

IS

4 | 2025

ILMANSUOJELU

HYPERILMASTOKAASU HFC-23:N mysteeripäästöjen ratkaiseminen s. 4

ILMANLAADUN MALLINNUS SUOMESSA s. 10

Kasvihuonekaasujen **PÄÄSTÖMITTAUKSET KAATOPAIKOILLA** s. 14

PUUNPOLTON PÄÄSTÖJEN vaikutus pientaloalueiden ilmanlaatuun s. 17

Hybridiautojen tuoreen pakokaasun **ULTRAPIENTEN HIUKKASTEN PÄÄSTÖT** s. 22

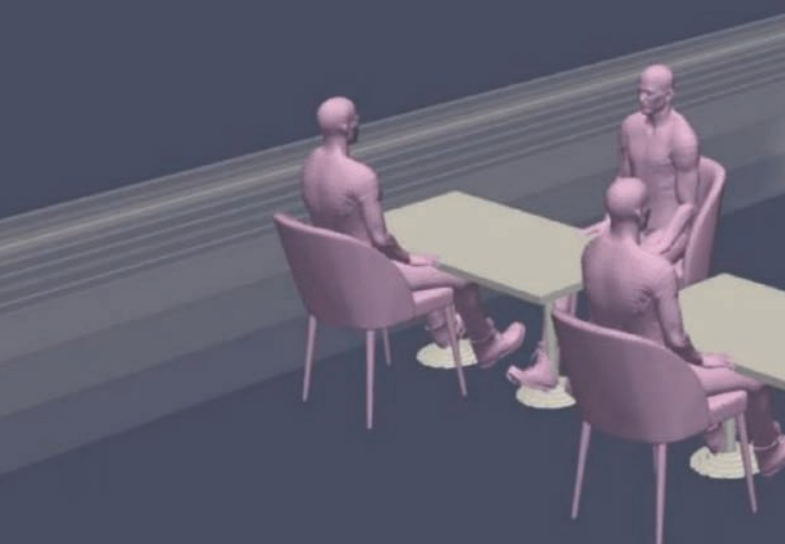
Ehdotus ilmanlaadun **SEURANNAN JÄRJESTÄMISESTÄ** Hämeessä s. 28

Hiilineutraali energiatuotanto tarvitsee **LISÄÄ OSAAMISTA** s. 32

10

Ilmanlaadun mallinnus aloitettiin jo 60- ja 70-luvuilla, ja ajan saatossa mallit ovat kehittyneet ja tarkentuneet huomasti.

KUVA: ILMATIETEEN LAITOS



14

Jätesektorin päästöt ovat laske-neet 63 prosenttia 35 vuodessa. Kasvihuonekaasuja vapautuu silti edelleen vanhoilta kaa-topaikoilta, mutta mittausten ansiosta tiedämme minkä verran.

KUVA: MAJUJ LUKOSALMI



17

Pientaloalueilla piiput tuprut-tavat. Kotitalouksien puun-poltton päästöihin pyritään vaikuttamaan tiedottamalla hyvistä puunpoltto tavoista.

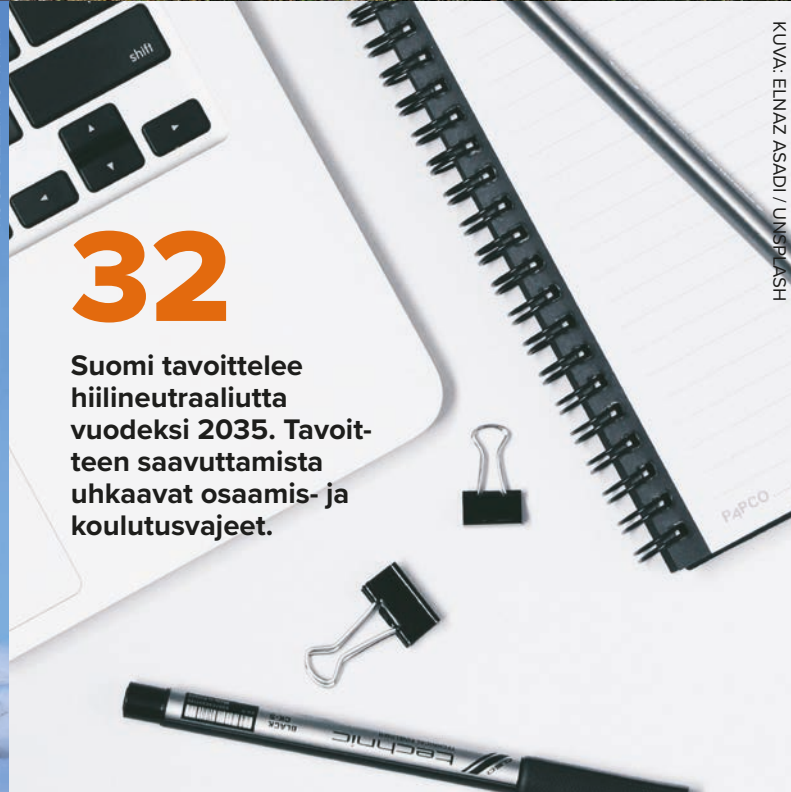
KUVA: SHUTTERSTOCK



32

Suomi tavoittelee hiilineutraaliutta vuodeksi 2035. Tavoitteen saavuttamista uhkaavat osaamis- ja koulutusvajeet.

KUVA: ELINÄZ ASADI / UNSPLASH



SISÄLLYS 4 | 2025

- 4 **HYPERILMASTOKAASU HFC-23:N** mysteeripäästöjen ratkaiseminen
- 10 **ILMANLAADUN MALLINNUS SUOMESSA**
- 14 Kasvihuonekaasujen **PÄÄSTÖMITTAUKSET KAAKOPAIKOILLA**
- 17 **PUUNPOLTON PÄÄSTÖJEN** vaikutus pientaloalueiden ilmanlaatuun
- 22 **OPINNÄYTE:** Hybridiautojen tuoreen pakokaasun ultrapienien hiukkasten päästöt muuttuvissa ajo-olosuhteissa
- 26 **VALOKEILASSA:** Hilka Timonen
- 28 **OPINNÄYTE:** Ehdotus ilmanlaadun seurannan järjestämisestä Kanta- ja Päijät-Hämeessä
- 32 Hiilineutraali energiatuotanto tarvitsee **LISÄÄ OSAAMISTA**

Pääkirjoitus

Ilmasto ei meitä odottele

Yksi vuosi ihmiskunnan ilmastomuutostaistelua on taas takana. Suomen 2035 hiilineutraaliustavoite horjuu aiempaa näkyvämmiin. Tavoitteen perusteluista käydään keskustelua, sen lykkäämistä ajetaan ja raporttien perusteella sen saavuttaminen vaatisi radikaaleja toimia. Tiedossa on jo pitkään ollut, että maankäyttösektorin kehityssuunta pitäisi saada kääntymään. Toimenpiteet antavat odottaa itseään.

Marraskuissa Belémin COP30-ilmastokokouksessa EU sai viime metreillä läpi kirjaukset, joiden avulla varmistetaan työn jatkuminen energiasiirtymän toteutumiseksi ja fossiilisista polttoaineista irtautumiseksi. Kokouksessa myös sovittiin, että kehittyvien maiden sopeutumiseen suunnattava rahoitus pyritään kolminkertaistamaan vuoteen 2035 mennessä. Pienistä edistysaskeleista huolimatta vaikuttaa edelleen, että eri maiden näkemykset ja toiveet ilmastokokousten tavoitteista ovat eriytyneet. Kunnianhimoisia toimia kannattavat maat ovat jäämässä vähemmistöön. Ilmastomuutos ei kuitenkaan anna lisäaikaa.

Tässä vuoden viimeisessä Ilmansuojelussa aloitamme ilmastotemalla, kun perehdyimme "hyperilmastokaasu"-päästöihin, joiden jäljittäminen ja ehkäisy on osoittautunut salapolitiisyyttä vaativaksi mysteeriksi.

Toisessa artikkelissa kerromme ilmanlaadun mallinnuksesta Suomessa. Mallinnusta on tehty jo 70-luvulta alkaen, mutta mallinnustyön luonne on muuttunut teknologian kehittyessä, ja myös saatujen tulosten tarkkuus on ottanut harppauksia. Haasteitakin työssä riittää.

Seuraava artikkeli kertoo kaatopaikkojen kasvihuonekaasupäästöistä ja niiden mittaamisesta Suomessa. Päästöjä mitataan kaatopaikoilla mikrometeorologisella pyörrevarianssi-menetelmällä.

Talven tullen puunpoltton päästöt tulevat jälleen ajankohtaisemmaksi pientaloalueilla. Lehden puolivälin artikkeli luo kasauksen puunpoltton päästöjen tilanteeseen, sekä päästöihin vaikuttaviin moninasiin tekijöihin. Tiiviisti rakennetuilla pientaloalueilla puunpolttopäästöillä on huomattava vaikutus hengitysilmaan.

Ilmansuojelussa julkaistaan vuosittain myös artikkelit Ilmansuojeluyhdistyksen stipendeillä palkitsemista opinnäytetöistä. Tällä kertaa saamme ensimmäisestä opinnäyteartikkelista lukea PAREM-PI-hankkeen yhteydessä toteutusta opinnäytteestä, jossa mitattiin hybridiautojen pakokaasun ultrapienien hiukkasten päästöjä. Tulosten perusteella autojen ajoasetuksilla on huomattava vaikutus päästöihin. Toisessa opinnäyteartikkelissa kuvataan, miten ilmanlaadun seuranta kannattaisi järjestää Kanta- ja Päijät-Hämeen alueilla. Kyseisten alueiden mittausverkosto paljastuukin jo reilusti vaatimukset täyttäväksi.

Lehden lopun artikkelissa kerrotaan vielä vihreän siirtymän kiireellisistä osaamistarpeista, ja vinkkinä takasivulta löytyy myös linkki alan maksuttomalle täydennyskoulutuskurssille.

Jälleen on se aika vuodesta, kun Ilmansuojeluyhdistyksen syysseminaari, vuosikokous ja pikkujoulut on pidetty. Tällä kertaa yhdistys kokoontui vantaan Aviapoliksessa ja valitsi uutena hallitukseen muun muassa opiskelijajäsenen.

Joulun jälkeen alkaa Ilmansuojeluyhdistyksen 50-vuotisen taipa-leen juhluvuosi, ja erityinen toimikunta on suunnitellut vuodelle 2026 juhlaa toimintaa. Seuraava Ilmansuojelun numero on myös tuhti juhlalehti, joten kiinnostavaa luettavaa on luvassa myös ensi vuodelle!

Rauhaisaa joulun aikaa ilman ystäville!

TYTTI HAUTALA
Päätoimittaja



**ILMANSUOJELU-
YHDISTYS ry.**

ILMANSUOJELU-LEHTI

Ilmansuojeluyhdistys ry:n jäsenlehti
Magazine of the Finnish Air
Pollution Prevention Society
Medlemstidning av Luftvårdsföreningen rf.

Lehti ilmestyy neljä kertaa vuodessa.

Päätoimittaja / Redaktör
Tytti Hautala
ilmansuojelulehti@isy.fi

Toimituskunta / Redaktionsråd
Suvi Haaparanta, Helsingin kaupunki
Petteri Haveri, Energiategollisuus ry
Niina Kuittinen, VTT Oy
Katrianne Lehtipalo, Helsingin yliopisto
Hanna Pitkänen, Vantaan energia
Karri Saarnio, Ilmatieteen laitos
Laura Sokka, Suomen ympäristökeskus
Antti Tohka, Metropolia AMK
Jari Viinanen, Vantaan kaupunki
Outi Väkevä, HSY

Taitto / Ombrytning
Tytti Hautala

Kannen kuva / Omslagsbild
Jason Blackeye / Unsplash

Paino / Tryckeri
Scanseri Oy

ISSN-L 1239-8950
ISSN 1239-8950 (Painettu)
ISSN 2323-1211 (Verkkójulkaisu)

Lehti on luettavissa korkeakoulujen kirjastoissa sekä suurimmissa kaupunginkirjastoissa / Tidningen finns till påseende i högskolornas bibliotek samt i de största stadsbiblioteken

Ilmoitukset / Annonser
Ilmoitushinnat normaali tai yritysjäsen / Annonpris vanligt eller för medlemmar:
1/1 sivu 420 € tai 350 €
1/2 sivu 320 € tai 270 €
1/3 sivu 250 € tai 210 €

Kestoilmottajille lisäksi 20 % alennus
Fortgående annons ger 20 % rabatt

Tilaukset / Beställningar
Myös yksittäisnumeroiden tilaukset ja osoitteenmuutokset / Beställning av enskilda nummer och adressförändringarna:

Ilmansuojeluyhdistys ry
Sihteeri Hanne Väistö
PL 136,
00251 Helsinki
Puh. 045 1335989
sihteeri@isy.fi



Kuva 1. Tiedekonferenssivieraat tapasivat JUHUA-konsernin pääjohtajan, sekä yrityksen omistaman maailman suurimman kylmä-ainetehtaan johtajan ja teknistä johtoa tehdaskonglomeraatin kokoustiloissa.

HYPERILMASTOKAASU HFC-23:N mysteripäästöjen ratkaiseminen

Tapio Reinikainen, johtava asiantuntija, Suomen ympäristökeskus

Halogenoitujen kylmäaineiden tuotanto raaka-ainekäyttöihin on voimakkaassa kasvussa.

Aineita tarvitaan monien teollisuustuotteiden, kuten muovien, teflonin ja lääkkeiden valmistuksessa. Lisäksi raaka-ainekäyttöjen päästökertoimet ovat suurempia kuin on oletettu.

Raaka-ainekäytöstä syntyy ennakoitua suurempia otsonikerrosta tuhoavien ja ilmastoa lämmittävien aineiden päästöjä. Joitakin näistä päästöongelmista on ratkaistu, mutta jäljellä on monia huolia: esimerkiksi HCFC-22 -raaka-ainekaasun sivutuotteena syntyvä erittäin voimakas kasvihuonekaasu HFC-23, jonka pitoisuudet ilmakehässä ovat voimakkaassa nousussa. Nyt Montrealin pöytäkirjan piirissä yritetään saada tämän ”hyperilmastokaasun” päästöt kuriin. Se on osoittautunut mutkikkaaksi salapoliisintyötä muistuttavaksi hankkeeksi.

Useimmissa maailman rakennuksissa on kylmä- ja ilmastointilaitteita, sammutuslaitteita sekä lämpöpumppuja. Montrealin pöytäkirjan (MP) myötä näissä laitteissa käytettyjä otsonikerrosta tuhoavia kloorattuja kaasuja (freoni) on korvattu suurelta osin fluoratuilla kaasulla eli fluorihilivedyllä (HFC). Fluoratut kaasut eivät tuhoa otsonikerrosta, mutta nekin ovat voimakkaasti ilmastoa lämmittäviä, jopa satoja tai tuhansia kertoja hiilidioksidia voimakkaampia ”superilmastokaasuja”. Myös niistä on tarkeitus päästä eroon rajoittamalla korkean ilmastonlämmityspotentiaalin HFC-kaasujen tuotantoa ja kulutusta maailmanlaajuisesti. Rajoituksista sovittiin niin sanotulla Kigalin muutoksella vuonna 2016 ja nyt päätöksiä pannaan toimeen maailmanlaajuisesti.

Montrealin pöytäkirjalla ei siis rajoiteta suoranaisesti päästöjä, kuten Pariisin ilmasopimuksella, vaan rajoitustoimilla puututaan aineiden tuotantoon ja kulutukseen. Juuri tuotannon ja kulutuksen rajoittaminen on yksi MP:n menestystekijöistä (Reinikainen 2022). Useimmille MP:n käsittelemille kaasuille ei ole luonnollisia päästölähteitä. Niinpä päästöjä ei synny, jos kaasuja ei tuoteta eikä kuluteta. Ainoana poikkeuksena sääntöön on aine nimeltä HFC-23 (GWP 14 800), jonka ilmastonlämmityspotentiaali (GWP) on 14 800 kertaa suurempi kuin hiilidioksidin – siksi sitä voi hyvällä syyllä kutsua hyperilmastokaasuksi. Sen päästöt ovat kaiken lisäksi kasvussa (kuva 3), vaikka niitä rajoitetaan MP:n päätöksillä.

Päästökuilu

Tutkijat ovat havainneet, että maiden raportoimat päästöt eivät täsmää ilmakehän pitoisuuksista johdettujen päästöarvioiden kanssa (kuva 3a ja b). Ilmakehästä mitatut HFC-23:n pitoisuudet ovat erittäin merkittävästi korkeammat kuin niiden pitäisi, mikäli maiden raportoimat päästömäärät kattaisivat kaikki päästöt. MP:n osapuolet ovat pyytäneet asiantuntijapaneeleitaan selvittämään syitä tälle päästökuilulle. Ansiokkaita selvityksiä on saatu kaasun pitoisuuksien kehityksestä ilmakehässä, päästömäärästä eri maissa sekä eri teollisista ja ilmakehän prosesseista, joista kaasua syntyy.

Suurin osa päästöistä on paikannettu Kiinan itäisiin maakuntiin (kuva 3b). Havainto ei sinänsä ole yllätys, sillä Kiinan kemianteollisuudessa on ollut laittomien päästöjen ongelmia aikaisemminkin kuluneen kymmenen vuoden aikana. Ongelmat liittyvät näiden aineiden tuotantoon ja raaka-ainekäyttöön. On havaittu esimerkiksi otsonikerrosta tuhoavien aineiden, hiilitetrakloridin ja CFC-11 -kaasun, yllättäviä laittomia päästöjä.

Päästöongelmia on selvitetty tarkkaan MP:n rahoitusmekanismiin Multilateral Fundin johtokunnan (MLF/ExCom) ja erityisesti sen suljetun tuotantosektorin ryhmän päätöksillä, joissa on edellytetty Kiinan hallitukselta tarkkoja selvityksiä maan kaikkien tämän alan teollisuuslaitosten prosesseista ja niiden päästöistä. Tuotantosektorin alaryhmä on jäsenmäärältään rajoitettu ja tarkkailijoilta (esim. EU:n komissio ja kansalaisjärjestöt) suljettu. Sen dokumentit käsitellään luottamuksellisina, minkä vuoksi ryhmä on saanut vaatimiaan yksityiskohtaisia raportteja prosesseista ja niiden päästöistä.

MP:n tieteellisen asiantuntijapaneelin (SAP), teknistaloudellisen asiantuntijapaneelin (TEAP) Multilateral Fundin (MLF) sihteeristön, Maailmanpankin, MP:n osapuolten ja MLF:n johtokunnan (MLF/ExCom) sekä sen tuotantosektorin ryhmän työstä huolimatta HFC-23 -päästöjen lähteet ovat edelleen puoliksi selvittämättä. Puolet päästöistä on paikannettu Kiinan itäisiin maakuntiin – mutta mistä loput päästöt tulevat?

Mahdollisuuksia on monia: esimerkiksi sellaiset tuottajamaat, joiden ilmakehän pitoisuuksien seuranta varten ei ole vielä olemassa mittausasemia, tai ne Kiinan alueet, joiden päästöt tapahtuvat liian kaukana kansainvälisen mittausasemaverkoston (AGAGE) mittausasemista. Toinen puoli mysteeriä on, mistä teollisuuslaitoksista tai muista päästölähteistä Itä-Kiinaan paikannetut päästöt tulevat, koska laitosten raporttien ja MLF/ExComin tuotantosektorin toimeksiannosta Maailmanpankin tekemien evaluaatio- ja verifikaatioreporttien mukaan ne eivät tule todennäköisimmistä päästölähteistä, eli HCFC-22 -tuotantolaitoksista.

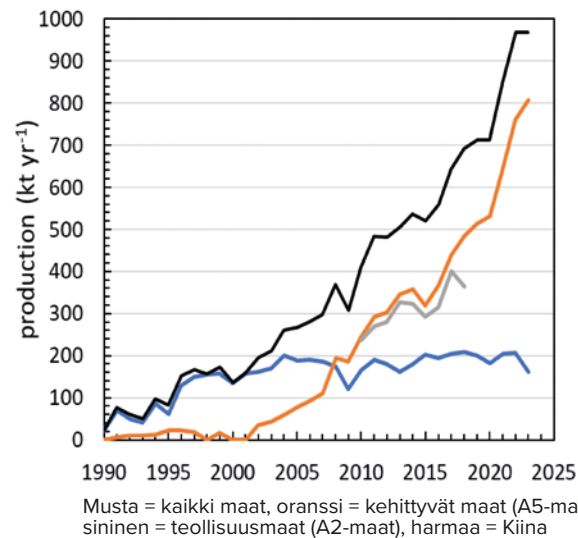
Mystisiä päästöjä voi kuitenkin tuotantolaitoksissa syntyä lukuisista syistä, kuten putkistovuodoista, huonosti optimoidusta prosessista tai polttolaitoksen tahattomasta tai tahalliseen vajaakäytöstä. Siksi olisi hyvä arvioida päästöjä alueellisten päästömittausten, prosesseihin kiinnitettävien virtausmittareiden ja massataseiden lisäksi piipun päästä otettavilla näytteillä, sekä tehdasalueen lähistöllä tehtävän riittävän taajan näytteenoton avulla.

TEAP ja SAP ovat osapuolten pyynnöstä etsineet myös muita mahdollisia päästölähteitä. Sellaisia on löytynytkin. HFC-23 -päästöjä syntyy myös esimerkiksi TFE/HPF- ja PT-FE-tuotannon (teflon) yhteydessä, ilmakehään päässeiden HFO-kaasujen foto-oksidation tuloksena sekä epäpuhtaute-na valmistetuissa kylmäaineissa. Yllättäen esimerkiksi kylmäaine R-32 -kaasussa (GWP 675), joka on tavallinen ilmalämpöpumpuissa, on epäpuhtautena 0,01 prosenttia HFC-23:a. Paneelin mukaan nämä eivät kuitenkaan ole likimainkaan yhtä merkittäviä päästölähteitä kuin HCFC-22:n sivutuotepäästöt.

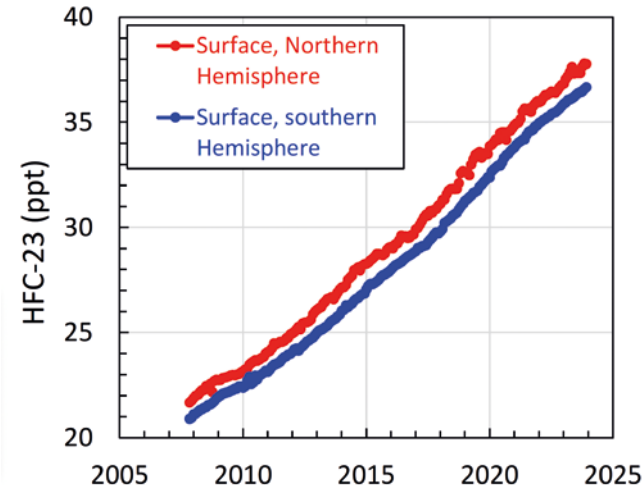
Tiedetyöpaja Shanghaissa

Ratkaisukeskeiseen HFC-23 -tiedetyöpajaan syyskuussa 2025 oli kutsuttu vain bussilastillinen osallistujia, joista jokaisella oli oma roolinsa tässä päästökysymyksessä. Joukkoon kuului Fudanin ja Pekingin yliopistojen sekä asiantuntijapaneelien (SAP ja TEAP) huippututkijoita, yliopistojen johtoa, Kiinan, Suomen ja EU-komission MP ja MLF-neuvottelijat, sekä otsonisihteeristön pääsihteerit ja MLF:n sihteeristön johtotiimi.

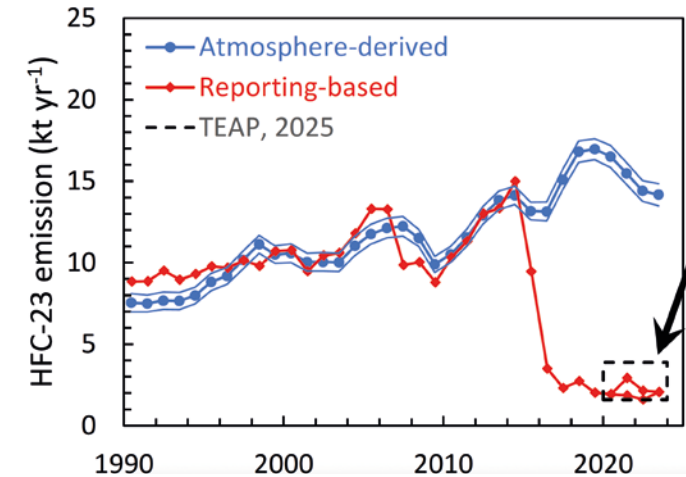
Esityksissä pureuduttiin HFC-23 -päästöjen ongelmaan perusteellisesti käymällä läpi kaikki viimeaikaiset tutkimukset asian tiimoilta erinomaisten esitysten avulla. Vierailuun kuului Kiinan uuden mittalaitteiston esittely sekä vierailu AGAGE-verkostoon äskettäin liittyneellä mittausasemalla Keltaisenmeren rannalla. Lisäksi vierailtiin maailman suurimmalla kylmäainetehtaalla ja tavattiin yrityksen ja tehtaan johtoa, sekä pidettiin heidän kanssaan suorapuheinen keskustelutilaisuus.



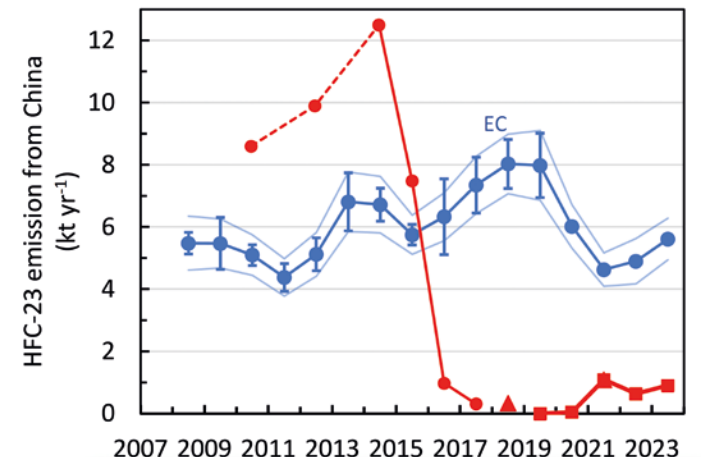
Kuva 2. Halogenoitujen kylmäaineiden tuotanto raaka-ainekäyttöön on voimakkaassa kasvussa. HCFC-22 on maailman tärkein ja massamäärältään suurin raaka-aineksi tuotettava halogenoitu kylmäaine. Vuonna 2024 HCFC-22:n maailmanlaajuisen tuotanto raaka-ainekäyttöön oli 1 197 000 tonnia. Tuotannosta arvioidaan syntyvän sivutuotteena HFC-23 -kaasua 18 000–36 000 tonnia (metristä). Tästä se osa, jota ei hävitetä, pääsee ilmakehään. (SAP 2025.)



Kuva 3. HFC-23 -kaasun pitoisuudet ilmakehässä ovat olleet voimakkaassa nousussa viimeisen kahden vuosikymmenen aikana. Päästöt ovat peräisin pohjoiselta pallonpuoliskolta, mutta ne näkyvät tasaisena pitoisuuksien kasvuna eteläisen pallonpuoliskon hyvin sekoittuneessa ilmakehässä vasta viiveellä, mikä johtuu tyypillisestä ilmakehän dynamiikasta.



Kuva 5a. Ilmakehän mittausten perusteella arvioidut päästöt (sininen pisteiviiva) ovat olleet pitkään nousussa, mikä näkyy myös hyvin sekoittuneen ilmakehän pitoisuuksissa (vrt. kuva 3). Ilmakehämittausten päästöarviot kuitenkin poikkeavat maiden raportoimista päästöistä merkittävästi. Ero ei selity mittausepävarmuudella, vaan syy on joko aliraportoinnissa tai tuntemattomissa päästölähteissä. Kuvan musta nuoli kuvaa raportointiin perustuvia arvioita, jotka vaihtelevat 1,6–3,7 kt välillä vuodessa. Sinisen ja punaisen käyrän väli on jopa kymmenen kilotonnin vuotuinen päästökuilu, eli jopa kolminkertainen Suomen kasvihuonekaasujen päästöihin nähden. (Steve Montzka, NASA/NOAA.)



Kuva 5b. Punainen käyrä kuvaa Kiinan raportoimia päästöjä (MP:n artiklan 7 vaatimusten mukaan) ja sininen käyrä ilmakehän pitoisuuksien perusteella arvioituja päästöjä Itä-Kiinasta (EC= Eastern China). Yllättävää on, että aivan viime vuosina Itä-Kiinan päästöt ovat nousseet. (Steve Montzka, NASA/NOAA.)

Kuva 4. Tapio Reinikainen ja Shang Shuwen (oik.) Suomen ja Kiinan edustajat Multilateral Fundin johtokunnan tuotantosektorin alaryhmässä, tehdasvierailulla Zhejiang Quhua Fluor-Chemistry -tehtaalla. Kyllä pitää Fudanin yliopiston tohtoriopiskelija.



Kokemuksia HFC-23 -tiedetyöpajasta

Osallistuvin syyskuussa Kiinan isännöimään tiedetyöpajaan Shanghaissa. Isäntien järjestelyt olivat erinomaiset. Esitin oman näkökulmani maailman suurimman kylmäainetehaan johdolle takavuosien konsulttijohtajan ammatissa saamieni kokemusten perusteella – kysymyksen muodossa: ”Vientiryitykselle hyvä ympäristömaine on pääomaan verrattava asia. Se saattaa huveta yllättävän nopeasti, jos osoittautuu, että yritys ei olekaan toiminut julkilausumiensa periaatteiden mukaisesti. Johdon on joskus vaikeata tietää, onko sen luomat politiikat pantu toimeen kunnolla. Paras lääke tähän on ulkopuolisten riippumattomien tahojen tekemä monitorointi, toimeenpanon seuranta ja verifiointi. Niitä voi verrata omaisuuden vakuuttamiseen. Miten yrityksessänne on huolehdittu riippumattoman seurannan ja verifiointin tuomasta vakuutuksesta?” Kysymys aiheutti pulinaa ja rivien rakoilua yrityksen johdossa muutoin tyylikkäästi orkestroidulla tehdasvierailulla, jossa kaikki näytti olevan kunnossa – polttolaitoksia, prosessien seurantaa ja jopa vastuullisuusraportointeja myöten. Olin jo hieman huolissani, olinko suorapuheisuudellani ylittänyt vierailta odotettavan kohteliaisuuden rajan. Toisaalta ajattelin, että enhän voi matkustaa tänne asti hymistelemäänkään. Vastaukseksi saatiin hieman epävarma vakuutus siitä, että tehdaskonglomeraatilla on tehokas prosessivalvonta (melko uskottavaa) ja päästöjen valvontamittarit tehtaan ulkopuolella (ei aivan uskottavaa). Lopullisen läpivalaisun teki huipputerävä Kalifornian yliopiston referenssilaboratorion johtaja professori **Ray Weiss** (82) kysymällä tehtaan oman päästöseurannan mittaustarkkuudesta. Vastauksesta kävi ilmi, että mittaustarkkuudella ei edes teoreettisesti olisi mahdollista saada päästöjä arvioitua.

Tiedetyöpaja ei tuonut tyhjentävää lopullista ratkaisua hyperilmastokaasu HFC-23:n päästöongelmaan, mutta se nosti asian esiin niin selkeästi, että kullakin osallistujalla on mahdollisuus pohtia seuraavia askeleita omasta näkökulmastaan.

Monitorointi avainasemassa

Kiinan vuonna 2018 julkitulleen laittomien CFC-II -päästöjen ratkaisussa avainasemassa oli tuulen alla olevat kansainvälisen AGAGE-verkoston intensiivimittausasemat Japanin Haterumassa ja Etelä-Korean Gosanissa. Niiden kaasukromatografien tai massaspektrometrien (GC/MS) sekä meteorologian avulla voitiin paikantaa päästöt Kiinan itäisiin maakuntiin. Samassa yhteydessä kuitenkin havaittiin, että ilmakehän alueellisen ja globaaliseurannan verkostoissa on valtavia aukkoja. Tuolloisesta päästökriisistä selittyi vain noin puolet Kiinan itäisten maakuntien päästöillä. Sama koskee nyt HFC-23 -päästöjä. Mittausasemaverkosto on liian harva.

Suomi ja EU:n komissio ovat olleet aloitteellisia neuvottelijoita Wienin sopimuksessa (COP), MP:n osapuolikokouksissa ja MLF:ssa mittausasemaverkoston täydentämiseksi tehtävissä päätöksissä ja kestäväen rahoituksen järjestämisessä. Työ on edelleen kesken, mutta ensi kesään mennessä todennäköisesti tilanne on merkittävästi parempi. MLF:n johtokunta harkitsee kevään 2026 kokouksessaan uuden rahoitusikkunan avaamista globaalina ja alueellisen monitoroinnin aukkojen paikkaamiseksi. Lisäksi EU:n horisonttirahoituksessa on varattu 4,5 miljoonaa euroa samaan tarkoitukseen. Valitettavasti samanaikaisesti riskinä kuitenkin on, että verkostojen kaikkein keskeisin toimija Yhdysvallat vähentää ratkaisevasti halogenoitujen ilmastokaasujen seurannan rahoitustaan.

Taloudellinen logiikka

HCFC-22 -kaasun tuottaminen on erittäin pääomaintensivistä, mutta tuotteen kate on matala. Sen sijaan sivutuotteena syntyneen HFC-23 -kaasun hävittäminen on kallista. HFC-23

-päästöjä on rajoitettu aiemmin niin sanotun puhtaan kehityksen mekanismin kautta (CDM). Siinä HCFC-22 -kaasua tuottaneille maille maksettiin HFC-23 -kaasun asianmukaisesta tuhoamisesta. Niinpä HFC-23:n tuhoaminen ei aiheuttanut lisäkustannuksia, ehkäpä jopa päinvastoin: Syntyi epäterveitä tuottolajeja, koska aineen hävittäminen korvattiin mekanismin kautta runsaskätisesti. Noina vuosina ilmakehän pitoisuuksista johdetut päästöarviot ja maiden raportoimat päästöarviot täsmäsivät. Yhtäkkiä vuoden 2014 tienoilla – samoihin aikoihin, kun CDM-mekanismi lakkautettiin – maiden raportoimat päästöarviot laskivat, mutta ilmakehän pitoisuuksien perusteella lasketut päästöt pysyivät ennallaan korkealla tasolla. Syitä voidaan vain arvailla. Selvästi on vain se, että jokin ei täsmää – onko kyseessä tahaton tai tahallinen aliraportointi vaiko tuntemattomat päästölähteet?

Yksi arvaus on, että kun HFC-23 -päästöjen ehkäisemisestä ei enää makseta CDM-mekanismiin lakkauttamisen jälkeen, eivät yhtiöt ole kokeneet enää välttämättömäksi jatkaa kustannuksia aiheuttavaa puhdistustoimintaa – ainakaan kaiken aikaa. Viime vuosina tilanne on kuitenkin muuttunut, koska Kiina on joutunut näistäkin päästöistä tarkastelun alle. Osapuolikokouksissa on tehty useampia päätöksiä näiden päästöjen alkuperän selvittämiseksi sekä päästöjen vähentämiseksi: On jaettu parhaita mahdollisia prosessi- ja puhdistusteknologioita ja MLF:n johtokunnan tuotantosektorin ryhmässä on käyty millimetrin tarkasti läpi Kiinan raportteja tuotantoprosesseista ja päästöistä tehdas tehtaalla. Päästöt globaalisti ovat lähteneet laskuun siitä huolimatta, että raaka-ainekäytön määrä on kasvanut. Tämä johtuu keskimääräisten päästökertoimien alenemisesta vuosisadan alun 2,0 prosentista 1,1 prosenttiin (kuva 6). Silti päästökertoimet parhailla eurooppalaisilla tehtailla (Reimann 2025) ovat vain 0,2 prosenttia eli viidesosa yleisestä tasosta ja selkeästi matalampia kuin Kiinan päästökertoimet. Kiinalla suurimpana toimijana on siis parantamisen varaa.

Osapuolikokouksessa kovaa vääntöä

Marraskuun 2025 alussa pidetyssä MP:n osapuolikokouksessa (MOP37) käsiteltiin uutta päätösesitystä HFC-23 -päästöistä EU:n, Kanadan, Norjan ja Sveitsin päätösesityksen pohjalta. Kiina toi oman esityksensä, jossa MLF rahoittaisi päästövähennystoimet, olipa kyseessä sitten jätteenkäsittelyn polttaminen tai sen palauttaminen raaka-aineeksi.

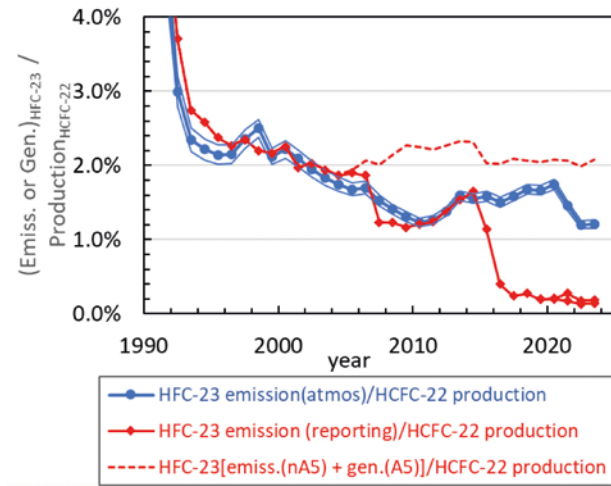
Ennätyspitkissä kontaktiryhmäkokouksissa Kiinan ja Yhdysvaltojen välinen geopolitiikkaa tiheästi kuvannut keskustelu kariutui konsensuksen saavuttamiseen: USA halusi laittaa Kiinan tilille ja Kiina puolestaan ei hyväksynyt itseensä kohdistuvaa osoittelua. EU:n rooli oli asiallinen ja osoittelematon. Lopputulemana Kiinan rahoitusesitystä MLF/ExComille ei hyväksytty, mutta eipä päätöksessä myöskään mainittu Kiinaa. Nähtäväksi jää miten Kiina aikoo toimia MP:n piirissä, sillä nyt olisi hyvä mahdollisuus tehdä silmankääntötemppeleitä ja puhua välttämättömät toimet hyveeksi.

Yli 60 prosenttia maailman HCFC-22:n tuotannosta on keskittynyt Kiinaan. Niinpä myös suurin osa HFC-23 -päästöistä syntyy Kiinassa, lähinnä Itä-Kiinan kemianteollisuuden jätteenkäsittelyssä konglomeraateissa. Kaasut täytyisi joko hävittää asianmukaisesti laitoksiin asennettavissa polttolaitoksissa tai saada uudelleenkäyttöön ja hyödyntää taloudellisesti.

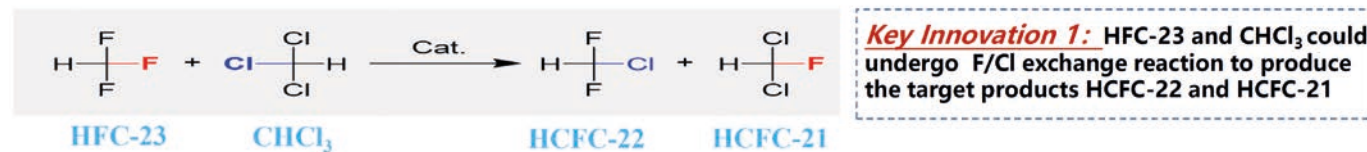
Voidaan arvioida, että Kiinan yliopistojen tutkijat tekevät parhaansa päästölähteiden identifioimiseksi ja päästömäärien kvantifioimiseksi sekä HFC-23:n palauttamiseksi raaka-aineeksi (kuva 7). Teollisuus taas on haluton maksamaan päästövähennysten kustannuksia. Niinpä Kiinan hallinnon tehtäväksi jää teollisuutensa vakuuttaminen – tavalla tai toisella – muutoksen välttämättömyydestä.

Osapuolikokouksen istunnossa Kiinan pääneuvottelija ilmoitti, että he ovat käynnistäneet kaikkien HCFC-22 -tuotantolaitostensa ulkoisen riippumattoman verifiointin ja aikovat myös ottaa laajasti käyttöön uuden teknologian, jolla

sivutuotteena syntyvä HFC-23 palautetaan HCFC-22:ksi. Paluumatkalla Quzhoun teollisuusvierailulta tasaisesti kulkevalla supernopealla junalla Shanghaihin oli helppo uskoa, että Kiina todella pystyy ratkaisemaan päästöongelmansa, jos se niin haluaa. Saattaa myös olla, että Kiinaa itse asiassa kiinnostaa pyrkiä laajemminkin vastuulliseen johtamiseen ilmastoasioissa. ■



Kuva 6. Päästötötehoisuuden koheneminen maailmanlaajuisesti (sin. käyrä). Vuoteen 2014 asti ilmakehän pitoisuuksien perusteella arvioidut (sin. pisteiviiva) päästömäärät täsmäsivät maiden raporttoimien päästömäärien (pun. viiva salmiakkikuvio) kanssa. Punainen katkoviiva kertoo, että kehittyvissä maissa (A5-maat) HFC-23:n generointi ja päästöt yhteenlaskettuna ovat olleet samalla tasolla jo vuosikymmenen.



Kuva 7. Kiinalaiset tutkijat esittivät Shanghain työpajassa uuden kemiantekniikan innovaation, jonka kloori-fluori-vaihtoreaktioon perustuen voitaisiin palauttaa hyperilmastokaasu HFC-23 raaka-aineeksi HCFC-22 ja HCFC-21. Kiina onkin rakentanut Sichuanin maakuntaan maailman ensimmäisen koelaitoksen, joka käyttää tätä teknologiaa. Laitos kykenee käsittelemään vaaratomaksi 500 tonnia HFC-23:a vuodessa. Päästövähennys tässä koelaitoksessa vastaa 7,4 miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttitonnia vuodessa, mikä olisi 14,1 prosenttia Suomen 2024 kasvihuonekaasujen päästöistä (Tilastokeskus 2025).

Lähteet:

Campbell N., Eriguchi T., Zhang J.: Technology and Economic Assessment Panel. Status of HFC-23 work under the Montreal Protocol. TEAP Medical and Chemical Technical Options Committee (MCTOC). 8-20 September, Shanghai and Zhejiang Province, PRC. Fudan University.
International Workshop on HFC-23 Emissions Control at the Scientific Level. 8-20 September, Shanghai and Zhejiang Province, PRC. Fudan University.
PBS News: China gives up WTO developing country status in face of U.S. tariffs. <https://www.pbs.org/newshour/world/china-gives-up-wto-developing-country-status-in-face-of-u-s-tariffs>
Reinikainen, T. Ilmansuojelu, nro 3/2022.
Report of the scientific assessment panel, September

2025- response to decision XXXVI/3: Emissions of HFC-23
Steve Montzka; An update to the current scientific understanding of HFC-23 in the atmosphere. National Oceanic and Atmospheric Administration, Global Monitoring Laboratory USA. 8-20 September, Shanghai and Zhejiang Province, PRC. Fudan University.
Stefan Reimann: Real-world HFC-23 emissions from a HCFC-22/PTFE production facility vs. bottom-up information. 8-20 September, Shanghai and Zhejiang Province, PRC. Fudan University.
Tilastokeskus 2025: <https://stat.fi/julkaisu/cm193ucyn9cjd08w9tbxx6jdn>
Wang: Zhejiang Research Institute of Chemical Industry. 8-20 September, Shanghai and Zhejiang Province, PRC. Fudan University.

Silloin joskus,
kun...

Ilmianna paras ILMANSUOJELUMUISTOSI!

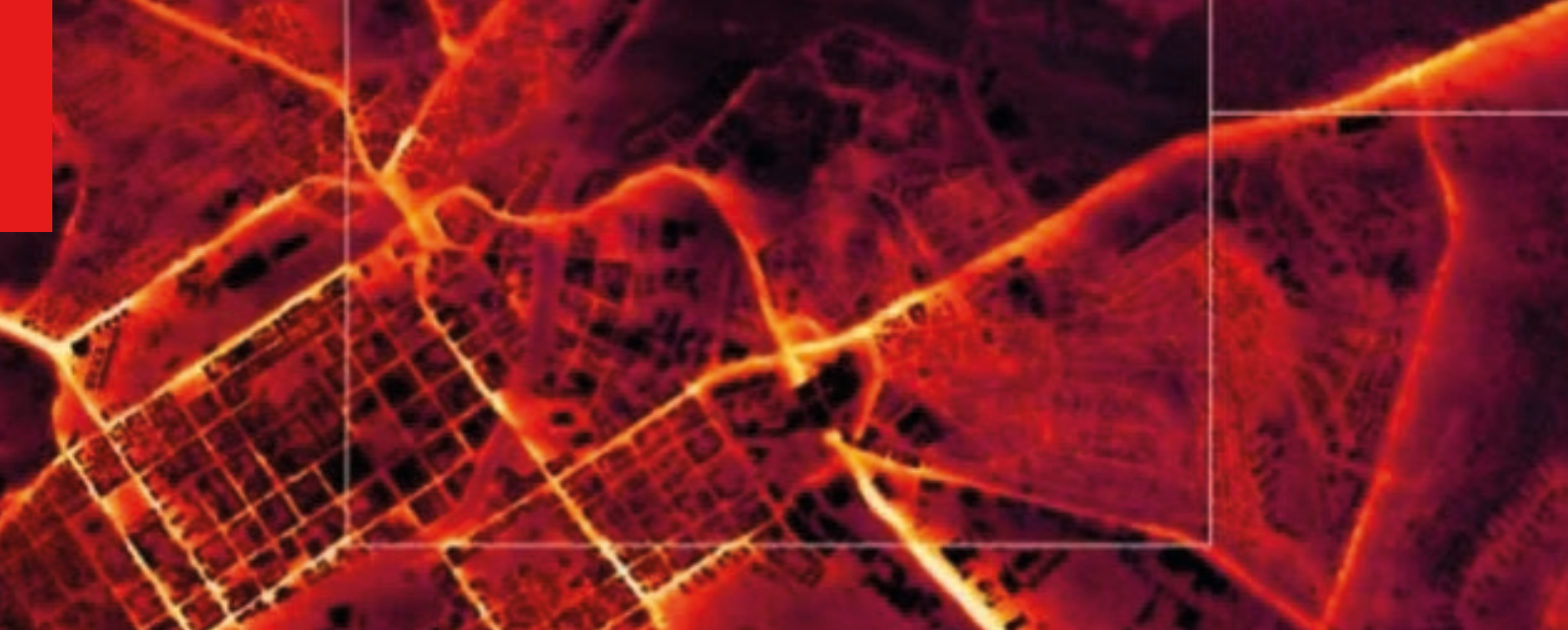
Liittykö paras muistosi Ilmansuojeluyhdistyksen toiminnan ajalta kenties tiettyihin Ilmansuojelupäiviin, yhteiseen ekskursioon tai ikimuistaiseen kommellukseen?

Ilmansuojeluyhdistys täyttää ensi vuonna pyöreät 50 vuotta ja seuraava Ilmansuojelu-lehti on yhdistyksen monivaiheista historiaa kunnioittava juhlanumero. Keräämme muistoja yhdistyksen historian ajalta ja kiinnostavimmista muistoista julkaistaan kooste juhlahedessä. Lähetä noin sadan sanan pituinen ISY-muistosi, ja mielellään mahdollisimman monta ISY-valokuvaasi (kuvan ottajan nimi mukaan) 6.1.2026 mennessä osoitteeseen niina.kuittinen@vtt.fi. Merkitse viestin otsikoksi 'Ilmansuojelumuisto'.

SAVE THE DATE: ILMANLAADUN MITTAAJATAPAAMINEN 20.-21.5.2026



HELSINKI
KUMPULA



ILMANLAADUN MALLINNUS SUOMESSA

Ilmanlaadun mallinnus ei ole aivan uusi keksintö, sitä tehtiin jo 60-luvulla ennen kuin edes tietokoneista oli apua mallien numeerisessa laskennassa. Ilmatieteen laitoksella mallinnusta on tehty 70-luvulta alkaen. Ensimmäisenä laajemman skaalan käytännön sovelluksena kehitettiin malli radioaktiivisten aineiden leviämislle.

Ari Karppinen, tutkimuspäällikkö, Ilmatieteen laitos

Ilmanlaatumallit perustuivat alussa pääsääntöisesti varsin yksinkertaiseen trajektorilaskentaan, johon kuitenkin jo 70-luvulla ja 80-luvun alussa yhdistettiin myös muun muassa realistiset arvot ilmapaketin pitoisuuksien laimenemisestä stabiiliuden funktiona. Malleihin lisättiin myös muiden laimenemisnopeuteen oleellisesti vaikuttavien sääsuureiden vaikutus pitoisuuksiin. Samoihin aikoihin aloitettiin myös niin sanottu piippuselvitysten teko: 70-luvun alussa Ruotsista ostetun tietokoneen ja kaupan päälle saadun ruotsalaisen leviämismallin avulla selvitettiin usean eri suuren suomalaisen toimijan päästöjen vaikutusta lähiympäristöön.

Tästä alkoi myös Ilmatieteen laitoksen omien mallien kehittäminen. Malleja kehiteltiin erityisesti lähileviämistä varten sekä piste-, viiva- ja aluelähteille. Samaan aikaan kuitenkin kehitystyö myös laajemman alueen leviämismallien kehittämiseksi jatkui aktiivisesti – tosin edelleen varsin pienillä resursseilla. Vasta vuoden 1986 ydinvoimalaonnettomuuden jälkeen myös kehitystyöhön alkoi löytyä merkittävästi suurempia resursseja, ja ilmakehän koostumuksen mallintaminen kasvoi hitaasti mutta varmasti tärkeäksi osaksi Ilmatieteen laitoksen tieteellistä kehitystyötä.

Käytännön mallinnustyö

Vaikka eri tarkoituksiin kehitetyt mallit ovat yksityiskohdittaan hyvinkin erilaisia, käytännön mallinnustyössä on hyvin paljon yhteisiäkin piirteitä.

Ensimmäinen, ”ulkoinen” yhdistävä tekijä on se, että tekniisesti leviämismallien kehitystyö on kuin mitä tahansa oh-

jelmistonkehitystyötä. Vaikka ohjelmointikielet ja tietokonejärjestelmät, joilla malleja koodataan ja ajetaan, voivat olla hyvinkin erilaisia, mallikehittäjien käytännön työ on päälinisin puolin identtistä muiden ohjelmistokehittäjien työn kanssa: koodin kirjoittamista, testausta, ohjelmointivirheiden metsästystä ja korjausta, sekä valmiin mallin arviointia sekä dokumentointia.

Tyypillisesti mallin kehitys tapahtuu vaihteittain. Perustana on useimmiten puhtaasti teoreettinen ratkaisu epäpuhtauksien kulkeutumiselle ilmakehässä. Siinä kuvataan kaikki fysiikkaaliset ja kemialliset prosessit, jotka vaikuttavat ilman epäpuhtauksien päästöihin, kulkeutumiseen, laimenemiseen, laskeumaan ja muuntumaan. Tässä vaiheessa varhaista mallikehitystä mallien rakentamiseen ei välttämättä hyödynnetä ilmanlaadun mittausdataa ollenkaan. Vasta mallien suorituskäkyä arvioitaessa hyödynnetään kaikki saatavilla oleva mittausdata mallin evaluointiin.

Mallien jatkokehityksessä on usein tärkeimpänä mahdollistavana tekijänä uudet mittauksilokset. Mallien tarkoituksena on lopulta tuottaa mahdollisimman realistisia pitoisuusarvoja koko mallinnusalueelle ja myös pystyä ennustamaan pitoisuuksien kehitystä lähitulevaisuudessa. Tämä on tehtävä kuitenkin niin, että niissä pisteissä ja niinä hetkinä, joista mittauksia on saatavilla, malliennusteet olisivat mahdollisimman yhteensopivia luotettavien mittausten kanssa.

Kun uusista mittauspisteistä ja uusilta ajanjaksoilta on saatavilla kokeellista aineistoa, sen pohjalta mallissa havaitaan mahdollisesti puutteita jonkun tietyn ilmiön (esim. katupölypitoisuuksien tai siitepölypitoisuuksien) kuvaamisen suhteen. Tällöin tätä puutteellista mallikomponenttia

jatkojalostetaan niin, että malli kykenee lopulta selittämään paremmin myös uudet havainnot. Jatkokehitys on useimmiten yhdistelmä fysikaalista ja kemiallista mallinmuokkausta, sekä mittaustuloksista tilastollisesti arvioitujen malliparametrien kalibrointia. Nykyisin tämä tapahtuu osin myös koneoppivien mallikomponenttien avulla.

Tästä peruskuvioista seuraa se, että useimmiten isoimmat parannukset mallien toiminnallisuudessa ja ennustetarkkuudessa tapahtuvat erityisesti sen jälkeen, kun jotain uutta, aiempia tuloksia täydentävää mittausdataa on saatavilla mallien jatkokehitystyön tueksi. Hyvänä esimerkkinä tästä toimii juuri nyt ajankohtainen, kesästä 2025 lähtien uudesta geostationäärisestä satelliitista saatava, ajallisesti (tunnin välein) merkittävästi aiempaa kattavampi ilmakehän epäpuhtauspitoisuuksien mittausdata (SENTINEL-4). Tämän uuden tiedon uskotaan auttavan merkittävästi Euroopan laajuisen ilmanlaadun mallinnuksen kehittämisessä useimpien ilmanlaadun kannalta tärkeiden yhdisteiden, kuten typpi-dioksidin, otsonin, rikkidioksidin, formaldehydin ja hiukkas-

Ilmanlaadun mallinnuksen nykytila

Mallikehitys on 70-luvulta tähän päivään asti jatkunut keskeytyksettä, ja alkuvuosien neljän mallikehittäjän ryhmä on Ilmatieteen laitoksella kasvanut noin 30 mallikehittäjän joukoksi. Ilmakehän koostumusta voidaan mallintaa tällä hetkellä joko hyvin tarkalla resoluutiolla (suuruusluokkaa 1 metri) mutta rajoitetulla alueella (sisäilma-, katukuilu-, kaupunki- ja korttelimallinnus) tai karkeammalla resoluutiolla (1–50 km) kaupungin, valtion, maanosan tai maapallon laajuisella mallinnusalueella. Mallinnuskalusto on kuitenkin vielä tällä hetkellä varsin erikoistunutta, eli yksittäistä universaalia mallia, joka integroisi kaikki skaalat ja ymmärtäisi kaikki epäpuhtaudet, ei ole vielä kehitetty.

Korkean resoluution malleilla ei normaalisti pystytty helposti hallitsemaan monimutkaisempia prosesseja kuten epälineaarista kemiaa, aerosoliprosesseja tai laskeumaa. Karkeamman resoluution malleilla nämä kaikki tärkeät prosessit voidaan ottaa huomioon, mutta laajemman skaalan mallit eivät pysty mallintamaan tyydyttävästi esimerkiksi kaupunkien monimutkaista meteorologiaa, koska käytetyt tuulientä ja sääparametrit ovat tyypillisesti parhaimmillaankin

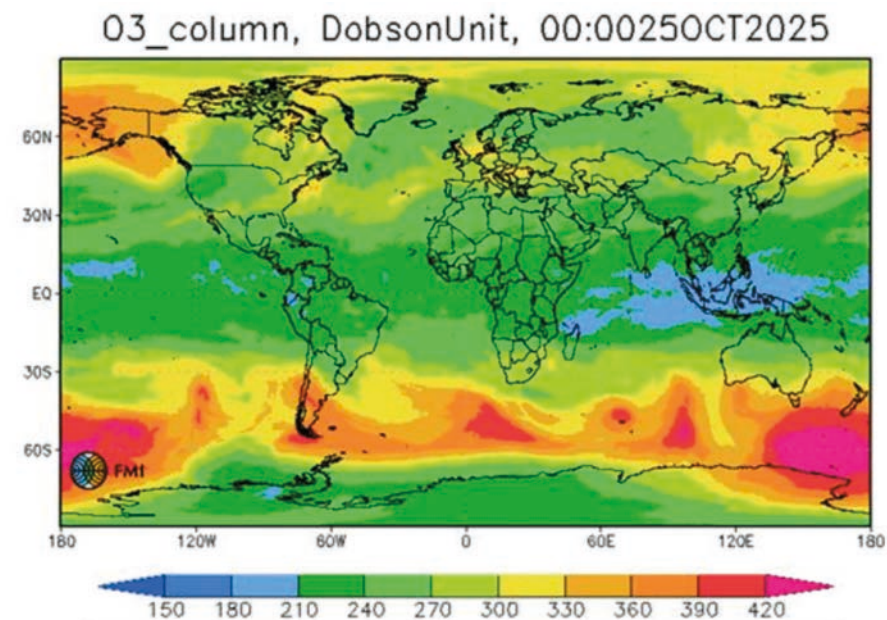
vain noin kilometrin ruutuun keskiarvostettuja kenttiä. Tällä tarkkuudella eivät rakennusten ja muiden esteiden sekä maastonmuotojen ohjaamat virtaukset näy mallissa realistisesti, joten mallinnetuista pitoisuuskentistäkin puuttuu esimerkiksi kaupungeille tyypilliset äärimmäisen voimakkaat pitoisuusgradientit päästölähteiden, kuten liikenneväylien, välittömässä läheisyydessä.

Leviämismallinnuksen lisäksi Ilmatieteen laitoksella on panostettu erityisesti laivaliikenteen päästöjen mallinnuksen kehitykseen (Johansson et al., 2017), koska on arvioitu, että meriliikenteen aiemmin vain karkealla tasolla mallinnetut päästöt nousevat tulevaisuudessa erittäin tärkeäksi päästökäkomponentiksi suhteessa muihin päästölähteisiin. Muilta osin on päästöjen arvioinnissa luotettu kansallisiin (VTT, SYKE) ja eurooppalaisiin (TNO) päästötiedoista vastaaviin tahoihin sekä Copernicus/CAMS-projekteissa (Colette et al., 2025) arvioituihin päästöihin. Päästöjen mallinnus onkin Euroopan osalta jo nykyisin vähintäänkin tyydyttävällä tasolla. Useimmissa Euroopan maissa päästöt tunnetaan hyvällä luotettavuudella ja noin nelikilometrin tarkkuudella kaikille tärkeille päästökäkomponenteille.

Mallinnuksen uusia haasteita

Globaalin mallinnuksen haastavana tavoitteena on rakentaa yhteen integroituun mallisysteemiin kaikki toiminnallisuus, jota globaalin ilmakehän koostumuksen ymmärtäminen ja ennustaminen riittävän tarkassa resoluutiossa vaativat. Mukaan mallinnukseen halutaan myös kasvihuonekaasut. Ilmatieteen laitoksella yli 20 vuoden ajan kehitetty SILAM-FMI-mallisysteemi (kuva 1) pitää jo sisällään perinteisten ilman epäpuhtauksien lisäksi bioaerosolit sekä radioaktiiviset päästöt. Siihen ollaan nyt liittämässä mukaan myös kasvihuonekaasujen päästöjen sekä pitoisuuksien mallintaminen. Uuden ja parempilaatuisen mittaustieteen sekä mikrometeorologisen mallikehityksen (kuva 2) uskotaan myös auttavan mallisysteemiä ymmärtämään yhä paremmin vaikean, esteisen maaston kuten kaupunkialueiden ilmanlaatua, joka on perinteisesti ollut vaikea haaste alueellisen skaalan karkeamman resoluution malleille.

Siitepölyn mallinnuksella on jo pitkät perinteet Ilmatieteen laitoksella (Sofiev et al., 2024). Työtä on jatkettu, ja mallinnusta on kehitetty yhteistyössä eurooppalaisten mallintajien ja



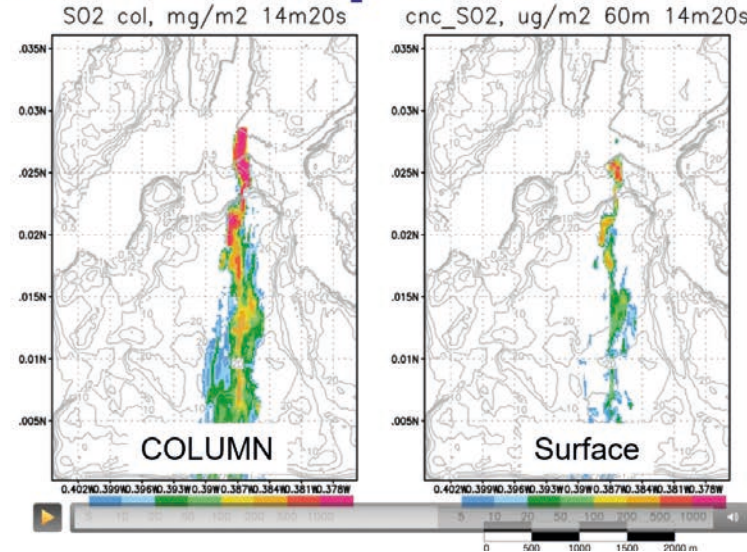
Kuva 1. Silam-mallin ennuste globaalien otsonipitoisuuksien (kokonaispitoisuus ilmapilarissa) jakaumasta.

Deca-meter resolution: Ship in Turku

PALM LES:
202x252x64 of
16mx16mx8m cells
3.2 x 4 km
Turku harbor
Neutral stratification

SILAM:

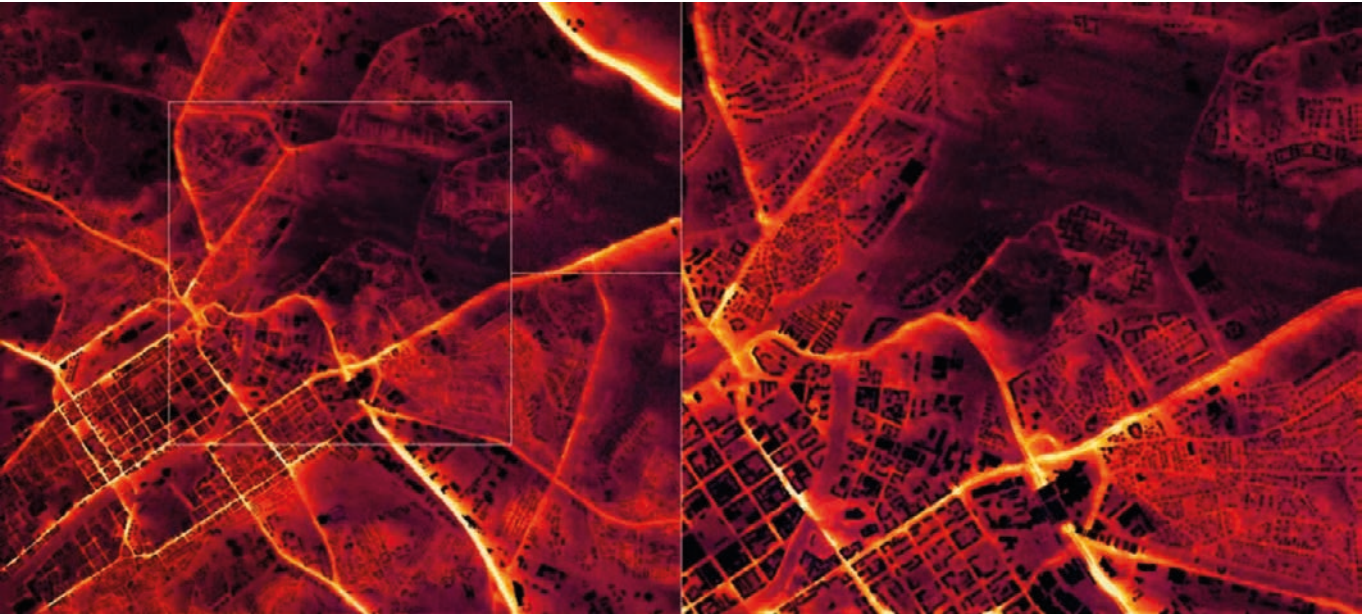
- MS Viking Glory (STEAM)
- SO2 tracer
- Interpolated locations/rates



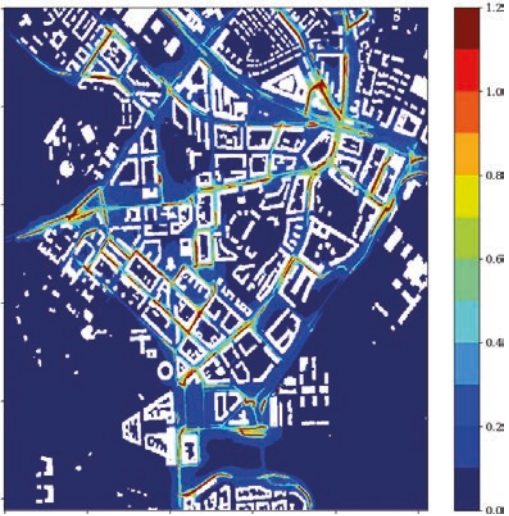
Kuva 2. SILAM-mallinnusta hyvin tarkalla resoluutiolla (16 m). Yksittäisen laivan aiheuttamat pitoisuudet Turun edustalla.

laitevalmistajien sekä mittaajien kanssa tarkentamalla muun muassa päästöarviota ja lisäämällä mallinnukseen uusia allergeisoivia kasvilajeja. Lisäksi bioaerosoleihin liittyvää mittausta- ja analyysitoimintaa on edistetty aktiivisella toiminalla Euroopan automaattiasemaverkon kehittämisessä. Myös täysin uusia analyysimenetelmiä, kuten DNA/RNA-analyysijä (Nanopore), on hyödynnetty mallikehityksessä (Sofiev et al., 2022). Tämän kehitystyön on todettu auttavan merkittävästi mallien jatkokehityksessä, koska bioaerosolipuolella lähteiden ja pitoisuuksien ymmärtäminen on ollut haastavaa mittausten vähyyden ja bioaerosoleille spesifisten analyysimenetelmien puuttumisen takia. Tällä kehityksellä eivät haasteet varmasti jatkossakaan tule loppumaan, koska bioaerosolien lähteiden, leviämisen sekä erityisesti niiden vaikutusten luotettava arviointi on vähintäänkin kertaluokkaa vaikeampaa kuin perinteisten ilmansaasteiden mallinnus.

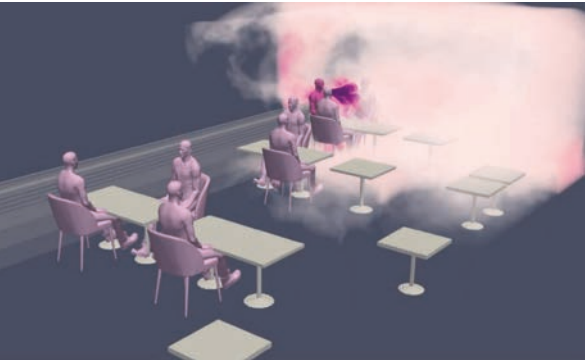
Mittausdatan mahdollisimman tehokasta käyttöä mallinnuksen tukena halutaan kehittää. Esimerkiksi meteorologiasa data-assimilaatio on ollut oleellinen osa säämallinnusta jo kymmenien vuosien ajan. Ilmanlaatualueella keskeinen rajoittava tekijä on aiemmin ollut mittausdatan puute: tehokasta data-assimilaatiota ja datafuusioita ei voi tehdä ilman tiheää ja luotettavaa mittausverkostoa. Kaupunkien tihenevät ja entistä laadukkaammat mittaukset sekä uusi satelliittidata ovat tehneet sekä datafuusio- ja data-assimilaatiomenetelmistä myös ilmanlaadun mallinnuksen puolella yhden tärkeimmistä uusista kehityskohteista. Käytännön esimerkkinä jatkuvasta kehitystyöstä datafuusion hyödyntämiseksi toimii FMI-EnFuser (Johansson et al, 2022), joka on jo yli viiden vuoden ajan tuottanut pääkaupunkiseudulle hyvin tarkalla resoluutiolla ilmanlaadun tilanekuvaa ja ennusteita yhteistyössä HSY:n kanssa (kuva 3).



Kuva 3. EnFuser-mallien ennustamia pitoisuuskenttiä pääkaupunkiseudun alueella.



Kuva 4. LES-PALM mallinnusta. Ulkoilmapitoisuuksien mallinnusta Helsingin kantakaupungissa sekä sisäilmamallinnusta ravintolatilassa



Myös mikroskaalan mallinnustyötä halutaan kehittää. Mikroskaalan mallinnuksella tarkoitetaan ilmanlaadun yhteydessä pääsääntöisesti meteorologisesti hyvin tarkkaa virtausmallinnusta, jonka tuloksia voidaan tarjota leviämismallien lähtötiedoiksi siten, että epäpuhtauksien kulkeutuminen myös vaikeassa ja esteisessä ympäristössä tai jopa sisätiloissa (Auvinen et al., 2025) saadaan realistisesti ja mahdollisimman oikein kuvattua. Tällä mallinnuksella on ollut aina tilausta puhtaasti meteorologisellakin puolella (kuten tuulivoima, rakenteiden kestävyysanalyysit, lentokenttien turbulenssi), mutta sen merkitys myös ilmanlaadun mallinnuksen kehittämiseksi on suuri, sillä se mahdollistaa fysikaalisesti realistisemman ja luotettavamman kaupunkien ilmanlaadun mallinnuksen (Keskinen et al, 2025) ja myös sisätilamallinnuksen (kuva 4).

Yhteenveto
Ilmanlaadun mallinnuksella Suomessa ja Euroopassa on jo yli 50 vuoden historia takanaan. Tällä hetkellä pystytään kohtuullisen luotettavasti arvioimaan perinteisten säänneltyjen ilman epäpuhtauksien päästöjä ja pitoisuuksia ja jopa ennustamaan pitoisuuksien kehittymistä yhdestä kahteen päivää eteenpäin. Kehitystarpeita on silti valtavasti. Lopullisena tavoitteena on kehittää integroitu mallisysteemi, joka kuvaa luotettavasti ja riittävällä tarkkuudella kaikkien terveyden kannalta merkittävien ilman epäpuhtauksien, taudinaiheuttajien sekä kasvihuonekaasujen pitoisuudet. Tämä on realistinen tavoite, mutta se vaatii vielä usean eri mallikomponentin jatkokehitystä sekä nykyistä selvästi tehokkaampaa mittausdatan reaaliaikaista hyödyntämistä mallinnuksessa. ■

Lähteet:

Auvinen, M., Izbassarov, D., Grönholm, T., Kuula, J., Asmi, E., Hellsten, A., 2025: Quantitative validation in indoor dispersion modeling: Comparing large-eddy simulation results with experimental measurements. *Physics of Fluids* 37, 085107, DOI:10.1063/5.0276393

Colette, A., Collin, G., Besson, F., Blot, E. et al., 2025: Copernicus Atmosphere Monitoring Service – Regional Air Quality Production System v1.0, *Geosci. Model Dev.*, 18, 6835–6883, <https://doi.org/10.5194/gmd-18-6835-2025>.

Johansson, L., Jalkanen, J.-P., Kukkonen, J., 2017: Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution, *Atmospheric Environment*, 167 (2017) 403–415.

Johansson, L., Karppinen, A., Kurppa, M., Kousa, A., Niemi, J. V., Kukkonen, J., 2022: An operational urban air quality model ENFUSER, based on dispersion modelling and data assimilation. *Environmental*

Modelling & Software, Vol. 156, October 2022, 105460 (19 pp.). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105460>.

Keskinen, J.-P., and Hellsten, A., 2025. Ensembles in Urban Large Eddy Simulations with Changing Wind Direction, *Boundary-Layer Meteorology* 191, 26, <https://doi.org/10.1007/s10546-025-00916-x>

Sofiev, M., Sofieva, S., Palamarchuk, J., Šaulienė, I., Kadantsev, E., Atanasova, N., Fatahi, J., Kouznetsov, R., Kuula, J., Noreikaite, A., Peltonen, M., Pihlajamäki, T., Saarto, A., Svirskaitė, J., Toivainen, L., Tyuryakov, S., Sukienė, L., Asmi, E., Bamford, D., Hyvärinen, A.-P., Karppinen, A., 2022: Bioaerosols in the atmosphere at two sites in Northern Europe in spring 2021: outline of an experimental campaign, *Environmental Research*, 214 (2022) 113798, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113798>

Sofiev, M., Palamarchuk, J., Kouznetsov, R. et al., 2024: European pollen reanalysis, 1980–2022, for alder, birch, and olive. *Sci Data* 11, 1082 <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03686-2>



KUVA: MAIJU LINKOSALMI

Kuva 1. Ilmatieteen laitoksen mikrometeorologinen kasvihuonekaasujen mittausasema HSY:n Ämmässuon ekoteollisuuskeskuksen jätteen loppusijoitusalueella. Maston päässä oleva anemometri mittaa turbulenttisia tuulikomponentteja. Samanaikaisesti ilmaa imetään näyteletkua pitkin kopin sisällä olevaan kaasuanalysaattoriin.

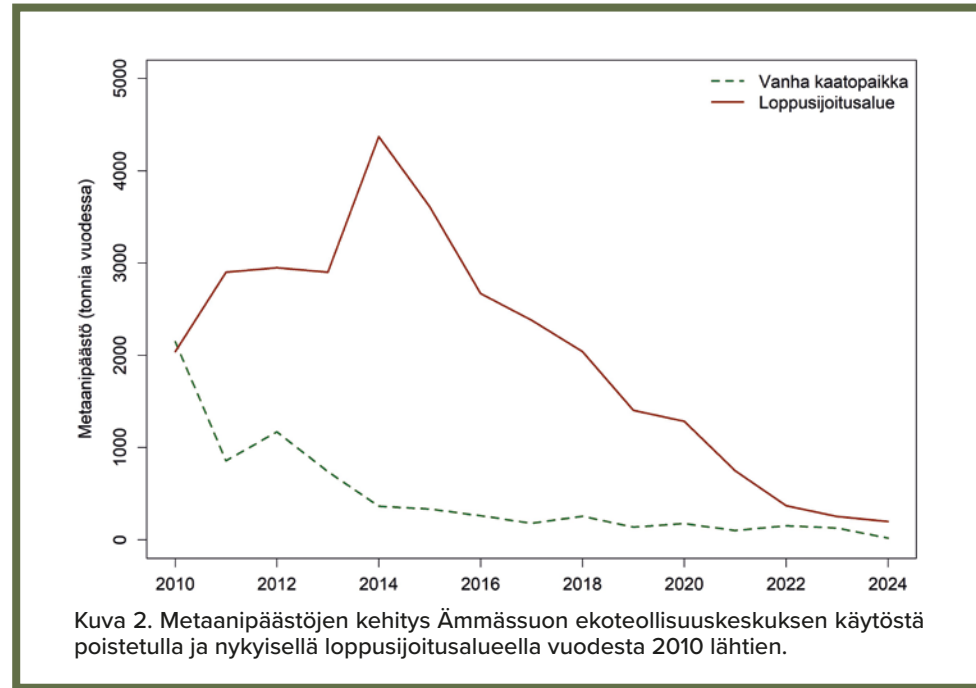
Kasvihuonekaasujen PÄÄSTÖMITTAUKSET KAATOPAIKOILLA

Ihmisen toiminnan seurauksena ilmakehässä lisääntyneet kasvihuonekaasut voimistavat ilmastonmuutosta. Kaatopaikat ovat yhä keskeisiä päästölähteitä, vaikka jätesektorin päästöt ovat laskeneet 63 prosentilla vuodesta 1990 lainsäädännön myötä. Metaania ja hiilidioksidia sisältävää kaatopaikkakaasua syntyy jatkuvasti suljettujenkin jätepenkkojen sisällä ja vapautuu ilmakehään. Ilmatieteen laitoksen Kasvihuonekaasut-ryhmä mittaa kaatopaikkapenkkojen metaani- ja hiilidioksidipäästöjä mikrometeorologisella pyörrekovarianssi-menetelmällä.

Maiju Linkosalmi, tutkija, Ilmatieteen laitos

Kasvihuonekaasut, kuten vesihöyry (H_2O), hiilidioksidi (CO_2) ja metaani (CH_4), sitovat lämpöä ilmakehässä, ja siten niillä on ilmakehää lämmittävä vaikutus. Kasvihuonekaasuja syntyy luonnollisissa prosesseissa ja niiden aiheuttama kasvihuoneilmiö on ollut elämän

kehityksen ehto maapallolla, mutta ihmistoiminnan, kuten fossiilisten polttoaineiden käytön ja maankäytön muutosten, seurauksena kasvihuonekaasujen pitoisuudet ilmakehässä ovat nousseet teollistumisen jälkeen. Tämä on entisestään voimistanut kasvihuoneilmiötä ja johtanut ilmastonmuutokseen, joka uhkaa muun muassa luonnon monimuotoisuutta ja ihmisten elinoloja (IPCC 2023).



Kuva 2. Metaanipäästöjen kehitys Ämmässuon ekoteollisuuskeskuksen käytöstä poistetulla ja nykyisellä loppusijoitusalueella vuodesta 2010 lähtien.

Hiilidioksidi on kasvihuonekaasuista merkittävin ja sitä syntyy luonnollisten prosessin lisäksi esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Metaani on hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu ja sen lämmityspotentiaali on sadan vuoden ajanjaksolla hiilidioksidiin verrattuna noin 30-kertainen eli se sitoo lämpösäteilyä tehokkaammin kuin hiilidioksidi (Forster et al. 2021). Metaania syntyy orgaanisen aineksen hajotessa hapettomissa olosuhteissa. Metaanin määrä ilmakehässä on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin hiilidioksidin ja sen elinikä ilmakehässä on lyhyt (noin 10 vuotta).

Jätesektorin osuus koko Suomen kasvihuonekaasupäästöistä oli noin neljä prosenttia Tilastokeskuksen vuoden 2024 pikaennakkotiedon mukaan, ja kunnallisen jätehuollon päästöjen osuus oli tästä noin 80 prosenttia. Kaatopaikkojen metaanipäästöt olivat samana vuonna noin 30 prosenttia kaikista Suomen ihmisperäisistä metaanipäästöistä. (Tilastokeskus, 2025.)

Jätesektorin päästöistä suurin osa tulee siis kaatopaikoilta, mikä kattaa yhdyskuntajätteiden, yhdyskuntien lietteiden, rakennus- ja purkujätteiden sekä teollisuuden jätteiden ja lietteiden kaatopaikkasijoituksen päästöt. Lisäksi orgaanisten jätteiden kompostoinnissa vapautuu metaania ilmakehään. Kasvihuonekaasuja syntyy myös välillisesti jätekuljetuksista ja jätteiden käsittelystä.

Jätesektorin päästöt ovat vähentyneet noin 65 prosentilla vuodesta 1990 (Tilastokeskus, 2021). Tähän kehitykseen ovat suuresti vaikuttaneet jätelain uudistus vuonna 1994 ja myöhemmin EU:n kaatopaikkadirektiivin edellyttämät toimet. Vuonna 2013 voimaan tulleen Valtioneuvoston asetuksen kaatopaikoista (331/2013) perusteella orgaanista jätettä ei ole saanut enää loppusijoittaa vuoden 2016 jälkeen, mikä on johtanut kaatopaikkakaasun tuoton vähenemiseen loppusijoitusalueilla. Jätteitä lajitellaan nykyisin ahkerammin ja hyödynnetään energian tuotannossa, joten loppusijoitettavan jätteen määrä on yleisesti vähentynyt.

Yksi ihmisperäinen metaanin lähde ilmakehään ovat siis kaatopaikkojen jätteen loppusijoitusalueet, joissa kaatopaikkakaasua muodostuu orgaanisen jätteen hajotessa hapettomissa olosuhteissa ja sitä vapautuu maanpinnan läpi ilmakehään. Kaatopaikkakaasu koostuu pääasiassa metaanista ja hiilidioksidista. Huolimatta orgaanisen aineksen sijoituskiellosta, kaatopaikkakaasun muodostuminen jatkuu vielä vuosikymmeniä myös jo käytöstä poistetuilla kaatopaikoilla, kun vanha jäte hajoo hapettomissa olosuhteissa jätepenkan

sisällä. Monissa jätekeskuksissa kaatopaikkakaasua kerätään jätepenkan sisältä ja hyödynnetään esimerkiksi biokaasun jalostuksessa sekä sähkön tai lämmön tuotannossa. Kaatopaikkakaasun talteenoton ansiosta kasvihuonekaasuja pääsee vapautumaan vähemmän maanpinnan läpi ilmakehään.

Jätesektorin loppusijoitusalueiden kasvihuonekaasupäästöjen arviointiin on erittäin haastavaa löytää soveltuvaa jatkuvatoimista mittausmenetelmää. Ilmatieteen laitoksen Ilmastojärjestelmätutkimuksen yksikön Kasvihuonekaasut-ryhmä on soveltanut mikrometeorologista pyörrekovarianssi-menetelmää jätteenkäsittelylaitosten loppusijoitusalueiden metaani- ja hiilidioksidipäästöjen arviointiin (kuva 1). Menetelmän avulla pystytään tuottamaan jatkuvaa aikasarjaa maanpinnan ja ilmakehän välisestä kaasunvaihdosta häiritsemättä mittauskohdetta. Pyörrekovarianssi perustuu tuulen pyörteiden ja kaasupitoisuuden nopeaan havainnointiin (Foken et al. 2012). Menetelmässä mitataan ylöspäin ja alaspäin meneviä tuulen pyörteitä samanaikaisesti tutkittavan kaasun, kuten hiilidioksidin tai metaanin, pitoisuuden kanssa.

Kasvihuonekaasut-ryhmän käyttämissä laitteissa mittaustaajuus on suuri, 10 Hz, mikä takaa pienienkin pyörteiden tarkan havaitsemisen. Kun ylöspäin menevien pyörteiden kaasupitoisuus on keskimäärin isompi kuin alaspäin menevien pyörteiden, kaasun virta on pois pinnasta, eli maanpinta on päästölähde ilmakehään. Vastaavasti esimerkiksi kasvillisuuden hiilidioksidinielun voi havaita maanpinnasta ylöspäin kulkevien pyörteiden pienempinä hiilidioksidipitoisuuksina kuin alaspäin menevien pyörteiden pitoisuus. Lähdealueen suunta vaihtelee kunakin ajanhetkenä vallitsevan tuulensuunnan mukaan. Lähdealueen kokoon vaikuttaa muun muassa tuulen nopeus, mittauskorkeus ja pinnan rosoisuus. Jatkuvatoimisilla mittauksilla saadaan kattavasti tietoa mitattavan alueen eri osista.

Mittausten perusteella on mahdollista arvioida mitattavan alueen, kuten kaatopaikan, metaanin ja hiilidioksidin päästöt ilmakehään. Usein mittaus tuloksissa voidaan myös havaita esimerkiksi kaasunkeräyksessä tapahtuneet katkot suurempina päästöinä tai rakenneurakoista aiheutuneet kohonneet päästöt. Mittaus tuloksia on mahdollista myös yhdistää kaatopaikkapenkalta kerättävän kaatopaikkakaasun keräystietoihin ja näistä voidaan arvioida alueen metaanin kokonaistuotto (mitattu päästö summattuna kerätyn kaasun määrään) sekä kaasunkeräysjärjestelmän tehokkuus.

Päästömittauksia on toteutettu useissa eri jätekeskuk-
sissa useiden vuosien ajan jo käytöstä poistetuilla kaato-
paikoilla ja vielä käytössä olevilla loppusijoitusalueilla.
Ilmatieteen laitoksen pitkäaikainen mittauskohde on
ollut HSY:n Ämmäsuon ekoteollisuuskeskus, missä mit-
tauksia on tehty vuodesta 2003 lähtien. Toinen mittaus-
piste sijaitsee vanhalla kaatopaikalla, jolle ei ole sijoitettu
jätteitä vuoden 2006 jälkeen ja joka on tällä hetkellä jälki-
hoitovaiheessa. Vuodesta 2007 lähtien kasvihuonekaasu-
päästöjä on mitattu myös yhä käytössä olevalla loppusi-
joitusalueella (kuva 1), jonne loppusijoitetaan nykyään
enää vain vähän jätteitä, kuten erilaista rakennusjätettä,
esimerkiksi asbestia tai betonia. Ilmatieteen laitoksen
mittausten perusteella metaanipäästöt ovat laskeneet
voimakkaasti vuodesta 2010 lähtien näillä Ämmäsuon
ekoteollisuuskeskuksen kahdella mittauspaikalla (kuva
2). Yhä käytössä olevan loppusijoitusalueen päästöt olivat
huipussaan 2014, jonka jälkeen päästöt laskivat tasais-
sti noin 500 tonnia metaanikaasua vuodessa tasaantuen
viime vuosina. Vanhalla kaatopaikalla päästöt ovat las-
keneet tasaisesti jätteen loppusijoituksen päätyttyä. Tä-
hän päästöjen laskuun ovat kaikella todennäköisyydellä
vaikuttaneet orgaanisen jätteen kaatopaikkasijoittamisen
kielto (2016) sekä Vantaan Energia Oy: jätevoimalan käyt-
töönotto (2014), minkä jälkeen sekajätettä ei ole enää lop-
pusijoitettu Ämmäsuolle. Lisäksi kaasunkeräysjärjestel-
män ja pintarakenteiden parannukset sekä yleisesti kaa-
topaikkakaasun tuoton väheneminen jätepenkan sisällä
ajan myötä vähentävät päästöjä ilmakehään. ■

Lähteet:

Foken, T., Leuning, R., Oncley, S. R., Mauder, M., &
Aubinet, M. (2012). The eddy covariance method. In M.
Aubinet, T. Vesala, & D. Papale (Eds.), *Eddy Covariance:
a practical guide to measurement and data analysis*
(pp. 1–19). Springer Atmospheric Sciences.

Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L.
et al. 2021: The Earth's Energy Budget, Climate
Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change
2021: The Physical Science Basis. Contribution of
Working Group I to the Sixth Assessment Report of
the Intergovernmental Panel on Climate Change*
[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, et al. (eds.)].
Cambridge University Press, Cambridge, United
Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054,
doi:10.1017/9781009157896.009.

IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report.
Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth
Assessment Report of the Intergovernmental Panel
on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J.
Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115,
doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Tilastokeskus, 2021: Suomen kasvihuonekaasupäästöt
1990–2020. ISBN 978-952-244-671-8, <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-244-671-8>

Tilastokeskus, 2025: Kasvihuonekaasupäästöt
[verkkajulkaisu]. Viimeisin päivitys: 22.5.2025.
Helsinki. [Viitattu: 23.9.2025]. Saantitapa: <https://stat.fi/indikaattori/kasvihuonekaasupaaastot>



KUVA: SHUTTERSTOCK

PUUNPOLTON PÄÄSTÖJEN vaikutus pientaloalueiden ilmanlaatuun

Kotitalouksien puunpoltto aiheuttaa merkittävän osan pienhiukkaspäästöistä Suomessa ja voi vaikuttaa merkittävästikin kaupunkien pientaloalueiden ilmanlaatuun. Päästöt syntyvät asuinalueilla, ja vaikuttavat siten monien hengitysilmaan. Puunpolton päästöihin ja savuhaittoihin voi kuitenkin vaikuttaa muun muassa hyvillä puunpolttotavoilla.

Nelli Kaski, ilmansuojeluasiantuntija, Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY

Koko Suomen pienhiukkaspäästöistä tulee noin puolet kotitalouksien puunpoltosta. Ennusteen mukaan puunpolton päästöt myös vähenevät hitaasti (Kansallinen ilmansuojeluohjelma), joten puunpoltto säilyy ilmanlaatuhaasteena tulevaisuudessakin. Verrattuna esimerkiksi tieliikenteen pakokaasujen pienhiukkaspäästöihin, puunpolton pienhiukkaspäästöt ovat koko Suomen tasolla moninkertaiset ja pääkaupunkiseudullakin lähes kaksinkertaiset.

Puunpoltolla voi olla suuri merkitys pientaloalueiden ilmanlaatuun, varsinkin tiheästi rakennetuilla alueilla. Yksikin pientalo voi olla suuri päästölähde muuten vähäpäästöisellä pientaloalueella. Puunpolton päästöillä on ihmisten terveydelle merkittävä vaikutus, koska päästöt syntyvät

asuinalueilla ja pääsevät lähialueen hengitysilmaan. Tulisijojen käyttö keskittyy niihin aikoihin, jolloin ihmiset ovat kotonaan tai pihallaan ja altistuvat siten päästöille.

Puunpoltossa muodostuu pienhiukkasia (PM_{2,5}), häkää (CO), haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC), polysyklisiä aromaattisia hiiliyhdisteitä (PAH), mustaa hiiltä (BC) ja muita terveydelle haitallisia ainesosia. Etenkin huonossa palamisessa vapautuu syöpävaarallisia hiukkasia, mustaa hiiltä sekä hengitysteitä ja silmiä ärsyttäviä yhdisteitä. Haitallisia päästöjä syntyy erityisesti, jos poltetaan jätteitä tai märkää puuta. Huonon polton päästöt ovat moninkertaiset verrattuna taitavaan kuivan puun polttoon hyvässä tulisijassa. Puunpolton päästöihin vaikuttaa puunpolttomäärät, polttopuun laatu, tulisijan tyyppi ja ikä, sekä puunpolttotavat.

Dekati®

Oxidation Flow Reactor DOFR™



DEKATI® Oxidation Flow Reactor
DOFR™

- Helppokäyttöinen läpivirtauskammio aerosolien ikäännyttämiseen
- Simuloi sekundääristen aerosolien muodostumisen alle minuutissa
- Erittäin pienet hiukcashäviöt

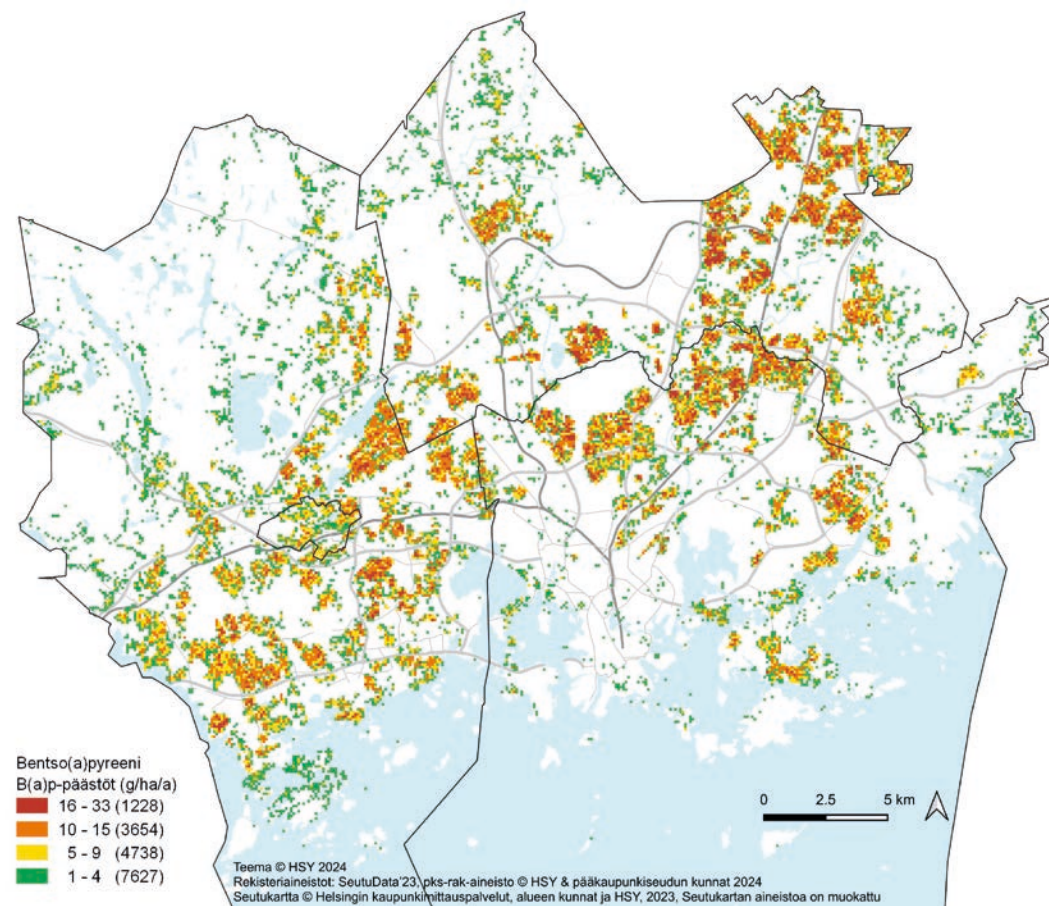
Lue lisää
DOFR™:



► Dekati Oy on maailman johtava pienhiukkasmittalaitteiden kehittäjä ja valmistaja. Kaikki Dekatin tuotteet suunnitellaan ja valmistetaan Suomessa, ja ne ovat saatavilla jopa viiden vuoden takuulla.



Excellence in particle measurement



Kuva 1. Puunpolton bentso(a)pyreenipäästöt kartalla 100x100 metrin ruuduilla. Selitteessä on suluissa kyseisten ruutujen määrä kartalla (HSY).

Mittausten perusteella uusi raja-arvo saattaa ylittyä

Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY seuraa pääkaupunkiseudun ja muun Uudenmaan ilmanlaatua. Pääkaupunkiseudun ilmanlaatuun vaikuttavat eniten liikenteen pakokaasut, katupöly sekä puunpolton päästöt. HSY on mitannut jo pitkään useilla eri pientaloalueilla muun muassa bentso(a)pyreenin (BaP) pitoisuuksia. Näistä mittauksista huomataan, että pitoisuuksissa on paljon vaihtelua eri pientaloalueiden ja myös eri vuosien välillä. Useiden muiden ilmansaasteiden kohdalla pitoisuudet ovat laskeneet aiempiin vuosiin verrattuna. Esimerkiksi tieliikenteen pakokaasuista johtuvan typpidioksidin päästöt ovat vähentyneet, mutta puunpoltoasta tulevan BaP:n osalta pitoisuuksissa ei näy kovin selvää laskua.

Myös muualla Suomessa on tehty jonkin verran BaP-mittauksia. Mittauksia on kuitenkin niukasti koko Suomen alueella. Mitatut pitoisuudet ovat olleet yleensä alle uuden vuosisirajan (1,0 ng/m³), joka tulee voimaan ensi vuonna. Pitoisuuksien tulee olla uuden raja-arvon alapuolella viimeistään vuonna 2030. Vuosina 2026–2029 pitoisuuksia verrataan uuteen vuosisirajaan ja jos se ylittyy, tulee kunnalle velvoite tehdä ilmanlaadun etenemissuunnitelma. On olemassa riski, että BaP:n uusi vuosisiraja-arvo ylittyy joillain pientaloalueilla. Täten puunpolton päästöihin kannattaa kiinnittää huomiota ja pyrkiä vähentämään niitä.

HSY on mitannut myös mustan hiilen pitoisuuksia sekä liikenneympäristöissä että pientaloalueilla. Liikenneympäristöissä mustahiilipitoisuudet ovat laskeneet nopeasti pakokaasujen päästösääntelyn vuoksi. Pientaloalueilla samanaista laskua pitoisuuksissa ei ole ollut, joten pientaloalueilla mustan hiilen vuosipitoisuudet ovatkin nykyään samalla tasolla kuin vilkasliikenteisillä alueilla. Etenkin talvi-iltaisin pientaloalueilla mitataan korkeita puunpolton päästöistä aiheutuvia mustan hiilen pitoisuuksia.

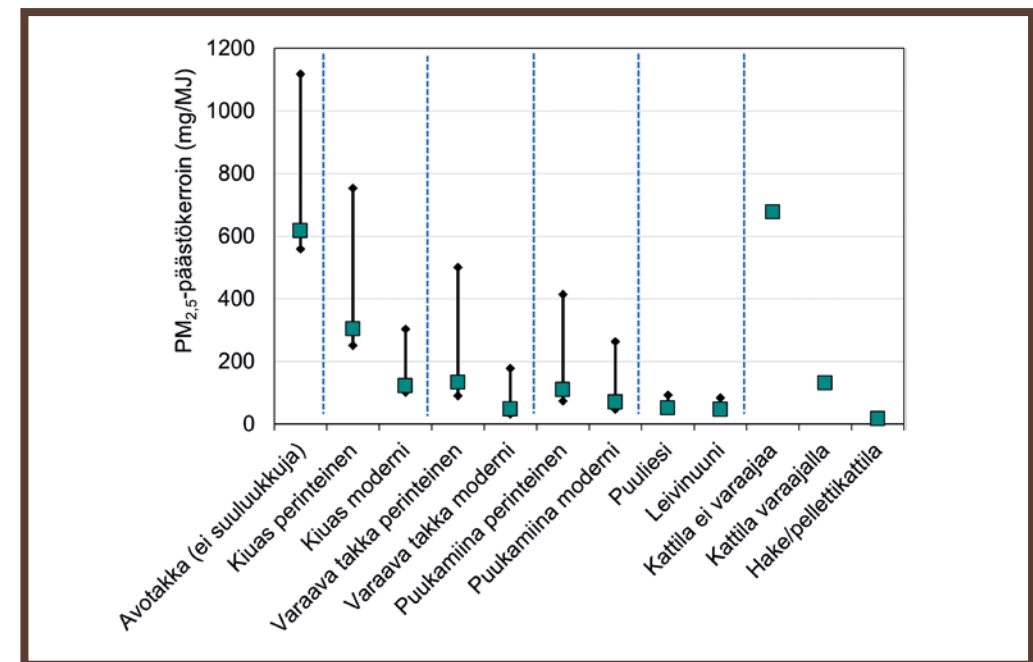
Pientaloalueiden ilmanlaadun seurannan lisäksi HSY tekee säännöllisesti pientalojen puunpolton päästöarvion. Päästöarvio perustuu pientaloasukkaille lähetettyyn puunkäyttökyselyyn. Viimeisin kysely ja päästöarvio on vuodelta 2023.

Päästöt vaihtelevat myös pientaloalueen iän mukaan

Pääasiallista puulämmitystä on pääkaupunkiseudulla vain vähän, mutta hieman yli 70 prosentissa pääkaupunkiseudun pientaloista poltetaan kuitenkin puuta. HSY:n puunpolton päästöarviossa laskettiin puunpolton päästöt 100x100 metrin ruuduille pääkaupunkiseudulla (kuva 1). Kaikkein suuripäästöisimmät paikat sijaitsevat tyypillisesti kaukolämpöverkon ulkopuolella olevilla tiiviisti rakennetuilla pientaloalueilla, joiden



KUVA: TERO PAJUKALLIO / HSY



Kuva 2. Pienhiukkasten päästökertoimia erilaisille tulisijatyypeille (Suomen ympäristökeskus). Mustat hajontajanat kuvaavat normaalin ja huonon palamisen päästöjä. Neliöt kuvaavat päästökertoimia, joissa on huomioitu huonon ja normaalin palamisen osuudet. (HSY:n puunpolton päästöarvio 2023.)

rakennus- ja tulisijakanta on vanhaa. Pääkaupunkiseudun pientalomäärä on kasvanut ja pientaloalueet ovat tiivistyneet. Pientalojen määrä pääkaupunkiseudulla on kasvanut noin 10 prosenttia kymmenen vuoden aikana.

Uudemmissa, eli vuosina 2010–2023 rakennetuissa pientaloissa poltetaan keskimäärin lähes puolet vähemmän puuta kuin vanhemmissa taloissa. Uusien pientalojen kohdalla myös puuta käyttävien talojen osuus on pienempi kuin vanhempien pientalojen kohdalla. Lisäksi uusissa taloissa on harvoin puukiukaita ja kiukaissa poltetun puun määrä on selvästi pienempi kuin vanhemmissa taloissa. Tämä vaikuttaa päästöihin, koska puukiukaat ovat yleisesti suurempipäästöisiä kuin muut tulisijat. Vaikka uudemmissa pientaloissa poltetaan vähemmän puuta, uudet alueet ovat usein hyvin tiheästi rakennettuja, ja päästöjä tai savuhaittoja voi siten kuitenkin muodostua.

Päästömäärien lisäksi myös paikalliset olosuhteet vaikuttavat merkittävästi siihen, kuinka paljon puunpolton savut heikentävät ilmanlaatua eri alueilla. Esimerkiksi meren ja isojen

järvien lähellä tuulettavuus on parempaa, ja siten päästöt laimenevat paremmin eivätkä heikennä niin paljon alueen ilmanlaatua. Päästökartasta ei myöskään luonnollisesti käy ilmi se, että yksittäisistä poikkeuksellisen suuripäästöisistä taloista voi aiheutua lähiympäristöön tavallista korkeampia savupitoisuuksia sekä vanhoilla että uusilla alueilla. Myös talojen sijainti toisiinsa nähden vaikuttaa savuhaittojen riskiin. Esimerkiksi uusilla pientaloalueilla talot ovat yleensä pienillä tonteilla lähellä toisiaan, minkä vuoksi riski savujen kulkeutumiseen sisäilmaan koneellisen ilmanvaihdon kautta voi kasvaa varsinkin rinnetonteilla.

Uudemmat tulisijat ovat yleensä vähäpäästöisempiä

Puunpoltoasta aiheutuvat päästöt vaihtelevat paljon eri tulisijatyypeissä (kuva 2). Esimerkiksi avotakoissa palamisolot ovat huonot ja päästöt suuret verrattuna moderniin varaavaan takkaan. Monilla tulisijatyypeillä moderni uudemmanmallinen tulisija on vähäpäästöisempi kuin perinteinen. Myös puunpolttotavoilla on suuri merkitys. Jos polttaa esimerkiksi roskia tai latoo tulisijan liian täyteen puita, päästöt ovat moninkertaiset parempiin puunpolttotapoihin verrattuna.

Pääkaupunkiseudun pientaloissa käytettävästä polttopuusta puolet poltetaan varaavissa takkoissa ja 20 prosenttia saunan kiukaissa. Täten näiden tulisijojen osuus on myös päästöistä suuri (70–80 %). Saunan kiukaat ovat suuripäästöisiä tulisijoja, ja niiden osuus pääkaupunkiseudun puunpolton päästöistä on merkittävä. Koko pääkaupunkiseudun puunpolton bentso(a)pyreenin (BaP) päästöistä lähes 50 prosenttia tulee saunan kiukaista. Kiukaissa palaminen on huonompaa kuin takkoissa, mikä lisää kiukaiden päästöosuutta.

Puunpolton päästöt vähenevät hitaasti

Vaikka pientalojen määrä pääkaupunkiseudulla on kasvanut voimakkaasti, polttopuun kokonaiskäyttömäärä on hieman vähentynyt. Koska puunkäyttömäärä on vähentynyt ja tulisijakanta on uudistunut, myös puunpolton päästöt ovat vähentyneet hieman. Nykyään pääkaupunkiseudulla on noin 75 000 pientaloa, ja niissä poltetaan noin 81 000 kiinto-m³ puuta vuodessa. Kymmenen vuotta sitten poltetun puun määrä oli noin 87 000 kiinto-m³.



Tietoa pienhiukkasista, bentso(a)pyreenistä ja mustasta hiilestä

- Pienhiukkasia ($PM_{2.5}$) syntyy pääasiassa liikenteen ja puunpolton päästöistä. Lisäksi niitä kulkeutuu pääkaupunkiseudulle maan rajojen ulkopuolelta. Pienhiukkasia pidetään erityisen haitallisina terveydelle, sillä ne pääsevät tunkeutumaan keuhkojen ääreisosiin saakka. Herkimpiä ilmansaasteiden terveyshaittoille ovat pienet lapset, iäkkäät sekä hengitys- ja sydänsairaat.
- PAH-yhdisteitä, joihin bentso(a)pyreeni (BaP) kuuluu, syntyy epätäydellisessä palamisessa. Kohonneita bentso(a)pyreenin pitoisuuksia esiintyy erityisesti asuinalueilla, joilla on paljon talokohtaista puulämmitystä. Liikenteen päästöjen vaikutus PAH-pitoisuuksiin on vähäinen. Bentso(a)pyreeni ja monet muut PAH-yhdisteet lisäävät syöpäriskiä.
- Mustaa hiiltä (BC) eli nokea vapautuu ilmaan epätäydellisestä palamisesta. Tärkeimmät päästölähteet pääkaupunkiseudulla ovat puunpoltto tulisijoissa, autojen pakokaasut, laivaliikenne ja kaukokulkeuma. Palamisessa ilmaan vapautuvien nokihiukkasten pinnoille on kiinnittynyt terveydelle haitallisia PAH-yhdisteitä, muita orgaanisia yhdisteitä ja metalleja.

Viime vuosina puunpolton päästöarviointi on kuitenkin kehittynyt ja päästökertoimet ovat uudistuneet. Tämän vuoksi päästöjä ei kannata verrata kymmenen vuoden takaisiin päästöihin. Sen sijaan viiden vuoden takaiseen tilanteeseen verrattuna pääkaupunkiseudun puunpolton pienhiukkaspäästöt ovat vähentyneet 124 tonnista 105 tonniin ja mustahiilipäästöt 40 tonnista 33 tonniin. Bentso(a)pyreenin päästöt ovat pienentyneet 211 kilogrammasta 117 kilogrammaan. Bentso(a)pyreenin päästöjen arvioinnissa on saatu uutta tietoa päästökertoimista, ja esimerkiksi saunan kiukaiden päästökerroin on pienentynyt huomattavasti.

HSY:n puunkäyttökyselyn mukaan suurimmalla osalla vastaajista puunkäyttö pysyy samana lähivuosien aikana. Puunkäyttöön vaikuttaa myös talvien kylmyys sekä polttopuun ja sähkön hinta tulevaisuudessa. Aiempaan kyselyyn verrattuna puuta käyttävien osuus on hieman laskenut. Uudet pientalot ovat energiatehokkaita, ja siten lisälämmityksen tarve puulla on niissä vähäisempää. Lisäksi puukiukaita on uudemmissa pientaloissa vähemmän ja tulisijat ovat uudempia. Nämä kaikki vähentävät puunpolton päästöjä tulevaisuudessa. Pientalojen määrän kasvaessa pientaloalueet kuitenkin tiivistyvät. Eli vaikka päästöt vähenisivätkin, on muistettava, että savuhaittojen riski tiheästi asutuilla pientaloalueilla voi kasvaa.

Puhtaammista puunpoltto tavoista tiedotetaan

Viestintä ja koulutus vähäpäästöisemmistä puunpoltto tavoista on tärkeää. Esimerkiksi sillä miten saunan kiuastaan käyttää, voi olla jopa kuusinkertainen ero pienhiukkaspäästöihin. HSY on viestinyt paremmista puunpoltto tavoista jo

2000-luvun alusta saakka. Toimenpiteitä päästöjen vähentämiseksi ja ilmanlaadun parantamiseksi on ollut seudun kuntien ilmansuojeluohjelmissa ja -suunnitelmissa. Viestintää on tuettu Urbaani puuvaja-, Kiuas- ja Kuivaa asiaa -hankkeilla, joiden kautta tuotettu viestintämateriaali on kaikkien käytettävissä kolmella kielellä osoitteessa poltapuhtaasti.fi.

Puunpoltto tulee myös huomioida tiivistyvän kaupunkirakenteen suunnittelussa ja asuntojen ilmanottoratkaisuisa. Kuitenkaan puunpolton päästöt eivät ole vain tiiviiden kaupunkialueiden ongelma. Kaikkien kannattaa opetella vähäpäästöiset puunpolttotavat. Tiiviillä kaupunkialueilla suurista puunpolton päästöistä kärsii useampi ja haitat ovat siten näkyvämpiä. Mutta vaikka naapureita ei olisi lähellä,kin voi vaikuttaa omaan ja läheistensä terveyteen polttamalla puuta mahdollisimman puhtaasti. ■

Lähteet:

HSY: Tulisijojen käyttö ja päästöt pääkaupunkiseudulla vuonna 2023: <https://julkaisu.hsy.fi/tulisijojen-kaytto-ja-paastot-paakaupunkiseudulla-vuonna-2023.html>

HSY: Poltapuhtaasti-sivusto: <https://www.hsy.fi/poltapuhtaasti/>

Ympäristöministeriö 2023: Kansallisen ilmansuojeluohjelman 2030 ensimmäinen päivitys: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/server/api/core/bitstreams/42b5aacc-d831-41e5-9445-f9f0add58578/content>



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

ILMANLAADUN JA UUSIUTUVAN ENERGIAN ASiantuntija

- Päästöjen leviämismalliselvitykset
- Ilmanlaadun mittaukset
- Mittalaitteiden kalibrointipalvelut
- Ilmakemian analyysipalvelut
- Ilmanlaadun seurantasuunnitelmat
- Ilmanlaadun koulutus- ja konsultointipalvelut
- Tuulimittaukset
- Tuuli- ja jäätämistästulosten analysointi
- Paikallisen tuulivoimapotentiaalin määrittäminen
- Tuulivoiman tuuliennusteet
- Aurinkoenergian tuotantopotentiaali ja ennusteet
- Kansainväliset hankkeet ja tutkimushankkeet

WWW.ILMATIETEENLAITOS.FI/ILMANLAATUPALVELUT
ILMANLAATUPALVELUT@FMI.FI



Kuva: Laura Karlin

Ilmanlaadun selvitykset, leviämismallinnukset ja päästöjen hallintasuunnitelmat



ENVINEER

www.envineer.fi

Hybridiautojen tuoreen pakokaasun ULTRAPIENTEN HIUKKASTEN PÄÄSTÖT muuttuvissa ajo-olosuhteissa

Liikenteen sähköistämistä eli polttomoottoriautojen korvaamista sähkö- ja hybridiautoilla pidetään yhtenä ratkaisuna ilmanlaatua heikentävien pakokaasupäästöjen vähentämisessä. Hybridiautot tuottavat kuitenkin edelleen pakokaasupäästöjä ja niiden tutkiminen on haastavaa muun muassa lukuisten erilaisten ajoasetusten takia. Tähän haasteeseen tartuttiin tänä keväänä julkaistussa diplomityössä, jossa tutkittiin hybridiautojen hiukkaspäästöjä.

Milja Jäppi, tutkija, Tampereen yliopisto

Liikenteen haitallisia pakokaasupäästöjä on pyritty rajoittamaan jo vuosikymmenten ajan asteittain tiukkenneiden päästörajojen avulla. Sääntelystä ja erilaisista tarpeista johtuva teknologinen kehitys onkin vähentänyt liikenteestä aiheutuvia pakokaasupäästöjä. Silti liikenne on edelleen merkittävä kaasumaisten yhdisteiden ja hiukkaspäästöjen päästölähde.

Hiukkaspäästöjä halutaan rajoittaa, koska hengitysilmassa olevat hiukkaset ovat merkittävä terveysriski. Erityisesti pienhiukkaset (alle 2,5 µm) voivat pysyä ilmassa pitkiä aikoja ja kulkeutua hengityksen mukana hengityselimistöön. Samalla ne voivat kuljettaa pinnallaan muita ilmansaasteita ihmisen elimistöön. Hengitetyt hiukkaset voivat aiheuttaa hengitys- ja verenkiertoelimistön sairauksia, jotka taas voivat johtaa terveyden elinvuosien menettämiseen sekä ennaltaehkäisyyn.

Yhtenä ratkaisuna liikenteen pakokaasupäästöjen vähentämisessä voidaan pitää erilaisten vaihtoehtoisten energiajärjestelmien käyttöä perinteisten bensiini- ja dieselkäyttöisten polttomoottorien rinnalla tai sijasta. Erityisesti viime vuosina kiihtynyt liikenteen sähköistyminen nähdään tärkeänä osana päästövähennyksiä. Sähköautothan eivät tuota lainkaan pakokaasupäästöjä. Sekä sähkö- että polttomoottoria käytävien hybridiautojen pakokaasupäästöjen arviointi on sen sijaan haastavampaa, sillä hybridiautoja voidaan ajaa useilla erilaisilla ajoasetuksilla, jotka vaikuttavat auton toimintaan ja muodostuviin päästöihin. Siksi hybridiautojen päästötutkimus on vielä toistaiseksi vajavaista. Halusin diplomityössäni tarttua tähän haasteeseen tutkimalla hybridiautojen hiukkaspäästöjä todellista ajoa vastaavissa mittauksissa.

Diplomityön tavoitteet ja toteutus

Tutkin diplomityössäni hybridiautojen hiukkaspäästöjä tuoreessa pakokaasussa. Käsitteellä tuore pakokaasu viitataan pakokaasun elinkaaren siihen vaiheeseen, jossa ilmakehään vapautunut kuuma pakokaasu on alkanut jäähtyä ja laimentua. Tällöin pakokaasussa olevat kaasumaiset yhdisteet alkavat tiivistyä jo olemassa olevien hiukkasten pinnoille sekä muodostamaan uusia hiukkasia. Pakokaasu on tällöin ehtinyt olla ilmakehässä joitakin sekunteja. Pakokaasu, jolle liikenteen seassa liikkuvat ihmiset altistuvat on siten juuri tätä tuoretta pakokaasua. Tämän työn mittauksissa kuumen pakokaasun muuttuminen tuoreeksi pakokaasuksi saatiin aikaan kontrolloidusti laboratorio-olosuhteissa hyödyntämällä huokoisen putken laimenninta ja viipymäaikaputkea. Tämän menetelmän on todettu vastaavan luonnollista ilmakehässä tapahtuvaa prosessia hyvin (ks. esim. Rönkkö ym., 2006).

Tuoreen pakokaasun hiukkaspäästöjen osalta tässä työssä oltiin erityisesti kiinnostuneita ultrapienistä hiukkasista (alle 100 nm) sekä mustasta hiilestä (nokihiukkasista, black carbon, BC). Työssä haluttiin selvittää, millaisia nämä hiukkaspäästöt ovat muuttuvissa ajo-olosuhteissa. Vastaavaa tutkimustietoa ei ollut työn aikana saatavilla, sillä hybridiautojen päästötutkimukset keskittyivät säänneltyihin päästöihin ja työssä tutkitut hiukkaspäästöt kuuluvat haihtuvuutensa ja osittain myös kokonsa takia sääntelemättömiin päästöihin. Lisäksi työssä oli tavoitteena selvittää, millaisia asioita hybridiautojen hiukkaspäästötutkimuksessa on huomioitava verrattuna tavallisten polttomoottoriautojen päästömittauksiin.

Diplomityöhön liittyvissä mittauksissa tutkittiin yhteensä seitsemää henkilöautoa: Kahta lataushybridia (plug-in hybrid electric vehicle, PHEV), kahta uudempaa ja kahta vanhemmalla tavallista polttomoottoriautoa sekä yhtä maakaasulla

toimivaa autoa. Lataushybrideistä sekä molemmista tavallisista autopareista toinen oli bensiini- ja toinen dieselkäyttöinen. Autoja ajettiin yksitellen alustadynamometrillä lämpötilakontrolloidussa tilassa, jonka lämpötilaa voitiin säätää. Autoilla ajettiin mittaussykli, joka simuloi maantiellä ajettua reittiä. Syklin aikainen ajonopeus sekä erilaisia ajoympäristöjä kuvaavat syklin vaiheet on esitetty kuvassa 2.

Hybridiautojen osalta mittauksissa vaihdeltiin mittaus-tilan lämpötilan lisäksi akuston varaustasoa ja ajomoodia. Näistä varaustaso määrittää, kuinka paljon, ja ajomoodi, miten, sähkömoottoria voidaan käyttää. Mittauksissa akuston varaustaso vaihteli välillä 6–56 prosenttia. Bensiinikäyttöisellä hybridillä (PHEV-B) oli käytössä varaustasoa ylläpitävä hybrid-ajomoodi (H) sekä varaustason laskun salliva automatic-ajomoodi (A). Dieselkäyttöisellä hybridillä (PHEV-D) oli käytössä A-ajomoodin kaltainen comfort-ajomoodi (C). Varaustason vaihtelua eri ajomoodeilla on havainnollistettu kuvassa 2.

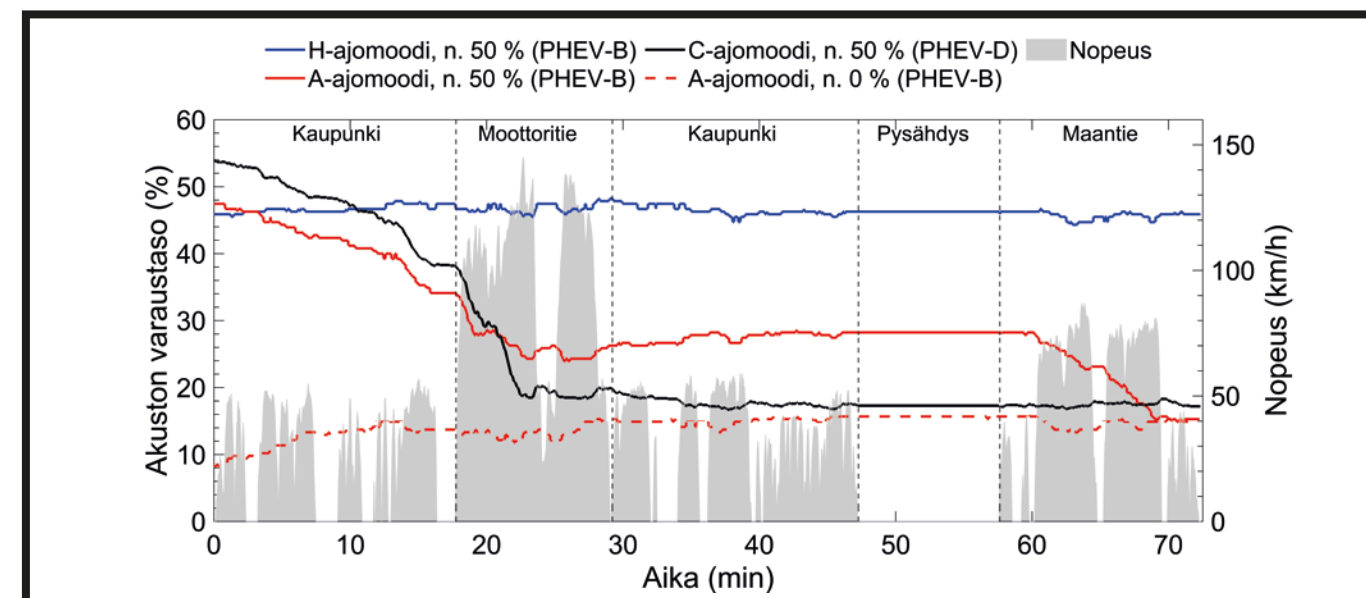
Tuloksia

Muodostuvien pakokaasupäästöjen kannalta hybridiautoissa käytettävät ajoasetukset ovat keskeisessä roolissa. Mikäli akuston varaustaso pyritään pitämään koko ajon ajan samana, poltto- ja sähkömoottorin käyttöä tulee vuorotella tiheästi, mikä johtaa lukuisiin polttomoottorin käynnistykseen. Polttomoottorin käynnistymisen on taas havaittu aiheuttavan huomattavan osan pakokaasupäästöistä suhteessa koko ajon aikana muodostuviin päästöihin (ks. esim. Zhai ym. 2023). Matala varaustaso sen sijaan johtaa siihen, että akustoa on ladattava enemmän ja siten polttomoottorilla ajetaan pidempiä aikoja. Myös ympäristön lämpötila voi pidentää polttomoottorin käyttöaikoja, sillä kylmässä auton lämmitys ja kuumassa auton viilennys lisäävät sähkönkulutusta.

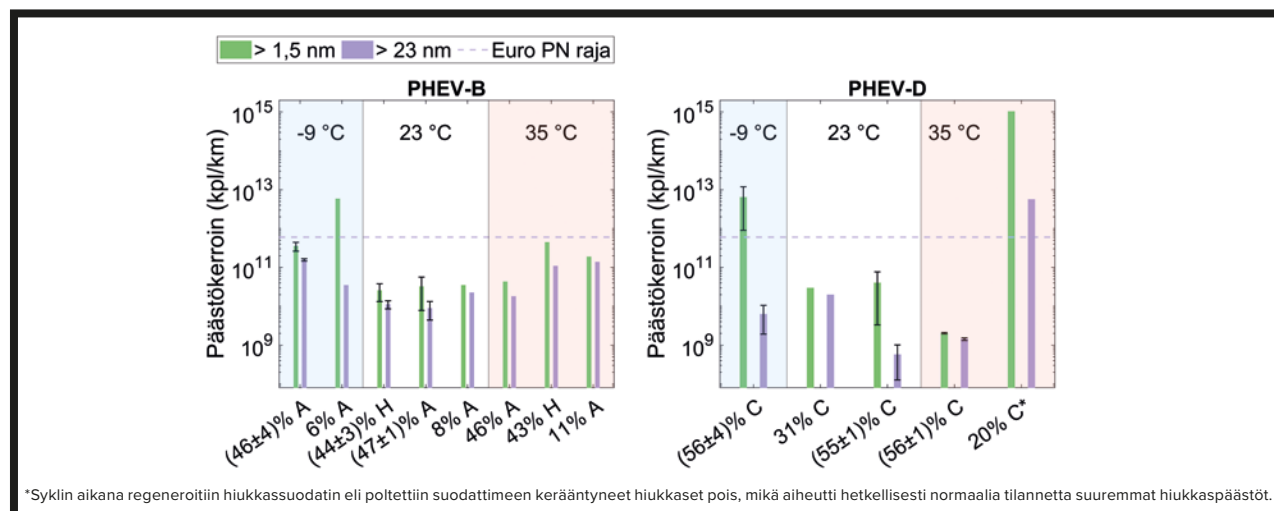
Ajoasetusten ja -olosuhteiden vaikutus muodostuviin hiukkaspäästöihin on nähtävissä kuvassa 3, jossa on esitetty hiukkaskulukumäärän päästökertoimia kahdessa eri kokoluokassa. Päästökertoimet on laskettu suhteessa ajettuun matkaan, mikä helpottaa tulosten vertailua ja hahmottamista. Kuvassa 3 nähdään esimerkiksi, että erityisesti matala ympäristön lämpötila ja akuston varaustaso johtavat helposti suhteellisen korkeisiin päästökertoimiin.



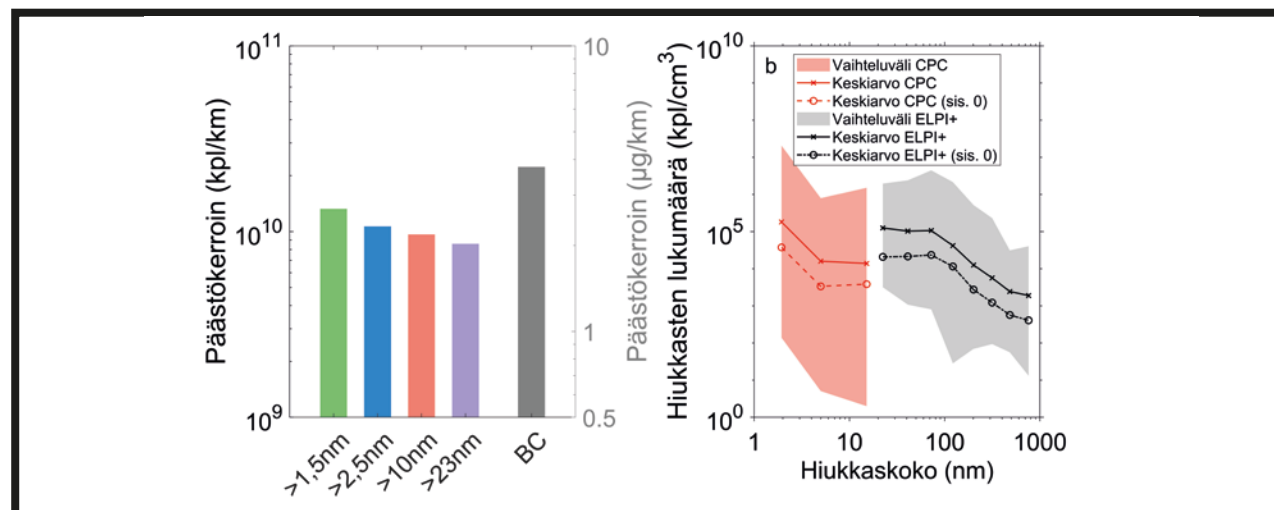
Kuva 1. Diplomityö tehtiin osana EU-rahoitteista PAREMPI-projektia, jossa tutkittiin esimerkiksi henkilöautojen pakokaasupäästöjä ajamalla autoja alustadynamometrillä. Kuvassa on mittaukset käynnissä Puolassa, Bosmalin autotestauslaboratoriossa.



Kuva 2. Akuston varaustason (vas.) ja ajonopeuden (oik.) vaihtelu mittaussyklin aikana eri ajomoodeilla ja alkuvaraustasoilla.



Kuva 3. Hybridiautojen hiukkaslukumäärän päästökertoimet kahdella eri hiukkaskokoalueella (> 1,5 nm ja > 23 nm) sekä erilaisilla ajoasetuksilla ja -olosuhteilla. Akuston varaustaso ja käytetty ajomoodi on esitetty x-akselilla. Toistomittausten tulokset on yhdistetty laskemalla keskiarvo (palkin korkeus) ja vaihteluväli (palkin päällä oleva jana).



Kuva 4. Päästökertoimet hiukkaslukumäärälle (a, vas.) ja mustalle hiillelle (a, oik.) sekä lukumäärä-hiukkaskoko-jakauma (b) yhdessä mittausyhteyksissä. Jakauma koostuu kondensaatiohiukkaslaskuri- eli CPC-patterilla sekä sähköisellä alipaineim-paktorilla eli ELPI+:lla mitatuista tuloksista. Yhtenäisellä viivalla piirretyssä jakaumassa sekä vaihteluvälissä on huomioitu vain nollasta poikkeavat arvot. Katkoviivalla piirretyssä jakaumassa on huomioitu myös pysähdysten ja sähkömoottoriajon aikaiset hiukkasten nollapitoisuudet.

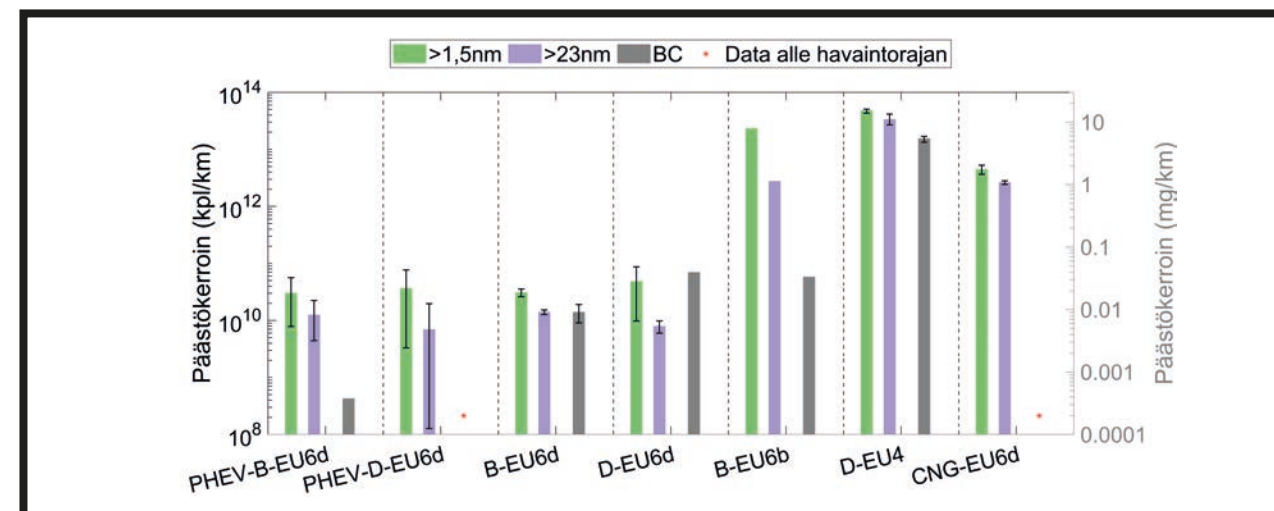
Päästökertoimien kokoluokan hahmottamiseksi todetta-koon, että tutkittujen hybridiautojen päästöloukassa (Euro 6) yli 23 nm:n kokoisten haihtumattomien hiukkasten maksimi-määräksi on säädetty 6×10^{10} kpl/km. Kyseinen raja on merkit-ty kuvaan 3 violetilla katkoviivalla. Seuraavassa voimaantule-vassa päästöloukassa (Euro 7) raja tulee olemaan sama, mutta hiukkaskoon alarajaksi tulee 10 nm. (EU 2024) Tämän työn tu-loksissa huomioitiin myös haihtumattomat hiukkaset, mutta silti hybridiautoille määritetyt päästökertoimet alittivat pääs-törajan regeneraatioisykliä lukuunottamatta. Mikäli huomioi-daan pienimmät tässä työssä mitatut hiukkaset (alle 2,5 nm:n kokoiset hiukkaset), raja ylittyy kahdessa muussakin syklistä.

Myös työssä määritetyt hiukkaskokojakaumat puoltavat pienimpien hiukkasten huomiointia päästörajoituksissa. Ku-vassa 4 on esitetty esimerkin omaisesti yhden mittausyhteyk-sin (PHEV-B, 23 °C, 46 % alkuvaraustaso, H-ajomoodi) yli lasket-tu hiukkaskokojakauma sekä päästökertoimet hiukkasluku-määrälle ja mustalle hiillelle. Ajo-asetuksista ja olosuhteista riippumatta jakaumat olivat pääsääntöisesti hyvin samankal-taisia eli jakaumiin muodostui alle 10 nm:n sekä noin 20–200 nm:n hiukkasten moodit (huiput). PHEV-B-autolla jakauman

keskivaiheille muodostuva moodi oli tosin selkeämpi, sillä PHEV-D -autolla kyseistä moodia ei muodostunut jokaises-sa syklistä. Molemmilla autoilla hiukkaslukumäärä kasvaa kuitenkin huomattavasti, kun tarkasteltava hiukkaskoko on alle 10 nm. Kuvasta 4 nähdään myös, millainen vaikutus polt-tomoottorin sammuttamisella on koko syklin yli laskettuihin keskiarvotuloksiin.

Hybridiautojen vaikutuksesta liikenteen päästökehityk-seen saadaan enemmän tietoa vertailemalla työssä tutkittu-jen hybridiautojen pakokaasupäästöjä muiden tutkittujen autojen päästöihin. Kuvassa 5 on esitetty kaikkien seitsemän tutkitun auton päästökertoimet hiukkasten lukumäärälle ja mustalle hiillelle. Päästökertoimissa on otettu huomioon kaikki 23 celsiusasteessa ajatut mittausyhteykset laskemalla kes-kiarvo ja vaihteluväli. Autojen erottelemisessa on käytetty tunnistetta, joka muodostuu käyttövoimasta sekä Euro-pääs-töloukasta.

Kuten kuvasta 5 nähdään, hybridiautoilla ja uudemmilla polttomoottoriautoilla hiukkaslukumäärän päästökertoimet ovat samalla tasolla. Vanhemmista autoista sekä kaasuaautos-ta on vapautunut selvästi enemmän hiukkaspäästöjä, mikä



Kuva 5. Tutkittujen autojen päästökertoimet hiukkasten lukumäärälle (vas.) kahdella eri hiukkaskokoalueella sekä mustalle hiillelle (oik.) 23 celsiusasteessa. Syklikohtaisesti lasketut päästökertoimet yhdistettiin autokohtaisiksi päästökertoimiksi keskiarvon ja vaihteluvälin avulla. Datalla ollessa alle havaintorajan tai puuttuessa kokonaan, päästökertoimia tai vaihtelu-väliä ei voitu laskea.

johtunee pitkälti siitä, että kyseisissä autoissa ei ollut hiuk-kassuodattimia ja muissa autoissa oli. Mustan hiilen pääs-tökerroin on pienin PHEV-B -autolla. PHEV-D -auton ja kaasuauton (CNG-EU6d) mustan hiilen päästökertoimet tosin puuttuvat kokonaan. Mustan hiilen päästökertoimien osalta tuleekin huomioda, että mittauksissa Euro 6d -pääs-töloukan autojen mustan hiilen pitoisuudet jäivät useissa sykleissä käytetyn mittalaitteen havaintorajan alapuolelle turhan suuren laimennussuhteen takia, mikä aiheuttaa epä-varmuutta tuloksiin.

Kuvan 5 perusteella voisi siis ajatella, että hybridiautojen käyttö on hiukkaspäästöjen kannalta kannattavinta vain, jos niillä korvataan autoja, joissa ei ole hiukkassuodattimia, sillä modernit polttomoottoriautot tuottavat saman verran hiukkaspäästöjä kuin hybridiautot. Asia ei kuitenkaan ole näin. Kuten kuvasta 5 nähdään, erityisesti hybridiautojen hiukkaslukumäärän päästökertoimien vaihteluväli on hyvin suuri, mikä kertoo siitä, että hybridiautojen päästöt ovat vah-vasti riippuvaisia käytetyistä ajoasetuksista. Mikäli akuston varaustaso olisi ajon alkaessa korkeampi, sähkömoottoria käytettäisiin enemmän ja siten myös päästöt olisivat pienem-piä. Pienemmällä varaustasolla hybridiauton toiminta on lähempänä tavallisen polttomoottoriauton toimintaa, ja polt-tomoottorin useat käynnistymiset ajon aikana voivat kumota sähkömoottorin käytöstä saadut hyödyt.

Yhteenveto

Tässä diplomityössä oli keskeistä havaita, kuinka merkittä-västi ajoasetukset ja -olosuhteet vaikuttavat hybridiautojen hiukkaspäästöihin. Vaikka tutkitut hiukkaspäästöt olivat tä-män työn hybridiautojen osalta jo suhteellisen pieniä, niitä voisi edelleen vähentää käyttämällä ajomoodia, joka minimoi polttomoottorin käynnistysten määrää sekä huolehtimalla siitä, että akuston varaustaso olisi mahdollisimman korkea. Tällöin hybridiauton toiminta olisi lähimpänä sähköauton toimintaa ja päästöttömyyttä. Päästöjä voisi vähentää myös kehittämällä pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmiä.

Havainto ajoasetuksien vaikutuksesta hiukkaspäästöihin antaa osaltaan myös vastauksia hybridiautojen hiukkaspääs-tötutkimuksessa huomioitaviin asioihin. Jotta hybridiautojen pakokaasupäästöihin liittyvää tutkimusvajetta saataisiin pai-kattua, tutkimuksissa tulisi käydä vielä laajemmin läpi erilai-sia ajotilanteita. Tämä tosin tuo oman haasteensa mittausten

toistettavuuteen, sekä tulosten yhdistämiseen ja vertailta-vuuteen. Samalla päästötutkimusta tulisi viedä yhä enem-män sääntelemättömien, mutta ihmisille ja ympäristölle hai-tallisten päästöjen suuntaan, mikä korostaa mittausteknisen osaamisen tärkeyttä. Tarkemmin tässä artikkelissa esiteltyyn aiheeseen voi perehtyä vielä diplomityöni (Jäppi 2025) sekä mahdollisesti myöhemmin julkaistavien tieteellisten artikke-lien kautta. ■

Diplomityö tehtiin Tampereen yliopistossa, teknis-luonnontieteel-lisessä tutkinto-ohjelmassa. Työ tehtiin osana EU-rahoitteista PA-REMPI-projektia (Particle emission prevention and impact: from real-world emissions of traffic to secondary PM of urban air, grant agreement No 101096133).

Lähteet:

- EU: "Euro 7: neuvostolta uudet säännöt henkilö-, paketti- ja kuorma-autojen päästörajoista". Viitattu 2.12.2024. <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2024/04/12/euro-7-council-adopts-new-rules-on-emission-limits-for-cars-vans-and-trucks/>.
- Jäppi, Milja 2025: Hybridiautojen tuoreen pakokaasun ultrapienien hiukkasten päästöt muuttuvissa ajo-olosuhteissa. <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/205136>.
- Rönkkö, Topi, Annele Virtanen, Kati Vaaraslahti, Jorma Keskinen, Liisa Pirjola, ja Maija Lappi. 2006: "Effect of dilution conditions and driving parameters on nucleation mode particles in diesel exhaust: Laboratory and on-road study". *Atmospheric Environment* 40 (16): 2893–901. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.01.002>.
- Zhai, Zhiqiang, Junshi Xu, Mingqian Zhang, An Wang, ja Marianne Hatzopoulou. 2023: "Quantifying start emissions and impact of reducing cold and warm starts for gasoline and hybrid vehicles". *Atmospheric Pollution Research* 14 (1): 101646. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101646>.

VALOKEILASSA

Sarjassa haastattemme ilmansuojelualalla toimivia ihmisiä heidän urastaan ja ajatuksistaan ilmansuojelun ja ilmastotyön tulevaisuudesta

Hilkka Timonen



KUVA: KARRI SAARNIO

Työskenteletkö ilmansuojelun, ilmastokysymysten vai molempien parissa?

Työskentelen pääasiassa ilmansuojelun ja ilmanlaadun tutkimuksen parissa, mutta työni sivuaa myös ilmastokysymyksiä erityisesti pienhiukkaspäästöjen ja niiden ilmastovaikutusten osalta.

Kuinka kauan olet työskennellyt aloilla?

Olen työskennellyt ilmansuojelun parissa yli 20 vuoden ajan. Tutkimusurani alkoi Ilmatieteen laitoksella 2000-luvun alussa väitöskirjatutkijana, ja siitä lähtien olen ollut aktiivisesti mukana aerosolihiukkasten tutkimuksessa. Työni on keskittynyt sekä ilmanlaadun mittauksiin erilaisissa kaupunkiympäristöissä että erilaisten päästölähteiden tutkimukseen. Väitöskirjan valmistumisen jälkeen muutin perheeni kanssa Seattleen, missä työskentelin kaksi vuotta PostDoc-tutkijana. Tutkimusalaani olivat Kiinasta Yhdysvaltoihin kaukokulkeutuvat saasteet ja niiden paikalliset ilmanlaatuvaikutukset. Vuodesta 2020 lähtien olen johtanut Ilmatieteen laitoksella tutkimusryhmää, joka keskittyy aerosolien koostumuksen tutkimukseen. Nykyään työhöni kuuluu erityisesti tutkimushankkeiden suunnittelu ja koordinointi, mutta myös mittauskampanjoiden toteutus sekä tulosten julkaiseminen.

Mitkä ovat olleet merkittävimmät murroskohdat ilmansuojelualalla oman urasi aikana?

Yksi merkittävimmistä muutoksista työssäni on ollut mitausteknologian kehittyminen ja sen tuoma muutos mittaus- tarkkuuteen ja aikaresoluutioon. Vielä 2000-luvun alkupuolella hiukkasmittauksia tehtiin lähinnä suodatinnäytteitä, joita punnittiin ja analysoitiin laboratorioissa kampanjan jälkeen. Nykyisin pystymme mittaamaan hiukkasten kemiallista koostumusta ja fysikaalisia ominaisuuksia reaaliaikaisesti ja paljon tarkemmin kuin urani alkuaikoina. Erityisesti

aerosolimassaspektrometrit ovat moninkertaistaneet aerosolien koostumuksesta ja muista ominaisuuksista saatavan tiedon määrän. Viimeaikaisista muutoksista merkittävin on ollut useiden uusien saastekomponenttien nousu tutkimuksen keskiöön. Erityisesti ultrapienet hiukkaset, musta hiili sekä aivan viime vuosina ilmakehän nano- ja mikromuovit ovat herättäneet kasvavaa kiinnostusta.

Ulkoilman laatuun kaupunkialueilla vaikuttava merkittävä muutos on ollut ajoneuvojen pakokaasupäästöjen väheneminen puhtaamman teknologian ja tiukemman lainsäädännön ansiosta, sekä puunpolton päästöjen tunnistaminen tärkeäksi paikalliseksi ilmanlaatuhaasteeksi erityisesti tiheään asutuilla kaupunkialueilla. Samaan aikaan ei-pakokaasupe- räiset päästöt ja hiukkasten sekundäärimuodostus kaasumaisista yhdisteistä ilmakehässä ovat nousseet tärkeiksi tutkimuskohteiksi.

Mitkä ovat olleet viimeisimpiä työtehtäviäsi tai projektejasi?

Viime vuosina olen osallistunut lukuisiin hankkeisiin, jotka ovat keskittyneet ajoneuvojen, laivojen ja voimalaitosten päästöihin sekä ulko- ja sisäilmanlaatuun. Päästötutkimuksessa, kuten EU:n rahoittamassa PAREMPI-hankkeessa, painopiste on ollut erityisesti liikennesektorin sekundääripäästöissä ja niiden vaikutuksissa ilmanlaatuun ja terveyteen. Lisäksi kotimaisessa NEXEL-hankkeessa on keskitytty ei-pakokaasuperäisiin päästöihin kuten jarru- ja rengaspölyyn sekä niiden osuuteen erilaisten ympäristöjen hiukkasissa.

Ulkoilman osalta olen ollut mukana useissa kansainvälisissä tutkimushankkeissa, joiden tavoitteena on ollut kehittää uusia menetelmiä ilmanlaadun tutkimukseen ja hiukkaspäästöjen lähteiden tunnistamiseen. Esimerkiksi EU:n rahoittamassa RI-URBANS -hankkeessa tutkittiin lähes reaaliaikaisen lähdeanalyysin käyttökelpoisuutta kaupunkien

hiukkaspitoisuuksien lähteiden tunnistamisessa ja seurannassa. Tämä edustaa merkittävää edistysaskelta ilmanlaadun hallinnassa, sillä se mahdollistaa nopean reagoinnin saaste- piikkeihin ja tarjoaa tarkempaa tietoa päästölähteistä.

Sisäilman osalta GIANT-hankkeessa on tutkittu, miten ulkoilmanlaatu vaikuttaa sisäilmanlaatuun – ja toisinaan myös sitä, miten sisäilma voi vaikuttaa ulkoilmanlaatuun. Hankkeessa on toteutettu lukuisia mittauskampanjoita, joiden avulla on saatu syvempää ymmärrystä sisäilmanlaatuun vaikuttavista tekijöistä.

Mitä näet suurimpina tulevina trendeinä ja haasteina ilmansuojelualalla?

Uusilla ja entistä tarkemmilla mittauslaitteilla on saatu entistä paremmin tietoa kaupunkien ilmanlaadun päästölähteistä, mikä on johtanut päästöjen tiukempaan sääntelyyn ja ilmanlaadun raja-arvojen kiristymiseen. Suomessa ilmanlaatu on parantunut tasaisesti viime vuosikymmenten aikana. Samalla uusien päästölähteiden, kuten jarru- ja rengaspölyn, nano- ja mikromuovien sekä ultrapienien hiukkasten merkitys on kasvanut. Näiden komponenttien mittaaminen, lähteiden tunnistaminen ja vaikutusten arviointi ilmanlaatuun, terveyteen ja ilmastoon vaatii edelleen kehitystyötä. Keskeinen haaste on ilmanlaadun monimutkaisuus ja vaihtelu: päästölähteitä on paljon, ja niiden ilmanlaatuvaikutukset vaihtelevat – niin erilaisissa ympäristöissä kuin ajallisesti-kin. Toinen haaste on tutkimusresurssien riittävyys: tutkimus edellyttää aikaa, osaamista, laitteistoja ja rahoitusta, joiden tasapainottaminen on jatkuvaa työtä.

Mitä haluaisit saada aikaan urasi aikana?

Toivon, että työni auttaa tuottamaan korkealaatuisia tutkimustuloksia, kehittämään uusia tutkimusmenetelmiä ja -laitteita sekä parantamaan ilmanlaatua Suomessa. Tieteellisesti haluan olla mukana kehittämässä reaaliaikaisia lähdeanalyysimenetelmiä, jotka mahdollistavat nopean ja tarkeman päästölähteiden tunnistamisen kaupunkiympäristössä. Tavoitteeni on myös edistää uusien saastekomponenttien, kuten nano- ja mikromuovien, sekä ultrapienien hiukkasten mittaustekniikoita ja niiden vaikutusten arviointia. Haluaisin edistää mittaustiedon hyödyntämistä päätöksenteossa ja tuoda esiin hiukkaspäästöjen merkitystä sekä terveys- että ilmastovaikutusten näkökulmasta. Lisäksi haluan rakentaa vahvaa tutkimusyhteisöä ja yhteistyötä, joka jatkaa ilmansuojelun ja ilmastotyön kehittämistä tulevaisuudessa. ■

Hilkka Timonen työskentelee johtavana tutkijana ja ryhmäpäällikkönä Ilmatieteen laitoksella. Hän on tehnyt yli 20 vuoden uran ilmansuojelun parissa, erityisesti kaupunkien ilmanlaadun ja liikenteen hiukkaspäästöjen tutkimuksessa. Timosen erityisosaamista on aerosolihiukkasten tutkimus sekä uusien mittausmenetelmien kehittäminen. Hän on koordinoinut useita pitkäaikaisia mittauskampanjoita ja projekteja sekä osallistunut kansallisiin ja kansainvälisiin tutkimusverkostoihin.

ILMANSUOJELUYHDISTYKSEN JUHLAVUOSI

2026

JUHLAVUOSI TARJOAA TEEMAN MUKAISTA, AJANKOHTAISTA JA MIELENKIINTOISTA OHJELMAA.

PYSY KUULOLLA TILAAMALLA UUTISKIRJE
[ISY.FI/UUTISKIRJE](https://isy.fi/uutiskirje)

Ehdotus ilmanlaadun SEURANNAN JÄRJESTÄMISESTÄ Kanta- ja Päijät-Hämeessä

Puhtaan ilmanlaadun turvaaminen on julkisen vallan lakisääteinen velvollisuus, ja ilmanlaatua seuraamalla pyritään suojelemaan ihmisten terveyttä sekä ympäristöä. Suomessa hyvälle ilmanlaadulle on annettu vaatimukset ympäristölainsäädännössä. Aiheesta tehdyssä opinnäytetyössä selvitetään ilmanlaadun mittausverkoston riittävyttä verrattuna ilmanlaadunormeihin: Vastaako Kanta- ja Päijät-Hämeen ilmanlaadun seurannan mittausasemien määrä voimassa olevan lainsäädännön sekä EU:n uudistetun ilmanlaadudirektiivin velvoitteita?

Paula Schroderus, ylitarkastaja, Hämeen ELY-keskus

Suomen ilmanlaadun seuranta koskeva lainsäädäntö perustuu Euroopan unionin direktiiveihin, jotka on pantu täytäntöön kansallisesti Valtioneuvoston asetuksessa ilmanlaadusta (myöhemmin ilmanlaatuasetus), sekä Valtioneuvoston asetuksessa ilmassa olevista arseenista, kadmiumista, elohopeasta, nikkelistä ja polysyklisistä aromaattisista hiilivedyistä (myöhemmin metalliasetus). Myös ympäristönsuojelulakiin ja ympäristönsuojeluasetukseen on sisällytetty useita ilmanlaatuun ja sen seurantaan liittyviä säädöksiä.

Suomessa on säädetty lisäksi kansallisista ohje- ja tavoitearvoista Valtioneuvoston päätöksessä ilmanlaadun ohjearvoista ja rikkilaskeman tavoitearvoista. Ilmanlaadun seuranta ohjaa myös WHO:n antamat kansainväliset ohjearvot ilman epäpuhtauksille. WHO:n ohjearvot ovat laajaan tieteelliseen näyttöön ja tutkimukseen perustuvia suosituksia, jotka eivät kuitenkaan ole oikeudellisesti sitovia.

Kansalliseen lainsäädäntöön on tulossa merkittäviä muutoksia EU:n uudistetun ilmanlaadudirektiivin myötä, joka tiukentaa normeja lähemmäs WHO:n suosituksia. Uudistettu ilmanlaadudirektiivi tuli voimaan 10.12.2024, ja se tulee toimeenpanna kansallisesti kahden vuoden kuluessa. Tiukentuvat ilmanlaadunormit epäpuhtauksille on saavutettava vuoteen 2030 mennessä.

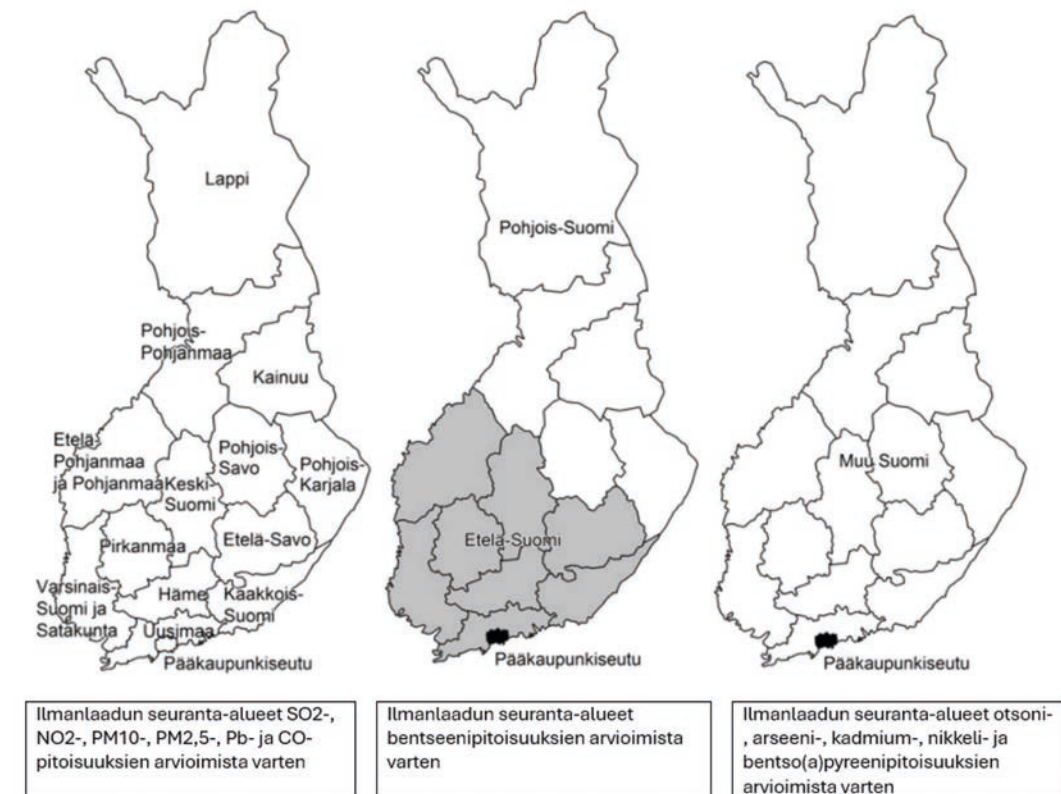
Uudistetun ilmanlaadudirektiivin lisäksi valmisteilla oleva valtion aluehallinnon uudistus tuo muutoksia ilmanlaadun seurantaan ja siihen liittyviin vastuisiin. ELY-keskukset lakkaavat ja niiden ympäristötehtävät siirtyvät valtakunnalliseen Lupa- ja valvontavirastoon sekä alueellisiin elinvoimakeskuksiin. Kanta- ja Päijät-Hämeen maakunnat tulevat kuulumaan eri elinvoimakeskusten toimialueeseen.

Ilmanlaadun seurannan vastuut

Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksilla (ELY-keskukset) on lakisääteinen velvollisuus olla selvillä toimialueensa ilmanlaadusta, valvoa ympäristön tilaa ja huolehtia asianmukaisen seurannan järjestämisestä. Keskusten tulee ohjata seuranta yleisellä tasolla, sekä esimerkiksi varmistaa, että ilmanlaadun seurannan mittausasemia on riittävä määrä.

Kunnat ovat ympäristönsuojelulain mukaisesti velvollisia huolehtimaan paikallisten olojen edellyttämästä tarpeellisesta ympäristön tilan seurannasta, eli ne vastaavat ilmanlaadun seurannan käytännön järjestämisestä ja toteutuksesta. Ilmatieteen laitos vastaa muun muassa ilman epäpuhtauksien seurannasta maaseututausta-alueilla, toimii kansallisen vertailulaboratoriona ja jakaa ilmanlaadutietoa kaikilta maan ilmanlaadun seuranta-asemilta reaaliajassa.

Edellä mainittujen lisäksi ympäristönsuojelulaissa on säädetty myös muiden viranomaisten erilaisista vastuista ilman epäpuhtauksien vaikutuksien ja ilmanlaadun seurannassa.



Kuva 1. Ilmanlaadun seuranta-alueet epäpuhtauksien perusteella (mukailtu Komppula ym. 2014).

Seuranta-alueiden ja -tarpeen määrittely

Metalliasetus ja ilmanlaatuasetus määrittelevät ilmanlaadun kansalliset seuranta-alueet ilman epäpuhtauksille. Seuranta-alueella viitataan joko yhden tai useamman ELY-keskuksen toiminta-alueeseen tai väestökeskittymään. Väestökeskittymällä tarkoitetaan yhtä tai useampaa kuntaa tai taajamaa, jossa asukasluku on vähintään 250 000. Ilmanlaatuasetuksessa ja metalliasetuksessa säädettyjen epäpuhtauksien seuranta-alueet on esitetty kuvassa 1.

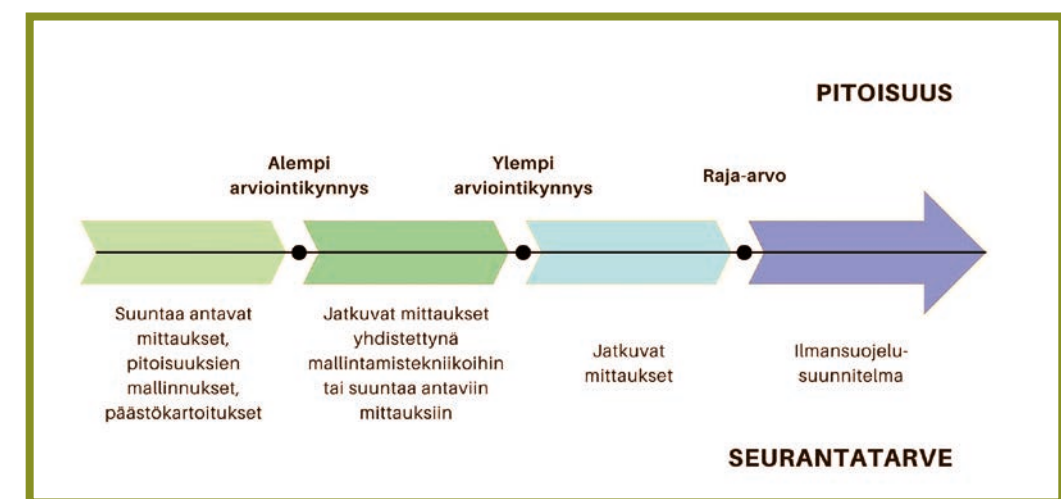
Ilmanlaadun seurantarake ja -menetelmät seuranta-alueilla määräytyvät arviointikynnysten perusteella (kuva 2). Arviointikynnykset (ylempi ja alempi) on määritetty prosenttiosuuksina raja- tai tavoitearvoista. Jos pitoisuudet ylittävät ylempään arviointikynnyksen, ensisijaisena menetelmänä vaaditaan jatkuvatoimisia mittauksia. Jos pitoisuudet alittavat alemman arviointikynnyksen, riittävät suuntaa antavat menetelmät, kuten mallinnustekniikat tai päästökartoitukset.

Kynnys katsotaan ylittyneeksi, jos se on ylittynyt vähintään kolmena vuotena viidestä.

Mittausasemien vähimmäislukumäärä riippuu väestön määrästä ja epäpuhtauksien arviointikynnysten ylittymisestä seuranta-alueilla. Mittausalueiden valinnassa on painotettava alueita, joilla väestön altistuminen on suurinta.

Tutkimusalue ja seurannan nykytila

Opinnäytetyössä tutkimusalueena oli Hämeen ELY-keskuksen toimialue, eli Kanta- ja Päijät-Hämeen maakunnat. Ilmanlaadua seurataan alueella jatkuvatoimisesti Hollolassa, Hämeenlinnassa ja Lahdessa. Hämeenlinnassa ilmanlaadua seurataan yhdellä mittausasemalla (Hämeenlinna 2025). Hollolassa ja Lahdessa ilmanlaadua on mitattu viime vuosina noin kymmenellä mittausasemalla, joista osa on kiinteitä ja osa siirrettäviä asemia (Kähäri et al. 2024).



Kuva 2. Ilmanlaadun seurantarakeen määräytyminen (mukailtu Salmi ym. 2019, 6).

Heinolassa ja Riihimäellä seurataan ilmanlaatua suuntaa antavin menetelmin noin viiden vuoden välein. Heinolassa viimeisimmällä seurantajaksolla vuonna 2022 ilmanlaatua mitattiin kahdella mittausasemalla (Ylinen et al. 2023). Riihimäellä ilman epäpuhtauksien vaikutusta ilmanlaatuun on arvioitu leviämismallilaskelmien avulla, viimeksi vuonna 2023 (Latikka et al.2023).

Opinnäytetyön toteutus

Opinnäytetyössä hyödynnettiin Heinolan, Hollolan, Hämeenlinnan, Lahden ja Riihimäen ilmanlaadun seuranta-tietoja ja -tuloksia vuosilta 2019–2023. Tarkastellut ilman epäpuhtaudet opinnäytetyössä olivat typpidioksidi ja typen oksidit, hengitettävät hiukkaset ja pienhiukkaset, otsoni, bentseeni, bentso(a)pyreeni ja pelkistyneet rikkiyhdisteet. Mittaustuloksia verrattiin raja-arvoihin, kriittisiin tasoihin, tavoitearvoihin, pitkän ajan tavoitteisiin ja arviointikynnyksiin. Pelkistyneitä rikkiyhdisteitä verrattiin poikkeuksellisesti kansallisiin ohjearvoihin, sillä niille ei ole asetettu raja-arvoa. Vertailun perusteella saatuja epäpuhtauksien pitoisuuksien ylitysten lukumääriä suhteessa arviointikynnyksiin peilattiin lainsäädännön velvoittamaan mittausasemien vähimmäis-määriin seuranta-alueella.

Opinnäytetyön tulokset

Ilmanlaadun seurannan tulosten perusteella ilmanlaatu on pääsääntöisesti hyvä Kanta- ja Päijät-Hämeessä. On kuitenkin huomioitava, että tietyillä alueilla ja tiettyjen epäpuh-tauksien osalta on havaittavissa ilmanlaatonormien ylityksiä tai ylitysten riskiä – erityisesti verrattaessa tuloksia uudistet-tuun ilmanlaatudirektiiviin ja sen tiukennettuihin ilmanlaa-tunormeihin.

Opinnäytetyössä saatujen tulosten perusteella bentso(a)-pyreenin arviointikynnykset sekä otsonin terveysterveitei-nen pitkän ajan tavoite ylittyvät Kanta- ja Päijät-Hämeessä verrattuna voimassa olevaan lainsäädäntöön. Tiukentunei-siin ilmanlaatonormeihin verrattuna tutkimusalueella ylit-tyisivät bentso(a)pyreenin arviointikynnys sekä joinain vuo-sina bentso(a)pyreenin uusi raja-arvo, jota on havainnoitu kuvassa 3.

Tiukentuneisiin ilmanlaatonormeihin verrattuna myös otsonin terveysterveiteinen pitkän ajan tavoite sekä typpi-dioksidin vuosiraja-arvon arviointikynnys ylittyisivät. Lisäksi esimerkiksi hengitettävien hiukkasten ja pienhiukkasten ar-viointikynnykset voivat olla riskissä ylittyä. WHO:n ohjear-voihin verrattuna otsonin kahdeksan tunnin keskiarvo ja typ-pidioksidin vuosikeskiarvo ylittyvät, ja pienhiukkasten ja hen-gitettävien hiukkasten vuosikeskiarvot ovat vaarassa ylittyä.

Opinnäytetyössä saatujen tulosten perusteella Kanta- ja Päijät-Hämeen mittausverkosto on kattavampi kuin mitä voi-massa oleva lainsäädäntö vaatii. Mittausasemien määrä verrat-tuna uudistetun ilmanlaatudirektiivin velvoitteisiin osoittaa, että alueen mittausverkosto on myös todennäköisesti siihen nähden vaadittua kattavampi.

Ehdotus ilmanlaadun seurannasta

Nopeat ja merkittävät muutokset ilmanlaadun seurannan käytäntöihin ja mittausverkoston kattavuuteen eivät ole juuri nyt suositeltavia, koska lähitulevaisuudessa seurannan sään-tely tarkentuu ja muutoksia on sen jälkeen mielekkäämpi teh-dä. Kanta-Hämeessä ja Päijät-Hämeessä ilmanlaadun seuran-taa on suositeltavaa jatkaa suurilta osin samassa mittakaavas-sa kuin aikaisemminkin, sillä alueen ilmanlaadun seuranta ja mittausverkosto on suunniteltu ympäristönsuojelulain

mukaisesti paikalliset olosuhteet huomioiden ihmisten ter-veyden ja ympäristön suojelemiseksi. Lahdessa, Hollolassa ja Hämeenlinnassa on suositeltavaa jatkaa jatkuvatoimista ilmanlaadun seurantaa samojen ilman epäpuhtauksien osalta kuin aiemmin. Heinolassa ja Riihimäellä on suositel-tavaa tehdä suuntaa antavaa ilmanlaadun seurantaa vähin-tään viiden vuoden välein, ja vähintään vastaavassa mitta-kaavassa kuin aiemmin.

Ilmanlaadun seurantaa ohjaavan lainsäädännön perim-mäisenä tarkoituksena on suojella ihmisten terveyttä ja ympäristöä ilman epäpuhtauksilta. Mittausasemille lain-säädännössä asetetut määrät ovat vähimmäisvelvoitteita, ja laajempi mittausverkosto antaa kattavamman kuvan alueen väestön ja ympäristön altistumisesta ilman epäpuhtauksille.

Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, vastaako Kanta- ja Päijät-Hämeen ilmanlaadun seurannan mittausasemien määrä lainsäädännössä asetettuja velvoitteita. Työn toi-meksiantajana toimi Hämeen ELY-keskus, ja opinnäy-tetyön tavoitteena oli tukea ELY-keskuksen lakisääteistä velvollisuutta olla selvillä toimialueensa ilmanlaadusta ja huolehtia ilmanlaadun seurannan tarkoituksenmukaisesta järjestämisestä.

Tulosten perusteella Kanta- ja Päijät-Hämeen mittaus-verkosto on kattavampi suhteessa voimassa olevan lainsää-dännön vähimmäisvaatimuksiin. Mittausverkosto on myös todennäköisesti vaadittua laajempi tarkasteltaessa mittaus-tuloksia suhteessa päivittyvään lainsäädäntöön ja sen vä-himmäisvelvoitteisiin. Tulos on positiivinen, sillä se osoit-taa, että alueella panostetaan ilmanlaadun seurantaan. On kuitenkin tärkeää arvioida mittausverkoston kattavuutta tulevaisuuden näkymien sekä ihmisten ja ympäristön suo-jelun kannalta.

Tutkimuksen tuloksena selvisi, että Kanta- ja Päijät-Hä-meen ilmanlaatu on pääsääntöisesti hyvä. Tämä tulos tukee Hämeen ELY-keskuksen työtä toimialueensa ilmanlaadun varmistamisessa. On kuitenkin alueita ja epäpuhtauksia, joissa on havaittavissa ilmanlaatonormien ylityksiä tai yli-tysten riskiä. Tämän tiedon avulla Hämeen ELY-keskus voi esittää kohdennettuja toimenpiteitä ilmanlaadun paranta-miseksi ja ohjata kaupunkien ilmanlaadun seurantaa.

Opinnäytetyö tarjoaa koottua tietoa Kanta- ja Päijät-Hä-meen ilmanlaadusta ja sen seurannasta verrattuna voi-massa olevaan ja päivittyvään lainsäädäntöön. ELY-keskus voi hyödyntää tuloksia toimialueensa ilmanlaadun koko-naiskuvan ylläpitämisessä, seurannan kehittämisessä, koh-dennettujen toimenpiteiden suunnittelussa ja yhteistyön edistämisessä. Kunnille tulokset tarjoavat tietoa erityisesti ilmanlaadun seurannan tilasta ja mahdollisista kehityskoh-teista. Opinnäytetyö tarjoaa myös alustan erilaisille jatko-selvitysmahdollisuuksille.■

Opinnäytetyö tehtiin LAB-ammattikorkeakoulun energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelmassa. Työn toimeksiantajana toimi Hämeen ELY-keskus.

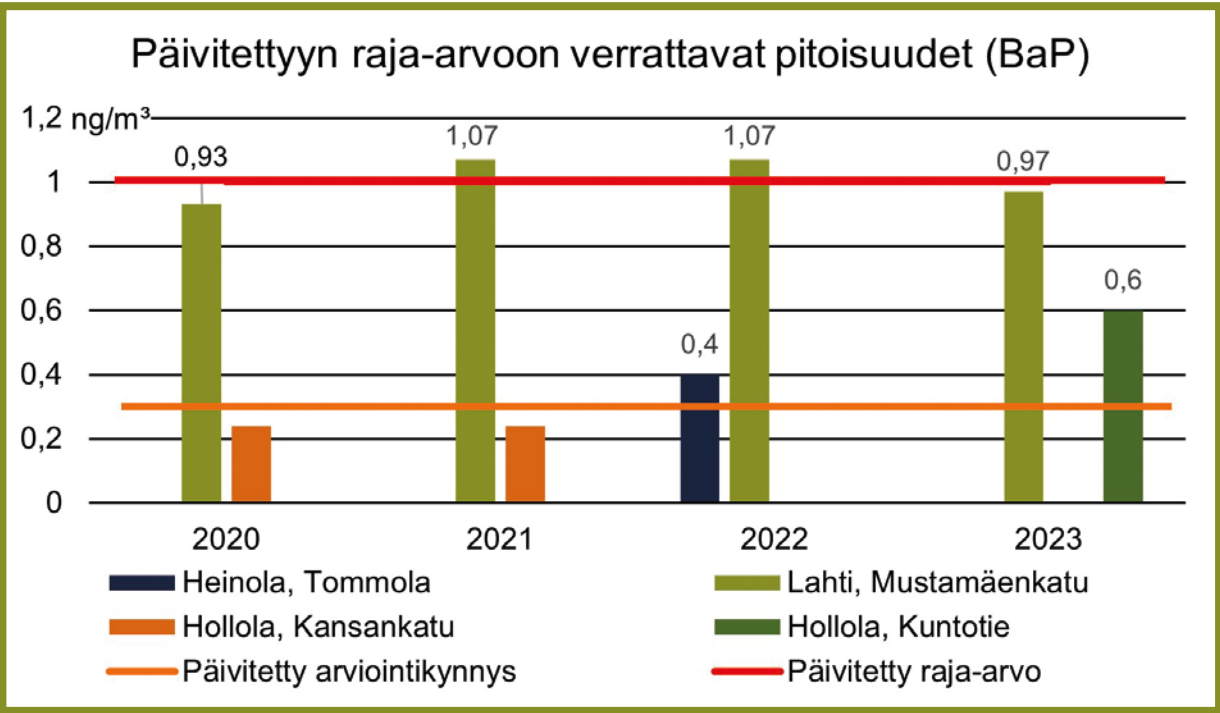
English summary

This thesis, commissioned by the Häme Centre for Eco-nomic Development, Transport and the Environment (ELY Centre), assessed the sufficiency of the air quality moni-toring network in the Kanta-Häme and Päijät-Häme regions, comparing measurement results from 2019–2023 to both current and updated air quality standards. The study ana-lyzed concentrations of nitrogen oxides, particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}), ozone, benzene, benzo(a)pyrene (B(a)P), and reduced sulphur compounds in Heinola, Hollola, Hämeen-linna, Lahti, and Riihimäki.

The results indicate that the current monitoring network is more extensive than the minimum requirements set by prevailing legislation. Air quality is generally good. Howe-ver, when results are compared to the stricter standards of the updated EU Air Quality Directive (2024/2881) and WHO guidelines, risks of exceedances are observed. Air quality monitoring in the Kanta-Häme and Päijät-Häme regions is recommended to continue largely at the current scale. Although the current network exceeds legal mini-mum requirements, its coverage should be reassessed in light of future needs, the revised EU Air Quality Directive, and WHO guidelines. A broader monitoring network provi-des a more comprehensive view of population and environ-mental exposure to air pollutants.

Lähteet:

Hämeenlinna. 2025. Ilmanlaadun seuranta. Ilmanlaadun seuranta - Hämeenlinna
Komppula, B., Anttila, P., Vestenius, M., Salmi, T. & Lovén, K. 2014. Ilmanlaadun seurantatarpeen arviointi. Ilmatieteen laitos. Raportti. Saatavissa https://expo.fmi.fi/aqes/public/Raportti_Ilmanlaadun_seurantatarpeen_arviointi.pdf
Kähäri, K., Lind, J. & Malminen, T. 2024. Ilmanlaatu Lahden seudulla vuonna 2023. Lahden kaupunki. Raportti. Saatavissa <https://www.lahti.fi/asuminen-ja-ymparisto/ymparistonsuojelu-ja-valvonta/ympariston-tila/ilmanlaatu/>
Lahden kaupunkiympäristön palvelualue. 2024. B(a)P Lahti ja Hollola 2020–2023. Excel-tiedosto. Saatavissa Lahden kaupunkiympäristön palvelualue.
Latikka, J., Pykäri, S., Rasila, T., Laurila, T. & Lovén, K. 2023. Riihimäen ilmanlaatuselvitys – Autoliikenteen, energiantuotannon, teollisuuden ja kiinteistökohtaisen lämmityksen päästöjen leviämislaskelmat. Ilmatieteen laitos. Raportti. Saatavissa <https://www.riihimäki.fi/asu-ja-rakenna/ymparisto-ja-luonto/ympariston-tila/ilmanlaatu/>
Salmi, J., Saari, H., Latikka, J., Komppula, B., Vestenius, M., Wemberg, A. & Laukkanen, E. 2019. Esiselvitys ilmanlaadun mittausasemien edustavuuden arvioinnista. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2019:4. Saatavissa https://expo.fmi.fi/aqes/public/Esiselvitys_ilmanlaadun_mittausasemien_edustavuuden_arvioinnista.pdf
Ylinen, M., Saunamäki, M., Vestenius, M., Mannisenaho, A. & Lovén, K. 2023. Heinolan ilmanlaadun seuranta - Typen oksidien, hengitettävien hiukkasten, pienhiukkasten ja PAH-yhdisteiden pitoisuustulokset vuonna 2022. Ilmatieteen laitos. Raportti. Saatavissa Hämeen ELY-keskus.



Kuva 3. Bentso(a)pyreenin päivittyviin vuosiraja-arvoon ja arviointikynnykseen verrattavia mittaustuloksia Kanta- ja Päijät-Hämeessä (mukailtu Ylinen et al. 2023, 17; Lahden kaupunkiympäristön palvelualue 2024).

Suomessa energiantuotanto on muuttunut vähähiiliseksi nopeasti. Monilla kunnilla ja yrityksillä hiilineutraaliuden tavoitevuosi on jo 2030, ja kansallisen ilmasto- ja energiastrategian tavoitteiden mukaan koko Suomen tulisi olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Muutos vaatii mittavia panostuksia tuotantoon, siirtoon, käytön joustoon ja varastointiin.

Energia-alan muutokset edellyttävät monitieteistä lähestymistapaa. Koulutukset, joissa on mahdollista yhdistää teknistä osaamista, liiketoimintaosaamista ja monipuolista ympäristöalan tietämystä, voivat luoda uudenlaisia innovaatioita ja ratkaisuja energiamurroksessa. Tässäosaamisen lisäksi tarvitaan myös laajaa systeemistä ymmärrystä.

Aiemmin energiantuotanto Suomessa on perustunut pitkälti ydinvoimaan, vesivoimaan ja erilaisten polttoaineiden polttamiseen (kivihiili, öljy, maakaasu, jäte, biopolttoaineet, turve).

Palamistekniikan osaaminen tarve ei siis ole katoamassa mihinkään, vaikka polttoainevalikoimasta poistuvat pitkään käytetyt fossiiliset polttoaineet. Palaminen tapahtuu edelleen höyrykattiloissa. Höyrykattilat eivät ole myöskään katoamassa ydinvoimaloista. Lisäksi nykyisissä ydinvoimaloissa ja soodakattiloissa nähdään varmasti jatkossakin höyryturbiineja. Tulevaisuuden pienet ydinvoimalayksiköt saattavat olla pelkkää lämpöä tuottavia kaukolämpölaitoksia.

Sanapilvi Energiateollisuus ry:n vuoden 2023 jäsenkyselystä kerätyistä osaamistarpeista (Energiateollisuus ry).

Voidaan siis summata, ettei mikään vanha osaamistarve katoa, mutta sen rinnalle nousee voimakkaasti monia muita tarpeita, ja tuotantoratkaisuja voidaan monipuolistaa. Konkreettisenä esimerkkinä tästä voidaan mainita esimerkiksi Helenin Vuosaaren bioenergiailahtuksessa savukaasujen lämmön talteenotto erilaisilla lämpöpumppuratkaisuilla, joilla pystytään nostamaan prosessin energiantuotannon hyötysuhdetta.

Nopeasti kasvaneista osaamistarpeista tuotantopuolella mairittakoon Suomessa etenkin lämpöpumppu-, tuulivoima- ja aurinkosähköosaaminen. Näiden tuotantomuotojen prosentuaalinen kasvu on ollut huimaa, ja kokonaiskuvassa etenkin tuulivoima on saavuttanut suuren merkityksen Suomessa monella eri tavalla. Sääriippuvainen sähköntuotanto tulee vaikuttamaan myös sähköä tarvitseviin laitteisiin, kuten lämpöpumppuihin. Näiden lisäksi muun muassa sähkön siirtopuolelle tarvitaan uusia osajia ja kulutuspuolelle ihmisiä, jotka ymmärtävät rakennusautomaatiota ja esimerkiksi data-analyysejä entistä paremmin.

Myös liikenteen sähköistymisen tarpeet näyttävät kasvavan – erityisesti sähköautojen lataamiseen liittyvä osaamistarve. Perinteisistä tuotantomuodoista vesivoiman hyödyntämisen mahdollisuuksista on jälleen virinnyt keskustelua, etenkin erilaisten pumppuvoimaloiden yhteydessä. Energiaa varastoidaan jatkossa entistä enemmän esimerkiksi lämmön kausivarastoihin. Sähköä varastoidaan akustoihin päivän säätötarpeita varten ja sähkömarkkinoiden “spot”-hintojen tai “day-ahead”-hintapiikkien loiventamiseen. Satojen megawattien lämpövarastoja on jo valmistella, samoin kymmenien megawattien sähköakustoja.

Yhteistä kaikelle muutokselle on voimakas sektori-integraatio. Tällä tarkoitetaan eri energiamuotojen kytkemistä toisiinsa ja loppukäyttäjiiin, eli rakennuksiin, liikenteeseen ja teollisuuteen. Sektori-integraatiosta voi mainita esimerkiksi kulutuksen dynaamisen säätelyn tehdasalueella tai korttelin sisällä, sekä rakennusautomaation, autojen lataamisen, aurinkosähköjärjestelmän ja lämpöpumppujen saumattoman toiminnan yhteensovittamisen.

Energiasiirtymä pois vanhasta fossiilisten polttoaineiden polttoon tukeutuneesta järjestelmästä on ollut nopeaa ja monipuolista. Siirtymässä on Suomessa havaittavissa tiettyjä painopistealueita:

- Fossiilisista polttoaineista, kuten kivihiilestä, maakaasusta ja erilaisista fossiilisista öljyistä, luopuminen sähkön ja lämmön tuotannossa.

- Sääriippuvaisen tuotannon nopea lisääntyminen ja siirtokapasiteetin ja sähkön varastoinnin lisäämisen tarve.

- Lämmityksen sähköistyminen lämpöpumppujen ja sähkökattiloiden avulla, joillakin alueilla yhteistuotannosta (CHP) luopuminen

- Energian varastointi (sähköä, lämpöä, muina tuotteina, kuten vetynä) ja tuotannon nopea tasapainotus (esim. vesivoima, sähkömoottorit, jne)

- Isojen sähkön loppukäyttäjien roolin kasvaminen energiasysteemeissä, esim. kysyntäjoustop ja reservimarkkinoiden osana.

- Sähkön loppukäyttäjien siirtyminen enenevissä määrin pörssisähkösopimuksiin

- Energiapalveluiden lisääntyminen

Osaamisen tarvekartoituksia on tehty useassa energia-alan hankkeessa (kts. Ohrling ym. 2021, Lindholm ym. 2023) sekä etujärjestöjen jäsenilleen teettämässä kyselytutkimuksissa. Lisäksi Jatkuvan oppimisen ja työllisyyden palvelukeskuksella (Jotpa) on käytössään osaamistarvekompassi. Kompassi on Jotpan kehittämä verkkopalvelu, joka hyödyntää ajantasaista tietoa työelämän osaamistarpeista ennakoidakseen työn ja osaamisen kohtaantoa. Eri lähteiden painotukset osaamistarpeissa vaihtelevat kyselyn kohderyhmästä riippuen, mutta yleisviesti on kaikissa sama: osaajia on liian vähän ja se hidastaa energiasiirtymää.

PK-yrityksillä osaamisvajae painottuu sähköasentajiin, hybridilämmitysjärjestelmien suunnitteluun ja kiinteistöautomaatioon. Lisäksi alalle toivottaisiin lisää väkeä, joka taitaa sekä sähkö- että LVI-asennukset ja myös järjestelmien kunnossapidon. Myös teknisen myynnin osaamista ja perusfysiikan ymmärrystä tarvittaisiin lisää. Suurempien yritysten puutteissa korostuu ICT-osaajat ja muun muassa datanhallinta-, myynti- ja asiakaspalvelutehtävissä tarvittava ”ymmärrys energiantuotannosta kokonaisuutena”.

Eri suuruisten projektien projektihenkilöstöstä on myös kauttaaltaan pulaa. Kyselyissä on noussut esiin joitakin hyvin alakohtaisia lisääntyviä tarpeita, kuten korkeanpaikan asennukset tuulivoiman alalla. Kuten muillakin aloilla, syrjäisemille paikoille, joissa voimalaitoshankkeet usein sijaitsevat, on hankala houkuttella työvoimaa. Tulevaisuudessa tulee todennäköisesti olemaan ammatteja, joihin ei ole vielä tutkintokoulutusta. Osa nykyisistäkin energiasiirtymän kannalta tärkeitä ammateista on opittu erikoisammattitutkinnon kautta tai työnantajan omien koulutusten avulla. Alla on listattu erilaisissa selvityksissä esille nousseita osaamistarpeita, joihin kuuluu myös enenevissä määrin niin sanottuja ”soft skillsejä”.

Selvityksissä esille nousseita osaamistarpeita:

- Yleinen käsitys energiasysteemistä, eli siitä miten eri asiat (tuotanto, kulutus, siirto, hinnoittelu, jne) liittyvät toisiinsa
- Projektinhallinta
- Rakennusautomaatio
- Aurinkosähköjärjestelmien asentaminen
- Asiakasrajapinnassa toimiminen ja muut sosiaaliset taidot
- Sähkö- ja LVI -osaamisen yhdistäminen
- Sähköautojen lataamisinfrastruktuuriin liittyvä osaaminen
- Teknisen myynnin hallinta
- ”Digiosaaminen”, etupäässä isojen datamäärien hallinta ja jalostaminen.
- Tekoälyn mahdollisuuksien ymmärtäminen energiasektorilla.

Joustava oppiminen ja digitaalisuuden edut

On tärkeää, että ihmiset voivat täydentää ja päivittää osaamistaan töiden ohessa. Metropolia AMK:ssa on tehty pitkään käyttäjälähtöistä tutkimusta energia-alan täydennyskoulutukseen liittyen. Erityisesti ammatillisessa jatkokoulutustumisessa aikaan ja paikkaan sitoutumattoman opiskelun mahdollisuus on tärkeä, koska täydennyskouluttautujalla ei välttämättä ole mahdollisuutta sitoutua pitkiksi ajoiksi kerralla oppimisistoihin. Opetuksen digipedagogiseen laatuun ja erityisesti kurssien palvelumuotoiluun on samasta syystä tärkeä kiinnittää huomiota, koska esimerkiksi raskaan työpäivän jälkeen ei sekavaan kokonaisuuteen jaksaa syventyä.

Kyselytutkimuksessa (Aejmelaeus M. ym 2022) kuitenkin havaittiin, että täydennyskoulutukseen osallistuvat toivoivat, että opiskelu toteutettaisiin ryhmämuotoisesti positiivisen ryhmäpaineen ylläpitämiseksi. Tämän suhteen on yritetty kehittää kurssien sisäisiä ryhmäkeskusteluita, jotta vuorovaikutus toteutuisi edes jollain tavalla. Verkko-opetuksen uusimpiin havaintoihin voi tutustua artikkelissa Verkko-opetus yksilöllisen oppimisen mahdollistajana (Aejmelaeus, M. & Koutonen, E. 2025).

Energia-alan verkkokursseja on laajasti tarjolla. Lisäksi Jotpan rahoittamien hankkeiden kautta tarjotaan kursseja. Jos tämän artikkelin lukija haluaa testata jotain kurssia, hän voi esimerkiksi hakea kurssin opin.fi -palvelun kautta (120 hakutulosta hakananalla energia) tai ilmoittautua alla olevan qr-koodin kautta Energiajärjestelmät ja -siirtymä Suomessa -kurssille. Energia-alan osaajien koulutus on haasteen edessä, koska ala muuttuu niin nopeasti ja osaamistarpeet saattavat olla hankalia ennustaa kolmen tai viiden vuoden päähän. Esimerkiksi paljon puhuttuja vetylaitoksia ei ole tulossa yhtä paljon ja nopeasti kuin viihdellä pari vuotta sitten luultiin, ja Metsähallituksen Ebba ja Edith-merituulivoimahankkeille ei löydetty toteuttajia.

Toisaalta on myös mahdollista, että joku innovaatio muuttaa alaa nopeasti. Esimerkiksi syvälämpökaivojen poraamisen onnistuminen voisi muuttaa paikallista lämmöntuotannon rakennetta melko nopeasti. Biotalouden kehittyminen kohti jalostettumia tuotteita voi tuoda uudenalaisia tarpeita vanhojen rinnalle myös energiatekniikan osajalle.

Kansainvälisesti Suomella on se etu, että energiasiirtymä on täällä tapahtunut harppauksin ja riippuvuus Venäjältä tuodusta energiasta on katkaistu äkisti. Sähkö on Suomessa eurooppalaisin erittäin halpaa ja keskimäärin yli 94 prosenttisesti hiilineutraalisti tuotettua. Suomi on siis onnistunut siinä, mikä ei tunnu muualla Euroopassa oikein onnistuvan. Jotta kehitys ei jäisi tähän, meidän on jatkettava osaamisemme jalostamista, käsillä on sähköistymisen ansiosta valtava teollisuuden ja oikeastaan kaiken energiankäytön murros, mikä tarvitsee jatkuvasti uutta ja vanhaa osaamista. ■



QR-koodi esimerkkikurssiin
Energiasiirtymästä (Metro-
polian ViVid-hanke).

osaamistarvekompPASS.fi/fi
Lindholm, F., Koutonen, E., Gröndahl, H., Rapanen, K., Stukolkina, L., Aejmelaeus, M., Hyökyvaara, P. & Ylä-Lyly, S. 2023. Energia-alan osaamistarpeiden tiekartta: käyttäjälähtöisen tarvekartoituksen tuloksia. FrEE – Framtidens EnergiExpert – Tulevaisuuden energiaosaajat hiilivapaaseen kasvuun –hanke. Yrkeshögskolan Novia. Saatavissa <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe20231122148481>

Ohrling, T., Heiskanen E. & Matschoss, K. 2021. Energiämurros ja osaaminen: tarkastelu energiämurroksen avainalojen ammatillisista osaamis- ja koulutustarpeista. Aalto-yliopiston julkaisusarja KAUPPA + TALOUS, Vuosikerta. 2/2021, Smart Energy Transition -hanke, Helsinki.. Saatavissa <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-0251-2>



**ILMANSUOJELU-
YHDISTYS ry.**

ILMANSUOJELUYHDISTYS

Ilmansuojeluyhdistys (ISY) toimii alansa valtakunnallisena ympäristönsuojelujärjestönä. Ilmansuojeluyhdistyksen tarkoituksena on edistää ilmansuojelua ja ilmansuojelun tutkimusta Suomessa sekä toimia yhdyssteinä ilmansuojelun parissa työskentelevien henkilöiden ja yhteisöjen välillä Suomessa ja ulkomailla. Ilmansuojeluyhdistys pyrkii toiminnallaan edistämään ilmansuojelualalla toimivien henkilöiden ammattitaitoa. Ilmansuojeluyhdistys on perustettu vuonna 1976.

Ilmansuojeluyhdistys:

1. seuraa alansa tutkimuksen, koulutuksen, tekniikan sekä hallinnon ja lainsäädännön kehitystä
2. suunnittelee ja järjestää koulutusta sekä keskustelutilaisuuksia
3. järjestää ekskursioita kotimaassa ja ulkomailla
4. tiedottaa ajankohtaisista ilmansuojeluasioista jäsenlehdessään
5. antaa lausuntoja ja tekee esityksiä alansa kuuluvista asioista
6. harjoittaa julkaisuutoimintaa
7. osallistuu kansainväliseen tiedonvaihtoon

HALLITUS / STYRELSE

Puheenjohtaja / Ordförande
Ville-Veikko Paunu

Varapuheenjohtaja / Viceordförande
Maija Leino

Jäsenet / Medlemmar
Jouni Ahtiainen
Minna Kaila
Helena Kivi-Koskinen
Hanna Manninen

Varajäsenet / Suppleanter
 Tuula Pellikka
 Janne Ruuth
 Topi Rönkkö
 Hilikka Timonen

LUFTVÅRDSFÖRENINGEN

Luftvårdsföreningen fungerar som nationell miljövärdningsförening. Luftvårdsföreningens syftsmål är att främja luftvärden och luftvårds- forskningen i Finland och fungera som förbindelselänk mellan personer och samfund som arbetar med luftvårdsfrågor i Finland och utomlands. Luftvårdsföreningen strävar att främja yrkesskickligheten hos personer som arbetar med luftvårdsfrågor. Luftvårdsföreningen är grundad år 1976.

Luftvårdsföreningen:

1. följer med den vetenskapliga, forsknings-
mässiga, tekniska samt förvaltnings- och
lagstiftningsmässiga utvecklingen i sin bransch
2. planerar och ordnar skolingstillfällen
samt diskussionstillfällen
3. ordnar exkursioner både i Finland och
utomlands
4. rapporterar om aktuella luftvårdsfrågor
i sin medlemstidning
5. avger utlåtanden och tar initiativ i
luftvårdsfrågor
6. bedriver publikationsverksamhet
7. deltar i det internationella
luftvårdssamarbetet

YHTEYSTIEDOT / KONTAKT

ILMANSUOJELUYHDISTYS RY

Sihteeri Hanne Väistö
PL 136,
00251 Helsinki
Puh. 045 1335989
sihteeri@isy.fi



www.isy.fi



ilmansuojeluyhdistys



www.facebook.com/ilmansuojeluyhdistys

**FINNISH AIR POLLUTION
PREVENTION SOCIETY**

Finnish Air Pollution Prevention Society (FAPPS) is the national air pollution prevention association. The purpose of FAPPS is to prevent air pollution and to promote the research of air protection in Finland. FAPPS connects people and communities working with air protection issues in Finland and abroad. FAPPS aims to further the professional skills of the people working in the field. FAPPS was founded in 1976.

FAPPS:

1. follows technical, scientific, administrative and legislative developments of air protection
2. plans and organizes education and seminars
3. organizes excursions in Finland and abroad
4. informs about air protection issues of current interest in the magazine of FAPPS
5. gives statements and prepares proposals about air protection issues
6. publishes
7. participates in the international information exchange

Lähteet:

Aejmelaeus M., Gröndahl H., Stulkokina L., Suoheimo M.
2022 Energia-alan ammatillinen jatkokouluttautuminen
verkko-opetuksen kautta, konferenssiartikkeli
Ammattikorkeakoulutuksen ja ammatillisen
koulutuksen tutkimuspäivät. Saatavissa: [https://www.
researchgate.net/publication/368959060_Energia-
alan_ammattillinen_jatkokouluttautuminen_verkko-
opetuksen_kautta](https://www.researchgate.net/publication/368959060_Energia-
alan_ammattillinen_jatkokouluttautuminen_verkko-
opetuksen_kautta)

Aejmelaeus, M. & Koutonen, E. (2025). Verkko-
opetus yksilöllisen oppimisen mahdollistajana. ITK -
Interaktiivinen Tekniikka Koulutuksessa 2025. Suomen
eOppimiskeskus ry. s. 10–13.

ITK Interaktiivinen Tekniikka Koulutuksessa 2025
Jatkuvan oppimisen ja työllisyyden palvelukeskus
(Jotpa): Osaamistarvekompassi <https://www.>

HNU Nordion
Kaikki ilmanlaadun mittaukseen

HNU Nordion Ltd. Oy
Atomitie 5 B 6, 00370 Helsinki
Puh. 09 565 7240
info@hnunordion.fi
www.hnunordion.fi



HNU Nordion Ltd. Oy

KIRJOITTAJAT 4 | 2025

MILJA JÄPPI

tutkija
Tampereen yliopisto
milja.jappi@tuni.fi

ARI KARPPINEN

tutkimuspäällikkö
Ilmatieteen laitos
ari.karppinen@fmi.fi

NELLI KASKI

ilmansuojeluasiantuntija
Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY
nelli.kaski@hsy.fi

MAIJU LINKOSALMI

tutkija
Ilmatieteen laitos
maiju.linkosalmi@fmi.fi

TAPIO REINIKAINEN

johtava asiantuntija
Suomen ympäristökeskus
tapio.reinikainen@syke.fi

PAULA SCHRODERUS

ylitarkastaja
Hämeen ELY-keskus
paula.schroderus@ely-keskus.fi

HILKKA TIMONEN

johtava tutkija
Ilmatieteen laitos
hilkka.timonen@fmi.fi

ANTTI TOHKA

yliopettaja
Metropolia AMK
antti.tohka@metropolia.fi

