



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

SAVUKAASUBLUUMIEN 3D - VISUALISOINTI

TEKIJÄ: Jukka Lappalainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Jukka Lappalainen			
Työn nimi Savukaasubluumien 3D-visualisointi			
Päiväys	5.11.2013	Sivumäärä/Liitteet	53/1
Ohjaaja(t) Yliopettaja Merja Tolvanen ja päätoiminen tuntiopettaja Teemu Räsänen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Symo Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän insinöörityön tavoitteena oli etsiä visualisointiohjelma savukaasubluumin 3D-visualisointia varten ja tuottaa menetelmäohje 3D-visualisointia varten. Visualisointiohjelman valinnassa vertailtiin kahta ohjelmaa, 3D Analyst- ja Paraview-ohjelmaa, keskenään, joista visualisointiohjelmaksi valittiin Paraview-ohjelma. Menetelmäohjeessa tarkastellaan visualisoinnin eri vaiheet läpi seikkaperäisesti. Ohjeessa kerrotaan, kuinka Aermod ViewTM-leviämismallinnusohjelmasta saadaan tuotettua reseptoriverkostot ja muutettua ne Excel-ohjelmalla sopivaan muotoon, jotta ne voidaan tuoda Paraview-visualisointiohjelmaan. Varsinaisen visualisoinnin lisäksi ohjeessa kerrotaan, miten tuotetaan erilaisia tulostuskuvia savukaasubluumin 3D-visualisaatiosta. Tarve savukaasubluumin 3D-visualisoinnille tuli Pino-asetuksen tultua voimaan; tämän vuoksi leviämismallinuksien kysyntä on lisääntynyt merkittävästi. 3D-visualisoinnilla saadaan huomattavasti havainnollisempi visualisaatio savukaasubluumin leviämisestä kuin 2D-tasolla. Tällöin 3D-visualisoinnin avulla leviämismallinuksien visualisaatioiden arvo nousee.</p> <p>Visualisointiohjelman valinnan jälkeen suoritettiin ohjelman validointi, jolla varmistettiin ohjelman toimivuus ja sopivuus käyttötarkoitukseensa. Validointimenetelmäksi valittiin visuaalinen vertailu, jossa vertailtiin Aermod ViewTM-ohjelmalla tuotetun savukaasubluumin 2D-visuaalisaation ja Paraview-ohjelmalla tuotetun savukaasubluumin 3D-visuaalisaation samalta tasolta otetun leikkauskuvan eroja ja yhtäläisyyksiä. Tämä validointimenetelmä suoritettiin kolmella eri tasolla, joiden visualisaatioita vertaamalla todettiin, että Paraview-ohjelman 3D-visuaalisaatio on luotettava ja ohjelma toimii oikealla tavalla.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin valittua visualisointiohjelma ja savukaasubluumin 3D-visualisointiohjeet työn tilaajan käyttöön. Työohjeessa esitetään vaihe vaiheelta savukaasubluumin 3D-visuaalisaation tuottaminen ja erilaisten tulosteiden tuottaminen 3D-visuaalisaatiosta, joiden avulla pystytään tuottamaan havainnollisia otoksia savukaasubluumin leviämisestä ympäristöön. Opinnäytetyön perusteella voidaan todeta, että Paraview-ohjelma soveltuu hyvin savukaasubluumin 3D-visualisointiin, jolla pystytään esittämään entistä havainnollisemmin bluumien leviämistä myös korkeussuunnassa eri mallinustilanteissa.</p>			
Avainsanat 3D-visualisointi, savukaasubluumi, Aermod View TM , Paraview,			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Jukka Lappalainen			
Title of Thesis 3D Visualization of Flue Gas Plumes			
Date	5 November 2013	Pages/Appendices	53/1
Supervisor(s) Mrs Merja Tolvanen, Principal Lecturer and Mr. Teemu Räsänen, Lecturer			
Client Organisation /Partners Symo Oy			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this thesis was to look for a visualization program to visualize flue gas plumes in 3D and to produce a guide for 3D visualization. When the program was being chosen, two programs, Paraview and 3D Analyst, were compared with each others. The Paraview-program was selected to as the visualization program. The guide, which was made to be used by the client, will walk the user through visualization phases step by step. The guide presents, how receptor nets are made by the Aermid View™ program and then converted to a form suitable for the Paraview-program by the Excel-spreadsheet program. The guide also displays how to make various prints of the visualization. The need for the 3D visualization of flue gas plume was came up when the Pino regulation came into force leading to increased demand for dispersion models. It is possible to illustrate more with 3D visualization than with 2D visualization. This gives added value to visualization of dispersion model.</p> <p>After the program had been selected, the validation was carried out. The validation of the program was performed to confirm its functionality and suitability for the purpose. Visual comparison was chosen as the validation method comparing the visualizations of the 2D visualization by the Aermid View™ program and the 3D visualization by the Paraview program of the flue gas plume taken at the same point and level. These visualizations were made in three different levels; with each level visualizations were compared to each other to determine the differences. The Paraview program was found to be working properly and reliably on the basis of the results of the validation.</p> <p>As a result of this thesis, a visualization program was chosen and a guide for 3D visualization of the flue gas plume was was produced. The guide presents step by step how a flue gas plume 3D visualization is made and how to make a variety of illustrative prints from the visualization. It can be concluded that the Paraview program is suitable for 3D visualization of flue gas plumes. The major advantage of the 3D visualization compared to the 2D visualization is that it can present more information of the spread of plumes in the vertical direction.</p>			
Keywords 3D visualization, flue gas plume, Aermid View™, Paraview			

ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö tehtiin Symo Oy:n toimeksiantona kevään ja alkutalven 2013 välisenä aikana. Haluan kiittää tilaajaa mielenkiintoisesta opinnäytetyöaiheesta ja sen ohjaamisesta. Erityisesti haluan kiittää opinnäytetyön ohjaajia Merja Tolvasta ja Teemu Räsästä opinnäytetyöni ohjaamisesta. Lisäksi haluan kiittää kaikkia muita henkilöitä, jotka ovat auttaneet ja tukeneet opinnäytetyön tekemisessä.

Kuopiossa 5.11.2013

Jukka Lappalainen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
1.1	Työn tausta ja tavoitteet	8
1.2	Symo Oy ja nykyinen leviämismallinnuksen ja visualisoinnin tila	9
2	PINO-ASETUS JA -REKISTERI	10
2.1	Pino-asetus.....	10
2.2	Pino-rekisteri	11
3	ILMAN EPÄPUHTAUSPÄÄSTÖJEN LEVIÄMINEN.....	12
3.1	Ilmansaasteiden vaikutukset ympäristöön ja ilmanlaadun seuranta ilmanlaatuindeksin avulla	12
3.2	Ilmanlaadun vaihtelut ja siihen vaikuttavat tekijät	13
3.3	Päästöjen leviämiskorkeus	15
3.3.1	Piippulisä	15
3.3.2	Savukaasupainuma	16
3.4	Savukaasupäästön laimeneminen.....	17
3.4.1	Diffuusio ja turbulenssi	17
3.4.2	Pystysuuntainen savukaasupäästöjen sekoittuminen ja ilmakerroksien terminen rakenne	18
3.4.3	Planetaarisen rajakerroksen vaikutus epäpuhtauksien leviämiseen ilmassa.....	19
3.4.4	Ilman liike ja sekoittuminen pystysuunnassa	20
3.5	Päästöjen leviäminen tuulen vaikutuksesta	21
3.5.1	Planetaariset ja alueelliset tuulimekanismit	21
3.5.2	Paikalliset tuulijärjestelmät	23
4	PÄÄSTÖJEN LEVIÄMISMALLINNUS JA VISUALISOINTI	25
4.1	Epäpuhtauksien leviämisen mallintaminen leviämismallinnuksien avulla	25
4.2	Päästölähdetyypit.....	26
4.3	Erilaisia leviämismalliteorioita.....	26
4.3.1	Stationaariset mallit.....	26
4.3.2	Dynaamiset mallit	30
4.3.3	Muita malleja	31
4.4	Savukaasubluumin leviämismallinnus ja sen visualisointi prosessina	31
4.4.1	Leviämismallinnukseen tarvittavat lähtötiedot	31
4.4.2	Meteorologia.....	32
4.5	Suomalaisia ja ulkomaalaisia tutkimuksia leviämismallinnuksesta ja visualisoinnista.....	33

4.6	Leviämismallinnuksia ja leviämismallien visualisointeja tekeviä tahoja ja yrityksiä.....	33
5	2D- JA 3D-LEVIÄMISMALLIEN TARKASTELU	35
5.1	Aermod View™	35
5.2	Leviämismallien visualisointi 2D-tasolla.....	37
5.3	Leviämismallinnuksien visualisointi 3D –tasolla.....	37
6	SAVUKAASUBLUUMIEN VISUALISOINTIOHJELMAN VALINTA.....	39
6.1	Visualisoinnin eri ohjelmavaihtoehdot.....	39
6.1.1	Paraview	39
6.1.2	3D Analyst.....	40
6.2	Ominaisuuksien vertailu.....	41
6.3	Ohjelman valinta.....	42
6.4	Ohjelman käyttöönotto.....	43
7	OHJELMAN VALIDOINTI.....	44
7.1	Paraview-ohjelman validointi	44
7.2	Validointimenetelmä.....	44
7.2.1	Validointi 50 metrin korkeudella	44
7.2.2	Validointi 90 metrin korkeudella	46
7.2.3	Validointi 140 metrin korkeudella	47
7.3	Validoinnin yhteenveto	48
8	YHTEENVETO.....	49

LÄHTEET

Liite 1 Savukaasubluumin leviämismallinnus ja sen visualisointi lohkoaviona

SANASTO

- CO₂-ekv** Hiilidioksidiekvivalentti on suure, joka ilmaisee kasvihuonekaasun vaikutukset suhteutettuna hiilidioksidin kasvihuonevaikutukseen. Se ilmaistaan yleensä massana, useimmiten kiloina tai tonneina. (Ilmatieteenlaitos 2012.)
- Inversio** Inversiotilanteessa maanpinnan lähellä on kylmää ilmaa ja sen päällä oleva ilma on tätä lämpimpää, jolloin ilmamassat eivät pääse sekoittumaan keskenään ja epäpuhtaudet eivät pääse laimentumaan.
- Ohjearvo** Kansallinen ohjearvo, joka on määritetty jollekin epäpuhtaudelle ja sen enimmäispitoisuudelle ulkoilmassa. Ohjearvot ovat lähinnä suunnittelua varten annettuja arvoja, joiden avulla epäpuhtauksien pitoisuuksien kohoaminen on tarkoitus estää ennakolta. (HSY 2011.)
- Pitoisuus** Pitoisuus ilmaisee jonkun tietyn komponentin määrän tietyssä tilavuudessa (esimerkiksi päästökomponentin pitoisuudet $\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- ppb** Ilmaisee pitoisuutta eli ppb on yksi miljardisosa (parts per billion).
- ppm** Ilmaisee pitoisuutta eli ppm on yksi miljoonasosa (parts per million).
- Raja-arvo** Raja-arvo on päästön pitoisuus, jota ei saa ylittää missään tilanteessa. (HSY 2011.)

2D-visualisointi

2D-visualisoinnilla tarkoitetaan jonkun mallin esittämistä kaksiulotteisesti esimerkiksi karttapohjalla, johon on merkitty leviämisen pitoisuuskäyrät ja eri pitoisuuksia omaavat värit leviämistä kuvaamaan.

3D-visualisointi

3D-visualisointi tarkoittaa mallinnuksen esittämistä samanlailla kuin 2D-visualisoinnissa, mutta visualisointiin on otettu mukaan Z-akseli, jolloin malli on kolmiulotteinen.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Ilmansaasteiden vaikutukset luontoon, rakennettuun ympäristöön, ja elämiin ovat merkittäviä, sillä yleensä ottaen ne vaikuttavat negatiivisesti kaikkiin näihin tekijöihin. Lisäksi ilmansaasteiden vaikutukset tulevat kalliiksi yhteiskunnalle, kun tarvitaan korjaavia ja ehkäiseviä toimenpiteitä ilmansaasteiden vaikutuksien poistamiseksi ja pienentämiseksi. Esimerkiksi ilmansaasteiden vaikutukset ihmisiin ovat merkittävät, kun ne aiheuttavat erinäköisiä oireita ja sairauksia ihmisille. Näiden vaikutuksien hoitaminen tulee yhteiskunnalle hyvin kalliiksi, minkä vuoksi niitä pyritään ennaltaehkäisemään eri keinoin. Ilmansaasteiden päästökomenttien ehkäisykeinoja ovat perinteisesti olleet erinäköiset puhdistustekniikat ja toiminnalle annetuissa lupaehtoissa olevat raja-arvot eri epäpuhtauskomponenteille, joita toiminnan aikana ei saa ylittää.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään uuden Pino-asetuksen alaisiin energiatuotantolaitoksien päästöihin ja niiden leviämiseen ja leviämisen visualisointiin. Pino-asetuksessa annetaan erilaisia ympäristömääräyksiä, joita laitoksen tulee noudattaa. Tärkein asia opinnäytetyöhön nähden on, että siinä annetaan ohjeet savukaasupiipun mitoittamiselle, mikä usein tapahtuu mallintamalla savukaasujen leviämistä sen purkautuessa piipunsuusta ulos. Pino-asetuksen voimaantulo on lisännyt merkittävästi leviämismallinnuksien kysyntää, minkä vuoksi tässä opinnäytetyössä keskitytään leviämismallinnuksen entistä havainnollisempien visualisointien tekemiseen. Perinteisesti mallinnuksen tulokset ovat esitetty karttatasolla pitoisuuskäyrien avulla, mutta kehittyneen tekniikan avulla pystytään visualisoimaan tuloksia myös kolmiulotteisena, joka mahdollistaa visualisoinnin lisäksi z-akselin suhteen.

Visualisointi on tarkoitus tehdä sekä nykyisellä kaksiulotteisena visualisointina että uutena kolmiulotteisena visualisointina. Opinnäytetyössä tarkastellaan kolmiulotteisen visualisoinnin hyötyjä kaksiulotteiseen visualisointiin nähden, vertaillaan saatavilla olevia visualisointiohjelmia keskenään ja valitaan näistä parhaiten käyttöön sopiva visualisointiohjelma. Ohjelman luotettavuus on tarkoitus selvittää validoinnin avulla, jossa 3-ulotteista visualisoinnin tuloksia verrataan visuaalisesti 2-ulotteisen visualisoinnin tuloksiin. Ohjelman valinnan ja luotettavuuden tarkastuksen jälkeen tuotetaan työn tilaajan käyttöön menetelmäohje, jonka avulla varsinainen leviämisen kolmiulotteinen visualisointi suoritetaan.

1.2 Symo Oy ja nykyinen leviämismallinnuksen ja visualisoinnin tila

Symo Oy on yksityinen, puolueeton ja riippumaton ympäristömittauksia tuottava yritys. Symo Oy:lla on kokemusta yli 10 vuoden ajalta erilaisista ympäristöalan mittauksista. Symo Oy:n osaamisalueita ovat: melumittaukset ja -selvitykset, päästö- ja hyötysuhdemittaukset, ulko- ja sisäilmanlaatumittaukset, melun ja ilmapäästöjen leviämislaskelmat, päästölähteiden kartoitukset, melun- ja pölyntorjuntasuunnitelmat sekä tulisijojen CE-testaukset.

Symo Oy:lla käytetään nykyisin leviämismallinnukseen ja leviämisen visualisointiin Lakes Environmental Softwaren valmistamaa Aermod ViewTM-ohjelmaa. Ohjelmalla pystytään mallintamaan päästölähteitä, joiden päästöt leviävät Gaussin teorian mukaisesti bluumina. Ohjelmalla pystytään visualisoimaan savukaasubluumin leviämistä 2D-karttatasolla pitoisuuskäyrien avulla.

2 PINO-ASETUS JA -REKISTERI

2.1 Pino-asetus

Pino-asetuksessa määrätään ympäristösuojeluvaatimuksia energiantuotantoyksilöille, jotka polttavat kaasumaista, nestemäistä tai kiinteää polttoainetta ja joiden teho on 5–50 MW:n välillä. Se koskee myös samalla laitosalueella sijaitsevia alle 5 MW:n energiantuotantolaitoksia, kun laitosten yhteenlaskettu teho on 5 MW tai enemmän. Lisäksi se koskee vähintään 1 MW:n voimalaitoksia, jos sen toiminta on ympäristöluvan mukaista toimintaa. (VNa 445/2010.)

Pino-asetuksessa eli VNa 445/2010:ssä määrätään useita eri asioita, kuten päästöraja-arvot ilmaan päästettäville päästöille ja ohjeet päästöraja-arvojen noudattamiseen, melutorjunnan toteuttaminen laitoksella ja syntyvien jätevesipäästöjen käsittely ja johtaminen vesistöön. Tärkein asia PINO-asetuksessa leviämismallinnukseen nähden määrätään pykälässä 7, jossa annetaan eri määräyksiä savupiipun korkeudesta seuraavanlaisesti (VNa 445/2010):

Energiantuotantoyksikön savupiipun korkeuden on oltava vähintään:

- 1) 10 metriä, kun kyse on kevyttä polttoöljyä tai maakaasua polttavasta yksiköstä;*
- 2) 30 metriä, kun kyse on kiinteää polttoainetta polttavasta vähintään 5 megawatin, mutta enintään 20 megawatin yksiköstä;*
- 3) 40 metriä, kun kyse on raskasta polttoöljyä polttavasta vähintään 5 megawatin, mutta enintään 20 megawatin yksiköstä;*
- 4) 40 metriä, kun kyse on yli 20 megawatin yksiköstä.*

Lisäksi energiantuotantoyksikön savupiipun korkeuden on täytettävä seuraavat vaatimukset:

- 1) piipun korkeuden on oltava vähintään 2.5 kertaa tuotantorakennuksen tai muun lähimmän esteen korkeus tai se on erikseen mitoitettava leviämismallilaskelmalla tai muun luotettavan menetelmän, kuten polttoainekohtaisen savupiippunomogrammin avulla;*
- 2) savukaasun virtausnopeuden laitoksen jokaisessa savuhormissa on oltava vähintään 5 m/s;*
- 3) energiantuotantoyksikkö ei yksinään aiheuta yli 20 prosenttia ilmanlaadun ohjearvoista ja rikkilaskeuman tavoitearvoista annetussa valtioneuvoston päätöksessä (480/1996) määritellystä ilmanlaadun vuorokausittaisesta ohjearvosta.*

Energiantuotantoyksikön savupiipun korkeus on kuitenkin aina mitoitettava leviämismallilaskelmalla, jos alle 500 metrin etäisyydellä energiantuotantoyksiköstä on yli 30 metriä korkeita rakennuksia tai muita maastoesteitä taikka maanpinnan korkeus kohoaa tätä ylemmäs mitattuna tuotantorakennuksen viereisen maanpinnan tasosta. (VNa 445/2010 § 7.)

Pino-asetuksen pykälässä 7 annetaan vaatimukset piipulle momentissa 1, jossa määrätään vähimmäiskorkeus piipun korkeudelle, jos tuotantorakennus tai muu rakennus sijaitsee piipun lähetyvillä. Jos piipunkorkeus ei ole riittävän korkea, se voidaan mitoitaa myös leviämislaskelmien tai muulla luotettavalla menetelmällä, kuten polttoainekohtaisen savupiippunomogrammin avulla. Kuitenkin yli 30 metriä korkeiden rakennuksien sijaitessa alle 500 metrin säteellä savukaasupiipusta, tulee leviämislaskelmat suorittaa leviämismallinnuksen avulla. Nämä kohdat vaikuttavat pitkälti leviämismallinnuksien lisääntyneeseen tarpeeseen. (VNa 445/2010.)

2.2 Pino-rekisteri

Pino-asetuksen alaiset energiantuotantoyksiköt tulee rekisteröidä ympäristönsuojelun tietokantaan. Tällä rekisteröinnillä on pyritty siirtämään pois pieniä energiantuotantolaitoksia ympäristöluvan piiristä. Rekisteröintivaatimus koskee välittömästi uusia laitoksia sekä vanhoja laitoksia portaittain vuoteen 2018 mennessä. Uusien laitosten on jätettävä rekisteröinti-ilmoitus vähintään 90 päivää ennen kuin toiminta aloitetaan. (Kunnat.net, 2013.)

Rekisteröinti-ilmoituksen sisällöstä määrätään ympäristönsuojelulain 65 §:ssä, että sen pitää sisältää energiantuotantoyksiköstä seuraavat asiat:

- 1) toiminnanharjoittajan nimi ja yhteystiedot;*
- 2) laitoksen yhteystiedot ja sijainti sekä tiedot laitoksen ympäristöstä;*
- 3) tiedot alueen kaavoituksesta;*
- 4) tiedot laitoksen ympäristöluvasta sekä muista voimassaolevista luvista, sopimuksista, päätöksistä ja ilmoituksista;*
- 5) tiedot laitoksen toiminnasta, käytettävistä polttoaineista ja päästöjen vähentämistekniikoista;*
- 6) tiedot päästöistä ilmaan;*
- 7) tiedot savupiipun korkeudesta ja sen mitoituksen perusteista;*
- 8) tiedot jätevesien ja sade- ja sulamisvesien (hulevesien) käsittelystä sekä päästöistä veteen tai viemäriin;*
- 9) tiedot polttoaineiden varastoinnista;*
- 10) tiedot toiminnassa syntyvistä jätteistä ja jätehuollosta;*
- 11) tiedot toiminnassa käytettävistä kemikaaleista;*
- 12) tiedot toiminnan melupäästöistä, niiden vaikutuksista sekä meluntorjuntatoimista;*
- 13) tarkkailusuunnitelma;*
- 14) suunnitelma varautumisesta häiriö- ja poikkeuksellisiin tilanteisiin. (VNa 445/2010 § 3.)*

Rekisteröinti-ilmoituksen täyttäessä nämä kohdat ja kun toiminta ei ole ympäristöluvan piirissä, eikä energiantuotantoyksikön toiminta ole alueen kaavan vastaista, toiminta voidaan rekisteröidä. Rekisteröinnistä vastaa kunnan ympäristönsuojeluviranomainen ja toiminta rekisteröidään kunta-Vahti-palveluun. Laitoksen toiminnan tulee täyttää ympäristönsuojeluvaatimusasetuksen säädetyt velvoitteita. Näiden velvoitteiden valvonnasta suorittaa kunnan ympäristönsuojeluviranomainen niin sanotusti jälkivalvontana. (Kunnat.net, 2013.)

3 ILMAN EPÄPUHTAUSPÄÄSTÖJEN LEVIÄMINEN

Seuraavassa käsitellään ilman epäpuhtauksien leviämistä Timo Laukkasen (2005) teoksen *Ilmansuojelun perusteet. Oppikirja ilman pilaantumisesta ja sen ehkäisemistä* pohjalta.

3.1 Ilmansaasteiden vaikutukset ympäristöön ja ilmanlaadun seuranta ilmanlaatuindeksin avulla

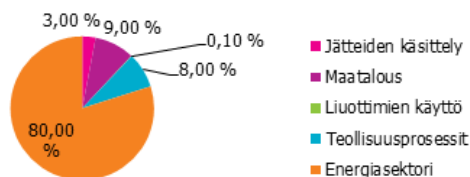
Ilmansaasteet vaikuttavat moneen asiaan: ihmisten terveyteen, ympäristöön ja infrastruktuuriin. Ilmansaasteiden ympäristövaikutuksia ovat maaperän ja vesistöjen happamoituminen, metsien kuolemat ja myös kasvihuoneilmiön voimistuminen. Nämä tekijät yhdessä vaikuttavat taas eläimiin, kun niiden elinympäristö pienenee ilmaston muuttuessa. Infrastruktuuriin vaikutukset ovat eri pinnoitteiden rapautuminen ja likaantuminen ilmansaasteiden takia. Lisäksi ilmanlaatu on olennaisesti ihmisen terveyteen vaikuttava asia, jonka vuoksi sitä seurataan jatkuvasti varsinkin asutuksen ja teollisuuden lähetyillä. Erityisesti herkät ihmiset, kuten astmaatikot, reagoivat huonoon ilmanlaatuun nopeasti ja pitkäaikainen altistuminen huonolle ilmanlaadulle voi johtaa terveyden huonontumiseen tai pahimmassa tapauksessa kuolemaan terveellä ihmisellä. Ilmanlaatua pyritään tämän vuoksi parantamaan, jonka seurauksena ilmanlaadussa on tapahtunut merkittävää kehitystä viime vuosikymmenien aikana. Tämä johtuu pitkälti lisääntyneestä tietoisuudesta ilmanlaadun merkityksestä terveyteen, mikä on myös lisännyt toimenpiteitä ilmanlaadun parantamista varten. Tämän vuoksi ilmanlaadun seuraamista varten on tehty ilmanlaatuindeksit, joka jakautuu viiteen eri luokkaan: hyvä, tyydyttävä, välttävä, huono ja erittäin huono. Ilmanlaatuindeksi toimii vertailulukuna, jolla kuvataan tunnitista ilmanlaatua verrattuna ilmanlaadun ohje- ja raja-arvoihin. Ilmanlaatuindeksissä otetaan huomioon seuraavat päästökäkomponentit: rikkidioksidi (SO₂), typpidioksidi (NO₂), pienhiukkaset (PM₁₀ ja PM_{2.5}), otsoni (O₃), häkä eli hiilimonoksidi (CO) ja haisevat rikkiyhdisteet (TRS). (HSY; Ilmanlaatuportaali; Rousku.)

Päästökäkomponenteista vakavimpana pidetään pienhiukkasia, koska ne lisää merkittävästi sydän- ja hengitystieoireita tai pahimmassa tapauksessa voi johtaa kuolemaan. Typpidioksidi vaikuttaa erityisesti herkkiin ihmisiin siten, että se supistaa keuhkoputkia aiheuttaen hengityselinoireita ja lisää herkkyyttä muille ärsykkeille. Otsoni aiheuttaa ärsytystä silmän, nenän ja kurkun limakalvoilla. Häkä taas syrjäyttää happea verenkierrasta aiheuttaen hapenpuutetta, joka voi olla erityisen haitallista sydän- ja verisuonitauksista kärsiville. Rikkidioksidin vaikutuksesta ylähengitystiet ja suuret keuhkoputket ärsyyntyvät, joka kasvattaa hengitystieinfektioiden määrää ja astmaatikoille aiheutuvia kohtauksia. Haisevat rikkiyhdisteet aiheuttavat isommissa pitoisuuksissa hengityselinongelmia, mutta jo pienissäkin määrin hajuhaittoja, jotka vaikuttavat merkittävästi asumisviihtyvyyteen. (HSY, 2010.)

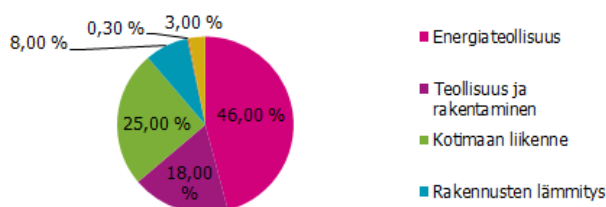
Suurin osa näistä päästökäkomponenteista on samalla kasvihuonekaasuja, joista suuri osa syntyy energiantuotannossa. Energiantuotannolla tarkoitetaan sekä lämmön- että sähköntuotantoa. Vuoden 2012 Suomen kokonaiskasvihuonepäästöt olivat 61,4 miljoona tonnia CO₂-ekv:ta, josta energiasektorin päästömäärä oli 48,5 miljoonaa tonnia CO₂-ekv:ta. Kuviio 1 esitetään vuoden 2011 energiasektorin kasvihuonepäästöt verrattuna muihin päästölähteisiin, minkä suuruus oli 80 % kokonaiskasvihuonepäästöistä. Kuviosta 1 nähdään myös, että energiasektorin kasvihuonepäästöistä

46 % muodostuu energiateollisuuden eli energian- ja lämmöntuotannon kasvihuonepäästöistä. (Suomen virallinen tilasto (SVT).)

Suomen kasvihuonekaasupäästöjen osuudet sektoreittain vuonna 2011



Energiasektorin kasvihuonepäästöt aloittain vuonna 2011



Kuvio 1 Suomen kasvihuonepäästöjen osuudet sektoreittain vuonna 2011 (ylempi) ja energiasektorin kasvihuonepäästöt aloittain vuonna 2011 (alempi). (Muokattu lähteestä Suomen virallinen tilasto (SVT).)

Energiantuotannon suurien päästömäärien ja niiden sisältämien savukaasukomponenttien terveys- ja ympäristövaikutusten takia energiantuotantolaitoksilta vaaditaan jatkuvasti yhä enemmän päästöjen seuranta ja ehkäisyä lupaehtojen kiristyessä vuosi vuodelta. Suurelta osalta nykyisin olevien laitosten ja tulevien laitosten toiminnalta vaaditaan yleensä ympäristölupaa, jossa määrätään erilaisia velvoitteita laitoksen toimintaan, kuten savukaasukomponenttien mittaamisesta. Lämpövoimalaitoksilla, jotka eivät tarvitse ympäristölupaa, sovelletaan niin sanottua Pino-asetusta (VNa 445/2010), jossa määritellään erilaisia vaatimuksia laitokselle. Erityisen tärkeä kohta Pino-asetuksessa tähän opinnäytetyöhön liittyen on vaatimukset savukaasupiipun mitoitukseen, jossa vaaditaan savukaasubluumin leviämismallinnusta, jos piipun lähettyvillä on korkeita rakennuksia 500 metrin säteellä. Tämän vaatimuksen takia leviämismallinnuksia tehdään huomattavasti enemmän kuin aiemmin.

3.2 Ilmanlaadun vaihtelut ja siihen vaikuttavat tekijät

Eri paikkakuntien ilmanlaatua vertailtaessa huomataan, että ilmanlaadussa esiintyy suuria eroja. Tähän vaikuttaa pitkälti paikkakunnan päästörakenne, joka muodostuu alueen teollisuuden, energiantuotannon ja liikenteen päästöistä. Suurimmat ilmanlaadun ongelmat ovatkin perinteisesti olleet teollisuuskaupungeissa, joissa on ollut esimerkiksi sulfaattiselluteollisuutta tai terästeollisuutta. Näistä kaupungeista on levinnyt ympäristöön erilaisia epäpuhtauspäästökäsitteitä. Tähän ongelmaan

onkin panostettu parin vuosikymmenen aikana, mutta samanaikaisesti yhä merkitsevämmässä määrin ilmanlaatuun vaikuttaa liikenteestä syntyvät päästöt. (Laukkanen 2005, 48.)

Ilmanlaadun eroihin eri paikkakuntien välillä vaikuttaa myös maaston muodot, maaston avoimuus ja alueen paikallinen ilmasto. Esimerkiksi mäkien ympäröimällä alueella päästöt eivät pääse laimenemaan muualle tuulen vaikutuksesta, jolloin pitoisuudet voivat olla hyvinkin korkeita. Ilmamassojen sekoittuvuuteen vaikuttaa alueen sijainti, sillä mitä pohjoisemmassa alue sijaitsee, sen vähemmän auringonsäteilyä alueelle tulee. Tällöin myös auringonsäteilyn vaikutuksesta lämpenevän ilmamassan kohoaminen ympäristössä vähenee ja samalla vähentäen ilmamassojen sekoittuvuutta. Myös vuorokauden- ja vuodenaikajalla on suuri merkitys ilmanlaatuun, joka johtuu sään ja päästöjen vaihteluista eri aikoina. Lämpötilan laskiessa päästöjen määrä lisääntyy sekä lämmitysenergian tarpeen lisääntyessä että autojen kylmäkäynnistysten vuoksi, jolloin palaminen on epätäydellistä. Kylmällä säällä valitsee yleensä tyyni sää, jolloin ilmamassojen sekoittuminen on vähäistä. Pahimmat epäpuhtauspitoisuudet ajoittuvatkin tällöin yleensä liikenneuhkien aikoihin, erityisesti aamuruuhkan aikaan. Talvisin ilmanlaatuun merkittävästi vaikuttava asia on omakotitalojen tulisijat, joiden polttoprosessi on hallitsematon ja täten epätäydellinen. Yleisesti näitä tulisijoja on hyvinkin tiheästi asutusseuduilla, jolloin näiden päästöt yhdessä voi olla hyvin merkittäviä. (HSY, 2012; Laukkanen 2005, 48.)

Teollisuudesta syntyviin päästöihin vaikuttaa prosessin toiminta ja siihen liittyvät toimintaongelmat, jolloin ilmaan voi häiriötilanteessa päästä korkeitakin epäpuhtauspitoisuuksia. Energiantuotantolaitoksilla päästöt ovat riippuvaisia lämpötilasta, sillä kylmillä säillä lämpö- ja sähköenergian tarve lisääntyy lisääntyvän lämmitykseen tarvittavan energian kautta. Tällöin energianmäärän lisääntyessä energiantuotantolaitoksen tehoa on lisättävä, jolloin myös päästöjen määrä lisääntyy. Lisäksi kaikkea energiaa, minkä poltettava polttoaine omaa, ei saada käytettyä hyödyksi, joten päästöjen määrään vaikuttaa myös laitoksen hyötysuhde. Itse päästöjen leviämiseen olennaisesti vaikuttaa vallitseva säätilanne, jonka vuoksi perättäisten päivien päästöjen leviäminen voi olla täysin erilaista säätilan muutoksien takia. Tuulen suunnan muutokset tai tyynen sään muuttuminen tuuliseksi sääksi muuttaa totaalisesti epäpuhtauksien pitoisuudet alueella. (Laukkanen 2005, 48; Rousku.)

Päästölähteestä päästessään epäpuhtauksien pitoisuudet ovat yleisesti ottaen korkeimmillaan ja niiden pitoisuudet ovat huomattavasti ulkoilman taustapitoisuuksia korkeammat. Tyypillisen voimalaitoksen päästöjen, kuten typen- ja rikinoksidien pitoisuudet, ovat muutama sata ppm:ää ja ulkoilman vastaavat pitoisuudet ovat enimmillään muutamia kymmeniä ppb:tä. Näin ollen päästöt laimenevat huomattavasti ja epäpuhtauspitoisuudet eivät aiheuta terveydellisiä haittoja. Kuitenkin joissain tilanteissa epäpuhtaudet eivät pääse laimenemaan riittävästi, esimerkiksi savukaasu painuman vuoksi, jolloin epäpuhtauspitoisuudet ylittävät epäpuhtauden pitoisuudelle annetut raja-arvot. (Laukkanen 2005, 49.)

Päästöjen leviämiseen ja laimenemiseen vaikuttaa epäpuhtauden päästökorkeus, alueen topografia, rakennukset ja ilmanlaatu. Ilmanlaadullisia ongelmia voi aiheuttaa myös epäpuhtauskomponenttien muuntuminen ilmassa, jolloin muutunutta voi aiheuttaa entistä haitallisempia epäpuhtauksia tai toisaalta puhdistaa ilmaa. Depositio eli epäpuhtauksien sitoutuminen pintoihin ja sateeseen puhdistaa

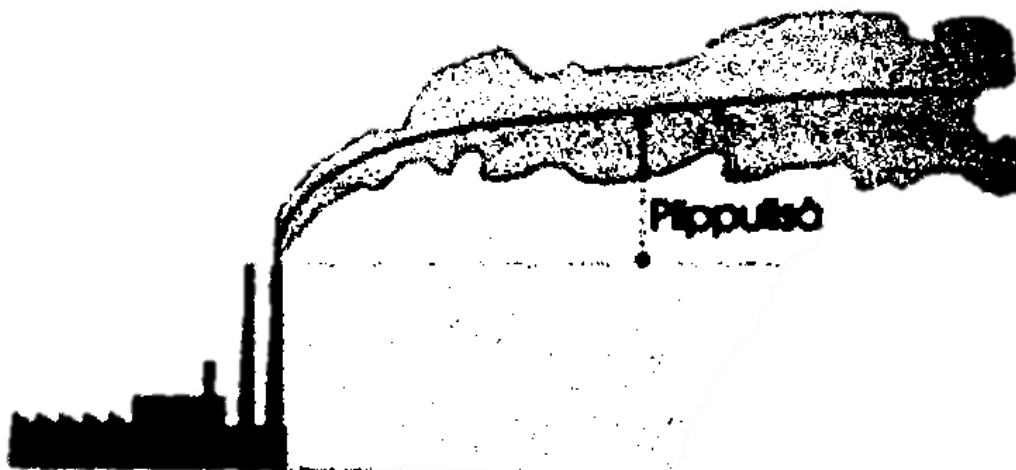
ilmaa, mutta samalla se voi aiheuttaa maaperän happamoitumista, pintojen likaantumista ja saasteiden siirtyminen veteen ja ravintoketjuun. Säätekijöistä tuulen nopeus ja suunta ja ilmassojen pystysuuntainen sekoittuminen vaikuttavat olennaisesti epäpuhtauksien leviämiseen ilmakehässä. Pystysuuntaiseen sekoittumiseen vaikuttaa pitkälti ilmakerroksien lämpötilakerrostuneisuus, joka taas on olennaisesti riippuvainen vallitsevista sääolosuhteista. Lämpötilakerrostuneisuuteen vaikuttaa tuulen nopeus, lumipeitteisyys, pilvisyys, vuorokauden- ja vuodenaika ja maaston topografia. (Laukkanen 2005, 49–50.)

3.3 Päästöjen leviämiskorkeus

Päästöjen leviämiskorkeudella on eniten merkitystä paikalliseen ilmanlaadun tasoon, mutta alueelliseen ilmanlaadun tasoon leviämiskorkeuden vaikutus vähenee. Alueelliseen ilmanlaatuun vaikuttaa huomattavasti enemmän päästöjen määrä kuin päästöjen leviämiskorkeuden vaikutus paikalliseen ilmanlaatuun on merkittävä, mutta lisäksi siihen vaikuttavat olennaisesti leviämiskorkeuden suhde lähellä oleviin rakennuksiin, maaston topografiaan ja muihin korkeisiin esteisiin. Kuitenkin on huomioitava, että savukaasupiipunsuun korkeus ei ole sama kuin päästön leviämiskorkeus. Tähän vaikuttaa olennaisesti savukaasun virtausnopeus piipussa ja sen sisältämä lämpömäärä, joiden avulla savukaasu kohoaa jopa useiden kilometrienkin päässä piipunsuuhun nähden. Tämän savukaasuviuhkan ”keskiviivan” ja piipunsuun välistä korkeutta kutsutaankin piippulisäksi. Huonoimmassa tilanteessa eli hyvin tuulisella säällä ja savukaasun virtausnopeuden ollessa piipussa liian alhainen tuulen nopeuteen nähden, voi esiintyä savukaasupainumaa, jolloin savukaasuviuhkan leviämiskorkeus on pienempi kuin savukaasupiipunsuun korkeus. (Laukkanen 2005, 50.)

3.3.1 Piippulisä

Savukaasuviuhkan leviämiskorkeus riippuu savukaasupiipun korkeudesta ja savukaasun virtauksesta piipussa ja lisäksi savukaasun sisältämästä lämpömäärästä (Kuva 1). Savukaasuviuhkan ”keskiviivan” ja piipunsuun välistä eroa korkeudessa sanotaan piippulisäksi. Usein puhutaan myös efektiivisestä piipunkorkeudesta, joka on savukaasupiipun korkeus ja piippulisä yhteensä. Savukaasun piippulisä voi olla joko positiivinen tai negatiivinen. Positiivisessa piippulisässä savukaasu viuhkan keskiviiva on savukaasupiipun suuta korkeammalla ja negatiivisessa piippulisässä piipunsuun alapuolella. Tilannetta, jolloin vallitsee negatiivinen piippulisä, kutsutaan savukaasupainumaksi. Näin ollen piippulisän vaikutukset epäpuhtauksien pitoisuuksiin maanpinnan tasolla voi olla hyvinkin merkittävä. (Laukkanen 2005, 50–51.)

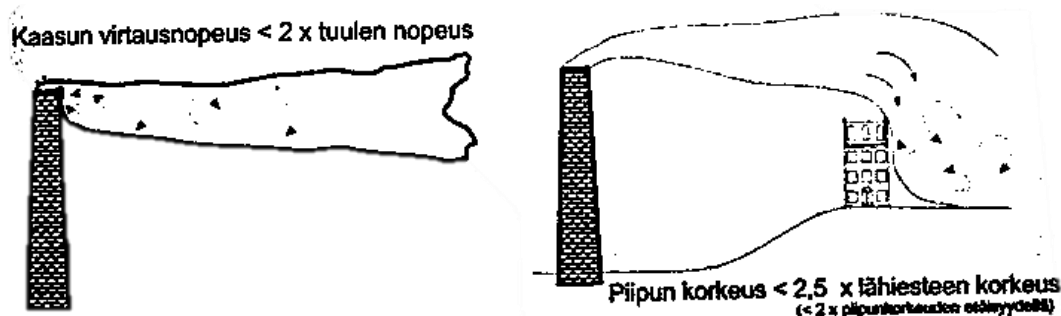


Kuva 1 Piippulisä (Laukkanen 2005, 50)

Piippulisään vaikuttaa savukaasun ominaisuudet, kuten kaasun lämpötila, hetkellinen tuulen nopeus, ilmakehän stabiilius, ilmakehän terminen rakenne ja virtausnopeus, jolla savukaasu poistuu piipunsuuaukosta. Savukaasun purkaantumisenopeus ja täten liike-energia, minkä savukaasu tällöin omaa, nostattaa savukaasua vain lyhyen matkaa. Suurempi vaikutus on savukaasun lämpötilalla, sillä lämpimät savukaasut voivat kohota jopa kilometrien päässä savukaasupiipusta. Tähän syntyvään nosteeseen vaikuttaa siis savukaasubluumin lämpö määrä, joka on riippuvainen sekä savukaasun ja ympäröivän ilman lämpötilaerosta että savukaasun määrästä. Esimerkiksi savukaasupesureissa savukaasun lämpötila laskee huomattavasti ja sitä joudutaan lämmittämään, jolla varmistetaan savukaasun riittävä noste sen purkautuessa ilmaan savukaasupiipusta. Epästabiilissa säässä savukaasubluumin noste lisääntyy, kun se nousee korkeammalle. Stabiilissa säässä bluumin noste pienenee, kun se nousee korkeammalle. Neutraalissa säässä noste pysyy muuttumattomana, kun savukaasubluumi nousee. (Lahdes & Laukkanen 2003; Laukkanen 2005, 51; EPA.)

3.3.2 Savukaasupainuma

Normaalissa tilanteessa savukaasun purkautumisnopeus savukaasupiipunsuulla on riittävän suuri, jotta savukaasuviuhka nousee ylöspäin piipunsuusta lähtiessään. Kuitenkin joissain tapauksissa, jolloin tuulen nopeus on normaalia suurempi, voi esiintyä savukaasuviuhkan painumista alaspäin sen purkautuessa piipunsuusta (Kuva 2). Savukaasun purkautumisnopeuden tulisi olla vähintään kaksinkertainen verrattuna tuulen nopeuteen, ettei savukaasuviuhka lähtisi painumaan alaspäin pyörteiden vuoksi, jotka aiheutuvat tuulen osuessa savukaasupiippuun. Tämän lisäksi korkeat rakennukset, maaston topografia ja muut korkeat objektit voivat aiheuttaa virtaushäiriöitä savukaasun kulkiessa niiden ohi. Tämän välttämiseksi savukaasupiipun korkeuden tulisi olla vähintään 2,5-kertainen verrattuna korkeimpaan esteeseen, joka sijaitsee enintään kahden piipun korkeuden verran piipusta. VNa 445/2010 pykälässä 7:n määrätäänkin, että savukaasupiipun korkeuden tulee olla vähintään 2,5-kertainen lähimpään esteeseen nähden tai vaihtoehtoisesti savukaasujen leviäminen tulee mallintaa leviämismallin avulla, jos piippu on tätä matalampi. (Laukkanen 2005, 51; VNa 445/2010 § 7.)



Kuva 2 Savukaasupainuma tuulen nopeuden (vasemmalla) ja rakennuksen (oikealla) vaikutuksista (Laukkanen 2005, 51)

Pahimmassa tapauksessa savukaasupainuma voi aiheuttaa hyvinkin korkeita epäpuhtauspitoisuuksia maanpinnantasolla. Yleisesti ottaen savukaasupainuma aiheuttaa ongelmia vanhanaikaisilla luonnolliseen vetoon perustuvissa savukaasupiipuissa, joissa savukaasun purkautumisnopeus on liian alhainen verrattuna tuulen nopeuteen. Vedon voimakkuutta voitaisiin lisätä esimerkiksi kuristamalla piipun suuaukkoa, joka vaatisi savukaasupuhtaltimen painehäviön voittamiseksi, tai korottamalla piippua, jota ei voida yleensä tehdä piipun rakenteellisen kestävyuden vuoksi. Useissa tapauksissa joudutaan rakentamaan täysin uusi savukaasupiippu, että savukaasupainumilta vältyttäisiin. (Laukkanen 2005, 51.)

3.4 Savukaasupäästön laimeneminen

Savukaasupäästön leviäminen voidaan jakaa sekä päästön laimenemiseen että sen kulkeutumiseen. Savukaasupäästön laimeneminen tapahtuu useaan eri suuntaan yhtä aikaa eli vallitsevaan tuulen suuntaan ja diffuusion ja turbulenssin kautta kaikkiin suuntiin. Päästön kulkeutumismekanismina toimii tuuli. (Laukkanen 2005, 52.)

3.4.1 Diffuusio ja turbulenssi

Ilmassa tapahtuvaa pyörteilyä kutsutaan myös turbulenssiksi, joka sekoittaa ja laimentaa ilmaan savukaasujen mukana päässeitä epäpuhtauksia. Turbulenssiä ei voida kutsua tuuleksi, koska sen virtaus on pyörivää. Turbulenssin pyörteiden koko vaihtelee sadoista metreistä muutamaan millimetriin, jolla on suuri merkitys päästön laimenemiseen ilmassa. Turbulenssia syntyy muutamien eri mekanismien kautta, jotka ovat terminen turbulenssi ja mekaaninen turbulenssi. Terminen turbulenssi syntyy, kun aurinko lämmittää maanpintaa. Tällöin maanpinnan ja sen päällä olevan ilmakerroksen päälle syntyy lämpötilaero, joka aiheuttaa turbulenssia tässä kerroksessa. Mekaaninen turbulenssi voi syntyä kahdella eri tavalla, joista enemmän vaikuttavana on maanpinnan muodoista aiheutuva kitka eli mitä rosoisempi maanpinta, sen suurempi kitka syntyy. Myös ilmakerroksien välille voi syntyä sisäistä kitkaa, kun tuulen suunta muuttuu äkillisesti. (Laukkanen 2005, 52.)

Turbulenssin pyörteiden koolla on suuri merkitys päästöjen laimenemiseen. Pienet pyörteet yhdessä diffuusion kanssa laimentavat ja paisuttavat tasaisesti savukaasuviuhkaa, mutta eivät vaikuta sinäl-

lään savukaasuviuhkan muotoon. Turbulenssin pyörteiden halkaisijan kasvaessa satojen metrien kokeiseksi, se pystyy siirtämään savukaasuviuhkan sijaintia hyvinkin nopeasti. Pahimmassa tapauksessa turbulenssi siirtää savukaasuviuhkan sijainnin lähelle maanpintaa aiheuttaen suuria maanpintoisuuksia. On todettu, että savukaasuviuhkan laimeneminen on tehokkainta silloin, kun turbulenssin pyörteiden koko on samaa koko luokkaa kuin savukaasuviuhkan halkaisija. (Laukkanen 2005, 52.)

Diffuusio on myös olennainen osa laimenemista, sillä diffuusio aiheuttaa sen, että korkeammat pitoisuudet pyrkivät laimentumaan laimeampaan pitoisuuteen päin, kunnes pitoisuuserot ovat tasoittuneet. Diffuusion kokoluokka on huomattavasti pienempi kuin turbulenssilla, koska se aiheutuu atomien ja molekyylien liikkeestä ja törmäilystä. Tästä seuraakin, että diffuusion merkitys laimenemisessä on paljon vähäisempää kuin turbulenssilla. Kuitenkin diffuusion ja turbulenssin tarkastelu erikseen on melko tarpeetonta, jonka vuoksi turbulenssi käsitellään yleisesti laajamittaisena diffuusiona, jota kutsutaan turbulenttiseksi diffuusioksi. (Laukkanen 2005, 52–53.)

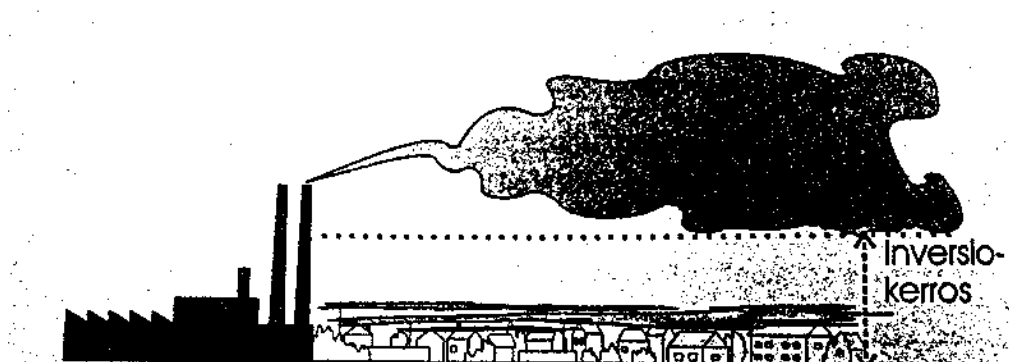
3.4.2 Pystysuuntainen savukaasupäästöjen sekoittuminen ja ilmakerroksien terminen rakenne

Ilmakerroksien pystysuuntaisen termisen rakenteen perusteella voidaan määrittää ilmakerroksien terminen tasapainotila. Termisiä tasapainotiloja ovat stabiili, neutraali ja labiili. Neutraalissa termisessä tasapainotilanteessa alailmakehässä tuulee sen verran, että alailmakehän ilmakerrokset sekoittuvat hyvin, eikä ilmakerroksia pääse syntymään. Tällöin noustaessa ylöspäin lämpötila laskee tasaisesti noin yhden asteen 100 metrin matkalla, joka johtuu ilmanpaineen alenemisesta. Ilmanpaineen alaneminen johtuu siitä, että ilman noustessa ylöspäin se laajenee ja samalla jäähtyy ja kun taas laskiessa alaspäin tiivistyy ja lämpenee. Neutraalissa termisessä tasapainotilanteessa savukaasupäästöjen laimeneminen tapahtuu tasaisesti riippumatta vallitsevista tuuliolosuhteista. (Laukkanen 2005, 53.)

Labiilissa tilanteessa vallitsee tyyni tai hyvin heikkotuulinen sää, jolloin ilma pääsee kerrostumaan. Labiilissa tilanteessa aurinko lämmittää maanpintaa, jolloin maanpinnan päällä oleva ilmakerros lämpiää nopeasti ja alkaa lämpiämisen vaikutuksesta sekä kohota ylöspäin että syntyä pyörteitä eli muuttuu turbulenttiseksi. Tällöin sekoittuminen on tehokasta pystysuunnassa lähellä maanpintaa, jolloin matalalla olevat päästölähteiden päästöt (liikenteen päästöt, omakotitalojen tulisijojen päästöt) laimenevat tehokkaasti, mutta korkeiden päästölähteiden päästöt taas eivät laimene tehokkaasti, vaan niihin voi syntyä voimakasta savukaasupainumaa maanpinnalle. (Laukkanen 2005, 53.)

Stabiilissa termisessä tasapainotilassa vallitsee inversiotilanne, jossa ilmanlämpötila nousee noustaessa ylöspäin. Tällöin pystysuuntainen sekoittuminen on olematonta, eivätkä ilmakerrokset pääse sekoittumaan keskenään. Maanpintainversio syntyy yleensä tyynen ja pilvettömän yön aikana talvisin, kun maanpinnan lämpötila pääsee jäähtymään ja sen päällä oleva ilmamassa jäähtyy nopeasti. Alimman ilmakerroksen ollessa kylmintä, myös sen tiheys on suurin, jolloin se ei lähde kohoamaan ja sekoittamaan ilmakerroksia, vaan syntyy inversiokerros maanpinnan yläpuolelle, jonka läpi matalan päästölähteen päästöt eivät pääse laimenemaan ylöspäin (Kuva 3). Tällöin voi syntyä erityisen korkeita epäpuhtauspitoisuuksia maanpinnantasolla aamuruuhkien aikana, kun ajoneuvojen päästöt ei-

vät pääse laimenemaan. Korkeiden päästölähteiden päästöt sen sijaan pääsevät laimenemaan inversiokerroksen yläpuolella, eivätkä painu kohottamaan maanpinnan epäpuhtauspitoisuuksia. Inversiotilanteen purkautuminen alkaa yleensä auringon noustua, kun maanpinnan lämpötila nousee tai sää muuttuu tuuliseksi. (Laukkanen 2005, 53–55.)



Kuva 3 Maanpinnan päällinen inversiokerros (Laukkanen 2005, 50)

Alailmakehän inversiotilanne on yleensä vain paikallista, mutta ajoittain voi esiintyä laaja-alainen yläinversiotilanne talvella korkeapaineen vallitessa. Tämä yläinversio voi muodostaa niin sanotun katon parinsadan metrin korkeudelle maanpinnasta, jolloin päästöt eivät pääse laimenemaan ylöspäin laajalla alueella, jopa pahimmillaan useiden valtioiden alueella. Tätä yläinversiotilannetta voidaan kutsua myös subsidenssi-inversioksi, joka voi aiheuttaa hyvin korkeitakin epäpuhtauspitoisuuksia isolla alueella. Tämä niin sanottu saastepilvi voi kulkeutua paikasta toiseen, jolloin kyseisen alueen epäpuhtaudet kerääntyvät saastepilveen pahentaen sitä. (Laukkanen 2005, 55–56.)

Ilmakehän lämpötilakerrostuneisuuden mittaaminen onkin melko haasteellista, jonka vuoksi sitä mitataan vain parilla sääasemalla Suomessa. Tämän vuoksi tietoa lämpötilakerrostuneisuudesta on vain harvoin käytössä säähavaintojen tueksi. Lämpötilakerrostuneisuutta voidaan myös päätellä epäsuorasti tuulen suunnan ja nopeuden hetkellisivaihteluiden synnyttämien pyörteiden perusteella. (Laukkanen 2005, 55.)

3.4.3 Planetaarisen rajakerroksen vaikutus epäpuhtauksien leviämiseen ilmassa

Auringon säteilyn vaikutuksesta aiheutuva terminen turbulenssi yhdessä maanpinnan rosoisuudesta johtuvan mekaanisen turbulenssin kanssa aiheuttavat turbulenssia maanpinnan yläpuolella, mutta tämä kerros ylittää enintään parin kilometrin korkeuteen. Tätä kerrosta, jossa näiden kahden turbulenssin vaikutus lakkaa, kutsutaan planetaariseksi rajakerrokseksi tai lyhyemmin rajakerrokseksi. Planetaarinen rajakerros erottaa siis maanpinnan vaikutuksen alaisen ilmakehän ja rajakerroksen yläpuolisen yläilmakehän, jota kutsutaan myös nimellä vapaa ilmakehä. Vapaassa ilmakehässä turbulenssia esiintyy vain hyvin vähän. Rajakerroksen fysiikka on epälineaarista turbulentsisuutensa vuoksi ja täten hyvin hankala ennustettava, kun taas vapaan ilmakehän fysiikka on lineaarista ja täten laskettavissa. Rajakerros sijaitsee normaalisti 1 000–1 500 metrin korkeuteen asti, joka voidaan havaita esimerkiksi kaupungin päällä kupuna, jonka sisällä oleva ilmakerros on selkeästi sameampaa

kuin sen yläpuolella oleva ilmakerros. Rajakerros voidaan myös havaita aurinkoisina päivinä kumpu-
pilvien avulla, sillä niiden pohja on yleisesti rajakerroksen yläpinnassa. (Laukkanen 2005, 57–58.)

Epäpuhtauksien leviäminen ja laimeneminen tapahtuu pääasiassa rajakerroksessa, jonka vuoksi sen
ominaisuuksien tietäminen on hyvin tärkeää leviämismallinnusta tehtäessä. Juuri rajakerroksen ylä-
osa muodostaa pystysuunnassa epäpuhtauksien leviämistä rajoittavan katon, joka estää hyvin te-
hokkaasti epäpuhtauksien leviämisen tämän yläpuolelle, erityisesti stabiilissa olosuhteessa. (Laukka-
nen 2005, 58.)

Joissain tapauksissa voi syntyä myös sisäinen rajakerros, joka on paikallisempi kuin planetaarinen
rajakerros. Esimerkiksi kaupungissa lämpötila voi olla korkeampi kuin sen ulkopuolella, lämpösaare-
ke, jolloin sen ympärille syntyy sisäinen rajakerros (Kuva 4). Lämpösaarekeilmion vallitessa kaupun-
gin ilmakerroksen stabiloituminen hidastuu tai estyy ja voi syntyä paikallisia tuulia, jolloin ilmaker-
roksien sekoituminen on tehokkaampaa kaupungin keskustassa kuin keskustan ulkopuolella. Myös
merien ja järvien pinnat ja niiden lähellä olevien maa-alueiden välille voi syntyä paikallisia tuulia vai-
kuttaen ilmakehän stabiiliuteen, josta voi syntyä paikallinen rajakerros. (Laukkanen 2005, 58.)



Kuva 4 Lämpösaarekeilmiö (Laukkanen 2005, 50)

3.4.4 Ilman liike ja sekoittuminen pystysuunnassa

Ilman liike tapahtuu yleensä vaakasuunnassa, mutta myös tietyissä tapauksissa ilma liikkuu pysty-
suunnassa, kuten rinteiden ja konvektion eli solussa tapahtuvien pysty- ja laskuvirtauksien vaikutuk-
sesta. Konvektiovirtaukset vaikuttavat kahta kautta päästöihin. Ensinnäkin pystyvirtauksien aikana
epäpuhtaudet kulkeutuvat yläilmakehään ja vastoin yläilmakehän otsonia maanpinnalle ja toiseksi
konvektiovirtaukset synnyttävät pilviä ja sateita, jolloin yläilmakehään joutuneet epäpuhtaudet las-
keutuvat maahan märkälasseumana. (Laukkanen 2005, 59.)

Konvektiovirtauksien syntymiseen vaikuttaa lähinnä noste, joka johtuu lämpötilaerosta. Suuremman
mittakaavan nostetta aiheuttaa kylmän ja lämpimän rintaman aiheuttamat nosteet, jossa kylmän rin-
taman aikana kylmä ilmassa painuu lämpimän ilmassa alle kylmän rintaman edetessä. Tällöin
samaan aikaan lämmin ilmassa alkaa kohota nopeasti ylöspäin. Lämpimän rintaman edetessä

lämmin ilmassa nousee kylmän ilmassan yläpuolelle. Paikallisen mittakaavan nostetta aiheuttaa auringonsäteily, joka säteillössään tummaan maanpintaa nostattaa tämän yläpuolella olevan ilmakerroksen lämpötilaa, jolloin se alkaa vähitellen kohota ylöspäin. Paikallisen nosteen vaikutusta kutsutaan myös rajapinnan konvektioksi, sillä se mahdollistaa rajakerroksen yläpinnassa aineiden vaihtumisen. Ilmiötä kutsutaan myös nimellä entrainment, jonka aikana otsonia voi siirtyä konvektivirtauksien mukana maanpinnalle. (Laukkanen 2005, 59–60.)

3.5 Päästöjen leviäminen tuulen vaikutuksesta

Epäpuhtauksien leviäminen ilmassa tapahtuu tehokkaiten tuulen vaikutuksesta, johon vaikuttaa tuulen nopeus ja suunta. Tuulen nopeus vaikuttaa myös mekaanisen turbulenssin määrään, joten mitä nopeampi tuuli on, sitä tehokkaammin se sekä leviää että laimenee myös pystysuunnassa. Tuulen nopeuden kasvaessa myös leviäminen nopeutuu, jolloin laimeneminen on tehokasta. Tuulen suunta-vaikuttaa olennaisesti siihen, mihin epäpuhtaudet lähtevät leviämään. (Laukkanen 2005, 61.)

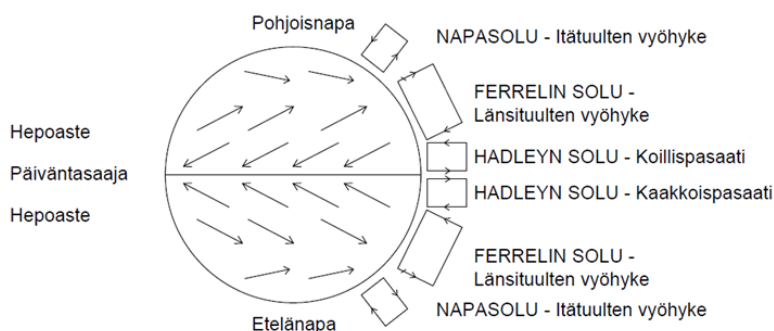
3.5.1 Planetaariset ja alueelliset tuulimekanismit

Tuulta pidetään kolmiulotteisena ilmiönä, joka voidaan havaita tietyllä hetkellä ja tietyssä paikassa vaakatasossa liikkuvana ilman virtauksena. Tällä virtauksella on sille ominainen tuulen nopeus ja suunta. Tuulen suunnan ja nopeuden äkillisiä muutoksia kutsutaankin puuskiksi, jota voidaan havainnollistaa ilman turbulentsisuudella. Vastaavasti kuin pystysuuntaista ilman virtausta kutsutaan konvektioksi, myös vaakasuuntaiselle tuulelle on oma nimitys eli advektio. Epäpuhtauksien ja muiden aineiden kulkeutuminen ilmakehässä tapahtuu tuulen avustuksella ja sekoittumista aiheuttaa aiemmin käsitelty turbulenssi. Yleiset ilmavirtaukset siirtävät laajoja ilmassoja ja näiden mukana epäpuhtauksia paikasta toiseen, jopa eri maanosiin tai maihin. Turbulenttisen diffuusion vaikutuksesta epäpuhtaudet leviävät koko rajakerrokseen. Täten samalla tuulen ja turbulenssin vaikutuksesta epäpuhtaudet laimenevat tuulen suuntaan päin ja pystysuunnassa turbulenssin vaikutuksesta. Turbulenssin voimakkuus on myös hyvin riippuvainen tuulen nopeudesta, sillä mitä kovempi tuuli, sitä kovempi mekaaninen turbulenssi on. Kappaleessa 3.4.2 on käsitelty myös tuulen vaikutusta ilmakehän kerrostuneisuuteen, jossa todetaan, että tuulisilla säällä kerrostuneisuutta ei synny ja sekoittuminen on täten tasaisempaa. (Lahdes & Laukkanen 2003; Laukkanen 2005, 61.)

Troposfäärissä tapahtuva yleinen kierto

Ilman liikkuminen ilmakehässä tapahtuu pystysuunnassa ja leveysasteiden välillä troposfäärissä, joka on keskimäärin noin 10 kilometrin korkeudessa. Tästä aiheutuva kiertävä ilmavirtaus pystytään havainnoimaan keskimääräisten tuulen suuntien avulla. Tähän kiertoliikkeeseen vaikuttaa lisäksi maapallon kiertoliikkeen aiheuttava coriolisvoima, joka ”kääntää” tuulen suuntaa havaintijaan nähden. Tämä johtuu siitä, että maapallon pyöriessä havaintija liikkuu sen mukana, mutta ilmavirtaus liikkuu edelleen pystysuunnassa samassa kohdassa, jolloin tuuli ikään kuin kääntyy. Tästä syntyy niin kutsutut lounais- ja koillispasaatit. Päiväntasaajalla syntyy Hadleyn solut, jotka muodostuvat auringonpaisteen vaikutuksesta. Auringon säteilyn tullessa kohtisuoraan maahan, aiheutuu tälle alueelle matalapaine, johon korkeapaineen alueelta virtaa ilmaa tasoittamaan paine-eroa. Matala-

paineen alueelta kohonnut ilmassa lähtee virtaamaan kohti hepoasteen korkeapainetta, jossa se painuu alas ja lähtee virtaamaan takaisin matalapaineen alueelle. Hadleyn solun lisäksi on olemassa kaksi muutakin solua, Ferrelin solu ja napasolu, joissa ilmavirtaus on leveyspiirien etelä-pohjoisakselin suuntaista. Näiden solujen merkitys on kuitenkin pienempi kuin Hadleyn soluilla. Kes-kileveysasteilla sään epävakaisuuteen vaikuttaa pitkälti syklonit, jotka syntyvät Atlantilta tulevista matalapaineista. Kuva 5 esitetään edellä esiteltyt solut ja niiden vaikutuksesta syntyvät planetaariset tuulet. (Laukkanen 2005, 61–62.)



Kuva 5 Napasolut, Hadleyn ja Ferrelin solut sekä Planetaariset tuulet. (Muokattu lähteestä Laukkanen 2005, 63.)

Planetaariset tuulet vaikuttavat merkittävästi epäpuhtauksien leviämiseen troposfäärissä, sillä epäpuhtauksien leviäminen päiväntasaajan yli on hyvin hidasta. Tämä johtuu siitä, että päiväntasaajan yli puhaltavia tuulet ovat hyvin harvassa ja nekin yleensä ovat ajoittaisia. (Laukkanen 2005, 62.)

Geostrofiset tuulet

Geostrofiset tuulet johtuvat paine-eroista matala- ja korkeapaineen välillä, jossa paine-ero pyrkii tasaantumaan. Tämä voidaan havaita tuulena, jonka nopeus on täysin riippuvainen paine-erosta näiden alueiden välillä. Geostrofiset tuulet muodostuvat yläilmakehässä eli vapaassa ilmakehässä. Tyyppillisesti sääkarttoja katsoessa ilmaistaan geostrofisten tuulien suunta kartalla. (Laukkanen 2005, 63.; Suomen tuuliATLAS)

Matala- ja korkeapaineen alueiden väliset tuulet eivät ole pohjois-eteläsuuntaisia, vaan itä-länsisuuntaisia. Tämä johtuu maanpyörimisliikkeen aiheuttamasta coriolisvoimasta, joka "kääntää" tuulen suunnan itä-länsiakselille. Tuulen lähdettyä liikkeelle korkeapaineen alueelta se nopeasti alkaa kääntyä oikealle päiväntasaajan pohjoispuolella, kunnes se lopulta kääntyy täysin samansuuntaiseksi kuin ilmanpainetta osoittavat samanarvoiskäyrät. Tällöin matalapaineen keskus on tuulen suuntaan nähden vasemmalla puolella. Näiden vaikutuksesta syntyvät koillis- ja kaakkoispasaatituulet, länsi- ja itätuulet. Länsituulet syntyvät Hepoasteilla vallitsevan korkeapaineen vaikutuksesta ja itätuulet vastaavasti napojen korkeapaineen vaikutuksesta. (Laukkanen 2005, 63.; Suomen tuuliATLAS)

Geostrofiset tuulet vaikuttavat tyyppillisesti vapaassa ilmakehässä, mutta rajakerroksessa oleva tuulen suunta- ja nopeus voi olla täysin eri kuin vapaassa ilmakehässä. Tämä johtuu maanpinnalla ole-

vista esteistä ja lämpötilaeroista, joka aiheuttaa turbulenssia virtaukseen. Näiden vaikutuksesta tuuleen vaikuttaa yhä enemmän kitkaa ja coriolisvoiman merkitys tuuleen pienenee. Tällöin tuulen suuntaan vaikuttaakin enemmän korkea- ja matalapaineen akseli, jolloin se kääntyy yhä enemmän tälle akselille lähestyttäessä maanpintaa. (Laukkanen 2005, 64.)

3.5.2 Paikalliset tuulijärjestelmät

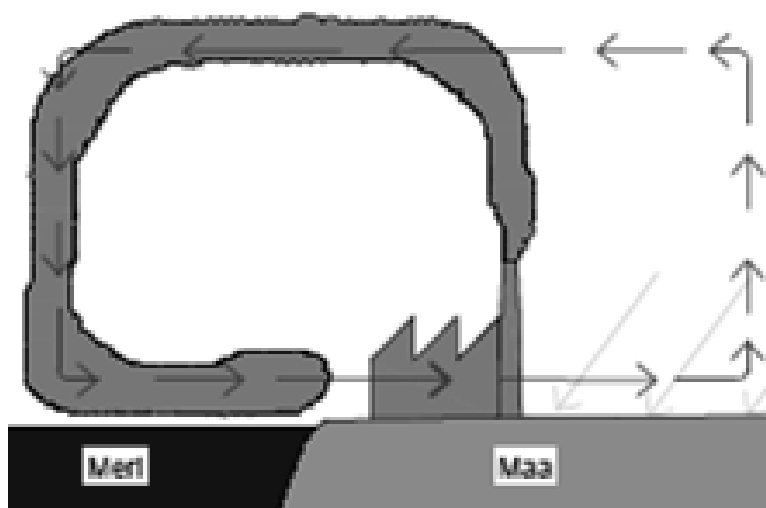
Paikalliset tuulijärjestelmät voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan: lämpösaareke, meri-maatuuli ja rinte-laaksotuuli. Näistä tuulimekanismeista tarkastellaan lähinnä asioita, jotka vaikuttavat päästöjen leviämiseen.

Lämpösaareke

Kappaleessa 3.4.3 käsiteltiin lämpösaarekettä, jossa todettiin, että kaupungissa vallitseva lämpötila voi olla useita asteita lämpimämpi verrattuna kaupungin ulkopuolisiin alueisiin. Tämä johtuu pitkälti kaupungin infrasktuktuurista lämmityksineen ja ajoneuvoista pakokaasuineen. Lisäksi päivisin aurion säteily absorboituu rakennuksiin ja asfalttipinnoitteisiin, jotka säteilevät lämmön yön aikana ilmaan lämmittäen kaupungissa olevaa ilmaa. Tällöin kaupungissa vallitseva lämpimämpi ilma alkaa kohota ja korvausilmaa virtaa kaupungin ulkopuolelta, joka on yleensä ottaen puhtaampaa kuin kaupungissa vallitseva. Kuitenkin joissain tapauksissa esimerkiksi kaupungin lähellä sijaitsevan savukaasupiipun päästöt voivat tällöin pyörähtää kaupunkiin lämpösaarekkeen synnyttämän solun kautta. (Laukkanen 2005, 64.)

Meri-maatuuli

Meri-maatuuli syntyy Suomessa kevään ja kesän aikana, kun aurinko lämmittää maata meren lähellä. Tällöin maanpinnan yläpuolella ilma alkaa kohota, jolloin muodostuu konvektiivinen solu (Kuva 6). Jos merenpinnan lämpötila on huomattavasti maanpinnan lämpötilaa alhaisempi, venyy kyseinen solu merenpinnan päälle ja mereltä alkaa virrata puhdasta ja kylmempää ilmaa korvaamaan lämpimän maan päällä nousutta ilmaa. Iltapäivällä solu voi yltää jopa 20 km päähän mantereelle. Tuuli saattaa myös olla päinvastainen syksyisin, kun meriveden lämpötila on olennaisesti mantereeseen lämpötilaa korkeampi. Meri-maatuulen vaikutus kuitenkin rajoittuu lähelle maanpintaa ja samalla savukaasupiipun korkeudella vallitseva tuulen suunta voi olla täysin päinvastainen. Tällöin savukaasupiipusta lähtevä epäpuhtaus voi lähteä merelle päin, mutta laskeuduttuaan lähemmäs maanpintaa, palaa takaisin meri-maatuulen vaikutuksesta. (Laukkanen 2005, 65.)



Kuva 6 Auringon säteilyn (vaaleat nuolet) vaikutuksesta syntyvä meri-maatuuli-konvektiivinen solu (tummat nuolet). Kuvassa esitetään myös savukaasujen kierto solussa.

Rinne-laaksotuuli

Auringon paistaessa rinteeseen, alkavat rinne lämpenemään ja ilma tämän yläpuolella kohoamaan aiheuttaen konvektiivisen virtauksen ylöspäin. Tätä konvektiivista virtausta jatkuu niin kauan kuin aurinko paistaa rinteeseen, jonka jälkeen rinteiden yläpuolinen ilmassa alkaa jäähtyä ja kylmä, raskas ilma alkaa virrata alas rinnettä. (Laukkanen 2005, 65.)

4 PÄÄSTÖJEN LEVIÄMISMALLINNUS JA VISUALISOINTI

4.1 Epäpuhtauksien leviämisen mallintaminen leviämismallinnuksien avulla

Leviämismallinnus on matemaattinen simulaatio päästökomponenttien leviämisestä ilmakehässä. Leviämismalleilla pystytään esimerkiksi mallintamaan rakentamattoman kohteen päästöjen leviämistä, jota ei voida mitaamalla selvittää. Näin pystytään tarkastelemaan, että tuleeko kohde täyttämään sille asetetut ohje-arvot, jota se ei saisi ylittää tulevaisuudessa. Joka tapauksessa leviämismallit ovat enemmän tai vähemmän yksinkertaistettuja todellisesta tilanteesta, josta seuraa, ettei pystytä tuottamaan täydellistä tietoa savukaasubluumin leviämisestä. Muita leviämismallinnuksen sovelluskohteita ovat esimerkiksi ilmanlaatuselvitykset ja suunnittelu. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

Leviämismallinnuksella pystytään vastaamaan useisiin kysymyksiin, joissa selvitetään tulevaisuudessa rakennettavan laitoksen päästöjen leviämistä ilmassa. Lisäksi on mahdollista selvittää esimerkiksi onnettomuustilanteiden päästöjen leviämistä trajektoreiden avulla (4.3.2). Ilmanlaatuselvityksessä tuotetaan kattava hilaverkosto (reseptoriverkosto) alueesta, jossa voi olla useita satoja jopa kymmeniä tuhansia pisteitä, joissa lasketaan pisteen päästöpitoisuuksia. Tarkastelua voidaan tehdä pitkältä ajanjaksolta, jopa useiden vuosien meteorologisen säädatan perusteella. Mallintamisen avulla saadaan tuotettua kattavampaa tietoa alueen pitoisuuksista kuin mitaamalla pystyttäisiin tuottamaan. Suunnittelun avulla voidaan esimerkiksi suunnitella etukäteen alueen maankäyttöä ja mitoitaa savukaasupiippu riittävän korkeaksi, ettei syntyisi savukaasubluumin painumista maanpinnalle läheisten rakennusten vaikutuksesta. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

Tyypillisesti päästölähteestä lähtevän päästömäärästä ei ole tarkkaa mittaustietoa, jonka vuoksi päästöjen määrä ilmaistaankin yleensä keskimääräisenä päästöjen määränä ja näiden keskimääräisenä vaihteluna. Tällöin leviämismallinnusta täytyy yksinkertaistaa ja samalla tulosten laatu kärsii, eivätkä ne enää vastaa niin hyvin todellisuutta. Olennaisena osana leviämismallinnuksessa on mallinnettavan alueen meteorologinen säädadata, joka on kerätty pitkältä aikaväliltä, yleensä usean vuoden ajalta. Tällä varmistetaan, että leviämismallinnus tapahtuu säädatan mukaisesti, jossa leviämisen lasketaan eri tunnintaisten säätietojen perusteella. Jos säädadata on puutteellista, ei mallinnusta voida suorittaa riittävällä säädatalalla ja leviämisen todellinen huippupitoisuus voi jäädä mallinnuksesta pois. Näiden asioiden vuoksi kattavien päästölähteen tietojen ja meteorologisten säätietojen hankinta on olennainen osa leviämismallinnuksen laadun varmistamiseksi. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

Tässä opinnäytetyössä keskityttävien Pino-asetuksen alaisien lämpövoimalaitoksien päästölähteiden tiedot ovat kattavammin tiedossa, jonka vuoksi mallintaminen on tällöin paljon luotettavampaa ja todellisuutta vastaavaa. Päästöjen määrän laskennassa käytetään päästökertoimia, jotka ovat ominaisia päästölähteelle. Esimerkiksi polttolaitteille ja -aineille sekä erilaisille teollisuusprosesseille on määritetty omat päästökertoimet. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

4.2 Päästölähdetyypit

Päästölähteet luokitellaan yleensä kolmeen luokkaan, jotka ovat pistelähde, alue- eli pintalähde ja viivalähde. Pistelähde on paikallaan pysyvä, kuten lämpövoimalaitos, liikerakennus tai tehdas. Tärkeimpiä tietoja pistelähteestä ovat päästön massavirtaus, piipun korkeus ja savukaasun ominaisuudet, kuten sen lämpötila, virtausnopeus piipussa ja virtauksen määrä. Näiden tietojen avulla voidaan määrittää savukaasubluumin nousukorkeus, joka vaikuttaa leviämisen laajuuteen merkittävästi. Lisäksi olennaisena tietona on määrittää läheiset rakennukset ja niiden vaikutus savukaasubluumin nousuun. Korkeat rakennukset piipun lähellä voivat aiheuttaa virtaushäiriöitä savukaasubluumissa ja pahimmassa tilanteessa savukaasubluumi voi painua nopeasti maahan rakennuksen vaikutuksesta. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

Aluelähteellä tarkoitetaan tiettyä aluetta päästöineen, jonka päästölähteet kerätään yhteen hilaruudukkoon. Aluelähdettä käytetään alueellisessa mittakaavassa, kuten 100 km x 100 km hilaksi, jossa yhden päästölähteen tarkoilla ominaisuuksilla ei ole väliä. Hilaruutujen koko voi tällöin olla esimerkiksi 0,5 km x 0,5, jossa alueella sijaitsevat tehtaot, lämpö- ja voimalaitokset ja talojen lämmityslähteet yhdistetään yhdeksi hilaruutulähteeksi. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

Viivalähteet ovat yleensä liikenteen päästöjä kuvaavia lähteitä, jossa päästöarvio muodostuu tien tai kadun ajoneuvomäärien ja -tyyppien mukaisesti eri aikoina. Näiden tietojen lisäksi tulee tietää tien tai kadun nopeusjakaumat, koska autojen päästömäärät määräytyvät ajonopeuden mukaisesti. Päästömäärät saadaan arvioitua näiden tietojen avulla yhdessä ajosuoritteiden ja autojen polttoaineen ominaiskulutuksien avulla. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

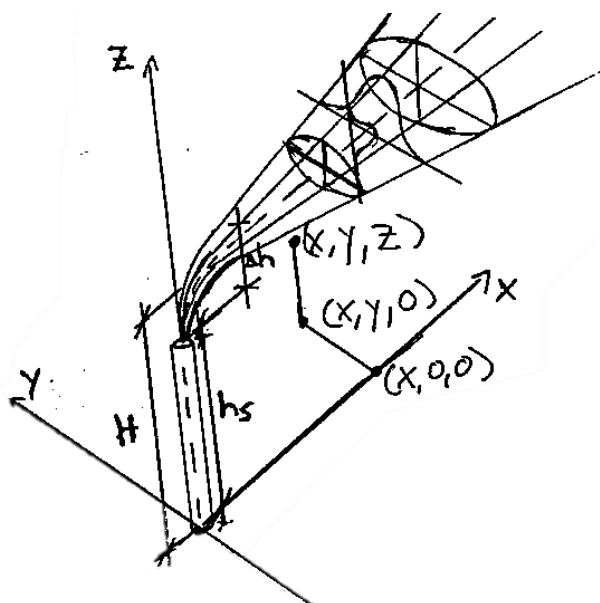
4.3 Erilaisia leviämismalliteorioita

Leviämismalliteoriat pystytään jaottelemaan monella eri tavalla, kuten fysikaallisten lähtötietojen, mallin laajuuden, sovelluskohteen tai matemaattisen rakenteen mukaan. Ne pystytään jakamaan myös leviämismallien dynaamisuuden ja stationaarisuuden mukaan eli mallinnuksen tuloksen aika-riippuvuus. Mallin laskennassa käytettävä koordinaatisto voi olla joko liikkuva eli Lagrange-malli tai paikallaan pysyvä eli Euler-malli. Lisäksi on käytössä niin sanottuja selittäviä malleja, joista eniten käytetty on reseptorimalli, jossa kuvataan tilastojen perusteella tehdyillä menetelmillä leviämistä mitaustuloksista alkaen. Yksikkönä reseptorimallissa käytetään pitoisuus/vaikutuksella. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

4.3.1 Stationaariset mallit

Stationaarisisissa leviämismalleissa oletetaan kaikkien laskentaparametrien ja -muuttujien pysyvän ajan eri hetkillä muuttumattomina eli vakioina. Tämä tekeekin stationaarisista leviämismalleista huonosti soveltuvia laajoihin leviämismalleihin. Perusoletuksena stationaarisisissa leviämismallissa savukaasubluumin leviämisessä on, että epäpuhtauspitoisuusvaihtelut eri kohdissa noudattaa normaalijakaumaa sekä pysty- että vaakasuunnassa tuulen suunnassa. Päästölähteen eli piipun alaosan oletetaan olevan origossa, jossa x-akseli on sama kuin tuulen suunta ja y-akseli on vaakasuunnassa x-

akseliin nähden. Z-akseli on pystysuunnassa maanpintaan nähden (Kuvio 2). Kuvio 3 esitetään laimeneminen sivulta päin kuvattuna, jossa h_s on savukaasupiipun korkeus, Δh on piippulisä ja H on efektiivinen piippukorkeus. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

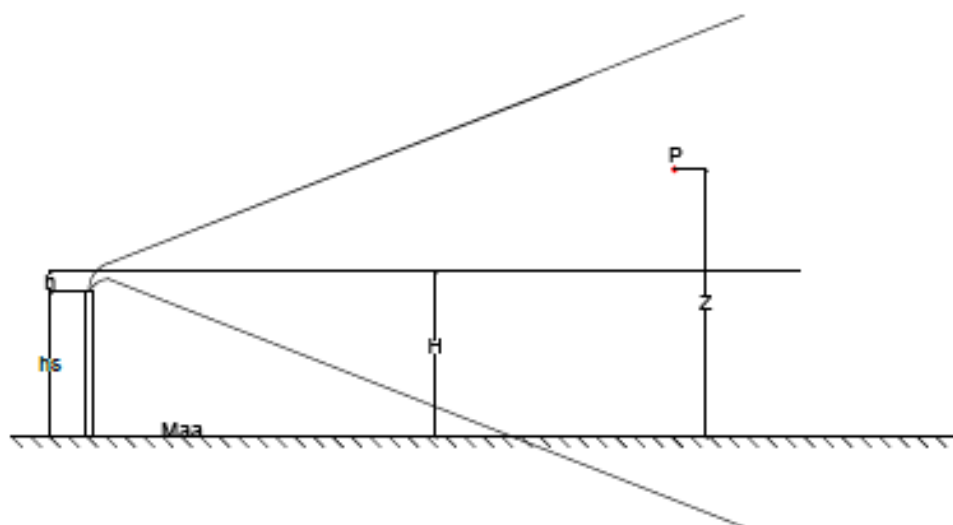


Kuvio 2 Gaussin teorian mukainen bluumin leviäminen ilmakehässä. Kuvassa on esitetty normaalijakauman muotoiset pitoisuusjakaumat Y- ja Z-akselien suhteen. (Muokattu lähteestä Lahdes, 2004.)

Yleisesti ottaen normaalijakaumaoletuksen omaavia malleja kutsutaan Gauss-malleiksi. Gauss-leviämismalleissa olennaisimpia parametreja ovat savukaasubluumin leveyden määrittävät hajontaparametrit, jotka ovat riippuvaisia bluumin etäisyydestä päästöpisteeseen nähden ja mallinnustilan meteorologisesta tilanteesta. Nämä hajontaparametrit ovat empiiristen tutkimusten ja mittaus-ten tuloksena saatuja tilastollisia tuloksia. Gaussin vanamallissa savukaasubluumin konsentraatio C tietyssä pisteessä on kääntäen verrannollinen vallitsevaan tuulen nopeuteen U ja suoraan verrannollinen päästölähteen lähtöpitoisuuteen Q (Kuvio 3) (Lahdes & Laukkanen, 2003; Western Engineering.):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{U} * C_y(x, y) C_z(x, z) \quad (1)$$

jossa termit C_y ja C_z kuvaavat laimenemistermit, joiden mukaisesti savukaasuviuhkan leviäminen y- ja z-akselin suuntaisesti.



Kuvio 3 Savukaasubluumin leviäminen sivulta päin kuvattuna (Muokattu lähteestä Western Engineering.)

Kaavassa 1 oletetaan x-akselin suuntaisen turbulenttisen diffuusion olevan merkitsemätön verrattuna tuulen laimennusvaikutukseen verrattuna, joten sitä ei huomioida kaavassa. Savukaasubluumin kulkeutumismisnopeuden ja vallitsevan tuulen nopeuden oletetaan olevan sama, joka määritetään bluumin keskiakselin korkeudelle. Keskiakselin korkeus on sama kuin efektiivinen piippukorkeus (H). Laimenemisparametrit C_Y ja C_Z ovat normaalijakauman mukaisia yhtälöitä, jotka voidaan esittää kaavoilla 2 ja 3. (Lahdes & Laukkanen, 2003; Western Engineering.)

$$C_Y = \frac{1}{\sigma_Y \sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-y^2}{2\sigma_Y^2}\right)} \quad (2)$$

$$C_Z = \frac{1}{\sigma_Z \sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-z^2}{2\sigma_Z^2}\right)} \quad (3)$$

jossa σ^Y ja σ^Z ovat keskihajonnan mukaisia parametreja, jotka esittävät Gaussian jakauman mu-
kaista savukaasubluumin leviämistä sekä y-että z-akselilla. Kaavat 2 ja 3 yhdistämällä pystytään joh-
tamaan kaava, jolla pystytään laskemaan savukaasubluumin konsentraatio missä tahansa pisteessä
kaavan 4 mukaisesti. (Western Engineering.)

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{U} * \frac{1}{2\pi\sigma_Y\sigma_Z} e^{\left(\frac{-y^2}{2\sigma_Y^2}\right)} e^{\left(\frac{-z^2}{2\sigma_Z^2}\right)} \quad (4)$$

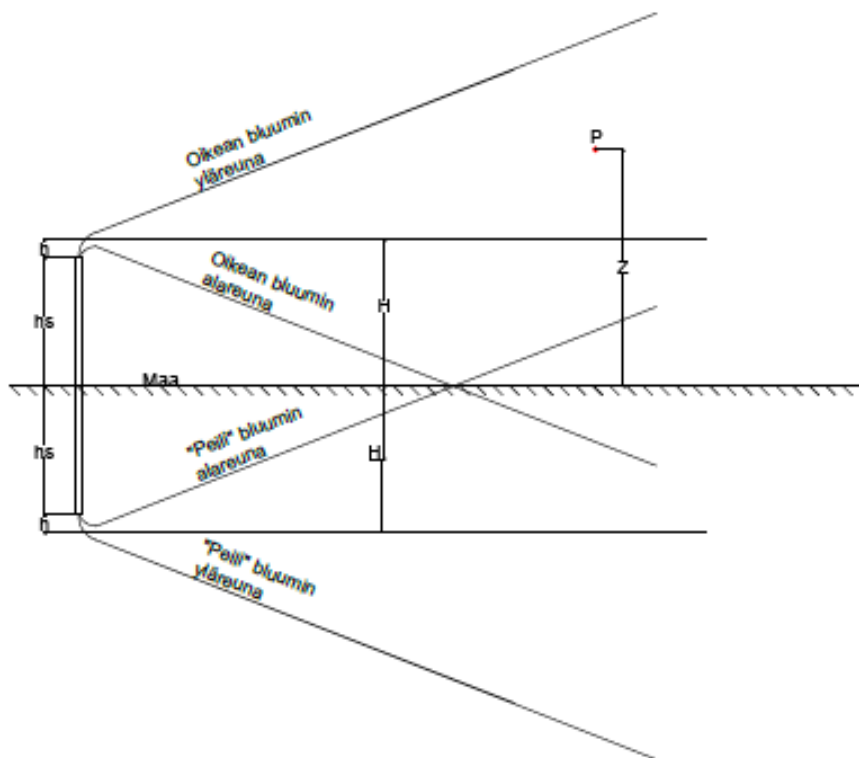
Kaavassa 5 oletetaan laskettavan pisteen origon olevan piipun juuressa, mutta useassa paikassa
piippu voi olla maanpintaa korkeammalla. Tämän asian vuoksi kaavaa vielä muokataan, niin että
laskettavan pisteen korko on laskettu maanpinnasta lähtien. Z-koordinaatti korvataan täten verti-
kaali koordinaatilla ($Z-H$). (Western Engineering.)

Tällöin kaavasta saadaan johdettua seuraavanlainen:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{U} * \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)} e^{\left(\frac{-(Z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} \quad (5)$$

Kaava 5 ei ole vielä täydellinen, sillä siinä ei huomioida sitä, että savukaasubluumin edetessä, se leviää myös alaspäin. Yleensä ottaen bluumi "törmää" jossain vaiheessa maahan, jolloin sen eteneminen estyy alaspäin ja pitoisuudet kasvavat maanpinnan yläpuolella, kun bluumi "heijastuu" maanpinnasta ilmaan. Tämä heijastuminen ja sen seurauksena pitoisuuksien nousu on otettu huomioon matemaattisesti käyttäen niin sanottua peilikuvaa savukaasubluumin lähdettä, joka vastaa mitoitukseltaan oikeaa lähdettä, paitsi se on peilattu maanpinnan alapuolelle (Lahdes & Laukkanen, 2003; Western Engineering.)

Missä tahansa pisteessä P, missä halutaan laskea pisteen konsentraatio, on otettu huomioon sekä oikean lähteen että peilikuvan lähteen aiheuttama pitoisuus kyseisessä pisteessä (Kuvio 4). Tällöin vertikaalinen etäisyys pisteestä P oikean lähteen savukaasubluumin keskijanjalle on (Z-H) ja peilikuvan lähteen savukaasubluumin keskijanjalle on tällöin (Z+H). Horisontaalinen eli Y-koordinaatti on molemmille lähteille sama. (Lahdes & Laukkanen, 2003; Western Engineering.)



Kuvio 4 Savukaasubluumin ja peilikuvan savukaasubluumin leviäminen sivulta päin kuvattuna (Muokattu lähteestä Western Engineering.)

Tällöin konsentraatio pisteessä P saadaan laskettua kaavalla:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{U} * \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \left[e^{\left(\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} + e^{\left(\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} \right] \quad (6)$$

Näin ollen on saatu johdettua kaava, jolla pystytään laskemaan konsentraatio missä tahansa maanpinnan yläpuolisessa pisteessä. Kuitenkin jossain tapauksissa joudutaan ottamaan myös huomioon se, että savukaasubluumin yläpuolellekin voi syntyä rajakerros, josta savukaasubluumi ei enää pääse etenemään. Tämäkin voidaan ottaa laskennallisesti huomioon, mutta sitä ei käsitellä tässä työssä. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

Gaussin teorian mukaista savukaasujen leviämismallia käytetään pääasiassa taajamien ilmanlaadun arviointiin. Näissä kaavoissa ei ole vielä otettu huomioon mitään päästövaihteluita ja erilaisia virtaushäiriöitä, jotka voivat johtua esimerkiksi läheisistä rakennuksista, jotka voivat aiheuttaa savukaasubluumin alapainumista. Eri mallinnusohjelmissa nämä otetaan huomioon, jolloin edellä johdettu yhtälö on vain pieni osa kokonaisuinnusta. Kuitenkin on käytössä niin sanottu laatikkomalli, jossa kaikki muuttujat oletetaan vakioiksi. Tällöin savukaasubluumin konsentraatiot vastaavat edellä johdetun yhtälön tuloksia. Laatikkomallit ovatkin hyvin karkeita versioita leviämismallista, joita voi soveltaa vain tietyissä mallinnuskohteissa. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

4.3.2 Dynaamiset mallit

Dynaamisia malleja on kahdenlaisia, jotka jakautuvat niiden matemaattisen rungon mukaan. Nämä ovat Euler- ja Lagrange-malleja, joista Euler-mallissa on kiinteä koordinaatisto ja Lagrange-mallissa savukaasubluumin mukaan liikkuva koordinaatisto. Euler-mallissa on kiinteät hilapisteet, joissa saasteiden kulkeutuminen ja muuttuminen lasketaan, joka mahdollistaa hyvin monimuotoisen kemiallisen ja fysikaalisen bluumin mallintamisen. Mallin yhtälöt ovat yleensä monimutkaisia, epälineaarisia osittaisdifferentiaaliyhtälöitä, minkä vuoksi niiden laskeminen on hankalaa ja työlästä sekä tarkkuus kärsii. Euler-malli käy lähestulkoon kaikkiin mittakaavoihin, joista tyypillinen käyttökohde on alueellinen mittakaavan levämismalli. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

Lagrange-teoriaa käytetään pääosin trajektorimalleissa, joissa kuvataan kuvitellun ilmakappaleen ratakäyrää eli trajektoria maanpintaan nähden. Näiden laskennassa käytetään tuulen suunta- ja nopeustietoja, joita tarvitaan koko tarkasteltavalta alueelta ja ajanjaksolta. Mallissa seurataan kyseisten trajektorien etenemistä, jossa huomioidaan myös etenemisen aikana tapahtuvat päästöjen ja kemiallisten muuntumisen ja deposition vaikutukset. Etuna trajektioniomallilla hilamalleihin nähden on se, että ne ovat melko yksinkertaisia. Kuitenkin niissä on vaikea huomioida ilmakehässä esiintyviä kolmiulotteisia liikkeitä. Yleensä trajektioniomallissa pystysuuntaista sekoittumista pidetäänkin täydellisenä maanpinnasta rajakerrokseen saakka. Tämän vuoksi trajektioniomallit eivät sovellu muihin kuin alueellisiin mittakaavoihin. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

4.3.3 Muita malleja

Stationaaristen ja dynaamisten mallien lisäksi savukasujen leviämismallinnuksessa käytetään fysikaalisia malleja, joita voidaan tehdä esimerkiksi pienoismallikoossa erilaisissa tuulitunneleissa tai vesitänkeissa. Tällaisia tutkittavia kohteita ovat esimerkiksi virtaushäiriöt, joita voivat aiheuttaa päästölähteen vieressä olevat rakennukset tai maaston topografia. Lisäksi voidaan käyttää CFD-malleja (Computational Fluid Dynamics) eli virtausmalleja, joilla pystytään ratkomaan hyvinkin tarkasti savukaasubluumin etenemistä ilmassa, vaikka maaston topografia olisi hyvin epätasaista. Virtausmallit perustuvatkin fysiikan lakien mukaiseen massan, energian ja liikemäärän säilymiseen. (Lahdes & Laukkanen, 2003; Laine 2011, 27.)

4.4 Savukaasubluumin leviämismallinnus ja sen visualisointi prosessina

Savukaasubluumin leviämismallinnus ja sen visualisointi tapahtuu liitteen 1 lohkokaaavion mukaisesti, jossa on kuvattu savukaasubluumin leviämismallinnuksen ja visualisoinnin vaiheet lähtötietojen ja meteorologian hakemisesta ja valmiisiin tuloksiin asti. Kun tarvittavat lähtötiedot ja meteorologia on hankittu ja käsitelty sopivaksi leviämismallinnusohjelmaan, voidaan itse leviämislaskenta suorittaa. Perinteisesti leviämismallinnusohjelma esittää mallinnuksen tulokset 2D-tasolla visualisoituna, mutta tässä opinnäytetyössä kehitetyllä metodilla leviämismallinnukset tulokset käsitellään sopivaksi visualisointiohjelmaan. Opinnäytetyössä kehitettävät uudet 3D-visualisointivaiheet on rajattu liitteessä 1 punaisella nelikulmiolla. Visualisointiohjelmalla tulokset käsitellään sellaiseksi, että savukaasubluumi on nähtävissä kolmiulotteisena. Kappaleissa 4.4.1 ja 4.4.2 käsitellään tarkemmin leviämismallinnukseen tarvittavia lähtötietoja ja meteorologisia tietoja.

4.4.1 Leviämismallinnukseen tarvittavat lähtötiedot

Leviämismallinnuksen olennaisimmat lähtötiedot ovat

- savukaasun lämpötila (K)
- savukaasun virtausnopeus (m/s) ja tilavuusvirta (m³/s) piipunsuulla
- epäpuhtauksien massavirta (g/s) ja sen ajallinen vaihtelu
- savukaasupiipun sijainti (X,Y ja Z)
- savukaasupiipun korkeus ja sisähalkaisija (m)
- maastomalli
- läheiset rakennukset mittoineen.

Maaston topografian ja kartan avulla luodaan mallinnusalueen maastomalli, jossa varsinainen leviämisen tarkastelu tapahtuu. Tähän maastomalliin lisätään erikseen rakennukset sijaintitietoineen ja mittoineen, jotka otetaan huomioon laskennassa. Piippu lisätään maastomalliin ja sille annetaan sen olennaisimmat tiedot eli piipun sisähalkaisija ja korkeus. Usein selvitetään myös eri korkeuden omaavien piippujen vaikutukset leviämiseen, jolloin mallinnus suoritetaan esimerkiksi kahdella eri piipun korkeudella. Tämän jälkeen lisätään reseptoripisteet, joissa lasketaan laskeuman pitoisuudet tiettyssä koordinaatissa (X, Y ja Z). Päästölähteen savukaasun tiedoista tarvitaan savukaasun lämpö-

tila, savukaasun virtausnopeus tai tilavuusvirta piipunsuulla ja lisäksi epäpuhtauksien massavirta ja niiden ajallinen vaihtelu. Lämpövoimalaitoksilla mitoituksessa voidaan käyttää PINO-asetuksessa (445/2010) annettuja mallinnettavan epäpuhtauskomponentin päästöraja-arvoja ja lämpökattilan nimellistehoa, joiden avulla voidaan laskea tietyn polttoaineen polttamisesta syntyvien epäpuhtauksien massavirta. Joissain leviämismallinnustapauksissa otetaan myös huomioon epäpuhtauden taustapitoisuus ilmassa, joka on peräisin jostain muusta päästölähteestä kuin mallinnettavasta kohteesta.

4.4.2 Meteorologia

Leviämismallinnuksessa eri reseptoripisteiden epäpuhtauspitoisuuksien laskennassa käytetään tuntipitoisuuksien keskiarvoja, jossa otetaan huomioon ulkoilman lämpötila, tuulen nopeus, tuulen suunta, pilvisuus ja pilvien korkeus. Leviämislaskenta käy läpi jokaisen tunnin säädätin, jonka pohjalta leviämislaskenta lopullisesti lasketaan. Yleensä lasketut tulokset vielä normitetaan tiettyyn ympäristöolosuhteisiin. Meteorologiset tiedot ovat pitkälti aikaväliltä saatuja säähavaintoja, jotka yleensä käsitellään erillisillä säätietojen mallinnusohjelmalla ennen kuin se syötetään leviämismalliin. Nykyään on käytössä yhä enemmän sääennustemalleja, joilla tuotetaan tarvittavia säätietoja leviämismalleihin. Näiden ohjelmien tuottamista malleista on paljon hyötyä, sillä niillä sekä pystytään tuottamaan säätietojen alueellisia jakaumia että syötetyt säätiedot saadaan kasattua yhteen pakettiin ja ovat fysikaalisesti selitettäviä. (Lahdes & Laukkanen, 2003.)

Tärkeimpänä meteorologisenä tietona leviämismallinnuksessa tuulen nopeus ja suunta ovatkin helppoja mitata, mutta ongelmaksi syntyy se, että nämä tiedot mitataan yleensä lähellä maanpintatasoa. Yleensä ottaen savukaasubluumi leviääkin useiden kymmenien metrien korkeudessa tai jopa satojen metrien korkeudessa, jolloin maanpintatasolla mitatut tuulen suunnat ja nopeudet voivat poiketa hyvin paljon. Esimerkiksi stabiilissa tilanteessa lähellä maanpintaa mitattu tuulen suunta voi poiketa yli 10° bluumin yläosan tuulen suuntaan verrattuna. Tuulen nopeuden muutos pystysuunnassa voidaan arvioida rajakerrosteorian avulla tai kokemuseräisten tutkimusten perusteella saatujen potenssilakien mukaisesti. Suuremman ongelman tuottaa tuulen suunnan määrittäminen eri korkeuksilla. Rajakerrosteorian avulla pystytään määrittämään leviämismalleissa tarvittavia turbulenssi-parametreja ja myös Gaussin leviämisteoriassa käytettyjä hajontaparametreja. Useissa tapauksissa käytetäänkin laadullista eli kvalitatiivista luokittelua, koska sen käyttäminen on mallinnuksessa helpompaa. Yksi esimerkki on Pasquillin stabiiliusluokitus (Taulukko 1), jota yleensä käytetään Gaussin leviämismalleissa hajontaparametrien määrittämisessä. Stabiiliusluokitus kuvaa ilmakehässä tapahtuvaa pystysuuntaista sekoittumista (3.4.2). Stabiilissa olosuhteissa pystysuuntainen sekoittuminen on vähäistä ja labiilissa eli epästabiilissa olosuhteissa pystysuuntainen sekoittuminen on merkittävä. Ilmakehän stabiiliuteen vaikuttaa pitkälti ympäristöolosuhteet, kuten tuulen nopeus ja suunta, ilmanpaine, lämpötila ja kosteus. (Lahdes & Laukkanen 2003; Laine 2011, 24.)

Taulukko 1 Pasquillin stabiiliusluokat (muokattu lähteestä Ahonen, 2013.)

Tuulen nopeus (m/s)	Saapuva lyhyt aikainen säteily			Yöaikainen pilvipeite (kahdeksasosina)	
	Voimakas	Kohtalainen	Heikko	> 4/8	< 4/8
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	D
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Olenainen osa leviämismallinnusta on sekoittumiskorkeuden määrittäminen, joka riippuu ilmakehän stabiiliudesta. Sekoittumiskorkeus tarkoittaa korkeuden aluetta, missä tapahtuu leviämisen kannalta olennaista sekoittumista. Sekoittumiskorkeuden määrittämisessä voidaan käyttää radioluotausta. (Lahdes & Laukkanen 2003; Laine 2011, 24.)

4.5 Suomalaisia ja ulkomaalaisia tutkimuksia leviämismallinnuksesta ja visualisoinnista

Erilaisien komponenttien leviämistä ilmassa on tutkittu paljon maailmalla, jonka voi huomata tutkiesaan erilaisia leviämismallinnohjelmaa ja teorioita, joiden pohjalta nämä ohjelmat ovat tehty. Suomessa johtava ilmakehän ilmiöiden tutkijataho on Ilmatieteenlaitos, jossa tehdään jatkuvaan erilaisia tutkimuksia ilmiöistä, kuten eri päästöjen leviämisestä ilmakehässä. Ilmatieteenlaitos on tutkinut paljon muun muassa liikenteen vaikutusta ja siitä syntyviä päästöjä. Suomessa on tehty muutenkin paljon tutkimuksia liikenteen päästöistä ja niihin vaikuttavista asioista. Esimerkiksi Silja Laine (2011) on tehnyt opinnäytetyön katupölyn mallintamisen mahdollisuuksista, jossa tutkitaan ajoneuvojen vaikutuksesta syntyvän katupölyn mallinnusmahdollisuuksia.

Ulkomailla on tehty lukuisia määriä tutkimuksia leviämismallinnuksesta ja sen visualisoinnista. Yksi esimerkki on Xinhao Wang:n tekemä tutkimus paikkatieto-ohjelman, simulointimallien ja visualisoinnin integroiminen yhdeksi paketiksi, jolla pystytään tutkimaan liikenteen päästöjen leviämistä. Ohjelmalla pystytään esittämään 3D-animaationa päästöjen leviämisen kaduilla autojen liikkua kadulla. Tutkimuksessa itsessään tutkitaan, että mitä hyötyä suunnittelijat saavat tällaisesta ohjelmapakettista ja sen toimivuudesta. Tutkimuksessa päädytäänkin päätelmään, että mallinnuksen yhdistyessä paikkatieto-ohjelmaan ja visualisointiin, mallinnuksesta saadaan huomattavasti havainnollisempi ja se on sidottu paremmin tiettyyn paikkaan kuin perinteisessä 2D-karttatason visualisoinnissa. (Wang, 2005.)

4.6 Leviämismallinnuksia ja leviämismallien visualisointeja tekeviä tahoja ja yrityksiä

Suomessa leviämismallinnuksia ja näistä visualisointia tekeviä tahoja on muutamia, joista yleisesti tunnetuin on Ilmatieteenlaitos, jossa mallinnetaan muun muassa tieliikenteestä syntyvien päästöjen ja erilaisten vaarallisten aineiden (onnettomuustilanteissa syntyvien päästöjen) leviämistä. Tieliiken-

teestä syntyvien päästöjen leviämismallinnuksessa käytetään Ilmatieteenlaitoksen omaa CAR-FMI-leviämismallia, jolla voidaan laskea hään (CO), typpioksidien (NO ja NO₂), otsonin (O₃), pienhiukkas-ten (PM_{2,5} ja PM₁₀) ja bentseenin (C₆H₆) leviämistä ilmassa. Ohjelma perustuu Gaussin teorian mukaiseen leviämiseen. Vaarallisten aineiden leviämisen mallinnukseen ilmakehässä käytetään Ilmatieteenlaitoksen kehittämää Escape-leviämismallia, jolla voidaan mallintaa esimerkiksi laitoksilta ja putkistosta tapahtuvien vuotojen leviämistä ilmassa. Escape-leviämismallinnusohjelmaa käytetään laajalti Suomessa eri viranomaistaholla, kuten pelastuslaitoksella.

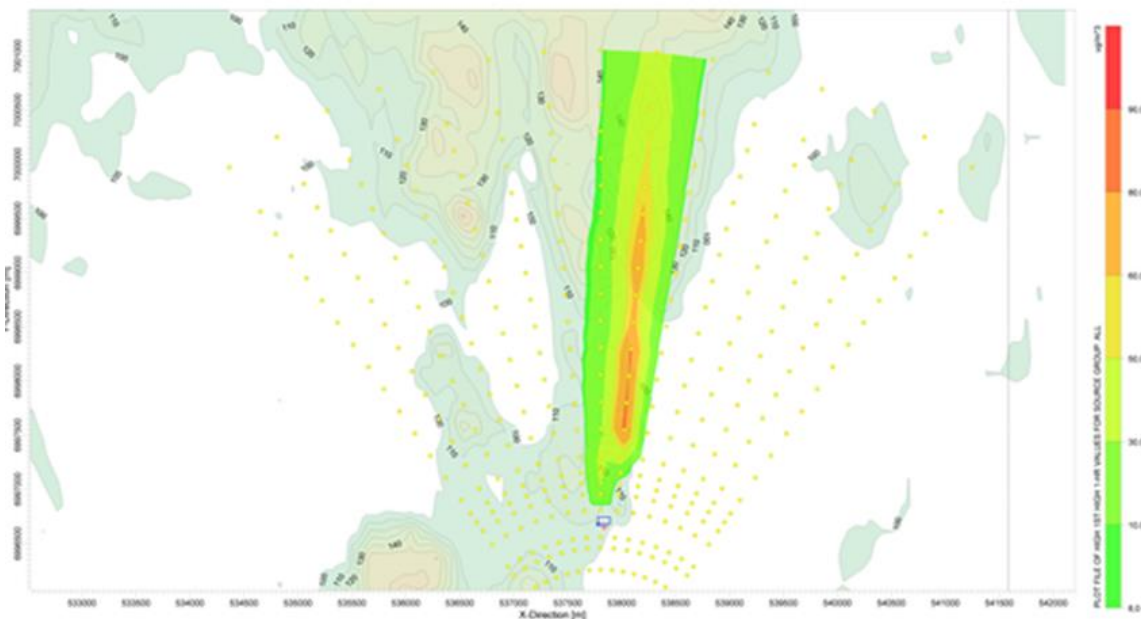
Leviämismallinnuksia tekeviä yrityksiä on myös lukuisia, mutta useat yrityksistä ovat erikoistuneet tietynlaisten päästöjen leviämisen mallintamiseen. Ramboll Finland Oy, joka kuuluu osaksi Ramboll Groupia, tekee kemikaalien leviämismallinnuksia, joita tarvitaan kemikaaliturvallisuuslain ja rakennuslain mukaiseen toimintaan, jossa esimerkiksi tuotetaan, käsitellään ja varastoidaan vaarallisia kemikaaleja tai räjähteitä. Suomalais-Virolainen insinööritoimisto Steiger Energia ja Ympäristö Oy on erikoistunut pitkälti turvetuotannon erilaisiin palveluihin. Yhtenä alueena ovat ympäristöpalvelut, joihin kuuluu muun muassa pölyn- ja pakokaasujen leviämisen mallintaminen. Pistelähteiden leviämismallinnuksia tekeviä on Envin ja Ecobio Symo Oy:n lisäksi. Envin käyttää mallinnuksessa Aermod-, ISC-PRIME- ja CALPUFF-ohjelmia. Ecobion käyttämistä ohjelmista ei mainita muuta kuin, että yritys käyttää alan parhaita ohjelmia. Ecobio käyttää kuitenkin mitä luultavimmin samoja ohjelmia kuin Envin, josta voidaan todeta, että Yhdysvaltojen kehittämät Aermod-, ISC-PRIME- ja CALPUFF-ohjelmat ovat yleisesti käytössä alan toimijoilla. (Ecobio; Enwin; Ramboll Finland Oy.)

5 2D- JA 3D-LEVIÄMISMALLIEN TARKASTELU

5.1 Aermod View™

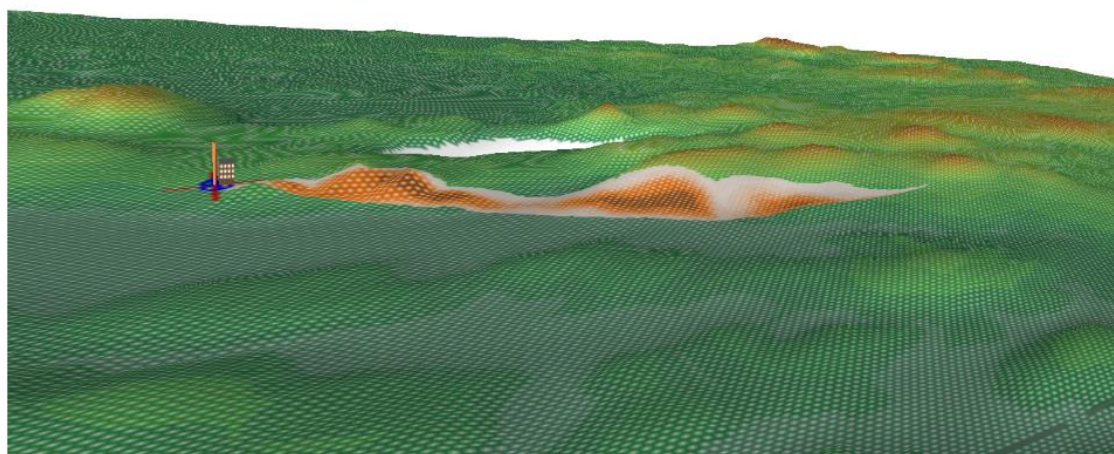
Aermod View™-ohjelma on Lakes Environmental Softwaren valmistama, jolla voidaan mallintaa eri päästöjen leviämistä ilmakehässä. Ohjelma yhdistää kolme eri leviämismallia: ISCST3, Aermod ja ISC-PRIME, joita voidaan käyttää savukaasubluumien leviämisen mallinnuksessa. ISCST3-malli, joka tulee sanoista the Industria Source Comple, on Gaussin teorian mukainen savukaasujen leviämismalli. Mallilla pystytään mallintamaan savukaasubluumin leviämistä ilmakehässä, jotka ovat lähtöisin erilaisista teollisuuslähteistä. Leviämismallin on kehittänyt Yhdysvaltojen ympäristönsuojeluvirasto eli Environmental Protection Agency (EPA). Mallin kehittämisessä on otettu huomioon EPA:n tuottama yleinen ilmanlaatumallien ohje. ISCST3-malli ottaa huomioon kuivalaskeuman, rakennusten aiheuttaman savukaasubluumin painuman, tasaisen ja epätasaisen maaston vaikutukset. Mallilla pystytään mallintamaan savukaasubluumin leviämistä piste-, viiva- ja aluelähteistä. AMS/EPA Regulatory Model eli AERMOD-malli on pitkälti samanlainen kuin ISCST3-malli, mutta niissä on muutama olennainen poikkeama. Aermod-malli on uuden sukupolven ilmakehän leviämismalli, jossa leviämisteoria perustuu planetaariseen rajakerrosteoriaan. Aermod-mallissa käytetään kehittyneempää meteorologisia turbulenssin vaikutuksien laskentaa kuin ISCST3-mallissa. Lisäksi siinä on pidemmälle kehitetty maaston vaikutuksien huomioonotto. Kuitenkaan Aermod-malli ei tue märkä- ja kuivalaskeuman vaikutusta leviämiseen, vaan laskee pelkästään bluumin konsentraatiot eri pisteissä. ISC-PRIME yhdistää ISCST3-mallin the Plume Model Enhancements- eli Prime-malliin. Prime-mallissa on kehittyneempi turbulenssin vaikutuksien arviointi savukaasubluumin leviämiseen. Lisäksi prime-mallissa on otettu paremmin huomioon rakennuksista johtuva savukaasubluumin painuma tai bluumin nouseminen virtauksen takia. (Lakes Environmental.)

Aermod View™-ohjelmaan syötetään leviämismallinnukseen tarvittavat lähtötiedot ja siihen voidaan tuoda helposti mallinnusalueen maasto ja maaston topografia. Sää tiedot syötetään ohjelmaan, jossa ne esikäsitellään laskentaa varten. Ohjelmaan syötetään mallinnukseen vaikuttavat rakennukset sijaintitietoineen ja mittoineen, joiden pohjalta ohjelma laskee rakennuksien vaikutuksen bluumiin. Kaikkien lähtötietojen ja muiden laskentaan olennaisten tietojen syötön jälkeen ohjelma laskee savukaasubluumin pitoisuudet halutulla korkeudella maanpintaan nähden. Ohjelmaan sisältyy integroitu visualisointityökalu, jossa voidaan esittää savukaasubluumin leviäminen 2D-karttatasolla (Kuva 7). Visualisaatiossa ohjelma on laskenut automaattisesti pitoisuuskäyrät, jossa eri pitoisuudet esitetään eri värillä. Ohjelmasta kuitenkin puuttuu yksi olennainen asia, joka helpottaisi merkittävästi 3D-visualisointia, sillä siinä ei pystytä tuottamaan reseptoriverkostoa usealta tasolta maanpintaan nähden kerralla. Tämä johtaa siihen, että 3D-visualisointia varten joudutaan tuottamaan useita kymmeniä tasoja, joiden perusteella 3D –hilaverkosto muodostetaan.



Kuva 7 Savukaasubluumin esittäminen 2D-karttatasolla Aermod View™-ohjelmassa. (Pitoisuudet piipunsuun korkeudella, 90m)(Laatija Jukka Lappalainen, 2013).

2D-visualisoinnin lisäksi ohjelma mahdollistaa 3D-visualisoinnin rajoitetusti, sillä se pystyy esittämään maaston topografian ja rakennukset kolmiulotteisena. Rakennukset ja topografia tulee olla lisätty ennen leviämismallin laskentaa, jotta ne näkyvät visualisoinnissa. Kuitenkaan itse savukaasubluumia ei esitetä 3-ulotteisena, vaan se esitetään edelleenkin pitoisuuskäyrinä 3-ulotteisen maanpinnan päällä (Kuva 8).



Kuva 8 Aermod View™-ohjelmalla mallinnetun savukaasubluumin maanpintapitoisuudet 3D-maastomallissa. Kuvan esimerkin kohde on sama kuin kuvassa 7.

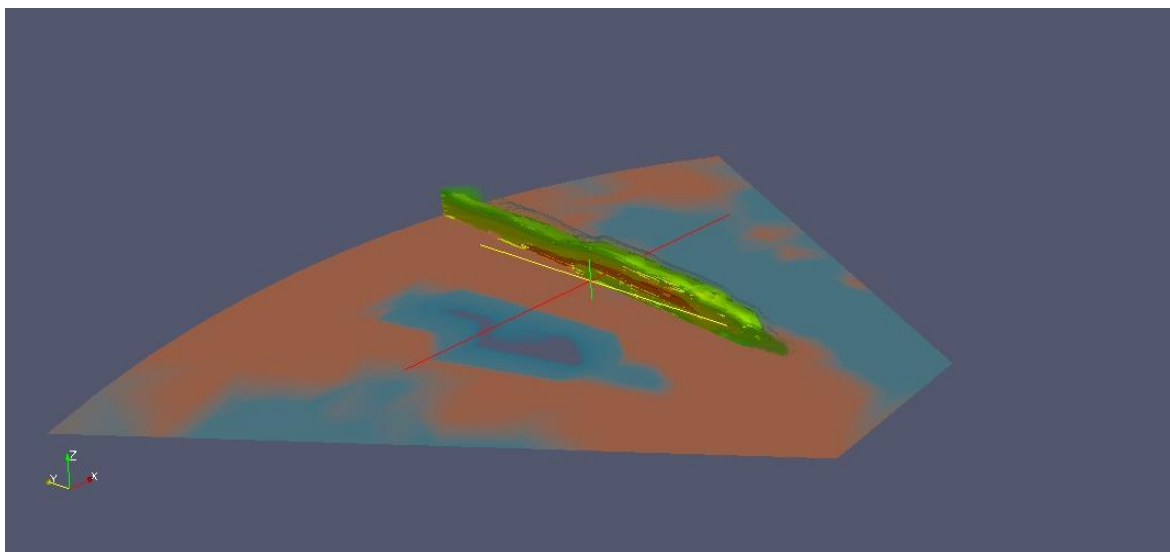
5.2 Leviämismallien visualisointi 2D-tasolla

Leviämismallien visualisointi 2D-tasolla on perinteinen keino esittää savukaasubluumin leviämistä ympäristöön. Savukaasubluumin pitoisuudet eri alueilla esitetään yleensä pitoisuuskäyrien ja pitoisuuksia vastaavien värien avulla karttatasolla itä-länsi- ja pohjois-etelä-akselilla (Kuva 7). Tämä on sinänsä yksinkertainen ja hyvin havainnollinen keino esittää pitoisuudet eri alueella, mutta ongelmaksi kehittyikin se, että pitoisuudet voidaan esittää vain yhdellä korkeudella kerrallaan. Tällöin esittäessä savukaasubluumin pitoisuuksia eri korkeuksilla, joudutaan tuottamaan useita karttakuvia, joissa pitoisuudet esitetään, jolloin savukaasubluumin esittäminen on monimutkaisempaa. (Dionne, 2012.)

Ennen 2D-visualisointi olikin kaikkein järkevin ratkaisu, koska leviämismallinnukset tehtiin tietokoneilla, joista ne yleensä tulostettiin paperille. Paperilla 3D-visualisoinnin esittäminen olisi ollutkin käytännössä mahdotonta. Tekniikan kehittymisen myötä myös tietokoneiden laskentateho on moninkertaistunut, mikä on mahdollistanut 3D-visualisoinnin perustietokoneillakin. Tämä on mahdollistanut sen, että 3D-visualisoinnin tekeminen ei vaadi enää supertietokonetta, vaan visualisoinnin voi suorittaa ihan perustietokoneellakin. Tällöin myös paperiversioiden käyttö leviämismallien visualisointien esittämisessä on vähentynyt ja ne esitetään yhä useammin sähköisessä muodossa. Esimerkiksi yleisötilaisuudessa havainnollistaessa päästöjen leviämistä, se voidaan esittää suoraan projektorilta yleisölle havainnollisesti visualisointiohjelmalla. Ohjelmalla voidaan esittää esimerkiksi savukaasu viuhkan leviäminen eri kuvakulmista ja tuulen eri nopeuksien vaikutus leviämiseen animoituna, mikä ei olisi mahdollista 2D-visualisoinnissa.

5.3 Leviämismallinnuksien visualisointi 3D-tasolla

Käyttämällä 3D-visualisointia 2D-visualisoinnin sijasta selviydytään yhdellä ”kuvalla”, jossa yhdistyy 2D-tasojen pitoisuuskäyrät eri korkeuksilta muodostaen 3D-pitoisuuskäyriä kolmiulotteisella akselilla. Lisäksi 3D-visualisointi mahdollistaa aikaparametrien käytön ja täten animaatioiden tekemisen visualisoinnista. 3D-visualisoinnin avulla voidaan myös havainnollistaa rakennusten ja muiden korkeiden objektien vaikutusta savukaasubluumin leviämiseen ja mahdolliseen painumaan. 3D-savukaasubluumista voidaan tehdä myös erilaisia poikkileikkauskuvia (Kuva 9), joilla pystytään esittämään esimerkiksi bluumin pitoisuuksia eri kohdissa Z-akselin suuntaisesti. Näiden eri visualisointioiden tekeminen on lisäksi hyvin nopeaa ja vaivatonta, toisin kuin 2D-visualisoinnissa, jossa on paljon rajatummalla mahdollisuudet ja lisäksi hitaampaa tuottaa tällaisia leikkauskuvia. (Dionne, 2012.)



Kuva 9 Savukaasubluumin visualisointi 3D-tasolla Paraview-ohjelman avulla. Kuvassa käytetään samaa esimerkkiä kuin kuvassa 2, josta on otettu poikkileikkauskuva Z-akselin suhteen.

6 SAVUKAASUBLUUMIEN VISUALISOINTIOHJELMAN VALINTA

6.1 Visualisoinnin eri ohjelmavaihtoehdot

Tässä kappaleessa käsitellään eri ohjelmia, jotka soveltuvat savukaasubluumien 3D visualisointiin. Sopivia ohjelmia on kaksi, jotka ovat Paraview ja Breeze Softwaren tekemä 3D Analyst. Paraview-ohjelma on tarkoitettu erilaisten fysikaalisten ilmiöiden mallintamiseen ja 3D Analyst-ohjelma on tehty suoraan erilaisten päästöjen leviämisen visualisointia varten.

6.1.1 Paraview

Paraview on visualisointi ja datan analysointi ohjelma, jonka perusversion pystyy lataamaan ilmaiseksi internetistä osoitteesta <http://paraview.org/paraview/resources/software.php>. Data on helposti ja nopeasti analysoitavissa ja visualisoitavissa kvantitatiivisilla ja kvalitatiivisilla työkaluilla. Ohjelmalla on mahdollista analysoida ja visualisoida 3D:nä suuriakin määriä dataa, kuten eri virtauksien käyttäytymistä niiden törmätessä johonkin objektiin. Lisäksi se soveltuu pienempiinkin kohteisiin, kuten ihmisen ruumiin osien lääketieteelliseen visualisointiin. Paraview-ohjelman visualisointi voidaan suorittaa joko samalla koneella kuin käyttäjä, etänä tai visualisointityön laskeminen jaettuna useille tietokoneille laajoissa mallinuksissa. Yleensä ottaen perustietokoneen tehot riittävät visualisoinnin suorittamiseen, mutta suurissa visualisoinneissa, jossa voi olla esimerkiksi miljoonia hilapisteitä, joudutaan laskentatyötä jakamaan usealle tietokoneelle, jotta laskenta olisi jouhevaa. Joskus visualisointi voidaan suorittaa etänä toisella koneella, jolloin on otettava huomioon tietoturva. (Selic, M. 2010.)

Paraview-ohjelman hyviä puolia ovat seuraavat ominaisuudet:

- Useiden eri formaattien tuki
- Datan visualisointi ja animointi mahdollista sekä 2D:nä että 3D:nä skalaareilla, vektoreilla ja tensoreilla
- Kvalitatiivinen ja kvantitatiivinen datan analysointi ja muokkaus
- Käyttöliittymä yksinkertainen ja selkeä
- Useita filttareita, joilla dataa voidaan käsitellä
- Ohjelmaan on tehty useita kattavia tutustumisohjeita eri toimintojen tekemiseen
- Ohjelman aktiivinen kehitys
- Vapaa lähdekoodi
- Perusversio on ilmainen
- Ohjelmalla visualisointi ja datan analysointi mahdollisuudet melkein rajattomat
- Tietoturva hyvä, kun visualisointi tehdään samalla koneella kuin millä käyttäjä on

Paraview-ohjelman huonoja puolia ovat seuraavat ominaisuudet:

- Ajoittain esiintyvät viat, jotka sammuttavat ohjelman yhtäkkiä
- Peruskartan tuominen ohjelmaan melko hankalaa
- ParaviewPro maksullinen versio
- 3D renderöinnin voi tehdä vain yhdellä tavalla ja renderöinnin asetuksien muokkaus on rajoitettua
- Etäkäytön tietoturva? (Selic, M. 2010.)

6.1.2 3D Analyst

3D Analyst ohjelman on kehittänyt amerikkalainen Breeze Software-yritys, joka on erikoistunut erilaisten päästöjen leviämismallinnukseen ja ilmakehässä tapahtuviin ilmiöiden mallinnukseen. 3D Analyst ohjelma puolestaan on kehitetty edellä mainittujen ohjelmien visualisointiin ja analysointiin. Ohjelmalla pystytään tuottamaan helposti havainnollistavia ja helposti ymmärrettäviä 3D-visualisointeja leviämismalleista. Ohjelma sopisikin tämän vuoksi savukaasubluumien 3D visualisointiin erittäin hyvin, mutta ongelmaksi koituu nykyisen leviämismallinnusohjelman ja 3D Analyst-ohjelman yhteensopivuus. 3D Analyst-ohjelman pitäisi tukea sen tuoteselostuksen mukaan myös muita formaatteja kuin mitä Breeze Softwaren omissa ohjelmissa käytetään, mutta tästä ei anneta sen tarkempaa selostusta. Tämän ongelman vuoksi todennäköisesti jouduttaisiin vaihtamaan nykyinen leviämismallinnusohjelma Breeze Softwaren omaan Aermod-ohjelmaan, jonka pitäisi olla melko samanlainen ominaisuuksiltaan kuin nykyisen Lakes Environmental-yrityksen Aermod ViewTM leviämismallinnusohjelman. Molemmat ohjelmat laskevat leviämisen Gaussin leviämisteorian mukaisesti. 3D Analyst-ohjelmasta on myynnissä kolme eri versiota, jotka ovat Results, Met ja Ultimate. Näistä Results- ja Ultimate-versiot soveltuvat savukaasubluumien 3D visualisointiin. Ultimate-versiossa on paljon enemmän visualisointi mahdollisuuksia, joita ei kuitenkaan tarvitse savukaasubluumin visualisoinnissa. Kaiken lisäksi sen hintakin on noin kolminkertainen Results-versioon nähden, jolloin sen hankintakustannukset olisivat huomattavasti korkeammat. Tämän vuoksi Ultimate-versio on pois suljettu vaihtoehto savukaasubluumin visualisointiohjelmaksi. (Breeze-software.)

3D Analyst-ohjelman hyviä puolia ovat seuraavat ominaisuudet:

- Tukee useiden Breeze Softwaren tuottamien ohjelmien dataa, kuten Aermod, Calmet ja Cal-Puff
- Yksinkertainen visualisointi ja helposti ymmärrettävässä muodossa
- Peruskartan tuominen topografioineen malliin melko yksinkertaista
- 3D visualisointi työkalut erittäin hyvä savukaasubluumien ja tuulen suunnan visualisointiin
- Visualisoinnista helppo tuottaa havainnollistavia kuvia ja animaatioita
- Työkalut, jotka ovat tehty erityisesti päästöjen leviämismallinnuksen analysointiin ja visualisointiin
- Tulosten jatkokäsittely mahdollisuudet hyvät ja tulokset voidaan tallentaa useassa eri formaatissa, joka mahdollistaa useiden eri ohjelmien tuen.

3D Analyst-ohjelman huonoja puolia ovat seuraavat ominaisuudet:

- Maksullinen
- Tukeeko muiden ohjelmien formaattia?
- Nykyinen leviämismallinnusohjelma tulisi vaihtaa Breeze Softwaren omaan ohjelmaan. (Breeze-software.)

6.2 Ominaisuuksien vertailu

Paraviewin perusversion ja 3D Analyst Results-vertailun yhteenveto on esitetty Taulukko 2, jossa voidaan yksinkertaisesti tarkastella ohjelmien sopivuutta savukaasubluumien visualisointiin. Vertailutaulukosta näkee hyvin, että molemmilla ohjelmilla on omat etunsa ja huonot puolensa. Tästä seuraa se, että vertailu ei ole aivan niin yksinkertainen.

Taulukko 2 Visualisointiohjelmien vertailutaulukko

Visualisointiohjelmien vertailutaulukko		
Ohjelma	Paraview (perusversio)	3D Analyst Results
Tukee useita formaatteja	***	*
Onko yhteen sopiva nykyisen leviämismallinnusohjelman kanssa	***	?
Suunniteltu varta vasten leviämismallien visualisointiin ja analysointiin	*	***
Käyttömahdollisuudet	***	*
Yksinkertainen käyttää	**	***
Ohjelmaan tehtyjen käyttöohjeiden kattavuus	***	**
Savukaasu bluumin visualisoinnin helppous	**	***
Pohjakartan ja topografian tuominen 3D visualisointiin	*	***
Mallin analysointityökalujen kattavuus	***	***
Animointimahdollisuudet	**	***
Tietoturvallisuus	***	?
Hinta	Ilmainen	995 \$/a

*** = soveltuu erittäin hyvin

** = Soveltuu hyvin

* = Ei sovellu tai soveltuu huonosti

6.3 Ohjelman valinta

Paraview-ohjelman yksi suurimpia etuja visualisoinnissa ja datan analysoinnissa on se, että sillä pystytään käsittelemään hyvin monenlaisessa formaatissa olevaa dataa, johon Breezen 3D Analyst Results-ohjelma ei pysty. Tällöin Paraview-ohjelman käyttötarkoitus ei rajoitu ainoastaan savukaasubluumien 3D-visualisointiin, vaan sitä voidaan soveltaa melkein mihin tahansa kohteeseen, esimerkiksi muiden mallinnusohjelmien datojen visualisointiin. Paraview-ohjelmalla pystyy käsittelemään nykyisen savukaasubluumin leviämismallinnuksen tuloksia, kun taas 3D Analyst Results-ohjelmalla tätä ei välttämättä voi tehdä, sillä ohjelmaan ei löydy kokeiluversiota, jolla voisi asian selvittää. Tällöin jouduttaisiin hankkimaan Breeze Softwaren Aermod-ohjelma, jolla pystyisi tuottamaan varmasti 3D Analyst Results-ohjelmaan soveltuva dataa. Hyvänä puolena olisi tässä tapauksessa se, että tällöin 3D Analyst Results-ohjelmalla olisi helppo visualisoida 3D:nä savukaasubluumin leviämistä eri tilanteissa. Lisäksi savukaasubluumin 3D visualisoinnista pystyttäisiin tuottamaan animaatioita kuvaamaan näitä eri tilanteita.

Molempiin ohjelmiin löytyy kattavat käyttöohjeet, tosin Paraview-ohjelmaan löytyy ohjeet monen muunkin datan visualisointiin ja analysointiin. Paraview-ohjelman käytön perusteella sen käyttäminen on melko yksinkertaista ja loogista pienen perehtymisen jälkeen, minkä vuoksi ohjelmalla on helppo tuottaa selkeitä visualisointia datasta. 3D Analyst Results-ohjelman esitteiden ja ohjeiden perusteella visualisoiminen ja animointi ovat melko yksinkertaisia toimenpiteitä. Isoimmaksi ongelmaksi Paraview-ohjelmaan perehtymisen jälkeen on ilmestynyt kartan tuominen visualisointiin, mitä ilman visualisoinnin tuottaminen on todella hankalaa. Tähän toimenpiteeseen löytyy kuitenkin ohjeet, jotka ovat melko monimutkaiset. Maaston topografian tuominen sen sijaan on melko yksinkertaista, jolloin maaston muotojen vuoksi savukaasubluumin sijainti voidaan yhdistää toiseen malliin. 3D Analyst Results-ohjelmaan taas kartan ja topografian tuominen on yksinkertainen ja helppo toimenpide. Molemmista ohjelmista löytyy kattavat työkalut visualisointiin ja datan analysointia varten, mutta Paraview-ohjelmassa niitä on enemmän, mikä johtuu sen laajemmasta käyttötarkoituksesta. Tietoturvalisuuden suhteen Paraview-ohjelman turvallisuus on hyvä, koska ohjelman visualisointi voidaan suorittaa omalla koneella. Tietoturvallisuus on kyseenalaisempi, kun käytetään servereitä ja etäkäyttöä, jolloin sen turvallisuutta ei voida yhtä hyvin taata. 3D Analyst Results-ohjelman tietoturvallisuudesta ei löytynyt riittäviä tietoja, jotta sitä voitaisiin vertailla Paraview-ohjelman turvallisuuteen.

Viimeisenä, mutta ratkaisevana asiana, ohjelman valintaan on ohjelman hankintakustannukset. Paraview-ohjelman perusversio on ilmainen, kun taas 3D Analyst Results-ohjelman vuosittainen lisenssi maksaa 995 \$. Lisäksi 3D Analyst Results-ohjelmaan vaihtaessa tulisi vaihtaa myös käytettävä leviämismallinnusohjelma, jonka vuosittainen lisenssi on nykyisen leviämismallinnusohjelman vuosittaisen lisenssin luokkaa. Tästä ei syntyisi sinällään lisää hankintakustannuksia, mutta uuden ohjelman opettelu vaatii aina oman aikansa, jolloin se olisi pois muusta työajasta. Näiden pohjalta päädyimme käyttämään visualisoinnissa Paraview-ohjelmaa, vaikka se ei ole suoraan suunniteltu savukaasubluumien 3D visualisointiin.

6.4 Ohjelman käyttöönotto

Paraview-ohjelman käyttöönottaminen on melko yksinkertainen prosessi, koska sen hankkiminen on helppoa, kun sitä varten ei tarvitse ostaa erillistä lisenssiä ja sen voi ladata suoraan internetistä valmistajan sivuilta. Teknisiltä vaatimuksiltaan ohjelman vaatimukset vaihtelevat riippuen visualisoitavasta kohteesta, mutta itse ohjelma on melko kevyt ja sen pyörittämiseen ei tarvita kovinkaan tehosta konetta. Muutaman tuhannen hilapisteen visualisointi onnistuu jouhevasti normaalilla kannettavalla tietokoneella, jonka vuoksi ohjelman käyttöönotto ei vaadi uusien tietokoneiden hankintaa. Suurimman työn ohjelman käyttöönotossa aiheuttaa ohjelman eri toimintojen opettelu, johon tässä opinnäytetyössä tehdään käyttöohjeet. Lisäksi tarvittaessa lisää ohjeistusta ohjelman eri toimintojen käyttöön, internetistä löytyy erilaisia käyttöoppaita ohjelmaan, kuten Paraview:n perustoimintojen käyttöohje *Paraview User's Guide (V3.14) How to unleash the beast!*, joka on saatavissa internetistä osoitteesta <http://denali.princeton.edu/Paraview/ParaViewUsersGuide.v3.14.pdf>.

7 OHJELMAN VALIDOINTI

7.1 Paraview-ohjelman validointi

Validoinnilla on tarkoitus varmistaa Paraview-ohjelman toimivuus, että se täyttää tilaajan asettamat vaatimukset ohjelmalle. Validointimenetelmillä pyritään osoittamaan, että ohjelma toimii luotettavasti, toimii oikein ja soveltuu käyttötarkoitukseensa. Paraview-ohjelmalla on tarkoitus vain visualisoida laskentatuloksia, ei tuottaa dataa, jonka vuoksi ohjelman validoinnissa käytetään vain visuaalista todentamismenetelmää. Validointimenetelmässä vertaillaan Aermod View™-ohjelman visualisoinnin tuloksia Paraview-ohjelman 3D-visualisoinnin tuloksiin.

7.2 Validointimenetelmä

Visualisointituloksien vertailussa otetaan kohteeksi leviämismallinnus, josta on tehty visualisaatiot sekä Aermod View™-että Paraview-ohjelmalla. Aermod View™-ohjelmasta saatu savukaasubluumin visualisaatio on vain yhdeltä tasolta, jonka vuoksi Paraview-ohjelman 3D-visualisoitu savukaasubluumista otetaan leikkauskuva samalta tasolta. Näin pitäisi saada lähestulkoon samanlaiset pitoisuuskäyrät omaavat 2D-tasot molemmista ohjelmista, joita vertaamalla pystytään toteamaan Paraview-ohjelman oikeellisuus verrattuna Aermod View™-ohjelmaan. Tämä vertailu suoritetaan kolmessa eri korkeudessa eli 50 metrissä, 90 metrissä ja 150 metrissä. Korkeudet valittiin niin, että yksi on piipunsuun korkeudella eli 90 metrissä ja yksi taso sen alapuolella ja yksi yläpuolella.

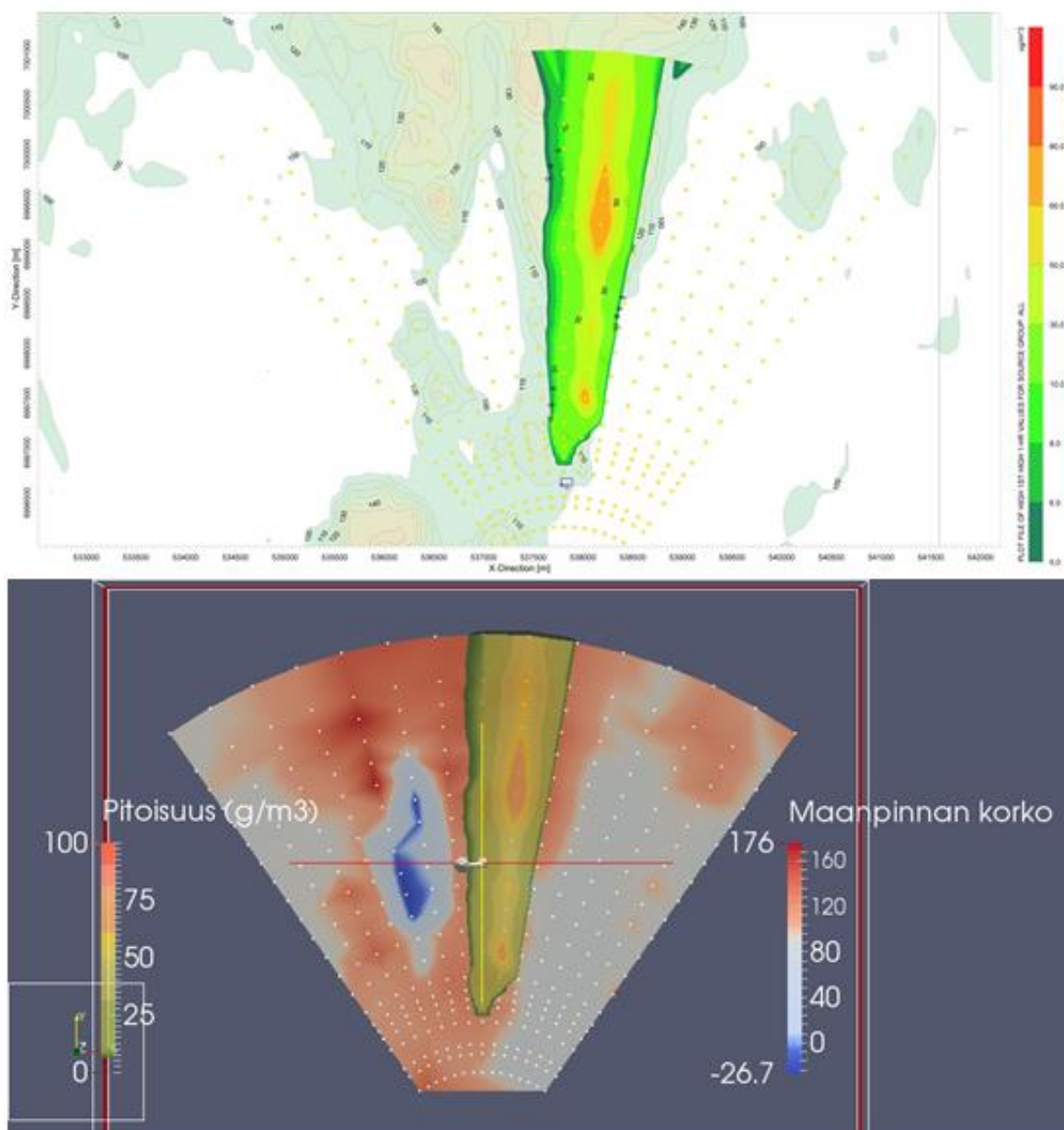
Validointia varten olevaa mallia yksinkertaistetaan siten, että topografia jätetään pois validoitavasta mallista. Tämä tehdään sen vuoksi, että Aermod:lla tallennettaessa tietyn korkeuden laskentatulokset, se laskee pisteen koron maanpintaan nähden. Tällöin tehtäessä 3D-visualisointi mallista ja otettaessa leikkauskuva samalta tasolta maanpintaan nähden on käytännössä mahdotonta, koska leikkauskuvan voi ottaa vain tietyltä korolta. Tällöin topografian jätettäessä huomioimatta, jokaisen pisteen korko on sama kyseisellä tasolla. Tämä mahdollistaa, että saman leviämismallin 3D-visualisaatiosta voidaan ottaa tiettyä korkoa vastaava leikkauskuva. Tätä leikkauskuvaa voidaan sitten verrata Aermod View™-ohjelmasta saatuun saman koron 2D-visualisaatioon.

Aermod View™-ohjelman visualisointikuviin on jätetty maaston korkeusrasteri taustalle ja Paraview-ohjelman visualisaatioon on tehty ohjelmalla hilapisteiden korkojen perusteella korkeusjakaumat, jotka eivät ole täysin samanlaiset oikeaan verrattuna. Tämä on tehty helpottamaan savukaasubluumin visualisaation sijainnin paikantamista validointia varten.

7.2.1 Validointi 50 metrin korkeudella

Kuva 10 ylempänä nähdään Aermod View™-ohjelmasta saadun savukaasubluumin leviämisen visualisaatio 50 metrin korkeudella ja alempana nähdään Paraview-ohjelmalla tehdyn 3D-visualisaatio savukaasubluumista otettu leikkauskuva samalta korkeudelta. Visualisaatioista nähdään väreillä ilmaistuna pitoisuudet, jotka on aseteltu samalle välille molemmissa ohjelmissa. Kuitenkin näiden pitoisuuksien indikaattoriväreissä on lievä ero, jonka vuoksi visualisaatiot eroavat väritykseltään toisis-

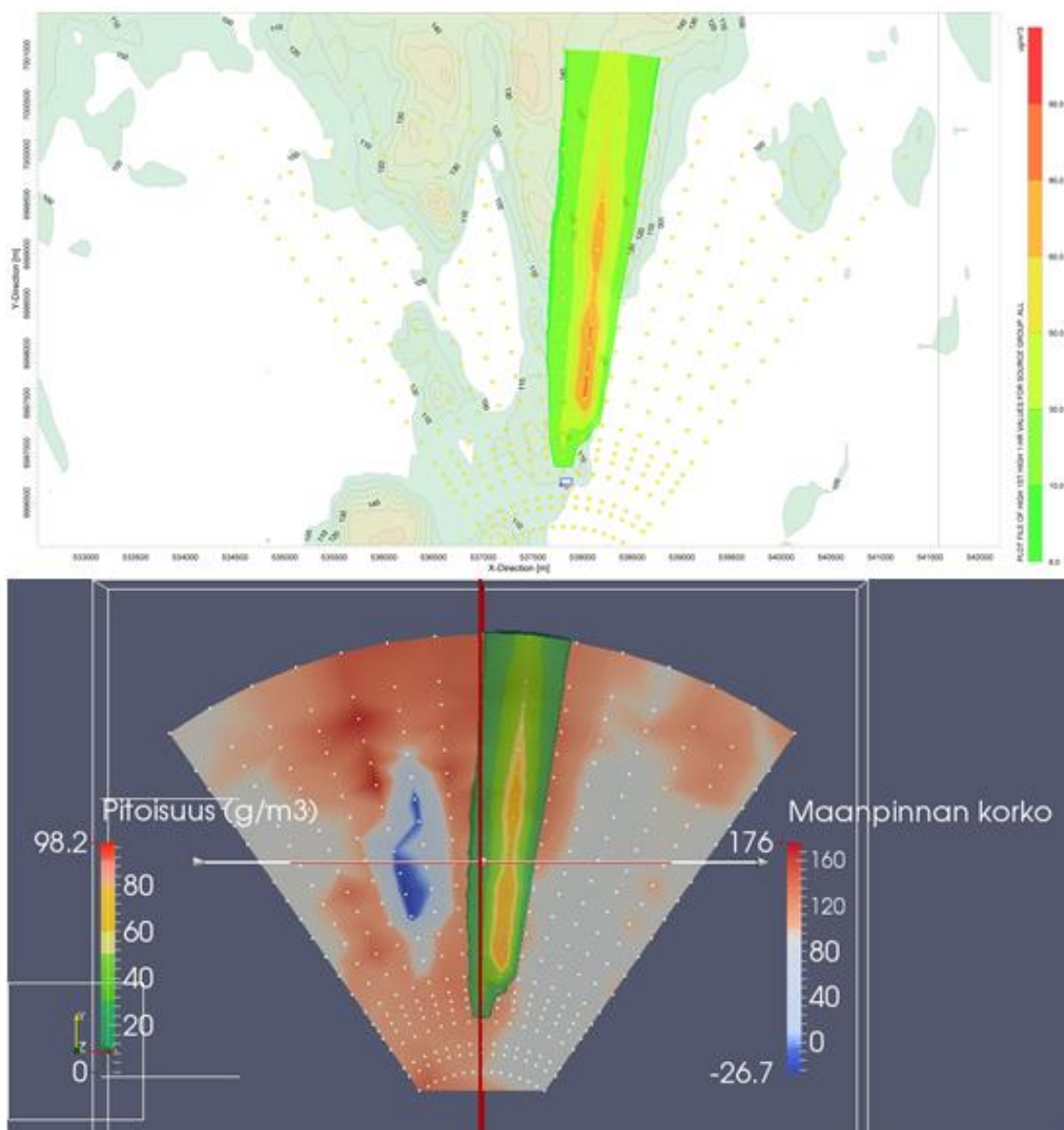
taan. Tarkasteltaessa yleisesti visualisaatiota nähdään, että Paraview-ohjelmalla tuotettu leviämisen visualisaatio vastaa pitkälti Aermod ViewTM-ohjelmasta saatua leviämisen visualisaatiota. Tarkemmin tarkasteltaessa huomataan kuitenkin pieniä eroja leviämisen visualisaatioissa, sillä Aermodista saatu visualisaatio eroaa varsinkin bluumin yläreunan oikeasta ja vasemmasta yläreunasta verrattuna Paraviewista saatuun visualisaatioon. Tämä voi johtua pitkälti Aermodin ohjelmasta, jonka pitoisuuksien laskenta ottaa leviämisessä huomioon enemmän asioita kuin Paraview-ohjelman visualisointilogiikka pystyy tekemään. Kuitenkin tarkasteltaessa pitoisuuksien jakautumisen piirteitä visualisaatioista, pystyy havaitsemaan, että ne ovat melko yksi yhteen sopivia. Sijainnitkin ovat molemmissa samat, mitkä voi tarkastaa hilapisteiden avulla, jotka pysyvät molemmissa visualisaatioissa samassa paikassa. Pitoisuudet ovat molemmissa visualisoinneissa $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mutta Paraview-ohjelma ei esitä μ -merkkiä, jonka vuoksi μ -merkki on jäänyt visualisoinnista pois.



Kuva 10 Aermod ViewTM-ohjelman visualisaatio 50 metrin korkeudella tapahtuvasta savukaasubluumin leviämisestä (ylempi) ja Paraview-ohjelman 3D-bluumista otettu leikkauskuva 50 metrin korkeudella (alempi). Alemmassa kuvassa pitoisuustaso virheellisesti g/m^3 . Oikea taso on $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

7.2.2 Validointi 90 metrin korkeudella

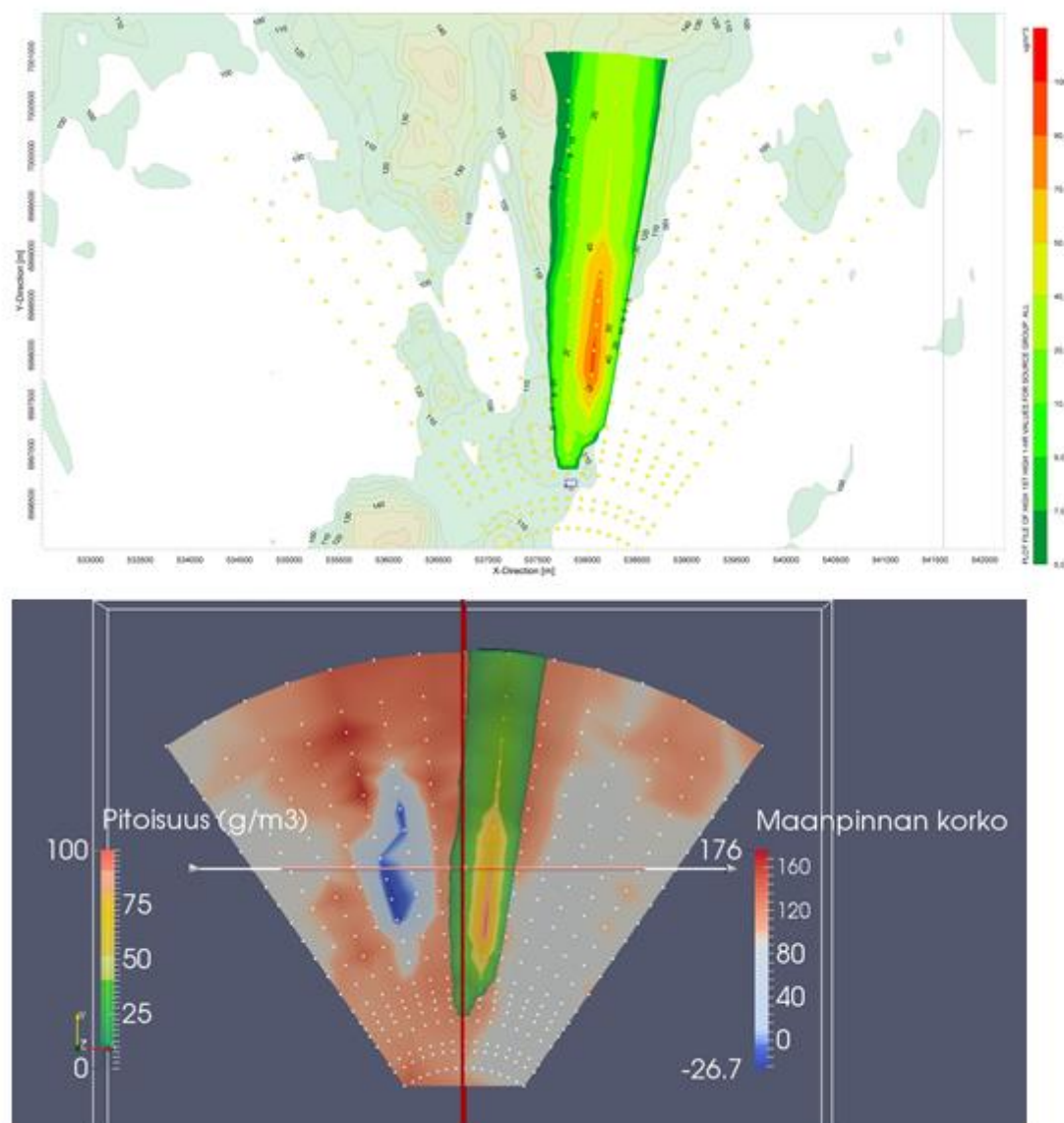
Kuva 11 nähdään vastaavat visualisaatiot Aermod ViewTM-ohjelmalla (ylempi) ja Paraview-ohjelmalla (alempi) tehtynä 90 metrin korkeudesta. Näiden visualisaatioiden erot ovat vielä pienemmän kuin 50 metrin visualisaatioiden välillä. Esimerkiksi maksimipitoisuuksien aluejakaumat ovat täysin samanlaiset. Tätä ei kuitenkaan pysty yhtä hyvin havaitsemaan kuvasta 5, koska kuva ei ole riittävän tarkka tarkastelua varten.



Kuva 11 Aermod ViewTM-ohjelman visualisaatio 90 metrin korkeudella tapahtuvasta savukaasubluumin leviämisestä (ylempi) ja Paraview-ohjelman 3D-bluumista otettu leikkauskuva 90 metrin korkeudella (alempi). Alemmassa kuvassa pitoisuustaso virheellisesti g/m^3 . Oikea taso on $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

7.2.3 Validointi 140 metrin korkeudella

Kuva 12 ylempänä nähdään 140 metrin korkeudelta tehty visualisaatio Aermod ViewTM-ohjelmalla ja alempana nähdään samalta korkeudelta otettu leikkauskuva Paraview-ohjelmalla tehdystä savukaasubluumista. Näissä visualisaatioissa esiintyvät erot pienillä pitoisuuksilla johtuvat Paraview-ohjelman säädöistä, jossa alle $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$:ssa olevia pitoisuuksia ei näytetä visualisaatioissa. Kuitenkin tarkasteltaessa isompia pitoisuuksia nähdään, että pitoisuusjakaumat ovat jälleen kerran yksi yhteen sopivia.

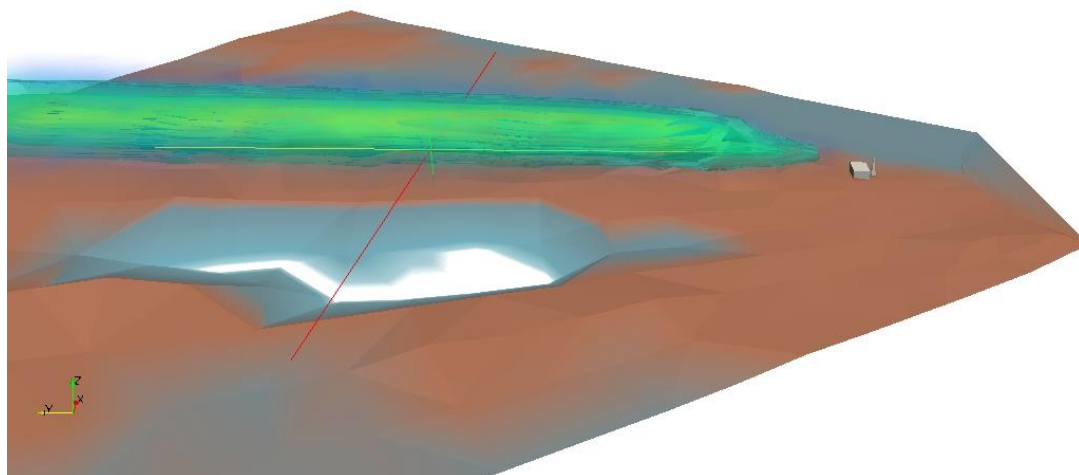


Kuva 12 Aermod ViewTM-ohjelman visualisaatio 140 metrin korkeudella tapahtuvasta savukaasubluumin leviämisestä (ylempi) ja Paraview-ohjelman 3D-bluumista otettu leikkauskuva 140 metrin korkeudella (alempi). Alemmassa kuvassa pitoisuustaso virheellisesti g/m^3 . Oikea taso on $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

7.3 Validoinnin yhteenveto

Tehdyistä visualisaatioista nähdään, että Aermot View™-ohjelmalla tuotetut visualisaatiot savukaasubluumin leviämisestä eivät eroa juurikaan Paraview-ohjelmalla tehdyn savukaasubluumin visualisaation leikkauskuvasta vastaavilla korkeuksilla. Visualisaatioissa esiintyneet erot johtuivat Aermot View™-ohjelman visualisaation laskentalogiikasta, mutta näiden vaikutus savukaasun visualisoimiseen ovat hyvin vähäiset. Suuremman eron visualisaatioissa voi tehdä itse visualisoija, jos hän ei osaa käyttää ohjelmaa riittävän hyvin.

Kaiken kaikkiaan tehtyjen visualisaatioiden perusteella voidaan havaita, että Paraview-ohjelma soveltuu hyvin savukaasubluumin visualisaatioiden tekemiseen ja sen tarkkuus ja luotettavuus visualisoinneissa on riittävän hyvä. Kuva 13 esitetään validoinnissa käytetyn aineiston pohjalta tehty savukaasubluumin 3D-visualisaatio, kun se on tehty loppuun saakka.



Kuva 13 Savukaasubluumi 3D-visualisoituna

8 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä oli tarkoitus selvittää eri mahdollisuuksia savukaasubluumin 3D-visualisoimiseksi, joka mahdollistaa entistä havainnollisemman tarkastelun savukaasubluumin leviämisestä kolmiulotteisella tasolla. Savukaasubluumin 3D-visualisaatio ei tule korvaamaan 2D-visualisaatiota savukaasujen leviämisestä, vaan se tulee tukemaan savukaasubluumin leviämisen havainnollistamista leviämisalueella. Tästä on erityisesti hyötyä, kun tehdään leviämismallinnuksia Pino-asetuksen alaisiin energiantuotantolaitoksiin, jotka sijaitsevat usein asutuksen lähellä. Näissä kohteissa laitoksen aiheuttamat epäpuhtauspitoisuudet maanpintatasolla ja asuinrakennuksien tasolla voivat olla sellaisia, että niillä on merkittäviä vaikutuksia ihmisten viihtyvyyteen ja terveyteen, joka puolestaan lisää terveydenhoitokustannuksia.

Tilaaajaorganisaation nykyisestä leviämismallinnusohjelmasta, Aermod View™, saatavia tuloksia käytetään hyödyksi, kun etsitään savukaasubluumin leviämisen 3D-visualisaatioon sopivaa ohjelmaa. Sopivia ohjelmia visualisointia varten löytyi kaksi, jotka olivat Paraview- ja Breeze Softwaren 3D Analyst. 3D Analyst-ohjelman vahvuus oli se, että se on suunniteltu ja tehty juuri leviämismallinnuksien visualisointiin, minkä vuoksi ohjelmalla voitaisiin tehdä suhteellisen helposti ja vaivattomasti kolmiulotteisia kuvia ja animaatioita leviämisestä. Huonona puolena ohjelmassa oli se, että se vaatii ohjelman hankinnan lisäksi myös itse leviämismallinnusohjelman vaihtamisen. Tämä tietäisi investointikustannusten lisäksi lisää töitä mallintajalle, koska mallintaja joutuisi opettelemaan uuden ohjelman käyttämisen. Paraview-ohjelman parhaimpana puolena on sen avoin lähdekoodi ja monipuolisuus, joka mahdollistaa käytännössä lähes rajattomat käyttötarkoitukset. Lisäksi avoimen lähdekoodin avulla jokainen käyttäjä voi kehittää ohjelmaan omia lisäosia. Huonoina puolina Paraview-ohjelmassa on puolestaan monimutkaisempi leviämisen visualisointi. Ohjelmien ominaisuudet koottiin vertailutaulukkoon, joka helpotti ominaisuuksien arviointia. Ohjelmien ominaisuuksissa oli paljon eroavaisuuksia, mutta yhdessä tilaaajaorganisaation kanssa päädyttiin Paraview-ohjelmaan. Paraview-ohjelman valintaa puolsivat sen monipuoliset 3D-visualisointiominaisuudet ja toisaalta sen hankkiminen on helppoa ja se on ilmaisohjelma.

Ohjelman luotettavuuden varmistamiseksi suoritettiin validointi, jossa tarkasteltiin Aermod View™- ja Paraview-ohjelmalla tehtyjä leviämismallinnuksia samasta kohteesta ja samasta tasosta. Validointi tehtiin kolmella eri tasolla, joista kaikista nähdään, että ohjelmien väliset erot visualisaatioissa ovat hyvin pienet, käytännössä mitättömät. Näiden perusteella voitiin todeta, että Paraview-ohjelma on luotettavuudeltaan riittävän hyvä visualisointia varten. Näiden vaiheiden jälkeen aloitettiin tilaaajaorganisaation käyttöön tarkoitettujen työohjeiden tekeminen, missä neuvotaan vaihe vaiheelta, kuinka savukaasubluumin 3D-visualisointi onnistuu. Työohjeiden tekemisessä ongelmaksi koituivat lähinnä maastokartan tuominen visualisaatioon, koska ei ollut saatavilla sopivassa muodossa olevaa maastokarttaa. Visualisointi on kaiken lisäksi melko hidasta, koska Aermod View™-ohjelmalla pystytään tallentamaan reseptoripisteverkko vain yhdeltä tasolta maanpintaan nähden kerrallaan. Tällöin reseptoripisteverkosto-tiedostoja syntyy useita kymmeniä, jotka kaikki tulee muokata Excel-taulukkoohjelmalla sopivaan muotoon ja yhdistää yhteen. Tämän jälkeen vasta päästään käyttämään itse Paraview-ohjelmaa, jolla varsinainen 3D-visualisointi suoritetaan. Savukaasubluumin le-

viämisen animointi rajattiin pois opinnäytetyöstä. Animointiin olisi vaatinut liian paljon aikaa suhteessa käytössä oleviin resursseihin nykyisen leviämismallinnusohjelman kanssa.

Yhteenvedona voidaan todeta, että opinnäytetyössä päästiin hyvin tavoitteisiin, jotka olivat visualisointiohjelman löytäminen ja sen validointi ja työohjeiden tekeminen visualisointia varten. Tilaajaorganisaatio voi tarvittaessa jatkaa 3D-visualisoinnin kehittämistä esimerkiksi kehittämällä entistä nopeampia keinoja visualisointia varten ja selvittämällä, kuinka visualisaatioon voidaan tuoda maastokartta, jolloin kuvat olisivat yhä paremmin sidottuja tiettyyn paikkaan. Lisäksi Paraview-ohjelman monipuolisuus mahdollistaa ohjelman soveltamisen myös moneen muuhun käyttötarkoitukseen, jossa jotain mallia tulee visualisoida joko kaksi- tai kolmiulotteisena tai vaikka animaationa.

LÄHTEET

Ahonen, L., Kotisalo, K., Kurttila, H., Säkkinen, U., Talvitie, T., Valanto, T. & Valvisto, T. 2013. Tuotantolaitosten sijoittaminen. [Verkkajulkaisu]. Tukes [Viitattu 18.9.2013]. Saatavissa:

http://www.tukes.fi/Tiedostot/vaaralliset_aineet/esitteet_ja_oppaat/Tuotantolaitosten_sijoittaminen_tukesopas.pdf

Breeze-software. Software. 3D Analyst. [Viitattu 31.7.2013]: Saatavissa:

<http://www.breeze-software.com/>

Dionne, D. 2012. 3D visualization of atmospheric dispersion modeling results-AERMOD, CALPUFF or ASHRAE. ETUDES GESTION SOLUTIONS [Viitattu 13.8.2013]. Saatavissa:

<https://sites.google.com/site/denisdionneen/in-the-news/3dvisualizationofatmosphericdispersionmodelingresults-aermodcalpuffforashrae>

Ecobio. Palvelut. Asiantuntijapalvelut] [Viitattu 23.8.2013]. Saatavissa:

<http://www.ecobio.fi/index.php/home>

Envin. Palvelut [Viitattu 23.8.2013]. Saatavissa: <http://www.enwin.fi/>

EPA. Lesson 6. Pume Dispersion and Air Quality Modeling [Verkko Julkaisu]. United States Environmental Protection Agency [Viitattu 30.7.2013]. Saatavissa:

[http://yosemite.epa.gov/oaqps/eogtrain.nsf/b81bacb527b016d785256e4a004c0393/c9862a32b0eb4f9885256b6d0064ce2b/\\$FILE/Lesson%206.pdf](http://yosemite.epa.gov/oaqps/eogtrain.nsf/b81bacb527b016d785256e4a004c0393/c9862a32b0eb4f9885256b6d0064ce2b/$FILE/Lesson%206.pdf)

HSY. Seutu- ja ympäristötieto. Ilmanlaatu. Ilmanlaatu tiedotus. Ilmanlaatuindeksi [Viitattu 14.8.2013]. Saatavissa: <http://www.hsy.fi/Sivut/Etusivu.aspx>

HSY 2010. *Millaista ilmaa hengität* [verkkajulkaisu]. HSY Helsingin seudun ympäristöpalvelut [Viitattu 14.8.2013]. Saatavissa:

http://www.hsy.fi/seututieto/Documents/Ilmanlaatu_esitteet/millaista_ilmaa_hengitat_web.pdf

HSY 2011. HSY Seutu- ja ympäristötieto. Ilmanlaatu. Tietoa ilmansuojelusta. Raja- ja ohjeavot [Viitattu 14.10.2013]. Saatavissa: <http://www.hsy.fi/Sivut/Etusivu.aspx>

HSY 2012. Seutu- ja ympäristötieto. Ilmanlaatu. Ilmanlaatuun vaikuttavat tekijät [Viitattu 12.9.2013]. Saatavissa: <http://www.hsy.fi/Sivut/Etusivu.aspx>

Ilmanlaatuportaali. Tietoa ilmansaasteista. Ilmanlaatuindeksi [Viitattu 14.8.2013]. Saatavissa: <http://www.ilmanlaatu.fi/index.php>

Ilmatieteenlaitos. Teematietoa. Yhteiskunta, terveys ja turvallisuus. Ilmanlaatu ja sää. Talviset inversiotilanteet [Viitattu 14.8.2013]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/>

Ilmatieteenlaitos 2012. Teematietoa. Ilmakehä-ABC [Viitattu 14.10.2013]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/>

Kunnat.net 2013. Rekisteröinti [Viitattu 5.6.2013]. Saatavissa:

<http://www.kunnat.net/fi/asiantuntijapalvelut/ymparisto/ymparistonsuojelu/kunta/ymparistoluvat/rekisterointi/Sivut/default.aspx>

Lahdes, R. & Laukkanen, T. 2003. Ilmansuojelu. luonnontieteellisiä perusteita.

Laine, S. 2011. Katupölyn mallintamisen mahdollisuudet. Metropolia Ammattikorkeakoulu, rakennustekniikka. Opinnäytetyö [Viitattu 29.7.2013]. Saatavissa:

http://webd.savonia.fi/moodle/yhteiset_tiedotteet/ont/ohjeet/fi/Raportointiohjeet_2010.pdf

Lakes Environmental. ISC-AERMOD VIEW Windows Interface for the U.S. EPA ISCST3, AERMOD, and ISC-PRIME Air Dispersion Models-User's Guide. Lakes Environmental Software [20.8.2013]. Saatavissa: <http://courses.washington.edu/cewa567/iscaerwv.pdf>

Laukkanen, T. 2005. Ilmansuojelun perusteet. Oppikirja ilman pilaantumisesta ja sen ehkäisemisestä. Mikkeli: Savilahden Kirjapaino Ky.

Mäki, T. & Posio, J. 2004. Savukaasumittaukset [Verkkójulkaisu]. Oulun yliopisto: Sääntötekniikan laboratorio. [Viitattu 9.8.2013]. Saatavissa:

<http://herkules oulu.fi/isbn9514275551/isbn9514275551.pdf>

Ramboll Finland Oy. Palvelut. Vesi & Ympäristö. Kaavoitus ja maankäyttö. Kemikaalien leviämismallinnus [Viitattu 23.8.2013]. Saatavissa: <http://www.ramboll.fi/>

Rousku, P. Kaasumaiset päästöt energiantuotannossa [Powerpoint-esitys]. Metsäkeskus Kaakkois-Suomi [Viitattu 12.9.2013]. Saatavissa:

http://elearn.ncp.fi/materiaali/kainulainens/bioenergiamateriaali04/ymparisto/ilmastonsuojelu/pdf_materiaali/PaastotPKAMK1003.pdf

Selic, M. 2010. 3D Visualization: Paraview. [Verkkójulkaisu]. Max Planck Institute for Astrophysics [Viitattu 31.7.2013]. Saatavissa: <http://www.mpa-garching.mpg.de/mpa/institute/index-en.html>

Steiger Energia ja Ympäristö Oy. Palvelut. Ympäristö [Viitattu 23.8.2013]. Saatavissa: <http://steiger.fi/>

Suomen tuuliATLAS. Tuulisuus Suomessa. Geostroofinen tuuli [Viitattu 11.9.2013]. Saatavissa: <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>

Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut [verkkójulkaisu].
ISSN=1797-6049. 2011, Liitekuvio 2. Suomen kasvihuonekaasupäästöt sektoreittain vuonna 2011 .
Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 14.8.2013].
Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/khki/2011/khki_2011_2013-04-15_kuv_002_fi.html

Valtioneuvoston asetuspolttoaineteholtaan alle 50 megawatin energiantuotantoyksiköiden ympäristönsuojeluvaatimuksista VNa 445/2010. Finlex. Lainsäädäntö [Viitattu 5.6.2013]. Saatavissa:
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20100445>

Wang, X. 2005. Integrating GIS, simulation models, and visualization in traffic impact analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com>.

Western Engineering. Self-study notes-GAUSSIAN PLUMES [Verkkójulkaisu]. Spencer Engineering Building, Western University [Viitattu 29.7.2013]. Saatavissa:
<http://www.eng.uwo.ca/people/esavory/Gaussian%20plumes.pdf>

