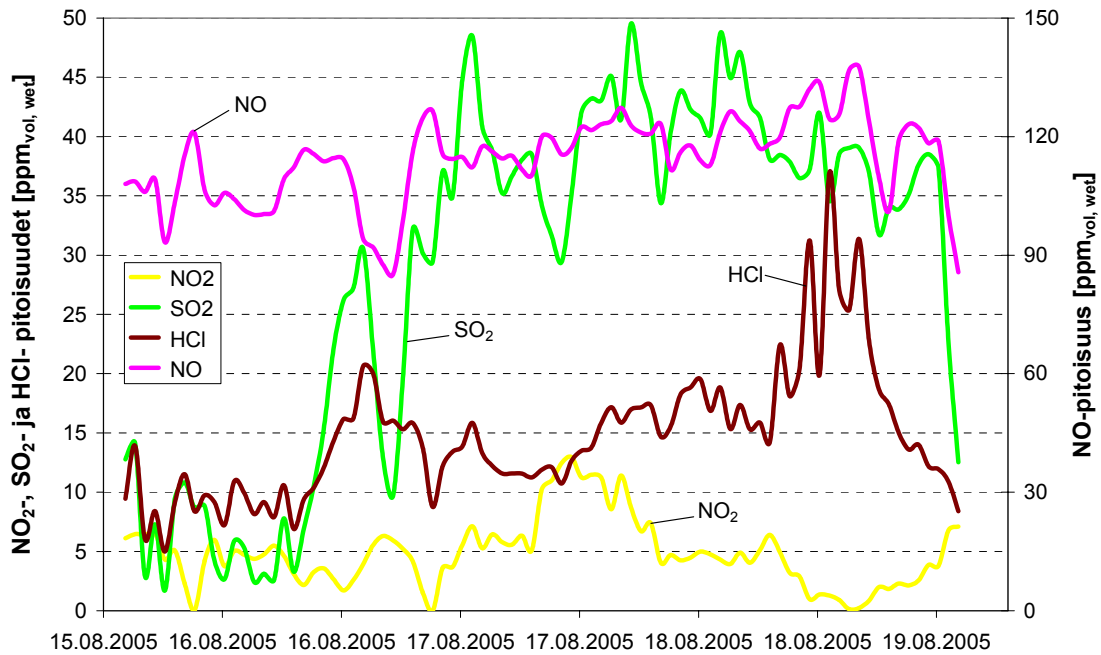
Kuvista 31–33 nähdään muun muassa, että mittauksen keskivaiheilla happipitoisuus kasvoi yhtä aikaa polttoainetehon putoamisen kanssa. Samaan aikaan N_2O -ominaispäästö kasvoi ja palamattomien (CO ja CH_4) ominaispäästöt laskivat. Myös NO_2 -pitoisuus kasvoi, luultavasti tulipesässä olevan ylimääräisen ilman vuoksi (kuva 33). Voimakas SO_2 -pitoisuuden kasvu mittausten alkupuolella johtunee samaan aikaan tapahtuneesta turpeen osuuden kasvusta polttoaineseoksessa.



Kuva 31. CO-, CH₄- N₂O- ja O₂-pitoisuuksien tuntikeskiarvoja biopolttoaineita ja turvetta polttavassa BFB-kattilassa (laitos F).



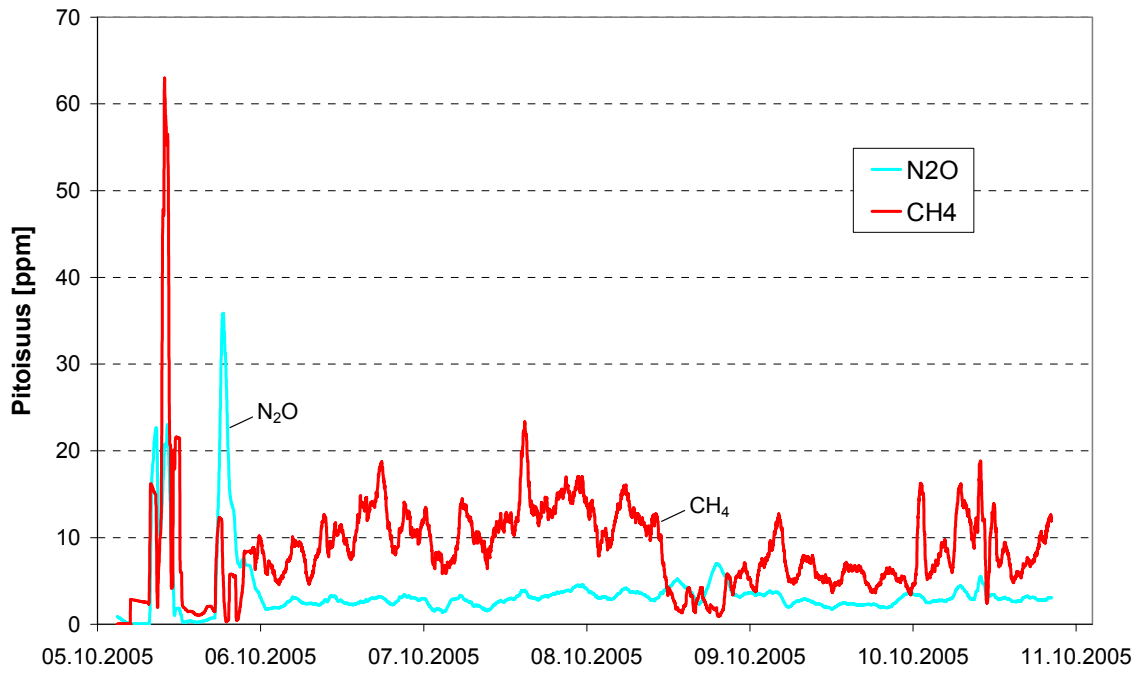
Kuva 32. CO-, CH₄- ja N₂O-ominaispäästöt [mg/MJ_{pa}] sekä polttoaineteho (% nimellistehosta) tuntikeskiarvoina biopolttoaineita ja turvetta polttavassa BFB-kattilassa (laitos F).



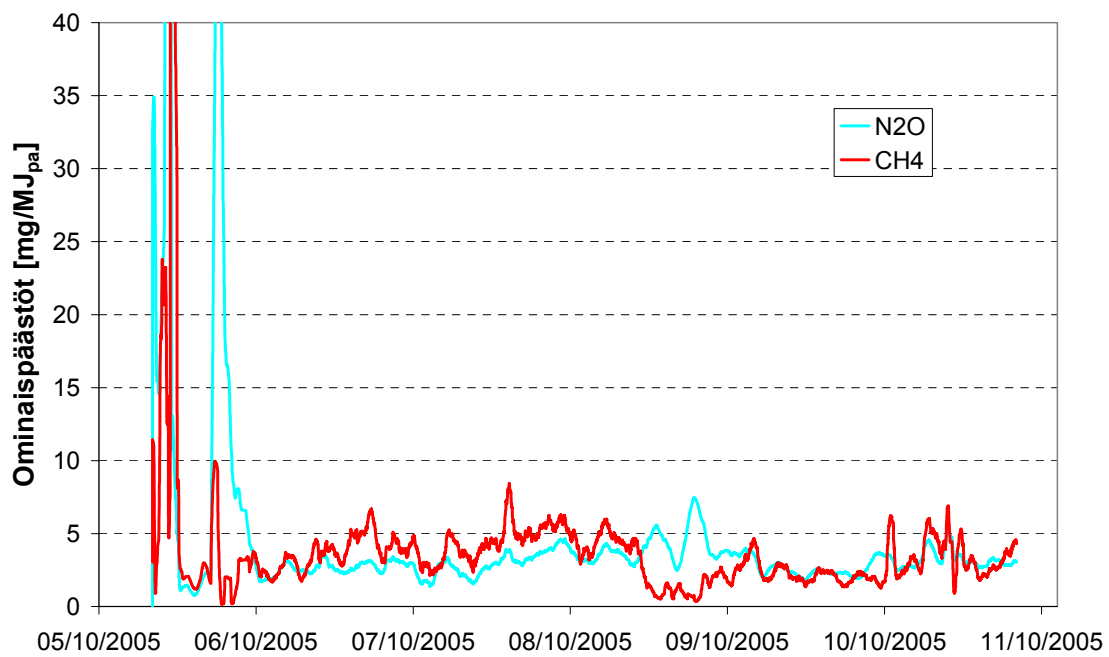
Kuva 33. SO_2 -, NO -, HCl - ja NO_2 -pitoisuuksien [ppm] tuntikeskiarvoja biopolttoaineita ja turvetta polttavassa BFB-kattilassa (laitos F).

2.2.3.8 Laitos G (BFB: turve, biomassa, REF)

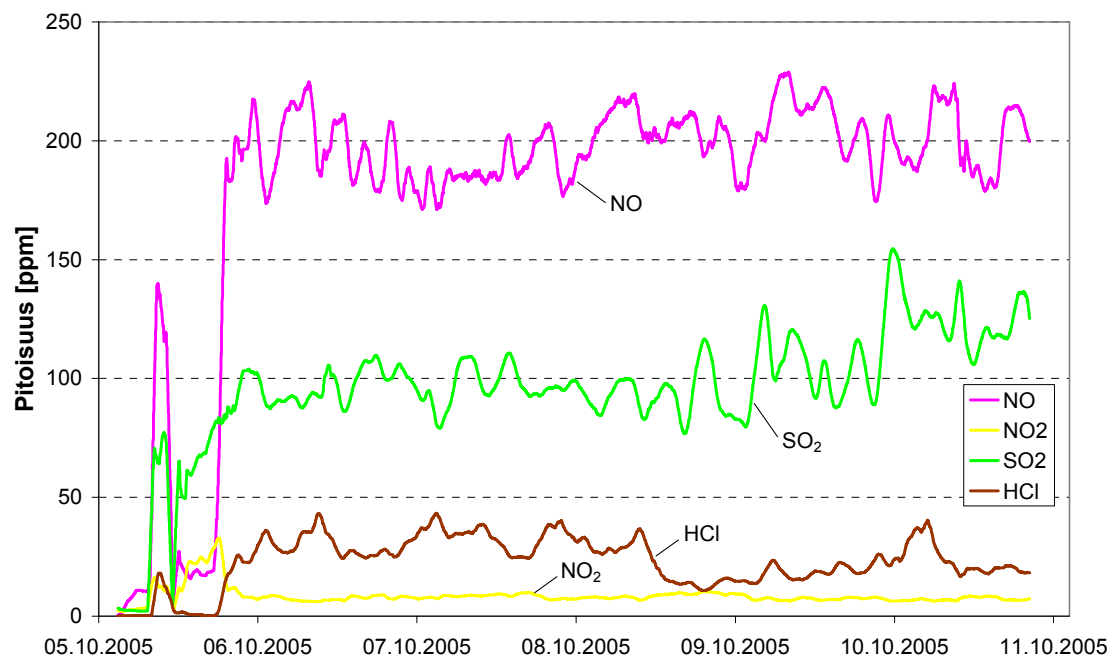
Seuraavissa kuvissa esitetään laitokselta G mitattuja CH_4 -, N_2O -, NO_x -, SO_2 - ja HCl -pitoisuuksia (kuvat 34 ja 36) ja laskettuja CH_4 - ja N_2O -ominaispäästöjä (kuva 35). Kuvissa mittausdatasta on otettu liukuvat tuntikeskiarvot, ja niistä nähdään vasemmassa reunassa kattilan käynnistyksen vaikutus päästötasoihin. Kattila ajettiin mittausjakson aikana ylös kaksi kertaa ensimmäisen käynnistyksen yhteydessä ilmenneiden ongelmien takia. Ominaispäästöjä esittävästä kuvasta on tarkkuuden parantamiseksi leikattu pois käynnistysten aikaisten ominaispäästöjen huiput. Kuvan ulkopuolelle jäävä osa metaanipiikistä yltyä tasolle 130 mg/MJ_{pa} , mutta minuuttitasolla tarkasteltuna ominaispäästö oli tuolloin korkeimmillaan noin 550 mg/MJ_{pa} . N_2O -ominaispäästöjen huiput ovat tasolla 100 mg/MJ_{pa} (tuntikeskiarvo) ja 200 mg/MJ_{pa} (minuuttikeskiarvo).



Kuva 34. CH_4 - ja N_2O -pitoisuudet liukuvina tuntikeskiarvoina laitos G:n savukaasuissa (BFB: turve, biomassa, REF).



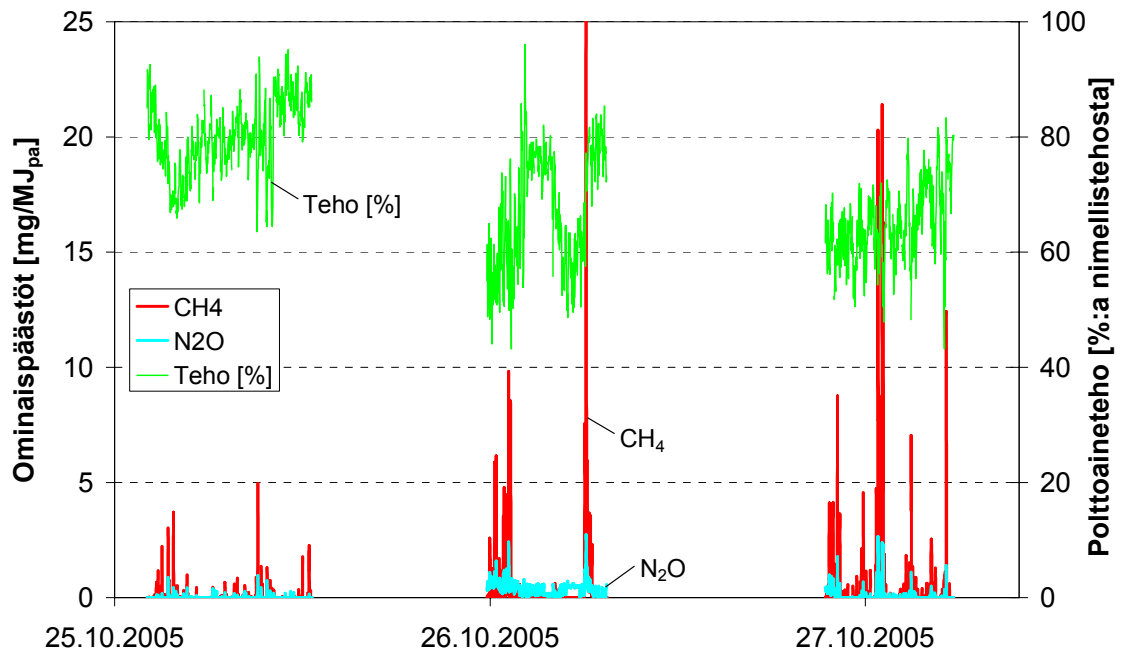
Kuva 35. Laitoksen G (BFB: turve, biomassa, REF) CH_4 - ja N_2O -ominaispäästöt liukuvina tuntikeskiarvoina.



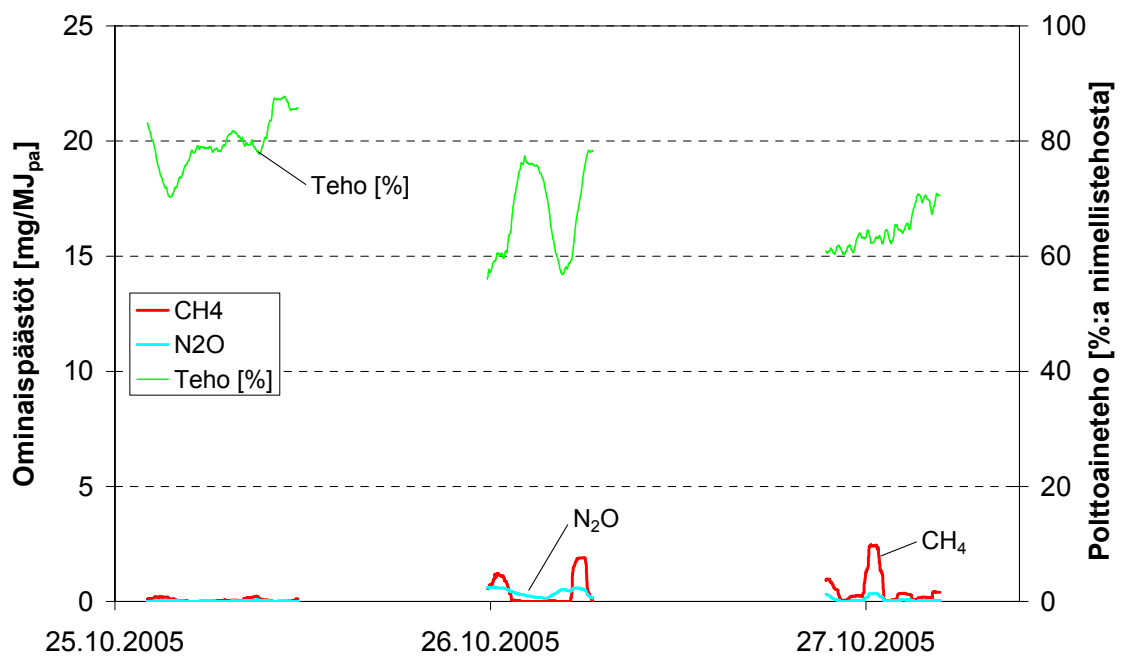
Kuva 36. NO -, NO_2 -, SO_2 -, ja HCl -pitoisuudet liukuvina tuntikeskiarvoina laitoksen G (BFB: turve, biomassa, REF) savukaasuista.

2.2.3.9 Laitos H (BFB: biopolttoaineet, turve)

Kuva 37 esittää laitoksen H päästöt minuuttitasolla mittausjaksolta yksikkönä $\text{mg}/\text{MJ}_{\text{pa}}$ ja kuva 38 vastaavat tulokset liukuvina tuntikeskiarvoina. Kuvia vertaamalla voidaan todeta, että minuuttitason kuvassa näkyvät piikit eivät ole tuntitasolla kovin merkittäviä.



Kuva 37. CH₄- ja N₂O-päästöt sekä teho laitoksella H (BFB: biopolttoaineet, turve) minuuttitasolla.



Kuva 38. CH₄- ja N₂O-päästöt sekä teho laitoksella H (BFB: biopolttoaineet, turve) liukuvina tuntikeskiarvoina.

2.2.4 Mittaustulosten epävarmuus

Mittaustuloksiin aiheutuu epävarmuutta seuraavista tekijöistä:

- mittauslaitteistosta, referensseistä ja mittausdatan käsittelyssä käytetyistä metodeista
- yksikkömuunnoksiin käytetyistä kaavoista (kaavat [1]–[6]: oletus ideaalikaasuista, laitostietojen oikeellisuus ja oletukset palamisen kemiasta).

Tässä tutkimuksissa tehdyissä CH₄- ja N₂O-mittauksissa pitoisuuden epävarmuus on noin ±10 %, mutta pienimmillä pitoisuuksilla (alle 10 ppm) suhteellinen epävarmuus on suurempi, noin ±1 ppm:n suuruusluokkaa sekä metaanille että dityppioksidille. Näiden tietojen avulla voidaan yksinkertaistaen laskea suhteelliset epävarmuudet kunkin laitoksen mittaustuloksille keskimääräisen päästön mukaan. Taulukko 6 esittää näin saadut mittausepävarmuudet laitoksille A–D.

Taulukko 6. Mittaustulosten epävarmuudet laitoksille A–D CH₄- ja N₂O-pitoisuuden osalta.

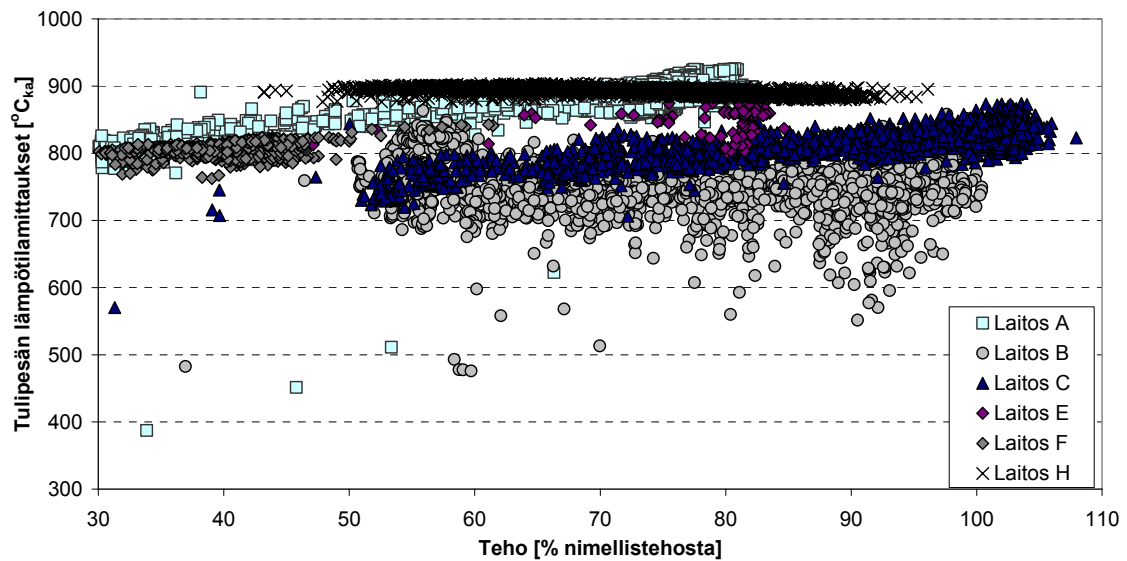
Laitos	CH ₄ -pitoisuuden keskiarvo	CH ₄ -mittauksen epävarmuus	N ₂ O-pitoisuuden keskiarvo	N ₂ O-mittauksen epävarmuus
A	2 ppm	±60 %	17 ppm	±10 %
B	5 ppm	±20 %	4 ppm	±25 %
C	5 ppm	±20 %	7 ppm	±15 %
D	< 1 ppm	±1 ppm ¹	3 ppm	±40 %

¹ Öljypolttimen metaanipäästöt olivat alle määrittäysrajan, joten epävarmuutta ei ole mielekäästä arvioida prosentteina.

Yksikkömuunnosten yksiköstä [ppm] yksikköön [mg/MJ_{pa}] voidaan arvioida olevan verrattain tarkkoja, joten niiden yhteenlaskettu virhe on suuruusluokaltaan alle ±5 %, joka huomioidaan myöhemmin päästökerrointen epävarmuusarvioiden yhteydessä.

2.3 Lämpötilan ja kuormituksen vaikutus N₂O-päästöön

N₂O päästöjä muodostuu 500–950 °C:n lämpötiloissa tapahtuvassa palamisessa. N₂O-päästöjen huippu asettuu noin 700 °C:n tienoille [Kilpinen 2002; IEA GHG R&D 2000]. Leijukerroskattiloiden palamislämpötilat vaihtelevat mm. kattilan suunnittelun ja käytettyjen polttoaineiden mukaan. Yksittäisen kattilan tulipesän lämpötilat vaihtelevat usein kuormituksen mukaan. Kuva 39 esittää kuormituksen ja tulipesän lämpötilamittausten keskiarvojen välisiä riippuvuuksia leijukattiloissa A, B, C, E, F ja H. Kuvassa esitetään lämpötilan ja kuormituksen välinen yhteys pidemmältä ajanjaksolta kuin mittausajalta. Kuvaa on syytä pitää suuntaa antavana, sillä kattiloissa on lukuisia mittauspisteitä, joiden antamien arvojen keskiarvot kuvassa on esitetty. Mittauspisteiden lukumäärässä ja sijoittelussa tulipesässä voi olla merkittäviä eroja laitosten välillä, mikä voi vaikuttaa paljon esitettyihin keskiarvoihin.

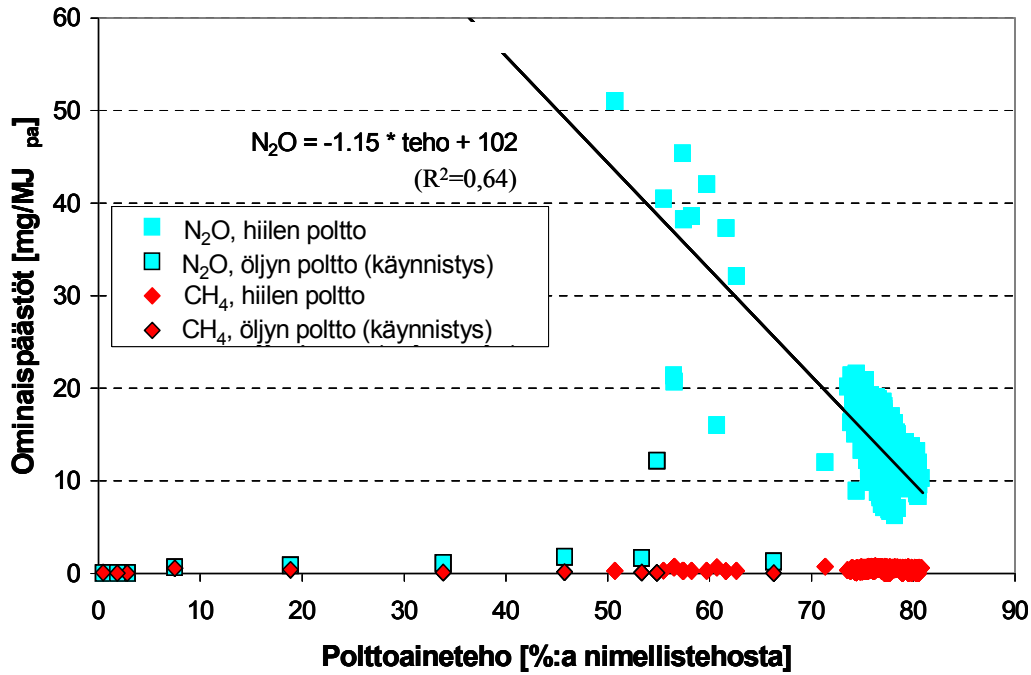


Kuva 39. Tutkittujen leijukerroskattiloiden tulipesistä mitattuja lämpötiloja polttoainekuorman funktiona.

Kuvasta 39 nähdään kuorman ja lämpötilan välinen riippuvuus, joka on useimmilla kattiloilla selkeä lähes koko leijupetien mahdollisella kuormitusalueella (>30–40 % nimellistehosta). Laitoksilla B ja H ei kuitenkaan voida havaita yhteyttä polttoainekuorman ja lämpötilan välillä.

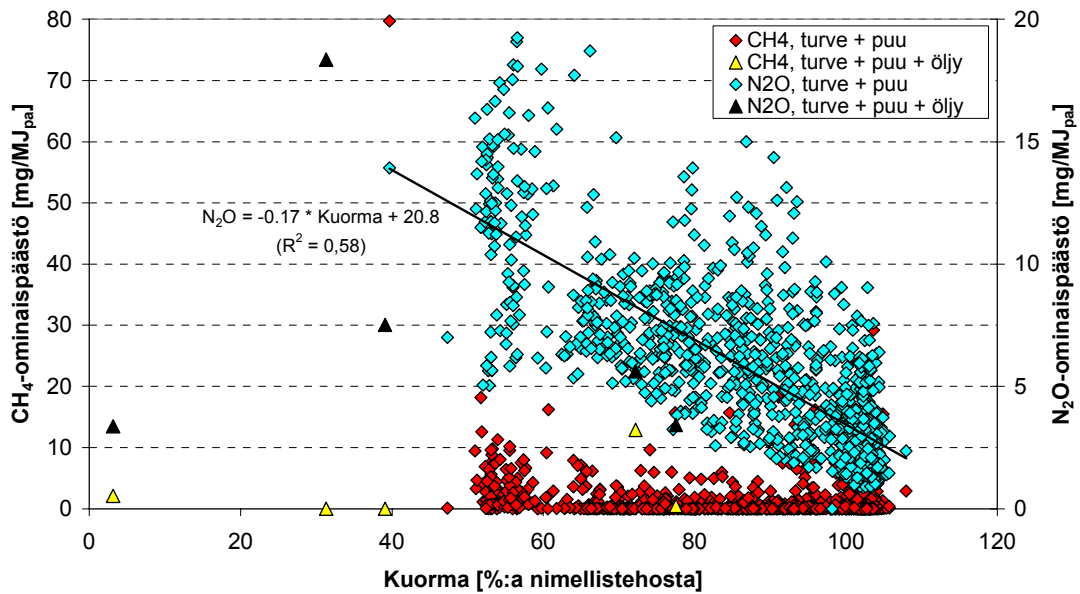
Eräs tämän tutkimuksen keskeisiä aiheita oli kuormituksen ja N_2O -päästön välinen suhde, sillä päästölaskentaa varten kuormitustietoa on paljon paremmin saatavilla kuin riittävää ja yhdenmukaista lämpötiladataa. Kuorman ja N_2O -päästön välinen suhde mitatuissa kattiloissa esitetään kuvissa 40–44.

Kuva 40 osoittaa selvästi, että osakuorma kasvattaa laitoksen A:n N_2O -ominaispäästöä huomattavasti mutta vain tiettyyn kuormitustasoon asti. Tämä johtuu siitä, että kaikki pienimmillä kuormilla mitatut pisteet on mitattu käynnistyksen yhteydessä, jolloin kattilassa poltettiin öljyä likimain öljypolttimen täydellä teholla, jolloin N_2O -päästöt ovat olleet pienet.



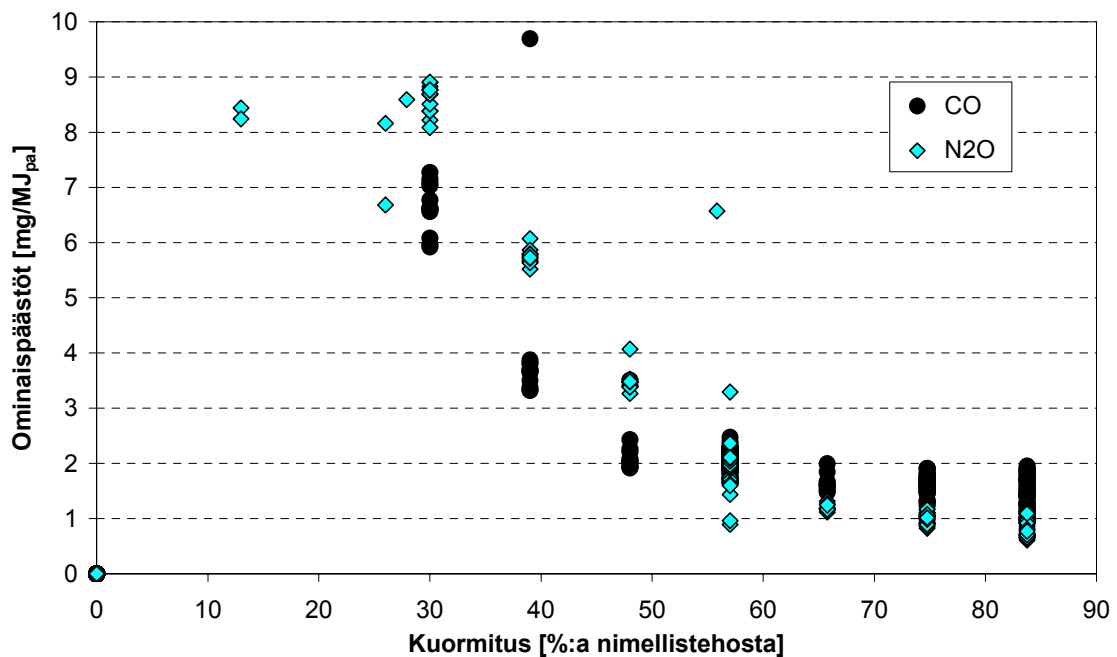
Kuva 40. Kuormituksen ja N_2O - ja CH_4 -päästöjen välinen yhteys laitoksella A (CFB: kivihiili).

Laitokselta C saatiin mittausdataa muita laitoksia pidemmältä aikaväliltä. Kuva 41 esittää tämän turvetta pääpolttoaineenaan polttavan CFB-kattilan N_2O -päästön ja polttoainetehton välisen riippuvuuden. Kuvassa N_2O -pisteisiin sovitetun suoran korrelaatiokertoimen arvo on 0,64. Korrelaatio voisi kuitenkin kasvaa, jos huomioitaisiin tarkemmin mm. polttoainetehton mittauksen ja polttoaineen tulipesään syötön välinen viive, petilämpötilan reagointi kuormitukseen, kaasujen viipymäaika tulipesässä ja kanavissa ja mahdolliset epätarkkuudet eri laitteiden kellonajoissa. Tällaiseen tarkasteluun ei tässä työssä kuitenkaan keskitytty, sillä laitoskohtaisten korrelaatioiden löytäminen ei ollut työn ensisijainen tarkoitus.



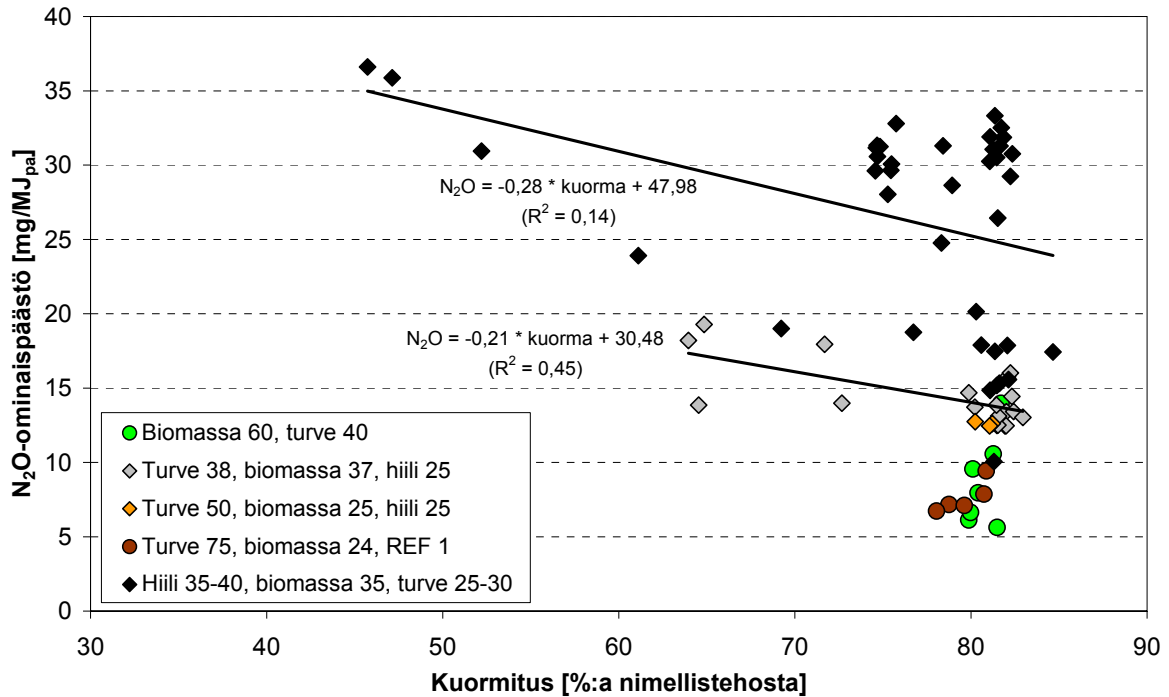
Kuva 41. Kuormituksen ja N₂O- ja CH₄-päästöjen yhteys laitoksella C (CFB: turve, biomassa).

Kuva 42 osoittaa, kuinka N₂O-ominaispäästö kasvaa, kun öljypolttimen polttoaineteho laskee. Tämän öljypolttimen tapauksessa osakuormalla erityisen voimakkaasti kasvavat N₂O-ominaispäästöt johtuivat luultavasti ilmakertoimen kasvusta mitatun kattilan tulipesässä. Osakuorman vaikutuksista muissa Suomen lämpökeskuksissa ei ole tarkempaa tietoa.



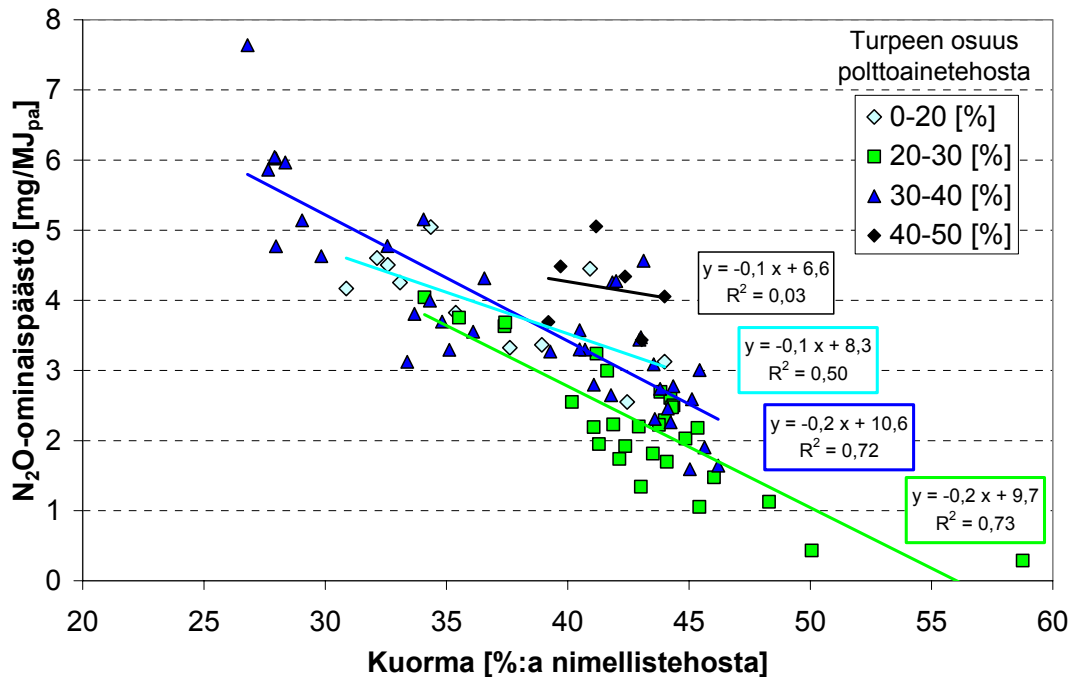
Kuva 42. Kuormituksen ja CO- ja N₂O-ominaispäästöjen yhteys laitoksella D (poltin, POR). Kuvasta jätetty pois korkeimmat CO-pitoisuudet käynnistysten ajalta (jopa 400 mg/MJ).

Kuva 43 esittää laitoksen E kuormituksen ja N₂O-päästön välisen yhteyden eri polttoaineseoksilla. Kuvasta nähdään sekä N₂O-päästön kasvaminen kivihiilen osuuden lisääntyessä että päästön ja kuorman välinen riippuvuus.



Kuva 43. Kuormituksen vaikutus suuren CFB-kattilan N₂O-ominaispäästöihin eri polttoaineseoksilla (laitos E). Polttoaineseokset ovat mittausajanjakson keskimääräisiä seoksia, mikä selittää osaltaan korrelaatiokertoimien alhaiset arvot.

Kuva 44 esittää vastaavat yhteydet laitoksella F, mutta polttoaineseoksista eritellään vain turpeen osuus, koska mittauksen aikana seokset vaihtelivat jatkuvasti eikä esim. lietteen osuudella (0–20 % energiasisällöstä) näyttänyt olevan selvää vaikutusta N₂O-ominaispäästöön.



Kuva 44. Kuormituksen ja turpeen osuuden vaikutukset biopolttoaineita, turvetta ja REF:ää polttavan BFB-kattilan (laitos F) N₂O-ominaispäästöön.

Kuvista 40, 41, 43 ja 44 nähdään, kuinka polttoainetehon laskeminen lisää N₂O-ominaispäästöjä sekä CFB- että BFB-kattiloista. Toisaalta kattilan H ominaispäästöt olivat pieniä myös 40–60 %:n kuormalla (taulukko 10). Osakuorman vaikutus, kuten N₂O-päästötaso muutenkin, riippuu mm. kullekin kattilalle ominaisista lämpötilatasoista. Kuvan 44 korrelaatiokertoimien arvoista voidaan havaita, että mittauspisteiden lukumäärän kasvaessa myös korrelaatio paranee.

2.3.1 N₂O-päästön määrittäminen kuormituksen perusteella

Tässä kohdassa pohditaan mahdollisuuksia käyttää edellä esitettyä kuormituksen ja N₂O-päästön välistä yhteyttä arvioitaessa laitoksen vuosittaisia N₂O-päästöjä.

Taulukko 7 esittää pitkäaikaisiin (15 ja 50 vrk) mittauksiin perustuvat päästöt laitoksilta A ja C. Lisäksi taulukossa esitetään N₂O-päästön ja kuormituksen välinen korrelaatio, joka on määritetty käyttämällä ensimmäisen sellaisen mittausvuorokauden tietoja, jossa esiintyi riittävästi kaikkia kuormitustasoja. Käynnistystilannetta ei kuitenkaan käytetty korrelaation määrittämiseen. Tämän – yhden päivän mittauksiin perustuvan – korrelaation avulla on sitten laskettu koko mittausjakson päästö käyttäen korrelaatioyhtälöä sekä tietoa laitoksen kuormituksesta kyseisellä jaksolla. Vertailun vuoksi taulukossa esitetään myös vuoden 2002 KHK-inventaarion päästökertoimet ja niiden avulla lasketut päästöt mittausjaksolta.

Taulukko 7. Kolmella tavalla mittausajalta määritetyt päästöt [tonnia N₂O] laitoksilta A ja C. Laitoksella A tarkastelujakso oli 15 vrk ja laitoksella C 50 vrk.

Laskentatapa	Mitattu	Kuormituskorrelaatio ¹	Inventaario ¹
Laitos A	0,96	$\Sigma_i (-0,08 * P_i + 7,82) / 1\ 000 = \mathbf{0,72}$	$70 \text{ mg/MJ}_{\text{pa}} * 3,6 * 10^{-6} * \Sigma_i P_i = \mathbf{4,70}$
Laitos C	5,38	$\Sigma_i (-0,03 * P_i + 12,12) / 1\ 000 = \mathbf{4,70}$	$30 \text{ mg/MJ}_{\text{pa}} * 3,6 * 10^{-6} * \Sigma_i P_i = \mathbf{31,53}$

¹ P_i tarkoittaa kyseisen tunnin keskimääräistä tehoa [MW_{pa}].

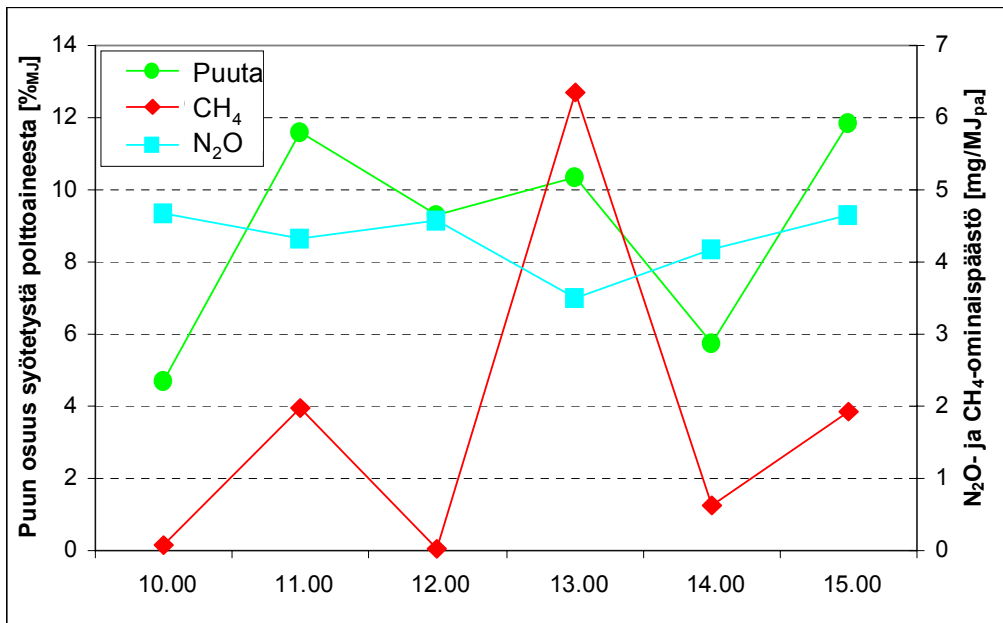
Taulukko 7 osoittaa, että yhden päivän pituisilla mittauksilla olisi voitu arvioida kohtuullisen tarkasti molempien tässä projektissa toteutettujen pitkien (yli 10 vrk) mittausjaksojen päästöt.

Koska polttoainekuormituksen seuranta ja tallentaminen on usein automatisoitu voimalaitoksilla, voisi laitoskohtainen N₂O-päästön laskenta perustua kuorma- tai lämpötilakohtaisiin korrelaatioihin, jotka olisi mitattu laitoksella tai vastaavalla laitostyyppillä. Lämpötilakorrelaation tapauksessa olisi mahdollista hyödyntää tulipesän lämpötilatietoa useista mittauspisteistä, laskea näistä keskiarvoja ja etsiä parasta korrelaatiota N₂O-päästön kanssa. Tarkkuuden parantamiseksi mittauksia voisi tehdä esimerkiksi eri polttoaineseoksilla.

Laskemalla päästöt laitoskohtaisesti tässä kohdassa esitetyllä tavalla kansallisen KHK-inventaarion tulokset tarkentuisivat huomattavasti. Leijukerrospoltto kattaa arviolta noin 60 % tarkastellun sektorin N₂O-päästöistä, ja näistä valtaosa tulee kiertoleijukattiloista. Näin ollen voisi olla järkevää käyttää tällaista laitoskohtaisiin mittauksiin perustuvaa korrelaatiotarkastelua vain CFB-kattiloille.

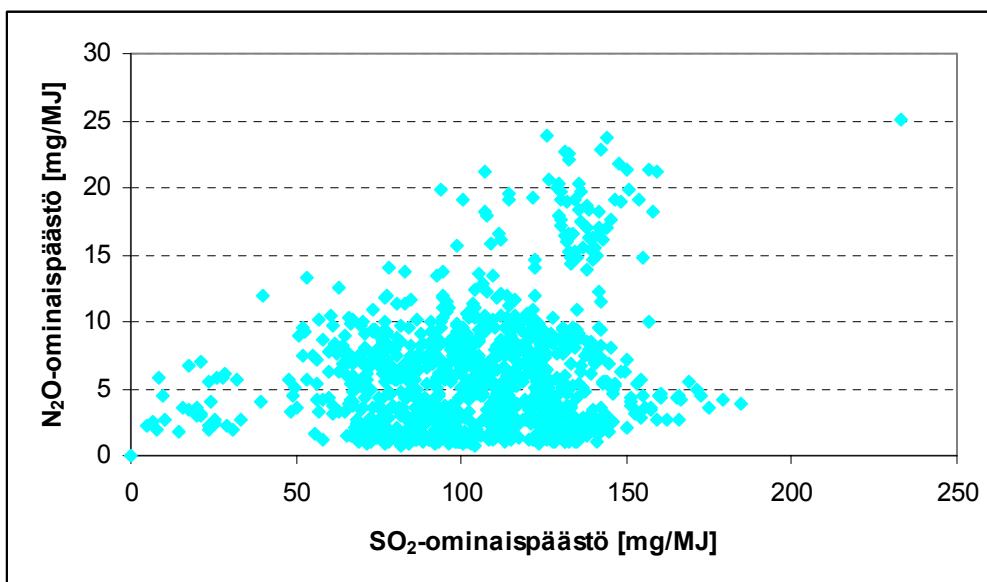
2.4 Polttoaineseoksen vaikutus päästöön

Laitoksella B seurattiin polttoainevirtoja tuotujen kuormien ja kattilan tehojen perusteella. Laskennassa käytettiin polttoaineen viipymäaikana varastoissa ja kuljettimilla kuutta tuntia, joka perustuu laitokselta saatuun arvioon. Kuva 45 esittää saapuneiden kuormien perusteella arvioidut puun ja turpeen osuudet sekä niiden vaikutukset päästöön. Kuvasta nähdään, että kasvanut puun osuus saattaa pienentää N₂O-päästöjä ja kasvattaa CH₄-päästöjä. Päästöt riippuvat kuitenkin enemmän muista tekijöistä. Esimerkiksi samaan aikaan kun puun osuus on kasvanut 6 %-yksikköä, on N₂O-ominaispäästö kerran laskenut ja kerran noussut 0,5 mg/MJ. On kuitenkin huomattava, että puun osuus on koko tarkastelujaksolla melko pieni (< 12 %) eikä suuremman puun osuuden vaikutuksesta saatu tietoa tässä mittauksessa. Laitoksella B ei käytetty öljyä tukipolttoaineena mittausten aikana. Korkea metaaniominaispäästön tuntikeskiarvo klo 13:n kohdalla johtuu kolmen minuutin aikana mitatuista korkeista metaanipitoisuuksista. Polttoainejakaumasta ei näin tarkalta ajanjaksolta ole tietoa, mutta mitattu happipitoisuus on ollut hyvin alhainen näiden minuuttien aikana.



Kuva 45. Polttoaineseoksen vaikutus N_2O - ja CH_4 - ominaispäästöihin laitoksella B (BFB: turve ja biomassa).

Laitokselta C saadun tiedon perusteella biomassan osuutta voisi arvioida myös rikki-päästöjen perusteella. Korkeilla rikkipitoisuuksilla biomassan käytön pitäisi olla vähäistä ja toisin päin. Kuvaajasta, jossa on vaaka-akselilla SO_2 -päästöt ja pystyakselilla N_2O -päästöt (kuva 46), saattaisi siis näkyä myös biomassan osuuden vaikutus N_2O -ominaispäästöön.



Kuva 46. SO_2 - ja N_2O -päästön yhteys laitoksella C (CFB: turve, biomassa).

Kuvasta ei kuitenkaan voida havaita selkeää yhteyttä päästöjen välillä. Dityppioksidipäästö näyttääkin olevan enemmän riippuvainen muista tekijöistä kuin turpeen ja biomassan seoksesta, ainakin pienillä muutoksilla seoksessa. Mittausten aikana biomassan osuus on ollut keskimäärin 20–30 % mutta voinut vaihdella hetkittäin huomattavasti enemmän.

Laitoksella H (BFB) poltettiin pääasiassa kuorta ja turvetta sekä pienempiä määriä lietettä ja öljyä. Polttoaineseoksen vaikutuksen tutkimiseksi laskettiin mittausjaksolta keskipäästö eri polttoaineseoksille (taulukko 8). Kaikilla seoksilla päästöt olivat hyvin pienet, jolloin suhteelliset mittausepävarmuudet ovat merkittäviä. Taulukon perusteella näyttää kuitenkin siltä, että muihin epävarmuuksiin verrattuna ei tehdä suurta virhettä, jos biopolttoaineiden ja turpeen sekapoltoille käytetään yhtä päästökerrointa.

Taulukko 8. Eri polttoaineseosten vaikutus mittausjakson keskimääräiseen päästöön laitoksella H (BFB).

	N ₂ O [mg/MJ]	CH ₄ [mg/MJ]
turve > 80 %	0,1	0,7
turve 50–80 %	0,1	0,4
biopolttoaineet 50–80 %	0,2	0,4
biopolttoaineet > 80 %	0,0	0,1
öljy 1–22 % (biopolttoaineet 50–64 %)	0,3	0,0

Laitoksen F mittausten perusteella pienet muutokset lietteen, biomassan ja turpeen osuuksissa vaikuttivat vain vähän N₂O-ominaispäästöihin, vaikka esim. poltettu liete oli huomattavan kosteaa (n. 60 %), joten sen osuuden voisi olettaa vaikuttavan palamisen lämpötiloihin. Turpeen ja biomassan osuuden muutokset laitoksella F (kuva 44) tukivat edellä esitettyjä johtopäätöksiä siitä, että turpeesta saattaa tulla hieman enemmän N₂O-päästöjä kuin puusta, mutta vaikutus on pienempi kuin kirjallisuuden perusteella voisi olettaa.

Neljältä tutkimuksessa mukana olleelta laitokselta (B, C, E ja F) saatiin myös keskimääräiset turpeen typpipitoisuustiedot. Turpeen typpipitoisuuden ja laitoksen N₂O-päästön välillä (täydellä kuormalla) ei havaittu yhteyttä. Näin ollen laitosten väliset erot päästöissä selittyvät muilla tekijöillä kuin turpeen typpipitoisuudella.

Myös kuvat 43 ja 44 osoittivat, että turpeen ja biomassan suhde polttoaineseoksessa vaikutti verrattain vähän N₂O-ominaispäästöön tutkituilla seoksilla. Sen sijaan kuvasta 43 nähtiin, että kivihiilen osuus oli N₂O-ominaispäästön kannalta ratkaiseva, mikä on myös kirjallisuudessa esitetyn teorian mukaista [mm. Kilpinen 2002]. Laitoksen A kivihiilenpoltosta tuli kuitenkin vähemmän N₂O-päästöjä kuin laitoksen E sekapoltoista, jossa oli mukana kivihiiltä, turvetta ja biomassaa. Tässä tapauksessa pedin lämpötila oli ratkaisevampi tekijä kuin polttoaine päästöjä vertailtaessa (laitoksen A pedin lämpötila oli korkeampi kuin laitoksen E).

Laitoksella A käynnistyksessä käytetystä öljystä aiheutui huomattavasti pienemmät N₂O-päästöt kuin kivihiilen poltosta (kuva 40). Käynnistyksen öljynpolton päästöt vastaavatkin enemmän öljypoltin kuin leijupetiteknikan päästöjä. Toisaalta kiinteän polttoaineen syötön alettua käynnistyksen päästöt olivat huomattavasti suuremmat kuin täydellä kuormalla ajettaessa.

2.5 Laitoskohtaiset ominaispäästöt

2.5.1 Ominaispäästöt mittausjaksolta

Kaavalla [1] lasketuista hetkellisistä ominaispäästöistä saadaan laskettua laitosten kokonaispäästöt kertomalla ominaispäästö [mg/MJ_{pa}] vastaavan ajanjakson aikana poltetulla energiamäärällä [MJ_{pa}] ja laskemalla sitten tulot yhteen koko mittausjakson ajalta. Yhteenlasketuista päästöistä voidaan laskea keskimääräinen ominaispäästö mitatulle ajanjaksolle kaavalla [7]:

$$EF = \frac{Päästö}{E_{in}}, \quad [7]$$

missä EF on ominaispäästö, $Päästö$ on koko mittausajalta yhteenlaskettu päästö [mg] ja E_{in} on mittausaikana kattilaan syötetty polttoaine-energia [MJ]. Jos aiemmin, kaavalla [1], lasketuista ominaispäästöistä olisi suoraan ottanut keskiarvot, tulos olisi virheellisesti painottunut niillä kuormilla, joiden osalta on eniten mittauspisteitä. Laitosten ominaispäästöt mittausjaksolta esitetään taulukossa 9.

Mittaukset laitoksella D (öljypoltin) poikkesivat hieman muista tässä projektissa tehdyistä mittauksista, koska niissä voitiin säätää kuormaa mittaustarpeiden mukaan. Mittausjaksojen pituudet vaihtelivat kuitenkin muutamasta minuutista lähes tuntiin, joten tuloksena ei saatu dataa tasaisin väliajoin kuten laitoksilta A, B ja C. Tästä syystä laitoksen D päästöt on laskettu kertomalla ominaispäästöt [mg/MJ_{pa}] kunkin mittausjakson aikana vakiona pidetyllä teholla [MW_{pa} = MJ_{pa}/s] ja ottamalla sitten keskiarvo kunkin kuormitustason päästötdatasta [mg/s] ja kertomalla tämä keskiarvo mittausajalla [s]. Laitoksen E osalta taulukossa esitetään useita ominaispäästöjä, sillä laitoksella poltettiin niin erilaisia polttoaineseoksia mittauksen aikana, että yhden ominaispäästöluvun laskeminen ei olisi mielekäästä.

Taulukko 9. Mitattujen laitosten ominaispäästöt tarkastelujaksolta. Taulukossa ” $\leq 0,5$ ” tarkoittaa päästöä välillä 0,05–0,5 ja ”0” tätä pienempää päästöä.

Laitos	CH ₄ -ominaispäästö [mg/MJ]	N ₂ O-ominaispäästö [mg/MJ]	Mittauspäiviä ¹ [kpl]
A (CFB: kivihiili)	$\leq 0,5$	14	15
B (BFB: turve, biomassa)	2	4	1
C (CFB: turve, biomassa)	2	5	50
D (poltin: POR)	0	2	1
E (CFB: biomassa 60, turve 40)	$\leq 0,5$	9	1
E (CFB: turve 38, biomassa 37, hiili 25)	0	14	1
E (CFB: turve 50, biomassa 25, hiili 25)	0	13	1
E (CFB: turve 75, biomassa 24, REF 1)	$\leq 0,5$	8	1
E (CFB: hiili 35 - 40, biomassa 35, turve 25 - 30)	$\leq 0,5$	26	2
F (BFB: biopolttoaineet, turve, REF)	$\leq 0,5$	3	5
G (BFB: turve, biomassa, REF) ²	4	4	6
H (BFB: biopolttoaineet, turve)	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	3

¹ Vuorokausia, joilta on käyttökelpoisia tuloksia.

² Mittausjakson päästöjen aritmeettinen keskiarvo.

2.5.2 Ominaispäästöt eri kuormituksilla

Taulukko 9 esitti laitosten ominaispäästöt mittausjaksolta. Jotta niiden perusteella voitaisiin arvioida laitoksen vuosittaisia päästöjä, jaettiin N₂O- ja CH₄-päästöt samoihin teholuokkiin kuin mitä aikaisemmin käytettiin kuormitustutkimuksessa. Näille teholuokille laskettiin keskimääräiset päästökertoimet vastaavasti kuin koko mittausjakson päästökerroin eli kaavalla [7] mutta jakamalla tarvittu data tehon mukaan neljään luokkaan. Taulukko 10 esittää tutkituille laitoksille lasketut päästökertoimet kuormituksen mukaan. Taulukossa EF_n tarkoittaa päästökerrointa ja sen alaindeksi viittaa kuhunkin kuormitusalueeseen, kuten aiemminkin (taulukko 2).

Taulukko 10. Tutkittujen laitojen ominaispäästöt eri kuormitusalueilla [mg/MJ_{pa}]. Taulukossa ”≤0,5” tarkoittaa päästöä välillä 0,05–0,5 ja ”0” tätä pienempää päästöä.

Laitos	CH ₄ [mg/MJ _{pa}]			N ₂ O [mg/MJ _{pa}]			EF ₀₋₄₀	
	EF ₈₀₊	EF ₆₀₋₈₀	EF ₄₀₋₆₀	EF ₈₀₊	EF ₆₀₋₈₀	EF ₄₀₋₆₀		
A (CFB: kivihiili)	≤0,5	≤0,5	≤0,5	0 ¹	14	27	28	1 ²
B (BFB: turve, biomassa)	2				4			
C (CFB: turve, biomassa)	2	1	4	43	4	8	12	13
D (polttin: POR)	0	0	0	0	1	1	2	7
E (CFB: biomassa 60, turve 40)	≤0,5	0			9	7		
E (CFB: turve 38, biomassa 37, hiili 25)	0	0			14	16		
E (CFB: turve 50, biomassa 25, hiili 25)	0				13			
E (CFB: turve 75, biomassa 24, REF 1)	0	≤0,5			8	7		
E (CFB: hiili 35–40, biomassa 35, turve 25–30)	0	≤0,5	0		25	28	29	
F (BFB: biopolttoaineet, turve, REF)			≤0,5	≤0,5			3	4
H (BFB: biopolttoaineet, turve)	≤0,5	≤0,5	≤0,5		0	≤0,5	≤0,5	

¹ Öljyn poltto käynnistyksen yhteydessä. Päästöt olivat alle määritysrajan, mutta keskimääräisiä päästökertoimia laskettaessa käytettiin myös tälle tehoalueelle tehoalueen 40–60 % päästökertointa.

² Öljyn poltto käynnistyksen yhteydessä.

³ Laitos E:llä keuhkotiin erilaiten polttoaineseosten vaikutuksia. Tästä syystä mittaukset jaetaan tässä taulukossa useammalle riville kulloinkin käytetyn pääpolttoaineen mukaan.

Laitos G:stä ei saatu riittävästi prosessitietoja kuormakohtaisten päästökerrointen laske-
miseksi. Eräiden muiden laitosten mittausten tuloksiin ei saatu mukaan kaikkia edellä
esitettyjä kuormitustasoja, joten näillä riveillä on tyhjiä soluja. Taulukossa esiintyvät
nollat puolestaan ovat mitatuista pitoisuuksista laskettuja ominaispäästöjä, joten mitta-
usten mukaan monista laitoksista ei pitäisi tulla merkittävästi metaanipäästöjä edes osa-
kuormilla. Ilman metaanipitoisuus on noin 1,7 ppm, mutta tämän vähentäminen päästö-
kertoimista ei ole KHK-inventaariossa hyväksyttävää.

Laitoksella C alle 40 %:n kuorman metaanipäästö poikkeaa muista selvästi. Korkea me-
taanipäästö tällä kuormatasolla nähdään myös kuvassa 41. Toisaalta kuvasta nähdään
myös, että laitoksella C (kuten suurilla leijupedeillä yleensäkin) on vähän alle 40 %:n
kuormaa ja nämä tilanteet ovat yleensä häiriöitä, alas- tai ylösajoja. Näin ollen, vaikka
kuormitusosuuden ominaispäästöt nousisivatkin huomattavan suuriksi, eivät ne kuormi-
tustason pienen osuuden vuoksi kasvata laitoksen päästökerrointa merkittävästi.

Kuormitustasojen mukaisten ominaispäästöjen (taulukko 10) ja laitospöytäisten kuormi-
tusjakaumien avulla voidaan arvioida kunkin laitoksen vuosittaista N₂O- ja CH₄-
päästöä. Päästökerroin lasketaan kaavalla [8] eli kertomalla kunkin kuormitustason
osuus vastaavalla ominaispäästöllä ja laskemalla tulot yhteen.

$$EF = X_{80+} \cdot EF_{80+} + X_{60-80} \cdot EF_{60-80} + X_{40-60} \cdot EF_{40-60} + X_{0-40} \cdot EF_{0-40}, \quad [8]$$

missä EF on laitoksen tai laitostyyppin keskimääräinen päästökerroin vuotuisia päästöjä
ajatellen, X_n kunkin kuormitustason osuus energiasta ja EF_n kullekin kuormitustasolle
mittausten mukaan määritetty päästökerroin. Näin saadaan päästökertoimet vuositasolla
laitoksille A, C ja H (taulukko 11).

Taulukko 11. Laitosten A, C ja H päästökertoimet esimerkkivuodelle.

Laitos	CH ₄ [mg/MJ _{pa}]	N ₂ O [mg/MJ _{pa}]
A (CFB: kivihiihi)	≤ 0,5	15
C (CFB: turve, biomassa)	2	4
H (BFB: biopolttoaineet, turve)	≤ 0,5	≤ 0,5

Vertaamalla taulukoita 9 ja 11 nähdään, että mittausjakso on kuvannut hyvin keskimää-
räistä kuormitustilannetta laitoksilla A, C ja H. Tämä oli tarkoituskin useita päiviä kes-
tämissä mittauksissa. Laitos A:n osalta mittausjakson aikana oli vähemmän osakuormaa
kuin vuoden aikana keskimäärin, mikä aiheutti mittausjaksolla hieman vuositason pääs-
tökerrointa pienemmän N₂O-ominaispäästön. Laitos C:llä tilanne oli päinvastainen, mis-
tä aiheutui mittausjaksolle keskimääräistä suuremmat N₂O-ominaispäästöt.

Laitokselta E saatiin kuormitusjakauma, jota ei kuitenkaan voinut soveltaa taulukon 11 kaltaiseen laskentaan. Jakaumasta voidaan kuitenkin päätellä laitoksen E vuosittaisten päästöjen olevan hyvin lähellä taulukossa 10 esitettyjä, yli 80 %:n kuormalla mitattuja päästöjä, vuoden keskimääräisen polttoainejakauman mukaan. Tämä johtuu siitä, että laitosta ajetaan poikkeuksellisen paljon täydellä tai lähes täydellä kuormalla.

2.6 Päästökertoimet

Tässä kohdassa esitetään mittaustulosten ja kuormitustutkimuksen perusteella arvioidut päästökertoimet. Kohdassa 2.6.1 esitetään kunkin mitatun laitostyyppin päästökertoimet käyttämällä mittaustuloksia ja tietoa laitostyyppin keskimääräisestä kuormituksesta. Kohdassa 2.6.2 päästökertoimet yleistetään myös muihin kokoluokkiin olettaen, että kunkin kuormitusosuuden päästötaso on sama kokoluokasta riippumatta, mutta huomioiden eri kokoluokkien erilaiset kuormitusjakaumat. Kohdassa 2.6.3 annetaan suositukset KHK-inventaariossa käytettäviksi päästökertoimiksi hyödyntämällä tämän tutkimuksen lisäksi myös muiden tutkimusten tuloksia ja ottamalla huomioon KHK-inventaarion laskennassa käytettävä tarkkuus.

2.6.1 Mitattujen laitostyyppien päästökertoimet

Tietyn laitostyyppin keskimääräistä päästöä voidaan arvioida käyttämällä tietoa keskimääräisistä kuormituksista ja yleistämällä mittaustulokset koko laitostyypille (eli olettaen, että mittaustulokset edustavat samantyyppisten laitosten päästöjä vastaavilla kuormituksilla). Kun mittaustulokset teholuokittain (taulukko 10) kerrotaan keskimääräisillä kuormituksilla (taulukko 2) kaavan [8] mukaan, saadaan arviot koko maan keskimääräisistä CH₄- ja N₂O-päästökertoimista (taulukko 12) laitostyypeittäin. Taulukossa huomioidaan keskiarvoisista kuormitusjakaumista (taulukko 2) vain luokka ”Kaukolämpö ja CHP”, koska kaikki mitatut kohteet olivat kaukolämpöä tai teollisuudelle energiaa tuottavia laitoksia eikä teollisuuden laitosten osalta ollut tarpeeksi kuormitustietoa.

Laitokselta F (BFB: biopolttoaineet, turve, REF) ei saatu mittaustuloksia täydellä kuormalla. Voidaan kuitenkin olettaa, että CH₄- ja N₂O-ominaispäästöt eivät ainakaan kasva suuremmilla kuormilla ajettaessa, joten laitoksen F päästökertoimelle voidaan laskea konservatiivinen arvio käyttämällä suuremmille kuormitustasojille tason 50–60 % ominaispäästöjä 1,7 mgN₂O/MJ ja 0,1 mgCH₄/MJ.

Taulukko 12. CH₄- ja N₂O-päästökertoimet [mg/MJ_{pa}] mitatuille laitostyypeille, joilta on mittaustuloksia myös pieniltä kuormilta. Taulukossa ”≤0,5” tarkoittaa päästöä välillä 0,05–0,5 ja ”0” tätä pienempää päästöä.

Laitos ¹	Tekniikka	Pääpolttoaineet	Kokoluokka [MW _{pa}]	CH ₄ [mg/MJ _{pa}]	N ₂ O [mg/MJ _{pa}]
A	CFB	Kivihiili	50–100	≤ 0,5	14
E	CFB	Sekapoltto (kivihiili < 50 %) ²	> 100	0	25
C	CFB	Turve ja biomassa	> 100	2	5
D	Poltin	Öljy	< 50	0	4
F ja H	BFB	Biopolttoaineet ja turve	> 100	≤ 0,5	≤ 0,5..2

¹ Laitos, jonka mittaustulokseen päästökerroin perustuu.

² Laskettu käyttäen mittaustuloksia 35–40 %:n kivihiilen osuudelle.

Laitoksen E mittausten perusteella määritettiin päästökerroin sekapoltolle, jossa hiilen osuus on < 50 %, sillä tällä seoksella oli mittaustuloksia myös alle 60 %:n kuormilla. Kuormitustutkimuksen (taulukko 2) mukaan 0–40 %:n kuormitukset ovat yli 100 MW:n kaukolämpölaitoksissa merkityksettömiä, joten tämä kuormitusalue voitiin jättää huomioimatta tarkasteluissa. Muille polttoaineseoksille laitoksella E päästökertoimia ei laskettu, sillä niille ei ollut tuloksia osakuormatilanteista.

2.6.2 Päästökertoimien yleistäminen muihin kokoluokkiin

Jos yleistyksiä viedään vielä taulukkoa 12 pidemmälle ja käytetään samoja kuormakoh-taisia päästökertoimia kaikille kuormitustutkimuksessa käsitellyille, tekniikaltaan sa-moille laitoksille kokoluokasta, tarkemmasta polttoainejakaumasta ja käyttötarkoituk-sesta riippumatta, voidaan kuormitustutkimuksen tuloksien avulla arvioida myös moni-en muiden laitosten päästöjä. Nämä päästökertoimet esitetään taulukossa 13, jossa ko-koluokkien väliset erot päästökertoimissa johtuvat siis eroista kuormitusjakaumissa. Päästökertoimien epävarmuudet kasvavat tehtyjen oletusten myötä, etenkin yleistettäes-sä suurten kattiloiden mittauksia pieniin kattiloihin ja toisin päin sekä polttoaineosuu-ken muuttuessa kymmeniä prosentteja. Taulukon luvut on saatu edellä esitetyn lasken-nan perusteella, mutta esimerkiksi mittausten määrittämisraja ja menetelmien epätarkkuu-det aiheuttavat sen verran virhettä, että inventaariossa ei liene järkevää esittää kertoimia muuten kuin kokonaislukuina.

Taulukko 13. Kuormitusjakauman perusteella arvioituja päästökertoimia mitattujen kaltaisille laitystyyeille. Taulukossa "≤0,5" tarkoittaa päästöä välillä 0,05–0,5 ja "0" tätä pienempää päästöä.

Tekniikka	Pääpolttoaineet	CHP- ja kaukolämpöä tuottavat laitokset, kokoluokka [MW _{pa}]			Lauhdevoima, kokoluokka [MW _e]		
		alle 50	50–100	yli 100	alle 50	50–200	yli 200
CH₄ [mg/MJ_{pa}]							
CFB	Kivihiili	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
CFB	Turve ja biomassa	6	2	2	3	2	2
Poltin	POR	0	0	0	0	0	0
BFB	Biopolttoaineet ja turve	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
N₂O [mg/MJ_{pa}]							
CFB	Kivihiili	20	14	16	17	17	16
CFB	Sekapoltto (kivihiili < 50 %)			25			
CFB	Turve ja biomassa	8	4	5	5	5	5
Poltin	POR	4	1	1	1	1	1
BFB	Biopolttoaineet ja turve	≤ 0,5...2	≤ 0,5...2	≤ 0,5...2	≤ 0,5...2	≤ 0,5...2	≤ 0,5...2

Metsäteollisuuden kattiloille ei esitetä tässä päästökertoimia, sillä kuormitusjakaumat (taulukko 2) pohjautuvat liian suppeaan otantaan. Näyttäisi, että teollisuuden kattiloilla on enemmän osakuormatilanteita kuin muilla CHP-kattiloilla keskimäärin, joten teollisuuden kattiloiden keskimääräiset ominaispäästöt voivat olla joissain tapauksissa hieinan taulukossa 13 esitettyjä kertoimia suurempia. Tämän tutkimuksen tuloksena määritetyt suositukset päästökertoimiksi ovat kuitenkin konservatiivisia, joten niiden käyttö myös teollisuuden kattiloille on paremman tiedon puuttuessa hyvin perusteltua.

Kuormitustutkimuksen virhearvioita on esitetty jo aiemmin kohdassa 2.1.4 ja mittaustulosten epävarmuutta puolestaan on käsitelty kohdassa 2.2.4. Taulukossa 13 esitettyjen päästökertoimien epävarmuuksia (U, Uncertainty) voidaan arvioida yhdistämällä eri lähteistä aiheutuvat epävarmuudet kaavoilla [9] ja [10]. Kun epävarmuuksia lasketaan osatekijöiden epävarmuuksista, käytetään yhteenlaskujen tapauksissa kaavaa [9] ja kertolaskujen tapauksissa kaavaa [10]. Kaavat ovat lähteestä [IPCC 2000].

$$U = \frac{\sqrt{(U_1 \cdot X_1)^2 + (U_2 \cdot X_2)^2 + \dots + (U_n \cdot X_n)^2}}{X_1 + X_2 + \dots + X_n}, \quad [9]$$

missä U_i on kunkin osatekijän (kuormitustutkimus, mittaukset ja yksikkömuunnokset) edellisissä luvuissa esitetty epävarmuus ja X_i on vastaavan tekijän arvo tarkasteltavassa yhteenlaskussa.

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}, \quad [10]$$

missä U_i on kunkin osatekijän epävarmuus kuten kaavassa [9].

Kuormitustutkimuksen epävarmuusarviot esitettiin aiemmin taulukossa 2. Epäsymmetrisessä tapauksessa näistä on käytetty suurempaa epävarmuutta.

Yksikkömuunnosten ja käytettyjen kaavojen ja prosessitietojen yhteenlaskettu epävarmuus arvioitiin kohdassa 2.2.4 noin ± 5 %:ksi. Näillä tiedoilla lasketut keskimääräisten päästökerrointen epävarmuudet esitetään alla (taulukko 14).

Taulukko 14. Laskettujen keskimääräisten päästökertoimien virhearvioiden likiarvoja [%] kolmelle laitostyypille.

Tekniikka	Pääpolttoaineet	CHP-laitokset [MW_{pa}]			Lauhdevoima [MW_e]		
		alle 50	50–100	yli 100	alle 50	50–200	yli 200
CH₄							
CFB	Kivihiili	± 40 %	± 60 %	± 60 %	± 50 %	± 50 %	± 50 %
CFB	Turve ja biomassa	± 60 %		± 30 %	± 60 %	± 40 %	± 40 %
Poltin	POR	$< 1 \text{ mg/MJ}^1$					
N₂O							
CFB	Kivihiili	± 20 %	± 50 %	± 30 %	± 30 %	± 20 %	± 20 %
CFB	Turve ja biomassa	± 30 %	± 80 %	± 30 %	± 30 %	± 20 %	± 20 %
Poltin	POR	± 70 %	± 80 %	± 40 %	± 40 %	± 30 %	± 30 %

¹ Öljypolttimen metaanipäästö oli alle määrittämissä rajat, joten sille ei voida määrittää virhearviota prosentteina.

Virhearviot vaihtelevat jonkin verran laitostyypeittäin. CH₄:n osalta suhteelliset epävarmuudet ovat suurempia kuin N₂O:n. Tämä johtuu muun muassa siitä, että mittauksissa havaitut CH₄-pitoisuudet ovat olleet N₂O:n vastaavia pienemmät, jolloin mittausten tarkkuus ± 1 ppm aiheuttaa suuremman suhteellisen virheen CH₄- kuin N₂O-päästöön.

Edellä esitetyissä arvioissa ei ole huomioitu virhettä, joka aiheutuu mittaustuloksen yleistämisestä muille samaa tekniikkaa ja polttoainetta käyttäville laitoksille, sillä sitä ei voida laskea. Tämä epävarmuus huomioidaan myöhemmin suosituspäästökerrointen epävarmuuden yhteydessä taulukossa 16. Mittaustulosten yleistämisestä tulevat epävarmuudet kasvavat, kun mennään kauemmas mitattujen laitosten tekniikasta ja kokoluokasta. Kuormitustutkimuksen epävarmuusarvioissa tämä yleistämisestä aiheutuva epävarmuus sen sijaan on huomioitu, joten taulukko 14 sisältää tämän epävarmuuden kuormitusjakaumien osalta. Kuormitusjakaumien tapauksessa epävarmuuksia on myös hieman yliarvioitu, sillä eri kuormitustasojen välisiä negatiivisia korrelaatioita ei ole huomioitu laskuissa.

2.6.3 Suositukset KHK-inventaarion päästökertoimiksi

Tässä luvussa esitetään suositukset KHK-inventaarion käytettäväksi päästökertoimiksi perustuen taulukossa 13 esitettyihin lukuihin, muihin tässä tutkimuksessa tehtyihin mittauksiin sekä muiden tutkimusten mittaustuloksiin, joita on liitteessä B. Suositellut päästökertoimet ovat hieman konservatiivisia, jolloin ne ennemmin yli- kuin aliarvioivat päästöjä.

Koska päästöjen arviointi päästökertoimilla on epätarkkaa, päästökertoimet esitetään kokonaislukuina (yksikkönä mg/MJ_{pa}). Dityppioksidipäästöt ja varsinkin metaanipäästöt kasvavat tyypillisesti erilaisissa häiriötilanteissa. Tässä tutkimuksessa on huomioitu erityisesti sellaiset häiriötilanteet, jotka johtavat polttoainetehon putoamiseen, mutta muunlaisten häiriötilanteiden vaikutusta ja yleisyyttä ei ole ollut mahdollista arvioida tarkasti. Erilaiset häiriötilanteet aiheuttavat kuitenkin usein polttoainetehon putoamisen. Näin esimerkiksi taulukon 13 päästökertoimiin sisältyy jo kuormitusjakaumien mukana tuleva häiriötilanteiden vaikutus vuosittaiseen päästöön. Tämä tarkkuus riittää kansallisten keskiarvoisten päästökertoimien määrittämiseen, sillä tutkitun sektorin merkitys kansallisiin CH_4 -päästöihin on vähäinen ja lisäksi voidaan olettaa, etteivät häiriötilanteet muuta N_2O -ominaispäästöjä merkittävästi eri tavalla kuin osakuormatilanteet. Lisäksi edellä esitetyn laskennan tuloksena saadut päästökertoimien likiarvot on pyöristetty suosituksissa ylöspäin seuraavaan kokonaislukuun. Näin muutkin mahdolliset häiriötilanteet tulevat huomioiduksi päästökertoimissa, ja arvio on edelleen konservatiivinen. Näin ollen tarkempaan häiriötilanteiden vaikutusten määrittämiseen ei ole perusteita, ellei haluta tietää laitospohjaisia päästöjä. Taulukko 15 esittää suositukset metaanin ja dityppioksidin päästökertoimiksi. Metaanin osalta esitetään suosituskertoimet vain sellaisille luokille, joista on mittaustuloksia pitkältä mittausjaksolta ja joihin tuloksia voidaan konservatiivisesti soveltaa. Karkeita yleistyksiä esimerkiksi alle 50 MW kokoluokkaan ei ole tehty siksi, että metaanipäästö voi moninkertaistua olosuhteiden muuttuessa, kuten esimerkiksi kuvista 31 ja 37 nähdään. Vertailun vuoksi taulukossa on myös IPCC:n [1997] suosituskertoimet sekä Tilastokeskuksen vuoden 2005 KHK-inventaariossa käytetyt kertoimet [Tilastokeskus 2005].

Koska taulukon 13 mukaan vain kokoluokaltaan alle 50 MW kaukolämpöä tuottavien kattiloiden N_2O - ja CH_4 -ominaispäästöt poikkesivat merkittävästi muiden luokkien päästöistä, voidaan laskennassa suositella käytettäväksi yksinkertaisempaa luokitusta kuin taulukossa 13. Yli 50 MW:n laitoksille erot taulukossa 13 esitetyissä kertoimissa ovat metaanin osalta merkityksettömän pieniä, ja dityppioksidinkin osalta pieniä suhteessa päästökertoimien epävarmuuksiin. Koska lähes kaikki leijukattilat ovat CHP-laitoksia tai lämpökeskuksia, ei siis ole syytä esittää eri kerrointa lauhdelaitoksille kansallisia päästöjä arvioitaessa.

Suurempi osakuorman osuus on kasvattanut taulukossa 13 alle 50 MW kaukolämpölaitosten N_2O -päästökertoimia suuremmaksi kuin yli 50 MW kattiloilla. Koska erilaisten kuormitusjakaumien aiheuttamat erot keskimääräisiin päästökertoimiin olivat kuitenkin samaa luokkaa kuin erot samankaltaisilta laitoksilta mitatuissa N_2O -ominaispäästöissä lähes samanlaisilla polttoaineseoksilla (taulukko 10), näyttäisi kokoluokan vaikutus keskimääräiseen päästökertoimeen häviävän muihin kansallisen päästölaskennan epävarmuuksiin. Pienemmät laitokset ovat lisäksi tyypillisesti suuria laitoksia vanhempia, ja siten myös keskimääräiset tulipesien lämpötilat ovat ainakin joissain tapauksissa kor-

keampia kuin nykyisillä kattiloilla [Rokka 2005]. Nykyisin kattiloita suunnitellaan matalampiin lämpötiloihin muun muassa kehittyneen polton hallinnan ja pienempiin NO_x-päästöihin pyrkimisen vuoksi. Tämän takia pienempien kattiloiden N₂O-ominaispäästöt voivat täydellä kuormalla olla keskimäärin jopa pienemmät kuin suurilla kattiloilla ja siten kumota suuremman osakuorman osuuden vaikutuksia pienten kattiloiden päästökertoimiin. Kansallisen tason tarkastelua varten ei siis ole perusteltua suositella eri N₂O-päästökertoimia yli ja alle 50 MW:n leijupetikattiloille. Suurilla laitoksilla tuotettu energiamäärä on niin suuri, että todellinen keskimääräinen ominaispäästö on joka tapauksessa lähellä yli 50 MW:n kattiloiden päästökerrointa.

Taulukko 15. Tilastokeskuksen [2005] päästölaskennassa käyttämät päästökertoimet, IPCC:n [1997] suositukset sekä tämän tutkimuksen suositukset laskennassa käytettäviksi päästökertoimiksi [mg/MJ_{pa}].

Tekniikka	Polttoaine	Kokoluokka [MW _{pa}]	Suositus	Tilastokeskus 2005	IPCC 1997
CH₄					
CFB	kivihiili	≥ 50	1	4–5	1
CFB	turve, biomassa	≥ 50	3	2–30	–
BFB	turve	5–50	4	2–7	–
BFB	turve, biomassa	≥ 50	2	2–30	–
Poltin	POR	kaikki	1	8	0,2–3
N₂O					
CFB	kivihiili	≥ 5	30	70	96
CFB	turve, biomassa	≥ 5	7	10–30	–
BFB	turve, biomassa	≥ 5	3	2	–
Poltin	POR	< 50	3	2	0,3–0,4
Poltin	POR	≥ 50	1	2	0,3–0,4

Turve ja biomassa on yhdistetty samaksi luokaksi useimmissa tapauksissa. Näiden polttoaineiden päästöissä oli mittausten mukaan vain vähän eroja, ja erot ovat tulosten mukaan merkityksettömiä verrattuna laitosten välisiin eroihin. Tämä johtunee myös siitä, että kattiloissa poltettava biomassa on usein kuorta, jonka tyypipitoisuus on suurempi kuin esim. runkopuun, jonka poltosta ei teorian mukaan pitäisi tulla merkittävästi N₂O-päästöjä.

BFB-kattiloiden N₂O-päästö näyttää olevan hyvin laitoskohtainen. Taulukko 9 osoittaa, että mittausten aikana, lähes täydellä kuormalla, laitos B:n (BFB, turve ja biomassa) N₂O-ominaispäästöt ovat olleet noin 4 mg/MJ_{pa}. Laitoksen B lämpötilat eivät kuitenkaan laske osakuormilla mittausjakson lämpötiloja alemmaksi, joten täyden kuorman mittaus edustanee kohtuullisen hyvin keskimääräistä päästöä. Lisäksi laitoksen G (BFB) keskimääräiset N₂O-päästöt turpeen ja biomassan sekapoltoista olivat noin 4 mg/MJ mutta laitoksella H (BFB) alle 0,5 mg/MJ_{pa} useilla eri turpeen ja biopoltoaineiden seoksilla. Laitoksella F (BFB) mittausajan keskiarvo oli noin 3 mgN₂O/MJ, vaikka koko

mittausjakso ajettiin merkittävää osakuormaa (< 60 % nimellistehosta). Myös liitteessä B esitetyn taulukon mukaan muissa BFB-kattiloissa on havaittu pienempiä N₂O-päästöjä vastaavalla kuormalla kuin laitoksilla B ja G. Päästökerroinsuosituksessa (3 mg/MJ_{pa}) on huomioitu sekä tämän tutkimuksen mittaukset että liitteessä B esitetyt mittaustulokset. Kerrointa voidaan pitää selvästi konservatiivisena arviona kansalliseksi keskiarvoksi.

Suositus N₂O-päästökertoimeksi kivihiiltä pääpolttoaineenaan käyttäville CFB-kattiloille (30 mg/MJ_{pa}) poikkeaa selvästi laitos A:n mittaustuloksista. Suosituksessa on hyödynnetty myös julkaisemattomia mittaustuloksia, joiden mukaan päästötaaso eräällä toisella merkittävästi hiiltä polttavalla CFB-kattilalla vaihteli välillä 12–45 mg/MJ petilämpötilan vaihdellessa välillä 920–870 °C. Kyseisen kattilan tyypillinen petilämpötila on noin 900 °C, joten näiden mittausten ja laitos A:n mittausten perusteella voidaan suositella Suomen CFB-kattiloille keskimääräistä päästökerrointa 30 mg/MJ. Tämäkin kerroin on verrattain alhainen, jos sitä verrataan esimerkiksi kivihiilen sekapolttokattilan (laitos E) päästöihin tilanteessa, jossa kivihiiltä oli 35–40 %. Laitos E kuuluu kuitenkin vuosittaisen polttoainejakauman perusteella luokkaan ”turvekattilat” tai ”sekapolttokattilat (kaikkia polttoaineita < 50 %)””, eikä sitä ole suunniteltu pelkälle kivihiilenpoltolle. On myös mahdollista, että sekapoltoissa lämpötilat ovat alhaisemmat kuin pelkässä kivihiilen poltossa, mikä lisää N₂O-päästöjä. Tässä käsitellyt, pelkkää kivihiiltä polttavat CFB-kattilat kattavat valtaosan kivihiilen CFB-poltosta (ilman sekapoltoa) Suomessa, joten suositeltu päästökerroin on edustava ja hieman konservatiivinen arvio Suomen kattilakannan keskimääräiseksi päästökertoimeksi. Kivihiilen CFB-polton päästöt voivat kuitenkin vaihdella eri kattiloilla huomattavasti muun muassa kivihiilen tuontimaan, iän ja tyypipitoisuuden mukaan, joten suositeltu päästökerroin ei välttämättä sovellu käytettäväksi muissa maissa.

Aiemmin, taulukossa 13 esitettiin alle 50 MW:n öljypolttimille suhteellisen korkea N₂O-päästökerroin (4 mg/MJ_{pa}) perustuen mittaukseen varakattilasta. Mitatun kattilan ilmakertoimen säädöt eivät kuitenkaan olleet optimaaliset. Tällaisten säätöjen yleisyydestä ei ole tarkempaa tietoa, mutta todennäköisesti jatkuvassa käytössä olevat kattilat (joissa poltetaan suurin osa polttoaineesta) ovat paremmin säädettyjä. Tästä syystä tälle luokalle suositellaan N₂O-päästökerrointa 3 mg/MJ_{pa}. Yli 50 MW:n öljypolttimien päästökerroin on jo huomattavasti pienempi taulukossa 13 (1 mg/MJ_{pa}, tarkemmin 1,4 mg/MJ_{pa}), johtuen osakuorman pienemmästä osuudesta suuremmissa kokoluokissa, vaikka tässäkin arvioissa hyödynnettiin mittaustulosta varakattilasta. Yli 50 MW:n laitoksissa on lisäksi usein enemmän automaatiota ja myös optimaalisemmat säädöt kuin pienissä laitoksissa. Öljypolttimien pientä N₂O-päästökerrointa > 50 MW laitoksille tukevat myös liitteessä B esitetyt aikaisemmat mittaustulokset, joissa isolla öljykattilalla päästöt eivät kohonneet yli 1 mg/MJ:n edes alle 50 %:n kuormalla. Näin ollen tälle kokoluokalle suositellaan päästökerrointa 1 mg/MJ_{pa}.

Päästökerroinsuosituksissa (taulukko 15) esitetään kertoimet tekniikan ja pääpolttoaineen mukaan. Pääpolttoaine tarkoittaa tässä yhteydessä yli 80 %:n osuutta energiasisälöstä. Jos mukana seoksessa on yli 20 % hiiltä tai muita polttoaineita, on kuitenkin syytä käyttää selvästi korkeampaa N₂O-päästökerrointa (turpeen ja biomassan sekapoltto on tästä poikkeus). Laitoksen E mittaustulokset ovat yksi esimerkki mahdollisista päästöistä, kun hiilen osuus vaihtelee välillä 25–40 %. Tälle laitostyypille ei ole kuitenkaan annettu suosituserrointa, sillä laitoksen E päästöaso saattaa poiketa merkittävästi muista laitoksista, joissa poltetaan < 50 % hiiltä. Näin ollen tällaisten laitosten päästökertoimia tulisi tarkastella tapauskohtaisesti.

Kun taulukon 15 suosituskertoimia verrataan samassa taulukossa esitettyihin IPCC:n [1997] suosituskertoimiin ja Tilastokeskuksen [2005] vuoden 2005 KHK-inventaariossa käytettyihin päästökertoimiin, voidaan todeta, että tässä tutkimuksessa esitetyt CH₄-päästökertoimet ovat joko pienempiä tai asettuvat Tilastokeskuksen ja IPCC:n päästökerrointen vaihteluvälille. N₂O:n tapauksessa tässä tutkimuksessa CFB-poltolle suositellut päästökertoimet ovat huomattavasti pienempiä kuin IPCC:n [1997] ja KHK-inventaarion [Tilastokeskus 2005] päästökertoimet. Turvetta ja biomassaa polttavien BFB-kattiloiden ja öljykäyttöisten lämpökeskusten N₂O-päästökertoimet puolestaan ovat tämän tutkimuksen perusteella hieman suuremmat kuin muissa lähteissä esitetyt päästökertoimet, johtuen osakuorman huomioimisesta tässä tutkimuksessa.

2.6.4 Epävarmuusarviot

Päästökertoimiin perustuva laskenta käsittää monia muuttujia sekä yleistyksiä, joihin sisältyy tietty epävarmuus. Tässä tutkimuksessa tehdyt mittaukset ovat aiempiin todellisen mittakaavan laitoksilla tehtyihin julkisiin N₂O- ja CH₄-tutkimuksiin verrattuna pidemmältä ajalta ja kuvaavat siten paremmin keskiarvoa juuri näiltä laitoksilta. Tässä työssä Suomen tasolle yleistetyt päästökertoimet virhearvioineen kuvaavat keskimääristä päästökerrointa Suomen tasolla; näin ollen päästökertoimia ei tulisi sellaisenaan soveltaa yksittäisille laitoksille. Päästökertoimien soveltaminen yksittäisille laitoksille (lukuun ottamatta tutkimuksessa mitattuja laitoksia) aiheuttaisi huomattavan epävarmuuden.

Taulukko 14 esitti yksityiskohtaiset epävarmuusarviot. Koska kuitenkin suuri osa epävarmuudesta aiheutuu päästökerrointen yleistämisestä ja toisaalta saman päästökertoimen käyttäminen kaikille saman tyyppin laitoksille tasoittaa laitosten välisiä vaihteluita, esitetään päästökerrointen epävarmuudet tässä jaettuna kolmeen eri epävarmuusluokkaan.

Metaanin päästökertoimet 1 mg/MJ_{pa} kivihiilen ja öljyn poltolle ovat konservatiivisia arvioita. Näiden arvioiden epävarmuus on siksi todennäköisesti suurempaa alas- kuin ylöspäin. Koska metaanin päästöt ovat kuitenkin vähämerkityksellisiä ja pienien päästö-

jen tapauksessa suhteellinen mittausepävarmuus kasvaa, on näille päästökertoimille käytetty epävarmuusarviota $\pm 40\%$.

Muiden metaanipäästökerrointen tapauksessa epävarmuus on suurempaa, ja päästöt vaihtelevat laitoksittain. Näiden päästöjen epävarmuus on arviolta $\pm 60\%$.

Kansallisella tasolla dityppioksidin päästökertoimien epävarmuus voidaan arvioida suu-remmaksi kuin metaanin, vaikkakin tässä tutkimuksessa on tarkasteltu N_2O -päästöihin vaikuttavaa kuormituksen vaihtelua huomattavasti tarkemmin kuin aikaisemmissa tutkimuk-sissa. Esitettyjen N_2O -päästökertoimien epävarmuuden ylärajana voidaan pitää 100% , kun pidetään mielessä päästökertoimien käyttö kansallisena vuosittaisena keskiarvona. Vaikka suosituskertoimet ovat konservatiivisia, voidaan myös olettaa, että epävarmuus alaspäin on pienempää kuin ylöspäin (eli ei pidetä mahdollisena sitä, että N_2O -päästöjä ei syntyisi lain-kaan). Epävarmuuden alarajaksi alaspäin voidaan siis arvioida 50% .

Taulukko 16. Suositellut CH_4 - ja N_2O -päästökertoimet sekä päästökertoimien arvioitu epävarmuus 95% :n luottamusvälinä.

	Kokoluokka [MW _{pa}]	EF [mg/MJ _{pa}]	EF:n vaihteluväli	EF:n epävarmuus prosentteissa
CH₄				
CFB, kivihiili	≥ 50	1	0,6–1,4	$\pm 40\%$
CFB, turve, biomassa	≥ 50	3	1,2–4,8	$\pm 60\%$
BFB, turve	5–50	4	1,6–6,4	$\pm 60\%$
BFB, turve, biomassa	≥ 50	2	0,8–3,2	$\pm 60\%$
Poltin, POR	kaikki	1	0,6–1,4	$\pm 40\%$
N₂O				
CFB, kivihiili	≥ 5	30	15–60	-50...+100 %
CFB, turve, biomassa	≥ 5	7	3,5–14	-50...+100 %
BFB, turve, biomassa	≥ 5	3	1,5–6	-50...+100 %
Poltin, POR	< 50	3	1,5–6	-50...+100 %
Poltin, POR	≥ 50	1	0,5–2	-50...+100 %

Epävarmuusarvio perustuu tunnettuihin epävarmuustekijöihin. Näin ollen on mahdollis-ta, että jokin epävarmuustekijä – esimerkiksi laitoksen omassa tiedonkeruussa – on jää-nyt huomioimatta. Voidaan kuitenkin olettaa, että epävarmuusarviossa on huomioitu tärkeimmät epävarmuuden aiheuttajat.

2.7 Jatkotutkimustarpeet

Tämän tutkimuksen perusteella määritettiin keskimääräiset päästökertoimet mitatuille laitostyypeille perustuen tyypillisesti muutamaa mittaukseen kattilatyyppejä kohden. Tutkimuksen kattavuutta lisäämällä tarkkuus keskimääräisten päästökerrointen osalta

paranisi. CFB-kattilat ovat N_2O -päästöjen kannalta merkittävin kattilatyyppejä. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että tämän polttotekniikan N_2O -päästöt voivat vaihdella huomattavasti kattilasta toiseen, johtuen mm. kattilan tulipesän lämpötiloista ja kattilan suunnittelusta. Näin ollen olisi perusteltua tehdä lisätutkimusta CFB-kattiloista ja määrittää tärkeimmille kattiloille omat päästökertoimet. Mittausten tulisi sisältää kaikkia todellisessa ajossa esiintyviä tilanteita, kuten osakuormaa ja käynnistyksiä, kuten tässäkin tutkimuksessa. Lisäksi eri polttoaineseoksien vaikutusta eri kattiloilla tulisi myös tutkia lisää. Tekemällä mittaukset kaikille (tai tärkeimmille) Suomen CFB-kattiloille päästäisiin eroon mittaustulosten yleistämisestä aiheutuvista epävarmuuksista ja voitaisiin päästä päästökerrointen tarkkuudessa taulukon 14 esittämälle tasolle. Tämä tarkkuus paranisi vielä kuormitustutkimuksen kattavuutta parantamalla. Mikäli lisäksi otettaisiin huomioon tieto kunkin kattilan vuosittaisesta kuormitusjakaumasta yhdistettynä laitokohtaisiin kuormitus- N_2O -korrelaatioihin, kuten kohdassa 2.3.1 esitetään, paranisi tarkkuus vielä huomattavasti. Tällöin voisi olla mahdollista päästä 10–20 %:n tarkkuuteen päästöarvioissa.

Tämän, tärkeimmän lisätutkimuskohteen lisäksi on monia muita tekijöitä, joiden tutkiminen tarkentaisi päästökertoimia. Myös BFB-kattiloiden päästöt vaihtelevat tutkimuksen tulosten mukaan kattilasta toiseen, joten niidenkin kattavampi mittaaminen toisi lisätietoa keskimääräisistä päästöistä. Toisaalta päästötaso näissä kattiloissa on huomattavasti CFB-kattiloita pienempi.

Kuormitustutkimuksen epävarmuuksien pienentämiseksi olisi hyvä saada vielä lisää kuormitustietoja erilaisilta laitoksilta. Erityisesti metsäteollisuuden osalta tämän tutkimuksen tulokset jäivät vähäisiksi.

Tässä tutkimuksessa mitattu öljypoltin on tyyppinen lämpökeskuskokoluokan poltin, mutta sitä ei ollut säädetty optimaalisesti. Tämän tyyppisen säädön yleisyydestä Suomen tasolla ei ole tietoa. Öljypoltintyyppisiä ja öljylaatuja on myös paljon erilaisia. Suomen tasolla määritetyn päästökertoimen tarkkuus paranisi, jos muunkin tyyppisiä öljypolttimia mitattaisiin.

Näiden lisäksi esimerkiksi hiilipölykattiloiden osakuormatilanteiden mittaaminen olisi hyödyllistä, sillä tämä tekniikka on merkittävässä osassa Suomen energiajärjestelmässä. Öljypolttimen osakuormalla syntyi ehkä hieman yllättäenkin merkittävästi dityppioksidia, joten on mahdollista, että sitä syntyy myös muista polttimista käytävistä laitoksista (esim. hiilen pölypoltto), mikäli säädöt eivät ole optimaalisia. Toisaalta hiilipölykattilat ovat tyyppillisesti isoja laitoksia, joita säädetään usein tarkemmin kuin pieniä laitoksia. Myös mahdollinen pölypolttokattiloiden tulipesän nuohouksen vaikutus N_2O -päästöön olisi kiinnostavaa selvittää.

Tarkastellun sektorin metaanipäästöistä merkittävä osa tulee pienistä biopolttoaineita ja turvetta polttavista arinakattiloista. Tällaisten kattiloiden päästöistä on vähän tietoa, joten niiden mittaaminen olisi tärkeää. Ennen mittauksia pitäisi selvittää tyypillisin arinakattilan kokoluokka ja etsiä muutenkin tyypillisiä suomalaisia arinakattiloita edustavia laitoksia. Mittauksia olisi kuitenkin hyvä järjestää useita, sillä palamattomien kaasujen päästöt poikkeavat huomattavasti toisistaan laitoksittain ja jopa hetkittäin samalla laitoksella. Erityisen mielenkiinnon kohteena voisivat olla vanhemmat arinakattilat, jotka kuvaisivat Kiiton sopimuksen perusvuoden (1990) tekniikkaa. Tarkastellun sektorin metaanipäästöjen osuus Suomen metaanipäästöistä on kuitenkin hyvin pieni.

Joitakin kattiloita pidetään myös ns. valmiustilassa, jolloin kattilan lämpötilaa pidetään yllä pienen liekin avulla. Tällaisen polton yleisyys ja päästöt olisivat myös mielenkiintoisia selvittää, sillä valmiustilan osuus kattilan vuosittaisesta käytöstä ja ennen kaikkea kattilakohtaisista päästöistä voi olla hyvinkin merkittävä.

3. Pienpoltto

3.1 Taustaa

3.1.1 Puun pienkäyttö

Polttopuun (pilke, hake, pelletti) käyttö oli vuosien 1992 ja 1993 lämmityskaudella 5,6 miljoonaa kiintokuutiometriä (m³) ja vuosien 2000 ja 2001 lämmityskaudella 6,1 milj. m³ jakautuen käyttökohteittain seuraavasti [Tuomi & Peltola 2002]:

- omakotitalot 3,1 milj. m³
- maatilat 2,2 milj. m³
- vapaa-ajan asunnot 0,8 milj. m³.

Polttopuun käyttö voidaan jakaa myös seuraavasti:

- 4,4 milj. m³ asuinrakennukset
- 1,2 milj. m³ saunat
- 0,5 milj. m³ maatalojen tuotantorakennusten lämmitys ja muu kulutus.

Raakapuuta käytettiin 5,1 milj. m³ ja puutähdettä 1,0 milj. m³. Energiamääränä käyttö vastaa 13,5 TWh:a. Hakkeen osuus määrästä on 6 %. Uusiutuvan energian edistämisohjelman tavoitteena on lisätä puun pienkäyttöä 20 TWh:iin vuoteen 2010 mennessä.

Puupellettien osuus käytöstä on vielä pieni, mutta sen ennustetaan lisääntyvän nopeasti. Vuonna 2004 Suomessa käytettiin puupellettejä 47 000 tonnia. VTT Prosessien arvion (helmikuu 2005) mukaan vuoden 2005 käyttömäärä on 59 000 tonnia, kun taas Vapo Oy on arvioinut käyttömääräksi 80 000 tonnia.

3.1.2 Lämmityslaitteet

Suomessa on noin 2,2 miljoonaa tulisijaa [Rakennustutkimus RTS Oy 2001]. Niistä 1,2 miljoonaa on omakotitaloissa, 0,8 miljoonaa loma-asunnoissa ja 0,2 miljoonaa rivi- ja kerrostaloissa. Tämän lisäksi puukiukaita ja patoja on yhteensä 1,5 miljoonaa kappaletta.

Pääosa Suomeen myytävistä tulisijoista (ns. kuivat tulisijat, esim. takat, uunit ja kamiinat) rakennetaan saneerauskohteisiin ja myyntimäärän arvioitiin vuonna 2002 olleen hieman alle 60 000 kappaletta. Puulämmitteisiä saunankiukaita myydään vuodessa noin 60 000 kappaletta. Pienkiinteistöjen puukattiloiden myynti on noin 4 000 kpl vuodessa.

Näistä varsinaisia pilkekattiloita on noin 1 500 kpl, hakekattiloita reilu 500 kpl, kaksoispesäkattiloita noin 1 500 kpl ja vaihtopolttokattiloita noin 500 kpl. Valtaosa (80 %) näistä asennetaan vanhojen kiinteistöjen saneerauksiin [Helynen & Oravainen 2002]. Suurin osa pilkettä käyttävistä kattiloista on yläpaloperiaatteella toimivia.

Vapo Oy:n arvion mukaan Suomessa on noin 4 000 pellettilämmittäjää, joista pienkäyttäjiä on 2 000–2 500. Noin 1 000 uutta pellettilämmittäjää on aloittamassa lämmityksen vuonna 2005.

3.2 Laboratoriomittaukset

3.2.1 Tulisijojen ja kattiloiden valinta

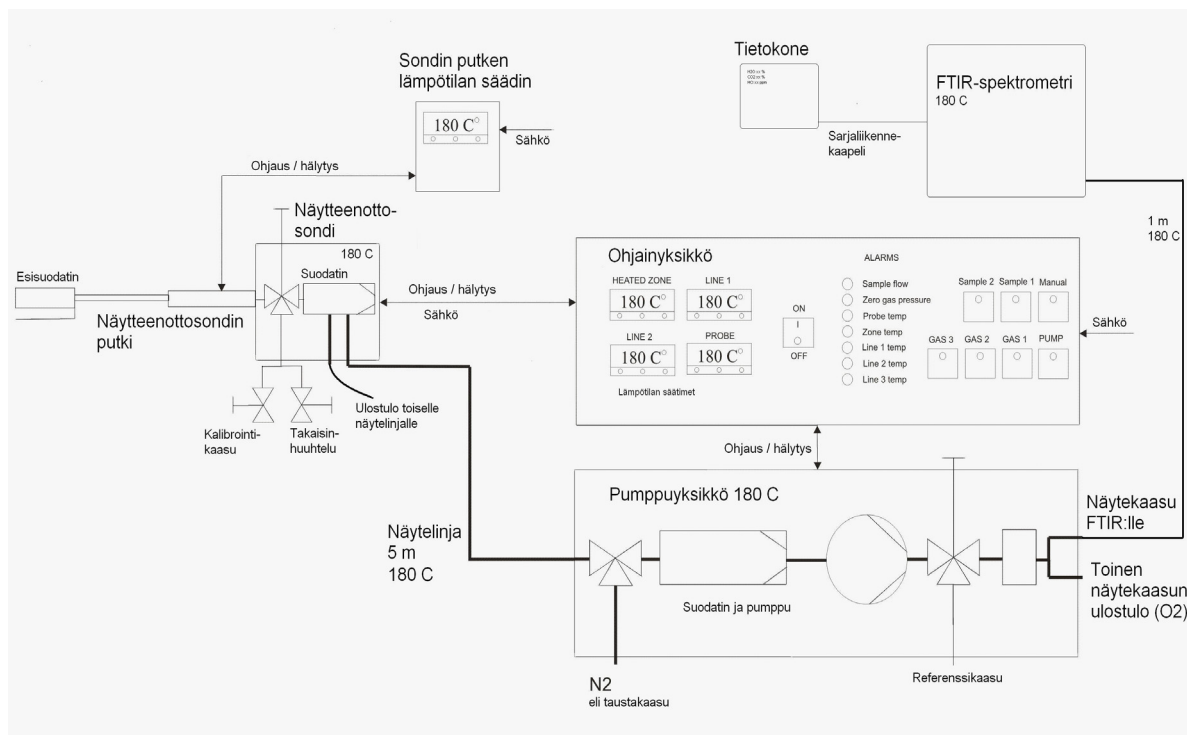
Projektin mittauksiin valittiin Suomessa yleisimmin käytössä olevia tulisija- ja pienkattilatyyppejä. Tutkittavat laitteet olivat perinteinen rakoarinalla varustettu puulämmitteinen saunankiuas, varaava takka varustettuna sekä rakoarinalla että uudella arinatyyppillä (= palamisilmaa syötetään myös tulipesän seinämiltä), 300 kW:n stokeripoltinkattila ja 40 kW:n yläpalokattila. Polttoaineina käytettiin tulisijoissa 0,33 m:n koivuklapeja ja yläpalokattilassa 0,5 m:n koivuhalkoja. Stokerikattilassa poltettiin koivuhaketta ja puupellettiä.

3.2.2 Mittausympäristö ja -laitteet

Mittaukset tehtiin VTT Prosesien Jyväskylän yksikön Lämmöntuotanto-ryhmän pienpolton tutkimusympäristössä. Tutkimusympäristö käsittää koelinjat K70 ja K300. K70-linja on tarkoitettu kattiloille, joiden lämpöteho on enintään 70 kW, sekä tulisijoille, joiden massa ei ylitä 3 000 kg:aa. Tila on varustettu 3 m x 3 m vaakatasolla, jonka päälle tutkittavat laitteet asennetaan. Vaa'an avulla pystytään määrittämään polttoaineen kulu- tus testien aikana. K300-testilinja on tarkoitettu kattiloille, joiden teho on enintään 300 kW, sekä tulisijoille, joiden massa on yli 3 000 kg. Molemmille linjoille on yhteiset savukaasuanalysointilaitteet, joilla pystytään määrittämään savukaasujen O₂-, CO₂-, CO-, NO_x-, SO₂- ja OGC-pitoisuudet. N₂O- ja CH₄-mittauksissa käytettiin GASMET FTIR - analysointilaitetta. Kuvassa 47 on vasemmalla lämmitetty näytesondi ja oikealla FTIR-analysointilaitteella sekä kaasunkäsittely- ja ohjausyksikkö. Kuva 48 esittää mittausjärjestelyn periaatekuvan.



Kuva 47. FTIR:n näytteenottosondi (vasemmalla) ja FTIR-analysoittori (oikealla).



Kuva 48. Mittausjärjestelyjen periaatekuva.

3.2.3 Tutkitut laitteet

3.2.3.1 Puulämmitteinen saunankiuas

Kiuas kytkettiin savuhormiin, jonka vetoa voidaan säätää savukaasupuhaltimella. Testin aikana hormin veto pidettiin vakiona. Kytkeä ei täysin vastaa normaalia luonnonveto-hormia, jossa hormin veto muuttuu palamisvaiheen kuluessa.

Kiuas lämmitettiin polttamalla siinä kolme pesällistä koivupilkkeitä. Sytytysvaiheessa tulipesä ladattiin lähes täyteen ja sytytettiin tuohilla. Sytytyspanoksen massa oli n. 8 kg, ja siinä oli 11 kpl pilkkeitä. Seuraava n. 4 kg:n (5 kpl) panos lisättiin, kun näkyvä liekki oli sammunut (CO₂-pitoisuus oli n. 4 %). Kolmas panos n. 4 kg (4 kpl) lisättiin vastavalla tavalla. Koko lämmitysjakson pituus oli noin 3 tuntia, joka vastanee normaalia saunomistilannetta. Poltetu puumäärä oli yhteensä 16,1 kg.

3.2.3.2 Varaava takka, rakoarina

Takka kytkettiin savuhormiin samaan tapaan kuin kiuas. Takka lämmitettiin polttamalla siinä kolme n. 3 kg:n panosta koivupilkkeitä. Pilkkeet sytytettiin päältä, ja sytytyspanoksessa oli pienempiä puita (7 kpl) ja lisäyksissä panoksessa pilkkeitä oli 4 kpl. Puut lisättiin, kun näkyvä liekki oli sammunut (CO₂-pitoisuus oli n. 3 %). Poltetu puumäärä oli yhteensä 9,1 kg. Lämmitysjakson pituus oli 2 tuntia ja 50 minuuttia.

3.2.3.3 Varaava takka, uudentyyppinen arina

Takkaan vaihdettiin uudentyyppinen arinamalli, jossa palamisilmaa tuodaan tulipesään myös molemmilta sivuilta ja takaa. Tällä mallilla pyritään palamista saamaan paremmin hallituksi ja päästöjä pienemmiksi. Tuli sytytettiin pienellä, n. 1 kg, panoksella (5 kpl) pieniä puita ja tämän jälkeen poltettiin kolme n. 3 kg:n panosta, joissa oli 7 kpl pilkkeitä. Poltetu puumäärä oli yhteensä 10,1 kg. Lämmitysjakson pituus oli noin 4 tuntia. Palaminen tällä arinamallilla oli selvästi hitaampaa kuin perinteisellä rakoarinalla. Näissä testeissä käytettyjen koivupilkkeiden kosteus oli 16,8 %.

3.2.3.4 Stokerikattila 300 kW

Stokerikattilalla tehtiin kolme testiä, joista kaksi koivuhakkeella ja yksi puupelletillä. Järjestelmä oli varustettu polttoainesiilolla, josta polttoaine siirrettiin ruuvisyöttimellä sulkusyöttimelle ja edelleen syöttöruuville, joka annosteli polttoaineen arinalle. Primääripalamisilma syötettiin arinan alle ja sekundääri-ilmat arinan yläpuolelle molemmilta sivuilta. Palamisilmoja pystyttiin säätämään peltimoottoreiden avulla. Savukaasupuhaltimella pidettiin tulipesän alipaine sopivana.

Koivuhakkeella kattilalle tehtiin eurooppalaisen standardin EN 303-5 mukaiset testit, joissa kattilaa ajettiin sekä sen nimellisteholla että maksimissaan 30 %:n osateholla. Testien pituus oli kuusi tuntia kummallakin tavalla. Nimellisteholla kattilaa ajettiin keskeytymättä, säätämällä polttoaineen syöttö lämpökuormaa vastaavaksi. Osateholla kattila

kävi katkokäytöllä menoveden lämpötilan ohjaamana. Seisontajakson aikana polttoaineen syöttö ja palamisilmapuhaltimet pysähtyivät.

Puupellettiä poltettiin kattilan ylösajon jälkeen tasaisella kuormalla neljän tunnin jakso. Puupellettiä poltettaessa kattila toimi puoliteholla. Pellettiä ei poltettu katkokäytöllä.

3.2.3.5 Yläpalokattila 40 kW

Yläpalokattilalla tehtiin yksi testi, jossa poltettiin 0,5 metrin koivupilkkeitä. Testi tehtiin soveltaen EN 303-5 -standardia panospoltosta. Ennen testiä kattila esilämmitettiin 19,5 kg:n halkopanosella perushiillostilaan. Ensimmäinen panos (20,4 kg) lisättiin hiiloksen päälle. Toinen panos (20,5 kg) lisättiin, kun ensimmäinen oli palanut perushiilokselle. Testi lopetettiin, kun toinen panos oli saavuttanut perushiillostason. Lämmitysaika oli n. 3,5 tuntia ja keskimääräinen lämpöteho oli 38 kW.

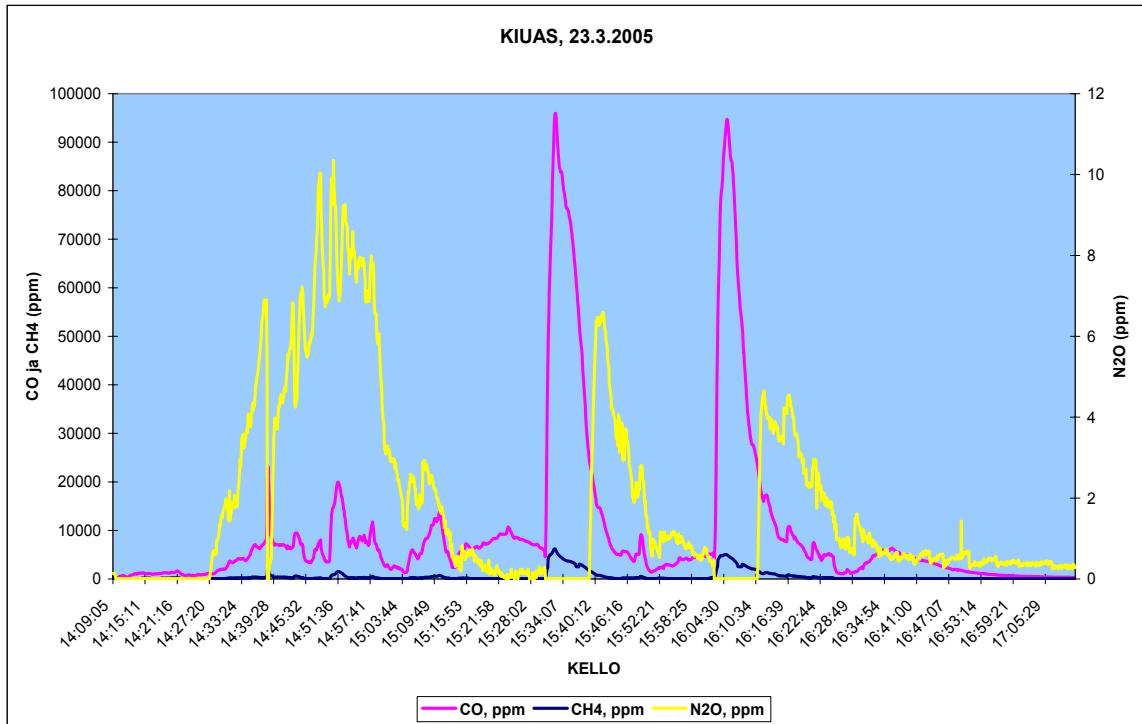
3.2.4 Mittaustulokset

Mittaustulokset on koottu taulukkoon 17. Savukaasujen pitoisuudet ovat kuivaa kaasua, eli myös OGC, N₂O, CH₄, C₂H₆, C₂H₄ ja C₂H₂ on laskettu kuiviksi kaasuiksi. Mittaustuloksiin ei ole tehty happiredusointeja. Ominaispäästöt on laskettu standardin SFS 5624 mukaisesti, kun tunnetaan polttoaineen kosteus ja lämpöarvo. Mitatut pitoisuudet (CH₄, N₂O ja CO) esitetään trendinäyttöinä ajan funktiona kuvissa 49–55.

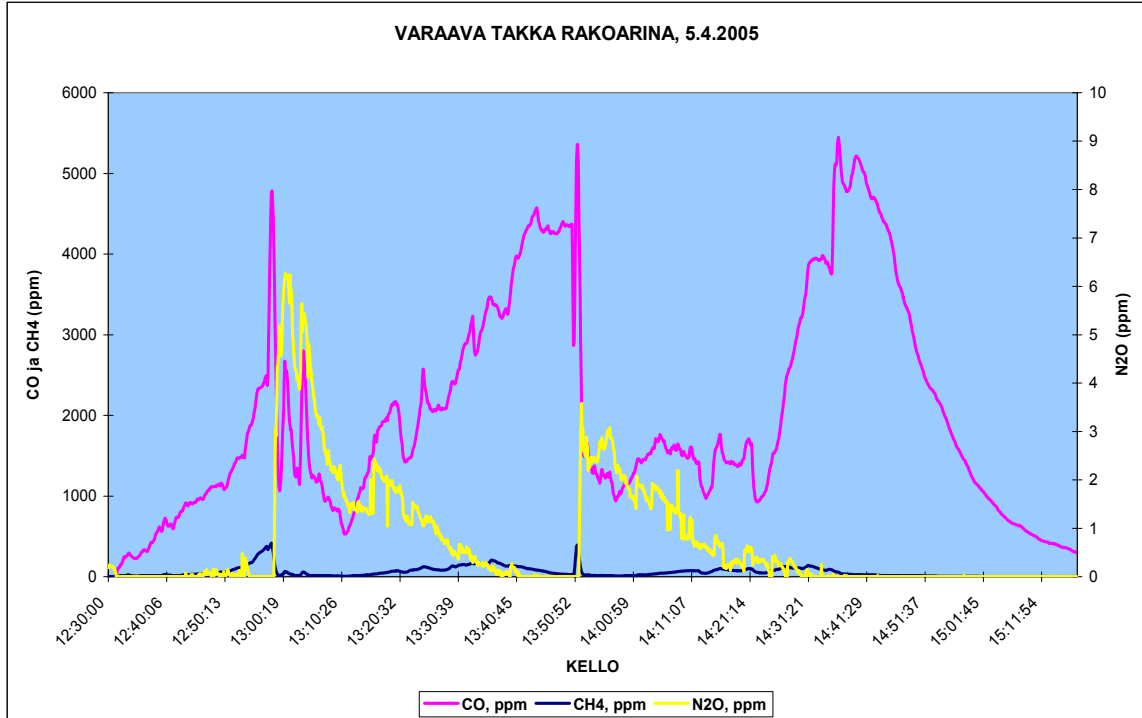
Taulukko 17. Pienpolton laboratoriomittausten tuloksia. Määritysepävarmuudet ovat suuruusluokaltaan $N_2O \pm 1 \text{ mg/MJ}$ ja $CH_4 \pm 10 \%$.

Testipäivä	23.3.2005	5.4.2005	12.4.2005	4.5.2005	4.5.2005	29.8.2005	2.9.2005
Laite	Kiuas	Varaava takka		300 kW kattila			40 kW kattila
Tyyppi		Perinteinen rakoarina	Uusi arinamalli	Stokeri			Yläpalo
Polttoaine	Koivupilke	Koivupilke	Koivupilke	Koivuhake	Koivuhake	Puupelletti	Koivupilke
Testiaika	14:09–17:11	12:30–15:18	13:00–17:01	11:41–17:41	20:00–02:00	11:30–15:30	12:05–15:37
Polttotapa	3 panosta	3 panosta	3 panosta	Jatkuva	Katkokäyttö	Jatkuva	2 panosta
Polttoainemäärä/ teho	16,1 kg	9,1 kg *	10,1 kg	259 kW	61 kW	156 kW	40,9 kg / 38 kW
O ₂ [%]	11,0	15,2	17,1	8,3	18,1	8,8	9,7
CO ₂ [%]	9,2	5,5	3,9	12,7	3,5	11,8	11,0
CO [ppm]	7 327	2 088	977	244	435	880	5 110
NO _x [ppm]	61	35	28	126	34	48	70
OGC [mg/m ³]	1 274	145	171	5,3	12,5	38	1 077
Savukaasu lämpötila [°C]	324	122	124	160	104	141	279
N ₂ O [mg/MJ]	1,9	1,3	2,7	0,15	1,8	0,32	2,2
CH ₄ [mg/MJ]	197	38	46	0,90	9,5	4,9	152
C ₂ H ₆ [mg/MJ]	12	18	33	0,01	0,1	0,06	30
C ₂ H ₄ [mg/MJ]	144	5,9	17	0,06	1,9	1,4	41
C ₂ H ₂ [mg/MJ]	115	4,9	13	0,6	5,0	2,3	50
CO [mg/MJ]	4 964	2 440	1 716	129	1 016	479	3 054

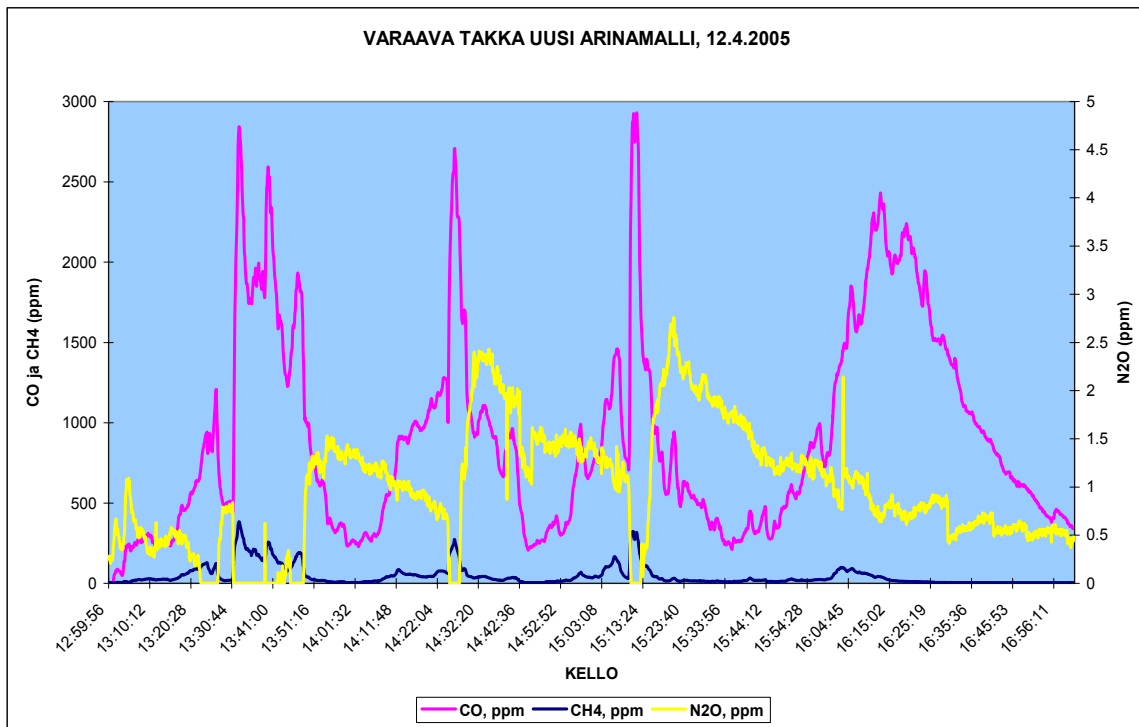
* Sytytys päältä.



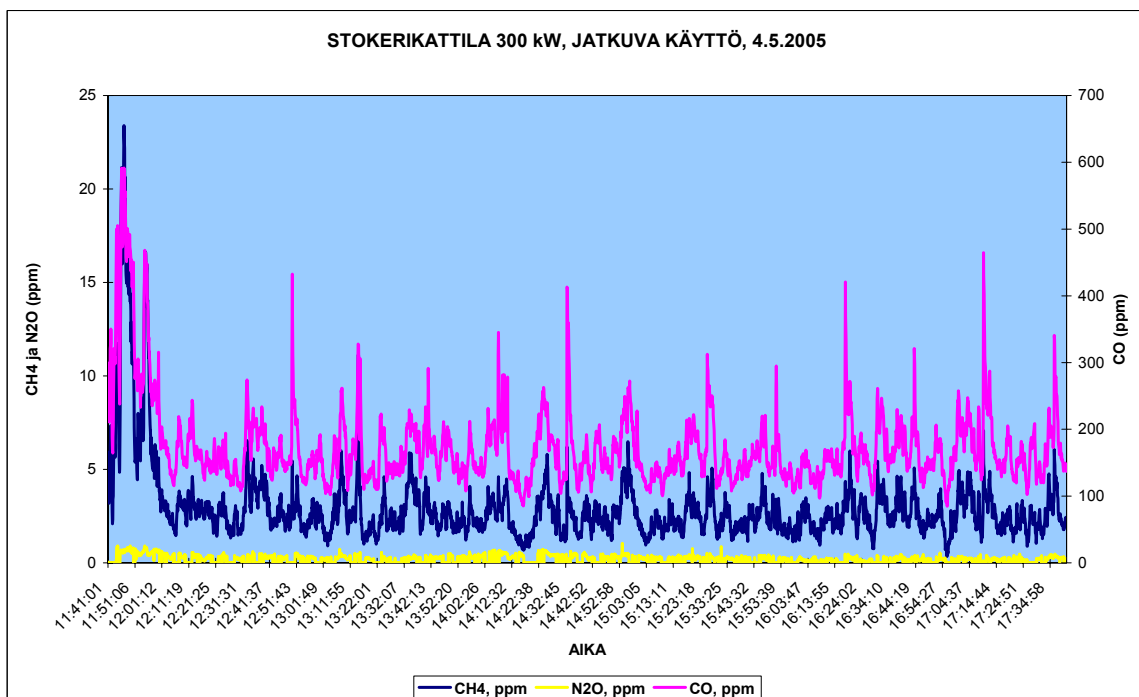
Kuva 49. Savukaasujen CO-, CH₄- ja N₂O-pitoisuuksia puulämmitteisessä saunan-kiukaassa.



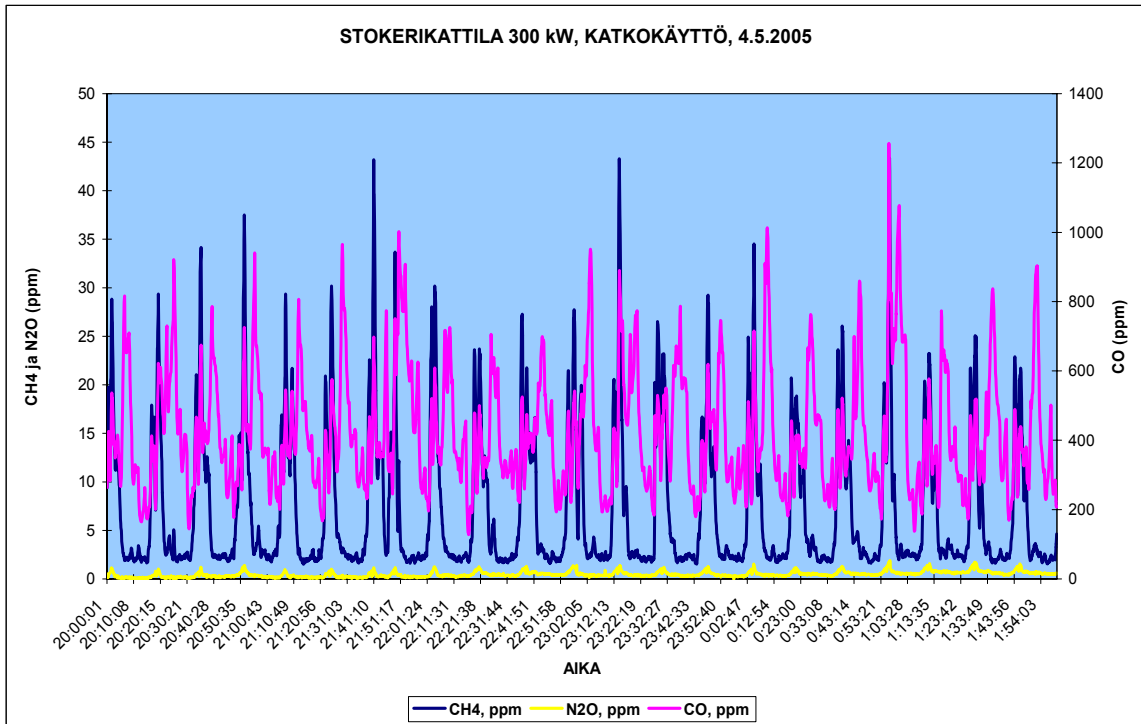
Kuva 50. Savukaasujen CO-, CH₄- ja N₂O-pitoisuuksia varaavassa takassa rakoarinalla. Sytytys päältä.



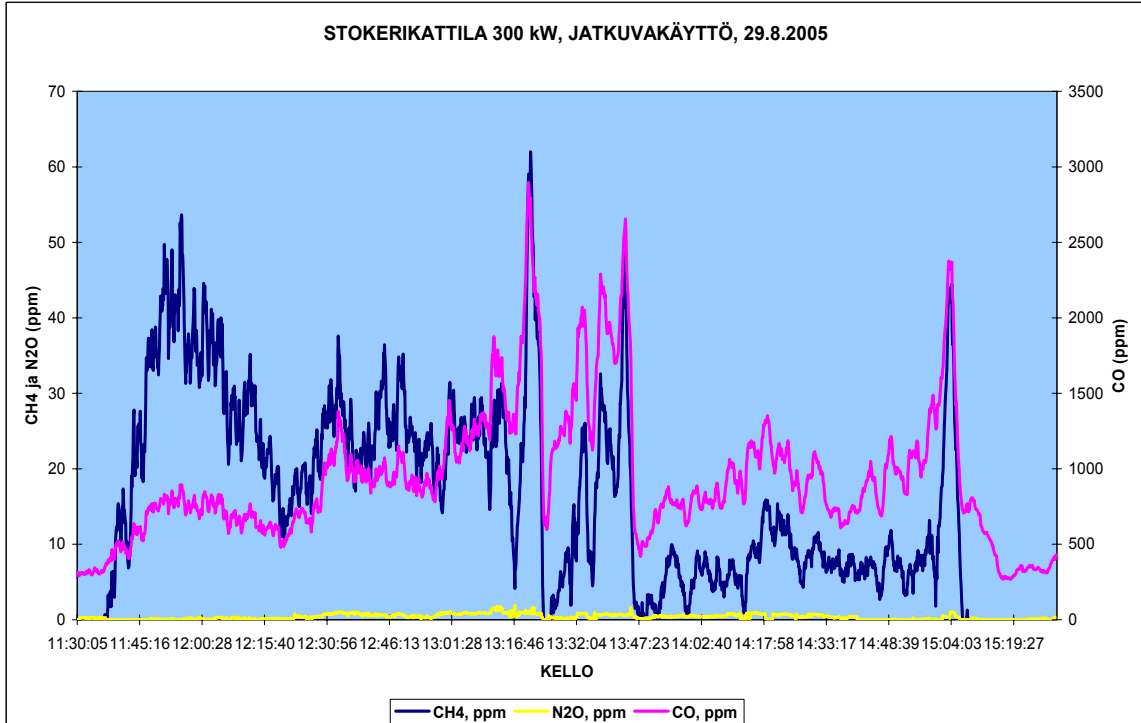
Kuva 51. Savukaasujen CO-, CH₄- ja N₂O-pitoisuuksia varaavassa takassa uudella arinalla.



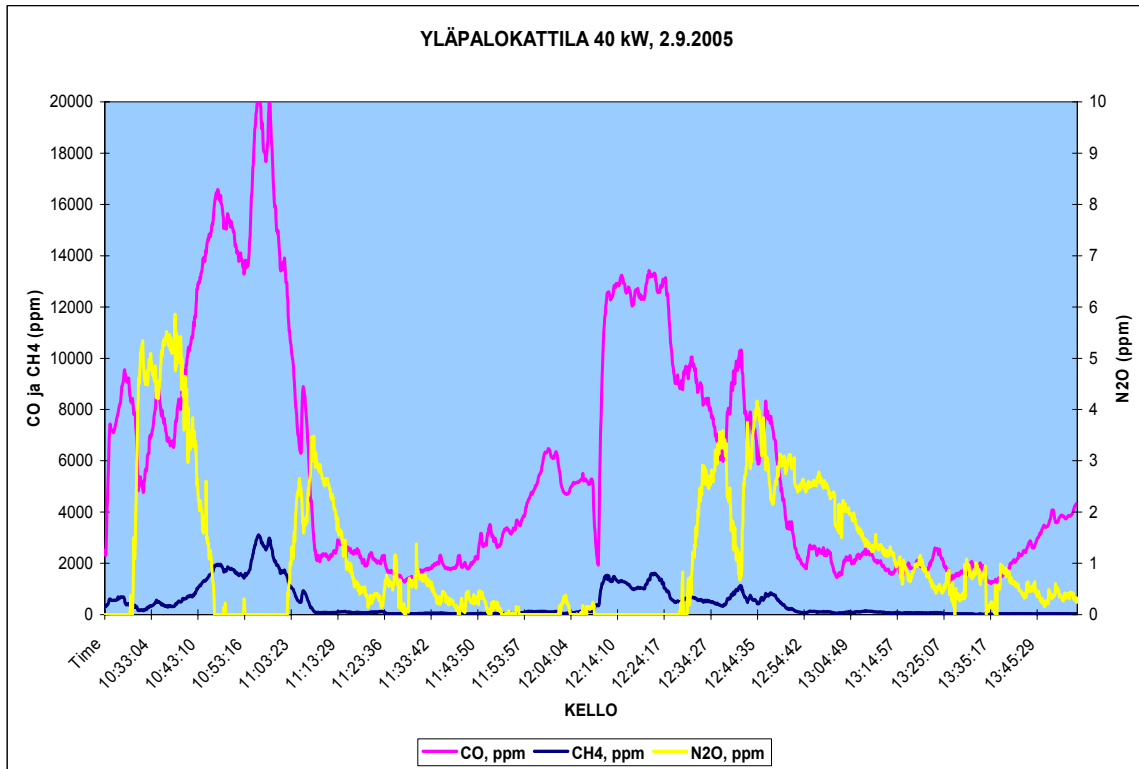
Kuva 52. Savukaasujen CO-, CH₄- ja N₂O-pitoisuuksia 300 kW:n stokerikattilassa koivuhakkeella jatkuvassa käytössä.



Kuva 53. Savukaasujen CO-, CH₄- ja N₂O-pitoisuuksia 300 kW:n stokerikattilassa koivuhakkeella katkokäytössä.



Kuva 54. Savukaasujen CO-, CH₄- ja N₂O-pitoisuuksia 300 kW:n stokerikattilassa puupelletillä jatkuvassa käytössä.



Kuva 55. Savukaasujen CO-, CH₄- ja N₂O-pitoisuuksia 40 kW:n yläpalokattilassa.

3.3 Kenttämittaukset

Tekesin Puupolttoaineiden pientuotannon ja -käytön panostusalueella on käynnissä tutkimushanke ”Puun pienpolton päästöjen mittausten menetelmien, ilmanlaatumittausten ja leviämismallien kehittäminen”. Hankkeen yhtenä osatavoitteena on määrittää suomalaisten tulisijojen (pienkattilat, takat, kiukaat) päästökertoimet käytännön lämmitysoloissa. Hanke käynnistyi 1.9.2004 ja päättyi 31.8.2006, ja sen rahoittavat Tekes, ympäristöministeriö, VTT, Ilmatieteen laitos ja Työtehoseura.

Kenttämittauksia on tehty kahdesta kiukaasta, yhdestä takkaleivinuunista ja yhdestä alapalokattilasta. Alustavat mittaustulokset on koottu taulukkoon 18.

Taulukko 18. Kenttämittausten tuloksia. Määrittäjävarmuudet ovat suuruusluokaltaan $N_2O \pm 1 \text{ mg/MJ}$ ja $CH_4 \pm 10 \%$.

Testipäivä	20.6.2005	22.6.2005	30.11.2005	9.11.2005	11.11.2005	29.11.2005	1.12.2005
Laite	Kiuas 1	Kiuas 1	Kiuas 2	Takka- leivinuuni	Takka- leivinuuni	Alapalo- kattila	Alapalo- kattila
	Jakso 1	Jakso 2		Jakso 1	Jakso 2	Jakso 1	Jakso 2
Polttoaine	Koivupilke	Koivupilke	Koivupilke	Koivupilke	Koivupilke	Koivupilke	Koivupilke
Testiaika	2 h	2 h	1 h 19 min	1 h 22 min	2 h 10 min	3 h 18 min	2 h 44 min
Polttotapa	5 panosta	5 panosta	3 panosta	3 panosta	4 panosta	1 panos	1 panos
Polttoainemäärä	11,5 kg	11,5 kg	12,3 kg	12,5 kg	16,2 kg	54,6 kg	54,6 kg
N_2O [mg/MJ]	0,74	0,44	1,2	2,4	3,6	7,3	3,0
CH_4 [mg/MJ]	630	226	267	47	52	752	551
C_2H_6 [mg/MJ]	0,7	0,7	18,1	5,9	10,9	133	21
C_2H_4 [mg/MJ]	102	39	287	5,6	6,4	439	286
C_2H_2 [mg/MJ]	235	82	240	11	13,8	408	439
CO [mg/MJ]	7 860	3 900	7 430	1 670	1 600	13 720	14 060

3.4 Tulosten tarkastelu

3.4.1 Laboratoriomittaukset

Laboratoriomittauksissa puun pienpoltosta mitatut N_2O -päästöt olivat pienet, korkeimmillaankin alle 3 mg/MJ (taulukko 17). Erityisen pienet päästöt olivat jatkuvassa stokeripoltossa. Katkokäyttöisessä stokeripoltossa N_2O -ominaispäästö oli samaa tasoa kuin panospoltossa. Jatkuva poltto kuvaa tilannetta, jossa kattila toimii täydellä teholla, ja katkokäyttö kuvaa polttoa kattilan toimiessa osateholla.

Panospoltossa N_2O -päästö tulee purskeina kuumimman liekkipalovaiheen (näkyvä korkeina häkäpiikkeinä kuvissa 49–51 ja 55) jälkeen. Kiivaimman liekkipalon aikana pitkä ja kuuma liekki tuhoaa tehokkaasti palamisessa syntyneen N_2O :n. Sytytyspanoksen N_2O -päästöön vaikuttavat monet seikat, kuten panoksen koko, arinan ja tulipesän rakenne, sytytystapa ja veto. Kiukaalla sytytyspanoksen osuus N_2O -päästöstä oli huomattavan suuri. Hiillosvaiheessa N_2O :n ja metaanin muodostus on vähäistä, koska valtaosa vedystä ja osatytestä ovat ehtineet haihtua polttoaineesta.

Metaani- ja CO-päästöt olivat suurimmat kiukaalla ja klapikattilalla ja pienimmät jatkuvassa stokeripoltossa (taulukko 17).

3.4.2 Kenttämittaukset

Kenttämittauksissa (taulukko 18) kiukaista mitatut N₂O-päästöt olivat pienemmät ja takkaleivinuunista mitatut suuremmat kuin laboratoriokokeissa. Päästöt olivat kuitenkin samaa suuruusluokkaa (kiukaalle < 1–2 mg/MJ ja takoille 1–4 mg/MJ) sekä laboratorioetta kenttämittauksissa. Korkeiden savukaasujen CO-pitoisuuksien perusteella arvioiden alapalokattilan polton säätö ei ollut kohdallaan, mistä syystä myös CH₄- ja N₂O-pitoisuudet olivat korkeat.

Takkaleivinuunin osalta metaanipäästöt olivat yhdenmukaiset laboratoriomittausten kanssa; ominaispäästöt olivat 50 mg/MJ tasolla. Kiukaiden metaanin ominaispäästöjen vaihteluväli oli 200–630 mg/MJ (taulukko 18).

3.4.3 Ehdotukset päästökertoimiksi

Taulukoista 17 ja 18 saadaan eri polttotapojen N₂O-ominaispäästöille taulukossa 19 esiteltävät aritmeettiset keskiarvot.

Taulukko 19. Mittauksista laskettuja keskiarvoja N₂O-päästöille.

Laite	Polttoaine	N ₂ O-ominaispäästö [mg/MJ]
Kiuas	pilke	1,1
Takka	pilke	2,5
Yläpalokattila	pilke	2,2
Stokeri (300 kW), katkokäyttö	hake	1,8
Stokeri (300 kW), jatkuva käyttö	hake ja pelletti	0,2
Alapalokattila	pilke	5,2

Kattilakannasta alapalokattiloiden osuus on pieni yläpaloiisiin verrattuna. Valtaosa asuinrakennusten polttopuusta käytetään kiukaissa, takoissa ja yläpalokattiloissa. Näiden ominaispäästöjen aritmeettinen keskiarvo on 1,9 mg/MJ. Eri lämmitystapojen puunkäyttömäärien jakauma ei ole tiedossa, mistä syystä arviossa käytetään aritmeettista keskiarvoa.

Liikerakennukset lämmitetään pääosin jatkuvatoimisilla kattiloilla (stokeri tai pellettipoltin), jotka tavallisesti on kytketty suoraan (ilman vesivarainta) keskuslämmitykseen. Tästä syystä niille on luontevaa soveltaa stokeripolton katkokäytön päästökeroita. Laboratoriomittaus vastaa tässä yhteydessä kansallista keskiarvoa muuta pienpolttua paremmin, sillä näiden kattiloiden käyttö on yleisemmin automatisoitua.

Ehdotus puun pienpolton N₂O-päästökertoimeksi on **2 mg/MJ** sekä liike- että asuinrakennuksille, mikä on sama kuin KHK-inventaariossa käytetty päästökerroin [Tilastokeskus 2005].

Metaanin ominaispäästöt vaihtelevat paljon N₂O:ta enemmän. Taulukoista 17 ja 18 saadaan eri polttotapojen metaanin ominaispäästöille taulukossa 20 esiteltävät aritmeettiset keskiarvot (pyöristetyin luvuin).

Taulukko 20. Mittauksista laskettuja keskiarvoja CH₄-päästöille.

Laite	Polttoaine	CH ₄ -ominaispäästö [mg/MJ]
Kiuas	pilke	330
Takka	pilke	50
Yläpalokattila	pilke	150
Stokeri (300 kW), katkokäyttö	hake	10
Stokeri (300 kW), jatkuva käyttö	hake ja pelletti	3
Alapalokattila	pilke	650

Kiukaiden, takkojen ja yläpalokattiloiden metaanin ominaispäästöjen keskiarvo on 180 mg/MJ. Stokeripolton metaanipäästöjen arviointia vaikeuttavat katkokäytön suppea mittaussaineisto (yksi koe, taulukko 17) ja niukka julkinen vertailuaineisto. Muut mittaukset ovat sopuissa viimeisimpien julkisten tutkimustulosten kanssa (esim. [Tissari et al. 2005]). Koejärjestelyjen puolesta katkokäytön tulokset edustavat päästöjen kannalta epäedullista tilannetta. Kattilaa ajettiin vain n. 20 %:n osateholla, jolloin polton käyntijaksot olivat lyhyitä ja paljon häkä- ja hiilivetypäästöjä tuottavien seisontajaksojen osuus suuri. Laboratoriomittausten tuloksia voidaan muuten pitää tyypillisinä liikerakennuksien kattiloiden päästöinä, sillä niiden käyttö on enimmäkseen automatisoitua. Tässä julkaisussa esitettyjen mittaustulosten lisäksi seuraavien suosituskertoimien perusteena on käytetty myös julkaisematonta mittaussaineistoa. Niissä useista liikerakennuksille tyypillisistä kattiloista on mitattu alle 10 mg/MJ CH₄-päästötaasoja. Tyypillinen ominaispäästö on selvästi pienempi kuin asuinrakennuksien kattiloissa, koska polttoaineen syöttö on tasaisempaa ja automatisoitua ja kattilat ovat paremmin säädettyjä.

Metaanin päästökertoimiksi puun pienpoltossa suositellaan **10 mg/MJ** liikerakennuksille ja **200 mg/MJ** asuinrakennuksille. Molemmat päästökertoimet ovat huomattavasti pienempiä kuin KHK-inventaariossa käytetty päästökerroin 300 mg/MJ [Tilastokeskus 2005]. IPCC:n [1997] suosituspäästökertoimet vaihtelevat välillä 200–380 mg/MJ.

4. Yhteenveto ja johtopäätökset

Energiantuotannon ja teollisuuden kattiloiden CH₄- ja N₂O-päästöt vastasivat vuonna 2003 noin 1 %:a Suomen koko KHK-päästöistä, ja pienpolton CH₄- ja N₂O-päästöt vastasivat noin 0,5 %:a kokonaispäästöistä (ilman LULUCF-sektoria) [Tilastokeskus 2005]. Päästöarvioihin sisältyy kuitenkin merkittävä epävarmuus. Tässä tutkimuksessa selvitettiin mittausten ja kuormitustutkimuksen avulla kuormituksen ja polttoaineiden vaikutuksia voimalaitosten ja lämpökeskuksien N₂O- ja CH₄-ominaispäästöihin ja tarkennettiin päästökertoimia mitatuille laitostyypeille. Lisäksi selvitettiin pienpolton CH₄- ja N₂O-päästöjä mittauksin.

Dityppioksidin ja metaanin arvioiminen päästökertoimilla on epätarkkaa, koska päästöt riippuvat mm. laitoksen tyypistä, ajotavasta ja polttoaineseoksesta. Poltossa metaania syntyy pääasiassa epätäydellisen palamisen tuloksena ja dityppioksidia matalissa lämpötiloissa tapahtuneen palamisen seurauksena. Epätäydellinen palaminen on täysin laitoskohtaista ja riippuu paljon polton hallinnasta; esimerkiksi huono sekoittuminen tulipesässä, käynnistysten määrä ja epätasainen ajo saattavat kasvattaa metaanipäästöjä. Häiriötilanteiden päästöt voivat olla niin suuria, että usein toistuvina ne vaikuttavat merkittävästi vuosittaiseen keskipäästöön. Metaaniominaispäästöt voivat olla hyvin pieniä sellaisissa laitoksissa, joissa on hyvät säätöjärjestelmät, tarpeeksi automatiikkaa tai esimerkiksi jatkuvatoiminen CO-mittaus takaisinkytkentöineen. Dityppioksidia lisäävät matalat lämpötilat taas johtuvat usein osakuormalla ajosta.

Pienpolton osalta mitattiin CH₄- ja N₂O-päästöjä Suomessa yleisimmin käytössä olevista tulisija- ja pienkattilatyypeistä. Laboratoriossa tutkittavat laitteet olivat perinteinen rakoarinalla varustettu puulämmiteinen saunankiuas, varaava takka varustettuna sekä rakoarinalla että uudella arinatyyppillä (jossa palamisilmaa syötetään myös tulipesän seinämiltä), 300 kW:n stokeripoltinkattila ja 40 kW:n yläpalokattila. Polttoaineina käytettiin tulisijoissa 0,33 m:n koivuklapeja ja yläpalokattilassa 0,5 m:n koivuhalkoja. Stokerikattilassa poltettiin koivuhaketta ja puupellettiä. Näiden lisäksi tehtiin kenttämittauksia kiukaista, takkaleivinuunista ja alapalokattilasta.

Kaikissa mitatuissa pienpolttokohteissa N₂O-päästöt olivat melko pienet. Metaani- ja CO-päästöt vaihtelivat laitteesta toiseen ollen suurimmat kenttämittauksessa alapalokattilalla (n. 550–750 mgCH₄/MJ) ja pienimmät jatkuvassa stokeripoltossa (1–5 mgCH₄/MJ). Taulukossa 21 esitetään mittaustietoihin perustuvat suositukset pienpolton päästökertoimiksi. Suurista vaihteluväleistä johtuen kertoimiin liittyy kuitenkin suuret epävarmuudet.

Taulukko 21. CH₄- ja N₂O-päästökertoimet [mg/MJ] pienpoltolle.

	CH ₄ [mg/MJ]	N ₂ O [mg/MJ]
Liikerakennukset	10	2
Asuinrakennukset	200	2

Tutkimuksen toisen osan – voimalaitosten ja lämpökeskusten päästöt – ensisijaisena tavoitteena oli tarkentaa CH₄- ja N₂O-päästökertoimia mitattujen laitostyyppien osalta. Tutkimuksessa mitattiin kolme kiertopetikattilaa, joiden polttoaineina olivat hiili, turve, biomassa ja REF (sekä öljy tukipolttoaineena). Päästöjä mitattiin eri polttoaineseoksilla. Lisäksi mitattiin neljä kuplivaa leijupetiä, joiden polttoaineina olivat turve, biomassa, liete, öljy ja REF, sekä yksi öljypolttimella varustettu lämpökeskus. Mittaukset tehtiin aikaisempia julkisia mittausprojekteja pitkäkestoisempina, jotta saatiin lisätietoa esimerkiksi eri kuormitustasojen, käynnistysten ja häiriöiden vaikutuksesta päästöihin.

Työn osana tehtiin kuormitustutkimus, jossa selvitettiin osakuormien yleisyyttä suomalaisilla voimalaitoksilla ja lämpökeskuksilla, koska kuormituksen tiedettiin vaikuttavan N₂O-päästöihin. Kuormitustutkimuksen perusteella todettiin, että kuormitukset vaihtelevat paljon laitoksesta toiseen. Suurin osa suurista laitoksista ajaa lähes neljä viidesosaa tuotannostaan yli 80 %:n teholla. Tämä pätee myös lauhdesähköä tuottaville laitoksille. Pääsääntöisesti suuret laitokset ajavat pieniä enemmän täydellä tai lähes täydellä teholla, mutta poikkeuksiakin on. Esimerkiksi jos suuren (yli 100 MW) laitoksen kanssa samassa kaukolämpöverkossa on vieläkin suurempi laitos, on pienemmällä laitoksella muita saman kokoluokan laitoksia enemmän osakuormaa.

N₂O-päästöt nousivat osakuormalla lähes kaikilla mitatuilla laitoksilla täyden kuorman ajoon verrattuna. Osakuorma vaikutti myös öljypolttimen N₂O-päästöön. Tämä johtunee mm. siitä, että tässä työssä mitatun polttimen ilmamäärää ei säädetä tarpeeksi alas osakuormalla. Vastaavien tilanteiden yleisyydestä muissa lämpökeskuksissa ei ole tietoa. Mitattu kattila oli kuitenkin kokoluokassaan tyypillinen lämpökeskus. Suuremmissa yksiköissä (> 50 MW) palamisen säätö saattaa olla optimaalisempaa, jolloin vastaavaa päästön nousua osakuormalla ei välttämättä tapahdu.

Polttoaine vaikutti useimmissa tapauksissa päästöihin kirjallisuuden perusteella oletetussa järjestyksessä: kivihiilen poltto aiheutti suuremmat N₂O-päästöt kuin turpeen, jonka poltosta tuli hieman enemmän päästöjä kuin biomassan poltosta. Tämä havaittiin esimerkiksi kivihiilen osuuden lisäyksen yhteydessä yhdellä CFB-kattilalla (laitos E). Pelkkää kivihiiltä polttavalla CFB-kattilalla N₂O-päästöt olivat kuitenkin alhaisemmat kuin CFB-kattilalla, jossa poltettiin hiilen lisäksi turvetta ja biomassaa. Tämä johtui siitä, että pelkkää kivihiiltä polttavassa CFB-kattilassa (laitos A) tulipesän lämpötilat

olivat korkeammalla tasolla kuin sekapolttokattilassa (laitos E). Turpeen ja biomassan keskinäisten osuuksien vaikutusta N₂O-päästökertoimeen voidaan pitää pienempänä kuin kirjallisuuden perusteella ennalta oletettiin, sillä monilla laitoksilla turpeen ja biomassan välisellä suhteella ei havaittu selkeää yhteyttä N₂O-päästöön. Tämä johtunee myös siitä, että sekapoltoissa poltettu biomassa on usein kuorta, jonka typpipitoisuus on runkopuuta korkeampi. Tämä on tärkeä tulos, sillä näiden polttoaineiden sekapolto on Suomessa yleistä.

Tutkimuksen tuloksena voidaan esittää taulukon 22 mukaiset päästökertoimet käytettäviksi KHK-inventaariossa.

Taulukko 22. Suositukset KHK-inventaarion laskennassa käytettäviksi päästökertoimiksi.

	Kokoluokka [MW _{pa}]	EF [mg/MJ _{pa}]
CH₄		
CFB, kivihiili	≥ 50	1
CFB, turve, biomassa	≥ 50	3
BFB, turve	5–50	4
BFB, turve, biomassa	≥ 50	2
Poltin, POR	kaikki	1
N₂O		
CFB, kivihiili	≥ 5	30
CFB, turve, biomassa	≥ 5	7
BFB, turve, biomassa	≥ 5	3
Poltin, POR	< 50	3
Poltin, POR	≥ 50	1

Suosittelut päästökertoimet perustuvat kuormitustutkimukseen, laitospohjaisiin mittauksiin ja aikaisempien tutkimusten tuloksiin, joita käytettiin lähinnä vertailuun. Yleisesti ottaen voidaan todeta, että laskennassa nykyisin käytettävät N₂O-päästökertoimet ovat korkeampia kuin tässä tutkimuksessa arvioidut päästökertoimet. Poikkeuksena ovat BFB-kattilat ja alle 50 MW:n öljypolttimet, joille tässä tutkimuksessa suositeltu N₂O-päästökerroin on suurempi kuin KHK-inventaariossa käytetty [Tilastokeskus 2005] johtuen osakuorman vaikutuksen huomioimisesta tässä tutkimuksessa. Tässä raportissa suositellut CH₄-päästökertoimet ovat joko pienempiä kuin KHK-inventaariossa käytetyt [Tilastokeskus 2005] tai asettuvat KHK-inventaarion päästökertoimien vaihteluvälille.

Erilaisten häiriöiden vaikutuksista päästöihin ei ole tarkkaa tietoa, mutta tässä tutkimuksessa arvioidut päästökertoimet käsittävät osakuorma- ja käynnistystilanteita useimmille kattilatyypeille. Mitatun öljykattilan käynnistystilanteissa N₂O-pitoisuus vastasi osakuormalla ajon vastaavaa pitoisuutta. Näin käynnistyksiä ei tämän mitatun laitoksen osalta erikseen huomioitu, eikä niitä välttämättä tarvitse huomioida muidenkaan laitosten osalta.

ten päästöissä, mikäli kuormitusjakauma huomioidaan tässä raportissa esitetyllä tavalla ja käynnistyksen päästöt vastaavat osakuormalla ajoa. Leijupetikattilat puolestaan käynnistetään yleensä esim. öljynpoltolla, jolloin käynnistyksen päästöt vastaavat öljypoltinten päästöjä. Kun kiinteän polttoaineen syöttö aloitetaan, voidaan tilannetta tarkastella normaalin osakuormalla ajon tapaan.

Keskimääräisiin päästökertoimiin liittyvien epävarmuuksien vuoksi tutkimuksessa tarkasteltiin myös vaihtoehtoisia päästöjenarviointimenetelmiä. Koska CH₄- ja CO-päästöt korreloivat keskenään hyvin biopolttoaineita ja turvetta polttavissa laitoksissa ja monella laitoksella on jatkuvatoimisia CO-mittauslaitteita, voidaan laitosten häiriötilanteet ja epätäydellinen palaminen huomioida arvioimalla CH₄-päästöä mitatun CO-päästön avulla. Tätä menetelmää kuvataan liitteessä C. Toisaalta voimalaitosten metaanipäästöjen osuus Suomen metaanipäästöistä on pieni, joten tämän menetelmän käyttö saattaisi osoittautua kalliiksi saavutettuun hyötyyn nähden.

Tutkimuksessa esitettiin myös menetelmä arvioida laitosten N₂O-päästöjä yksityiskohdittaiseen kuormitustietoon perustuen. Tämä menetelmä parantaisi päästöarvioiden tarkkuutta huomattavasti. Menetelmällä voitaisiin parhaimmillaan päästä noin 10 %:n tarkkuuteen, mikäli käytettäisiin kullekin laitokselle mittausten perusteella määritettyä kuorma-N₂O-korrelaatiota (tai lämpötila-N₂O-korrelaatiota) ja tietoa kattilan hetkellisestä polttoainekuormasta (tai lämpötilasta). Myös laitostyyppikohtaisen korrelaatiokäyrän ja kunkin laitoksen kuormitustiedon avulla päästäisiin huomattavasti tarkempiin tuloksiin kuin esimerkiksi tässä tutkimuksessa suositelluilla päästökertoimilla, joiden epävarmuus on 100 %:n luokkaa Suomen tasolla ja yksittäisille laitoksille sovelletuna vielä suurempaa. Ennen tämän menetelmän käyttöönottoa tulisi kuitenkin selvittää menetelmän käytöstä aiheutuvat kustannukset ja verrata niitä saavutettavaan hyötyyn.

Tarkennettuja N₂O- ja CH₄-päästökertoimia voidaan verrata myös muiden maiden käytämiin päästökertoimiin ja päästökertoimia voitaneen hyödyntää osittain myös muissa maissa. Ilman lisätutkimusta näitä päästökertoimia ei kuitenkaan tulisi suoraan käyttää muissa maissa esimerkiksi erilaisten polttoainelaatujen, kuormituskäytäntöjen sekä automaatio- ja säätöjärjestelmien takia.

Lähdeluettelo

BAT. 2003. Jalovaara, J., Aho, J., Hietamäki, E. & Hyytiä, H. SY649. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5–50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. Helsinki: Suomen ympäristökeskus (SYKE).

<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=3708&lan=fi> (viitattu 2.11.2005).

Boström, S., Backman, R. & Hupa, M. 1990. Energiantuotannon ja -kulutuksen kasvihuonekaasujen päästöt Suomessa. Raportti D:186. Helsinki: Kauppa- ja teollisuusministeriö.

Boström, S., Backman, R. & Hupa, M. 1992. Greenhouse gas emissions in Finland 1988 and 1990. Energy, industrial and transport activities. Turku: Insinööritoimisto Prosesikemia Ky.

Boström, S. 1994. Greenhouse Gas Inventory. Finland 1990. Turku: Insinööritoimisto Prosesikemia Ky.

Cooper, D. A. 2001. Exhaust emissions from high speed passenger ferries. Göteborg: IVL Swedish Environmental Research Institute.

Fabritius, M., Korhonen, S., Hoffren, H. & Leskelä, J. 2002. N₂O and CH₄ emissions from different power plant processes. Teoksessa: van Ham, J., Baede, A. P. M., Guicherit, R. & Williams-Jacobse, J. G. F. M. (toim.). Non-CO₂ greenhouse gases: Scientific understanding, control options and policy aspects. Rotterdam, Alankomaat: Millpress. S. 67–72. ISBN 90-7701770-4.

Harju, T. 2001. Puuenergiapolton materiaalivirrat. Puuenergian teknologiaohjelma. Loppuraportti. Espoo: VTT Kemiantekniikka.

Helynen, S. & Oravainen, H. 2002. Polttopuun pientuotannon ja -käytön kehitystarpeet. Teknologiakatsaus 124/2002. Helsinki: Tekes.

IEA GHG R&D. 2000. Abatement of other greenhouse gases – Nitrous oxide. Report PH3/29.

IPCC. 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reference manual. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.htm>.

IPCC. 2000. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Teoksessa: Penman, J., Kruger, D., Galbally, I., Hiraishi, T., Nyenzi, B., Emmanul, S., Buendia, L., Hoppaus, R., Martinsen, T., Meijer, J., Miwa, K. & Tanabe, K. (toim.). Hayama: Institute for Global Environmental Strategies (IGES). ISBN 4-88788-000-6.

Kilpinen, P. 2002. Typen oksidien muodostuminen ja hajoaminen. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. (toim.). Poltto ja palaminen. Jyväskylä, Finland: International Flame Research Foundation (IFRF), Suomen kansallinen osasto. S. 300–343.

Korhonen, S., Fabritius, M. & Hoffren, H. 2001. Methane and nitrous oxide emissions in the Finnish energy production. Vantaa: Fortum Power and Heat Oy. 36 s. (TECH-4615.)

Kytö, M. 2004. Tyypillisiä mittaustuloksia dieselmootoreista. Henkilökohtainen sähköpostikeskustelu 28.6.2004. VTT Prosessit.

Maakaasuyhdistys. 2005. Maakaasukäsikirja.
http://www.maakaasu.fi/7_kasikirja/index.html.

Orthofer, R., Knoflacher, H. & Zueger, J. 1996. Nitrous oxide emissions in Austria. Energy Conversion, Vol. 37, nro 6–8, s. 1309–1314.

Rakennustutkimus RTS Oy. 2001. Tulisijamarkkinat – Markkinatilanneraportti. Helsinki: Rakennustutkimus RTS Oy. 25 s.

Rautanen, M., Kinni, J. & Kokko, A. 1997. Experinece with multifuel industrial scale BFB and Cymic boilers. Teoksessa: The future of fluidised bed combustion. VGB technical scientific report. TW212e. Essen, Saksa: VGB-Kraftwerkstechnik GmbH.

Rokka, A. 2005. Mittaustuloksia sekä lämpötiloja leijupetikattiloista. Henkilökohtainen sähköpostikeskustelu 13.12.2005. Foster Wheeler Oy.

Roppo, J. 2004. Mittaustuloksia Kvaernerin CFB-kattilasta. Henkilökohtainen sähköpostikeskustelu 20.12.2004. Kvaerner Power Oy.

Teir, S. 2003. Steam Boiler Technology. 2nd Edition. Department of Mechanical Engineering, Energy Engineering and Environmental Protection Publications. Espoo: Helsinki University of Technology. ISBN 951-22-6759-4.

Tilastokeskus. 2005. Greenhouse gas emissions in Finland 1990–2003. National inventory Report to the UNFCCC.

Tissari, J., Raunemaa, T., Jokiniemi, J., Sippula, O., Hytönen, K., Linna, V., Oravainen, H., Pyykkönen, J., Tuomi, S., Vesterinen, R., Taipale, R., Kolsi, A., Nuutinen, I., Kouki, J. & Vuorio, K. 2005. Puun polton pienhiukkaspäästöt – Loppuraportti 31.8.2005. Kuopio: Kuopion yliopisto. ISSN 0786-4728.
<http://www.uku.fi/laitokset/ifk/PIPOLoppuraportti2005.pdf> (viitattu 19.12.2005).

Tsupari, E., Monni, S. & Pipatti, R. 2005. Non-CO₂ greenhouse gas emissions from boilers and industrial processes – evaluation and update of emission factors for the Finnish national greenhouse gas inventory. VTT Research Notes 2321. Espoo: VTT. 82 s. + liitt. 24 s.

Tuomi, S. & Peltola, A. 2002. Polttopuun käytön tilanne pientaloissa. Työtehoseuran metsätiedote 15/2002 (658). 4 s.

Vahlman, T. 1994. FTIR-mittaustekniikka savukaasuanalytiikassa. VTT Julkaisuja 794. Espoo: VTT Kemianteekniikka. 36 s. + liitt. 14 s. ISBN 951-38-4502-8.

Vakkilainen, E. 2005. Paperiteollisuuden polttolaitosten kuormituksia. Henkilökohtainen sähköpostikeskustelu keväällä 2005, Tsupari – Vakkilainen Esa (Jaakko Pöyry Oyj).

Vesterinen, R. 2004. Mittaustuloksia biopolttoaineen poltosta. Henkilökohtainen sähköpostikeskustelu 6.7.2004.

VTT Chemical Technology. 2000. Optimal utilisation of coal in modern power plants with respect to control of mass flows and emissions of VOCs/PAHs and mercury (OMPAC). Draft final report.

Liite A: Kuormitustutkimuksen kyselykaavake

KUORMITUSTUTKIMUS SUOMEN KASVIHUONEKAASUINVENTAARION CH₄- JA N₂O-PÄÄSTÖKERROINTEN TARKENNUSTA VARTEN

Kysymyksiin pyydetään vastaamaan kaikkien voimalaitostenne ja lämpökeskuksienne osalta, vaikka laitoksia ei olisi käytetty koko vuonna. Kopioikaa lomaketta laitosmäärän mukaan. Sähköpostilla palautettuna tätä sivua voi kopioida jonoon samaan tiedostoon.

Vastaajan nimi: _____

Vastaajan puh: _____

1) Laitostiedot:

Laitoksen nimi		Esimerkki Holma vl
Pääpolttoaine		<i>Hiili</i>
Polttotekniikka		<i>CFB</i>
Polttoaineteho		<i>120 MW</i>
NO _x -vähennystekniikat		<i>öljylle LowNO_x-polttimet. SCR</i>
NO _x -vähennystekniikan hankintavuosi		<i>SCR 1998, polttimet 2000-luvulla</i>

2) Kuormitustilastot: (Laitosten höyry-, polttoaine- tai sähkö+lämpötehot 1–3 vuoden ajalta. Tiedot pyydetään lähettämään sähköpostin liitetiedostona tai disketillä/CD:llä postitse, mieluiten Excel-taulukkona laitokohtaisina tuntikeskiarvoina mutta näiden puuttuessa myös esim. vuorokausituotannot tai pysyvyysskäyrät antavat tärkeää tietoa)

3) Pitoisuusmittaukset savukaasuista: (tarkkojen tietojen puuttuessa arviot ajankohdista riittävät)

	Jatkuvatoiminen mittaustulos (aloitusvuosi)	Säädetäänkö laitosta mittauksen perusteella (KYLLÄ/EI)	Kertaluontoinen mittaus (ajankohta tai -kohdat)
Esimerkki 1. Häkä			<i>kk.vv–kk.vv</i>
Esimerkki 2. N ₂ O			<i>10.2000–12.2000 ja 2.2004–2.2004</i>
Häkä			
Happi			
N ₂ O			
CH ₄			
TOC			
Hiukkaset			
NO _x			
SO _x			
Muu, mitä			

Kiitos vastauksestanne. Kaikkia tietoja käsitellään luottamuksellisesti.

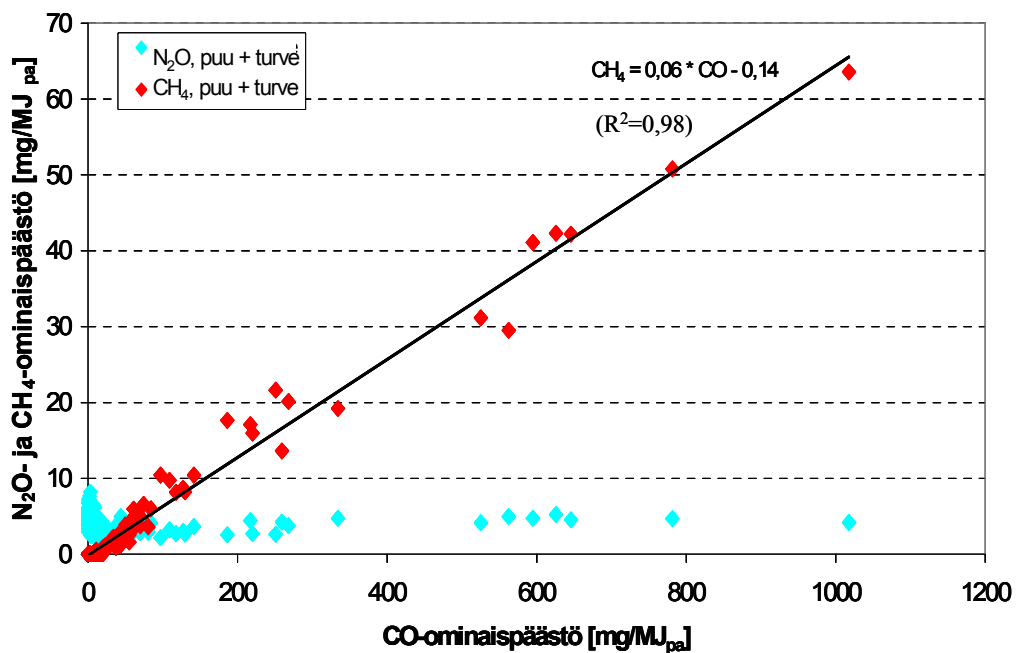
Liite B: Mittaustuloksia muista tutkimuksista

Tässä liitteessä esitetään muista tutkimuksista kerätyt mittaustulokset koskien leijupetikattiloita ja öljypolttimia. Kattavampi taulukko koskien myös muita tekniikoita on lähteessä [Tsupari et al. 2005]. Taulukon päästöt esitetään yksikkönä mg/MJ, mikäli ei ole toisin sanottu. Mittalaitteen määritysrajaa pienemmät päästöt esitetään muodossa ”< määritysraja”.

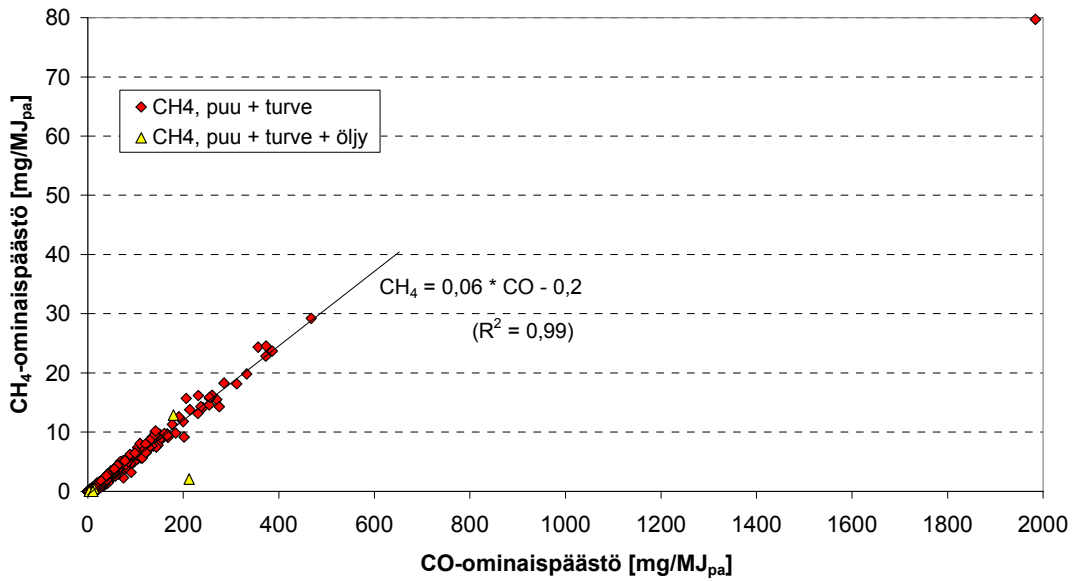
Fuel	Technology	Capacity	Bed [°C]	Upper furn. [°C]	Load [%]	CH ₄	N ₂ O	CO	O _{2, dry} [%]	NO _x	SO ₂	Source	Notes
Peat	CFB	299 MW _{th}	865	901	98	1	<2	14 ppm	6.1	68	153	[1]	Temperature after separator 905 °C
Peat	CFB	185 MW _{th}	865	746	75	<1	26	4 ppm	6.5	128	147	[1]	With 65% load 36 mg N ₂ O/MJ. After sep. 860 °C
Peat	BFB	260 MW _{th}	817		96	2	<1	179 ppm	4.9	136	362	[1]	
Peat + sludge	BFB	78 MW _{th}	831		74	3	<2	113 ppm	5.4	136	121	[1]	Share of sludge is only few percentages
Peat + wood	CFB	97.5 MW _{th}	867		96	1	3	34 ppm	5.5	122	93	[1]	Peat 80% + wood 20%. After separator 867 °C
Peat + wood	CFB	299 MW _{th}	846	887	99	1	4	9 ppm	6.2	62	113	[1]	Peat 85% + wood 15%. After separator 894 °C
Peat + bark	BFB	78 MW _{th}	897		76	<1	<2	38 ppm	6.4	124	40	[1]	Peat 50%
Peat + bark + coal	CFB	> 300 MW _{th}	905	850	100	<1	18	19	3.1	29	90	[3]	Peat > 50%. Emissions without NO _x or SO _x reduction methods
Bark	CFB	185 MW _{th}	838	768	75	1	10	24 ppm	7.1	123	<8	[1]	T after separator 796 °C
Bark	BFB	115 MW _{th}	853		64	72	<2	769 ppm	8.9	73	<9	[1]	Too small air ratio (average O ₂ 3%)
Bark / Wood	FBC	> 100 MW					6					[4]	
Bark / Wood residues	CFB						5					[1]	Original source: Foster Wheeler, Compact CFB
Bark + wood + waste	BFB	150 MW			~90	~0	~0					[5]	Waste is pelletized waste (15% of fuel). Wood is saw dust.
Wood + waste	CFB	9 MW				~0	~0					[5]	Wood chips + pelletized waste.
Wood + bark + coal + peat	CFB	> 300 MW _{th}	850	850	100	<1	5	10	4.2	73	5	[3]	Wood + bark cover > 70% of fuel mix. Wood is logging residues.
Wood / bark	BFB	70 MW _{th}			52–56	0.5	1.1	10–18	6.5–6.9	51–48	5.4	[6]	Softwood saw dust 45% (N-content 0.06 w-%), rotten softwood chips 55% (N-content 0.05 w-%).

Liite C: CH₄-pitoisuuden määrittäminen CO-pitoisuuden perusteella

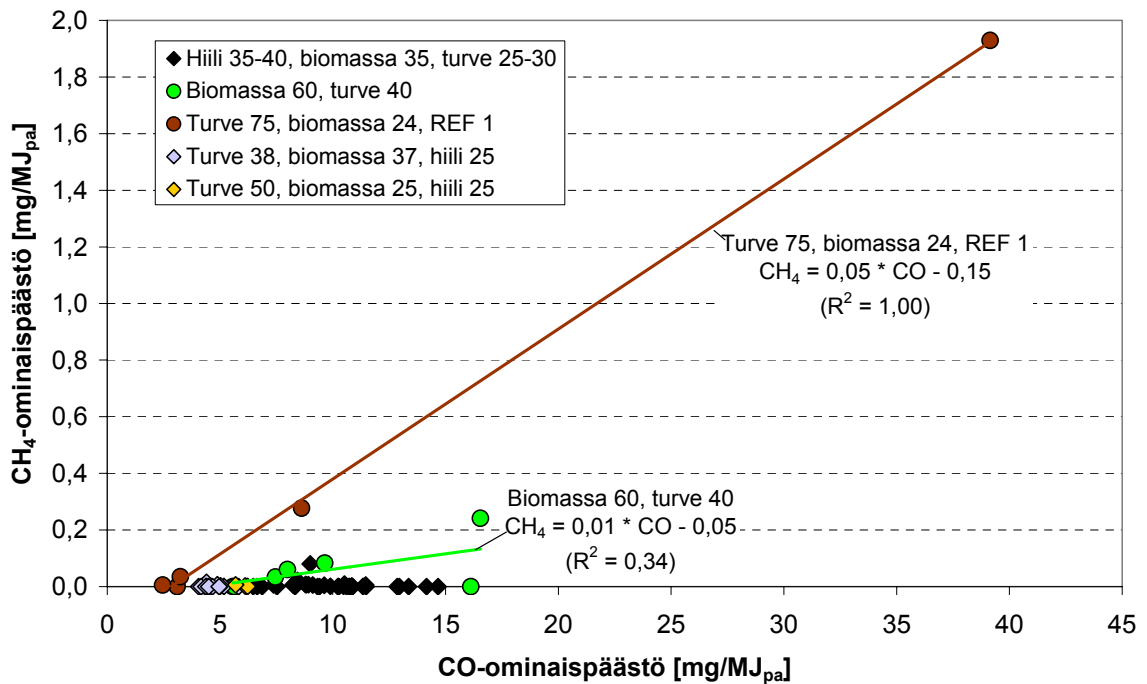
Metaanipäästöt syntyvät epätäydellisestä palamisesta. Tällaiset tilanteet ovat täysin laitoskohtaisia, eikä niitä voida arvioida luotettavasti päästökertoimilla. Kuvissa C-1–C-4 esitetään CO- ja CH₄-päästöjen välisiä korrelaatioita mitatuille laitoksille. Kuvissa esitetyt suoran yhtälöt ovat esimerkkejä korrelaation suuruusluokasta. Kuvista nähdään, että turvetta ja biomassaa polttavilla laitoksilla CO- ja CH₄-päästön välinen yhteys on selkeä. Yhtä selvää korrelaatiota ei kuitenkaan havaittu hiiltä tai öljyä polttavissa laitoksissa, sillä niissä CH₄-pitoisuudet olivat hyvin pieniä.



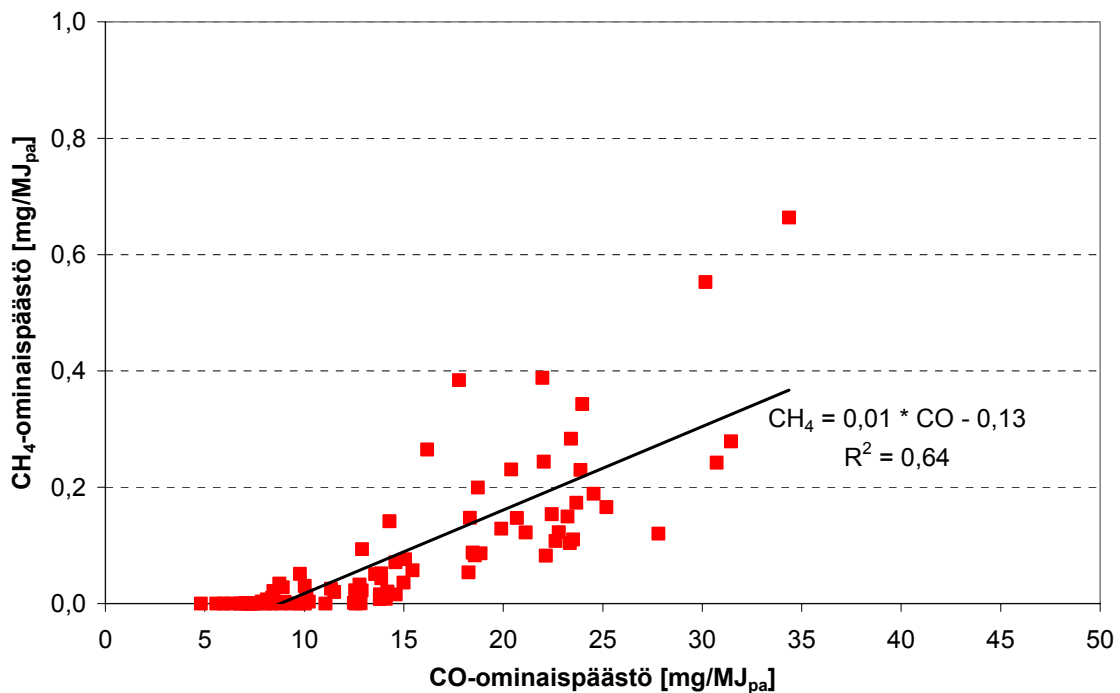
Kuva C-1. CO-, CH₄- ja N₂O-päästön välinen yhteys laitoksella B (BFB: turve, biomassa).



Kuva C-2. CO- ja CH₄-päästön välinen yhteys laitoksella C (CFB: turve, biomassa). Suoran sovituksessa ei ole huomioitu viimeistä erillään olevaa pistettä.



Kuva C-3. CO- ja CH₄-päästön välinen yhteys laitoksella E erilaisilla polttoaineseoksilla. Laitoksiin B ja C verrattuna nämä päästöt ovat kertaluokkaa pienemmät.



Kuva C-4. CO- ja CH₄-päästön välinen yhteys laitoksella F (BFB: biomassa, turve, bioliete). Laitoksiin B ja C verrattuna nämä päästöt ovat kertaluokkaa pienemmät.

Mittaustulosten mukaan näyttäisi siltä, että turvetta ja biopolttoaineita käyttävien laitosten metaanipäästöt korreloivat hyvin CO-päästöjen kanssa. Näiden mittausten mukaan lineaarinen korrelaatio ei ole aivan yhtä tarkka biopolttoaineille kuin turpeelle. Toisaalta laitosten E ja F CH₄- ja CO-ominaispäästöt olivat hyvin pienet, joten huonompi korrelaatio saattaa johtua myös mittauseräpäästä. Lisäksi näyttäisi siltä, että biopolttoaineiden päästöille sovitettuna suoraa kulmakertoimen olisi selvästi pienempi kuin turpeen päästöille. Vertailukelpoisia mittauspisteitä on tässä kuitenkin liian vähän tarkkojen arvioiden antamiseen. Tässä projektissa tehtyjen mittausten tuloksista voidaan kuitenkin päätellä, että turpeen leijupoltossa (turve > 50 % polttoainetehosta) hetkellinen CH₄-päästö on noin 6 % hetkellisestä CO-päästöistä [mg/MJ_{pa}]. Tällöin myös vuosittainen CH₄-päästö olisi noin 6 sadasosaa vuosittaisesta CO-päästöistä [t].

Suurilla laitoksilla on usein jatkuvatoimiset CO-mittauslaitteet, ja CO-päästöjä myös raportoidaan viranomaisille, esimerkiksi VAHTI-järjestelmään. Näin ollen CH₄-päästöä olisi mahdollista arvioida CO-mittauksiin perustuen. Mikäli järjestelmää haluttaisiin edelleen tarkentaa, olisi mahdollista mitata myös laitoskohtaiset CH₄-CO-korrelaatiot eri polttoaineseoksilla. Näin voitaisiin päästä huomattavasti nykyistä päästökertoimiin perustuvaa laskentaa tarkempiin tuloksiin, kun esim. kaikki häiriötilanteiden ja käynnistysten aiheuttamat päästöt voitaisiin huomioida. Vaikka kaikilla polttolaitoksilla ei olekaan jatkuvatoimista CO-mittausta, voitaisiin samantyyppisten laitosten CO-mittauksiin perustuvia päästökertoimia mahdollisesti yleistää vastaaville laitoksille.

Taulukko C-1 esittää kolmella tavalla määritetyt CH₄-päästöt laitokselta C, josta mittausdataa on pisimmältä ajalta. Tässä tarkastellaan koko mittausajalta mitattuja päästöjä ensimmäisen vuorokauden aikana määritetyn korrelaation avulla, kuten myöhemmin olisi mahdollista tehdä kaikkien laitosten osalta. Vertailun vuoksi taulukossa esitetään myös vuoden 2002 KHK-inventaarion päästökertoimilla saadut päästöt vastaavalta ajalta.

Taulukko C-1. Kolmella tavalla mittausajalta (50 vrk) määritetyt CH₄-päästöt laitokselta C.

Määrittystapa	Mitattu	CO-korrelaatio ¹	Inventaarion päästökerroin ²
CH ₄ -päästö	1,4 t CH₄	$\Sigma_i (0,0586 * CO_i) = \mathbf{1,6 t CH_4}$	$3 \text{ mg/MJ}_{pa} * 3,6 * 10^{-6} * \Sigma_j P_j = \mathbf{2,5 t CH_4}$

¹ CO_i tarkoittaa kyseisen tunnin keskimääräistä CO-päästöä tonneina.

² [Tilastokeskus 2005], P_j tarkoittaa ajanjakson j keskimääräistä tehoa.

Taulukosta huomataan, että CO-korrelaatiolla laskettu päästö määrä on huomattavasti lähempänä mitattua päästöä kuin inventaarion päästökertoimella laskettu. Tässä esitetyllä menetelmällä päästäisiin siis huomattavasti tarkempiin päästöarvioihin kuin nykyisellä päästökerrointarkastelulla. Toisaalta polton metaanipäästöt ovat Suomen muihin päästöihin verrattuna vähämerkityksellisiä, joten menetelmän kustannuksia tulisi arvioida suhteessa saavutettavaan hyötyyn ennen kuin voidaan antaa suosituksia menetelmän käytöstä.

