



Pro gradu -tutkielma
Meteorologia

Hiilidioksidin vaihdon alueelliset muutokset Helsingissä

Minttu Havu

03.12.2018

Ohjaajat: Ap. Prof. Leena Järvi ja Prof. Timo Vesala

Tarkastajat: Ap. Prof. Leena Järvi ja Prof. Timo Vesala

HELSINGIN YLIOPISTO
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2a)
00014 Helsingin yliopisto

| | | | |
|--|--|---|--|
| Tiedekunta — Fakultet — Faculty | | Koulutusohjelma — Utbildningsprogram — Degree programme | |
| Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta | | Fysikaalisten tieteiden koulutusohjelma Meteorologia | |
| Tekijä — Författare — Author | | | |
| Minttu Havu | | | |
| Työn nimi — Arbetets titel — Title | | | |
| Hiilidioksidin vaihdon alueelliset muutokset Helsingissä | | | |
| Työn laji — Arbetets art — Level | | Aika — Datum — Month and year | Sivumäärä — Sidantal — Number of pages |
| Pro gradu -tutkielma | | 03.12.2018 | 62 |
| Tiivistelmä — Referat — Abstract | | | |
| <p>Hiilidioksidin vaihto maanpinnan ja ilmakehän välillä on suurempi kaupungeissa kuin luonnollisissa ekosysteemeissä. Ihmisten aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat yksi suurimmista syistä ilmaston lämpenemiseen ja kaupungit ovat vastuussa jopa 70 % hiilidioksidipäästöistä. Tässä työssä luodaan hiilidioksidin vaihdon malli, jotta kaupunkien vuorovaikutusta ilmakehän kanssa pystytään tutkimaan.</p> <p><i>Surface Urban Energy and Water Balance Scheme (SUEWS)</i> on pintavuomalli, joka on varta vasten luotu kaupunkien ja ilmakehän välisen vaihdon mallintamiseen. Se mallintaa ennestään energia- ja vesitaseita kaupungeissa, jolloin hiilidioksidin vaihdon lisääminen samaan malliin mahdollistaisi näiden parametrien mallintamista yhdessä. Lisään tässä työssä hiilidioksidin vaihdon ihmisperäiset ja biogeeniset komponentit SUEWS-malliin. Ihmisperäisiä hiilidioksidin päästöjen komponentteja ovat liikenne, rakennusten lämmitys ja itse ihmisistä tuleva hiilidioksidi aineenvaihdunnasta. Biogeenisiä komponentteja ovat kasvillisuuden fotosynteesin nielu ja lähteenä kasvillisuuden ja maaperän soluhengitys. Uusi malli mahdollistaa kasvillisuuden ja ihmisten aktiviteettien mallintamisen samaan aikaan korkealla paikallisella (250 m) ja ajallisella (1 h) resoluutiolla. Mallia verrataan pyörrekovarianssi-menetelmällä tehtyihin mittauksiin SMEARIII-aseamalla Kumpulassa ja Helsingin keskustassa Hotelli Tornin katolla. Molemmilla asemilla hiilidioksidin vaihdon malli vertautuu todella hyvin mittauksiin. Malli onnistuu erittäin hyvin hiilidioksidin vaihdon vuorokausikäyttäytymisessä toimien kesällä fotosynteesin avulla hiilidioksidin nieluna ja muulloin mallintamaan erityisen hyvin liikenteen ruuhkapiikit ja ihmisten liikkuvuutta.</p> <p>Hiilidioksidimallin tavoitteena on luoda apuväline kaupunkisuunnittelulle, jotta erilaisten ratkaisujen vaikutusta ilmastoon voitaisiin tutkia. Ajan uutta mallia 6x9 km² kokoisella alueella Helsingin keskustassa 250x250 m² hilakoolla vuosina 2006-2012. Alueellisen hiilidioksidin vuositaseeseen vaikuttaa eniten liikenteen jakautuminen alueelle ja ihmisten liikkuvuus päivällä. Hiilidioksidin vuositaseeksi vuonna 2012 saatiin mallialueella 221.6 kt C y⁻¹ eli 41.0 t C ha⁻¹ y⁻¹, joka koostui 8.2 % soluhengityksestä, 7.3 % fotosynteesistä, 14.3 % ihmisten aineenvaihdunnasta, 25.4 % liikenteestä ja 59.5 % kaukolämmöstä ja kulutussähköstä. Tässä työssä tutkin myös potentiaalisten viherkattojen ja aurinkopaneelien sijoittamista mallialueen katoille ja tarkastelen kummasta on enemmän hyötyä hiilidioksidin vaihdon kannalta. Näistä kahdesta vaihtoehdosta aurinkopaneelit pystyivät kompensoimaan enemmän hiilidioksidipäästöjä säästämällä 37.0 kt C y⁻¹ vuodessa. Viherkattojen ansiosta hiilidioksidin vaihto kasvoi 0.9 kt C y⁻¹, sillä biogeeniset lähteet kasvoivat enemmän kuin nielut. Kuitenkin lähde voi olla yliarvio, jolloin hiilidioksidin vaihto voi toimia myös nieluna. Näin ollen aurinkopaneelilla on suurempi potentiaali vähentää hiilidioksidipäästöjä Helsingissä.</p> | | | |
| Avainsanat — Nyckelord — Keywords | | | |
| Hiilidioksidi, kaupungit, SUEWS, mallintaminen, pyörrekovarianssi, viherkatot, aurinkopaneelit | | | |
| Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited | | | |
| Muita tietoja — Övriga uppgifter — Additional information | | | |

Sisältö

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Teoria | 3 |
| 2.1 | Turbulenttinen kuljetus rajakerroksessa | 3 |
| 2.1.1 | Rajakerroksen rakenne | 3 |
| 2.1.2 | Kovarianssitermit | 5 |
| 2.2 | Hiilidioksidin vuo | 6 |
| 2.2.1 | Biogeeninen hiilidioksidin vuo | 7 |
| 2.2.2 | Ihmisperäinen hiilidioksidin vuo | 9 |
| 2.3 | Pyörrekovarianssi-menetelmä | 11 |
| 2.4 | Kammiomittaukset | 11 |
| 3 | Menetelmät | 13 |
| 3.1 | Mittausasemat ja mittalaitteet | 13 |
| 3.2 | SUEWS | 15 |
| 3.2.1 | Hiilidioksidin vuon malli | 16 |
| 3.3 | Malliajoissa käytettävät aineistot | 17 |
| 3.4 | Malliajot | 22 |
| 3.4.1 | Mallin arviointi Kumpulassa ja Tornissa | 22 |
| 3.4.2 | Alueelliset vuosijat | 25 |
| 3.5 | Skenaarioajot | 26 |
| 3.5.1 | Potentiaaliset viherkatot | 26 |
| 3.5.2 | Aurinkopanaaleilla painotettu tapaus | 27 |
| 4 | Tulokset | 29 |
| 4.1 | Soluhengityksen parametrisointi | 29 |
| 4.2 | Mallin evaluointi | 30 |
| 4.3 | Alueellinen hiilidioksidin vuo | 34 |
| 4.3.1 | Hiilidioksidin vuon kehitys eri vuosina | 37 |
| 4.4 | Skenaarioajot | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 5 Johtopäätökset | 44 |
| Kirjallisuutta | 47 |
| Liite A Biogeeninen hiilidioksidin vuon malli | 54 |
| Liite B Ihmisperäinen hiilidioksidin vuon malli | 58 |

1. Johdanto

Ihmisten kasvava määrä maapallolla suurentaa ihmisten rasiutusta ilmakehään. Teollistumisen ja ihmisten toiminnan seurauksena, erinäisiä kaasuja päätyy ilmakehään ja osalla näistä on suuri vaikutus ilmastoon. Hiilidioksidi (CO_2) ja muut kasvihuonekaasut kuten metaani (CH_4), CFC-yhdisteet, dityppioksidi (N_2O) ja troposfäärinen otsoni (O_3) lämmittävät ilmastoa. Kasvihuonekaasuilla on suuri vaikutus maanpinnan pitkäaaltosäteilyyn, heijastaen suuremman osan pitkäaaltosäteilystä takaisinpäin ja näin lämmittäen ilmakehää. Metaanilla on potentiaalia lämmittää ilmakehää 20-kertaisesti verrattuna hiilidioksidiin, mutta hiilidioksidipäästöt ovat suurimmat ja näin ollen sen päästöihin on tärkeintä vaikuttaa. Tällä hetkellä noin 55 % ihmisistä asuu kaupungeissa. Kaupunkien asukasluku on kuitenkin kasvussa ja vuoteen 2050 mennessä kaupungeissa tulee asumaan jo 68 % maapallon ihmisistä (UN, 2018). Kaupungistumisen seurauksena, kaupunkien rakenne tulee muuttumaan ja kasvihuonekaasujen päästöt kasvamaan, jos asialle ei tehdä mitään. Monet kaupungit ovat ottaneet asiakseen istuttaa lisää kasvillisuutta lisätäksseen hiilidioksidin nieluja, vähentää keskustoissa sallittuja autoilijamääriä vähentääksseen päästöjä tai panostamalla uusiutuvaan energiaan vähentääksseen fossiilisten polttoainesten käyttöä.

Hiilidioksidin vuo, eli vaihto ilmakehän ja maanpinnan välillä, toimii kaupungeissa lähteenä ilmakehään (Grimmond et al. 2002, Crawford et al. 2011, Vesala et al. 2008). Noin 70 % ilmakehään päätyvästä hiilidioksidista tulee kaupungeista (Seto et al., 2014). Ihmisten aktiviteetit kuten liikenne ja rakennusten lämmitys aiheittavat hiilidioksidipäästöjä ilmakehään. Ihmiset itsessään ovat hiilidioksidin päästön lähde aineenvaihdunnallaan ja hengittäessään hiilidioksidia ulos. Ihmisten hengitys on tärkeä komponentti suurilla väestötiheyksillä omaavissa kaupungeissa (Moriwaki and Kanda, 2004). Kasvillisuuden hiilidioksidin vuohon kuuluu lähteenä kasvillisuuden ja maaperän soluhengitys sekä nieluna kasvillisuuden fotosynteesi. Fotosynteesi on riippuvainen auringon säteilystä, jolloin se on kesällä voimakkainta. Soluhengitys on riippuvainen lämpötilasta, joten se on kesällä voimakkainta, mutta silti sitä tapahtuu ympäri vuoden (Suni et al., 2003). Kesällä kasvillisuus voi toimia hiilidioksidin nieluna, mutta vuositasolla kasvillisuuden hiilidioksidin vuo voi toimia myös lähteenä riippuen kasvukauden pituudesta.

Pintavuomallit mallintavat tyypillisesti energia- ja vesitaseita. Mallinnetavat vuot

ovat ylöspäin menevät säteilynvuot ($L \uparrow$, $K \uparrow$), säteilyn nettovuoto (Q_N) ja havaittavan lämmönvuoto (Q_H). Jotkin mallit mallintavat myös latentin lämmönvuota (Q_E) ja ihmisperäistä lämmönvuota (Q_F). Kaupunkialueilla rakennetun pinnan lisäksi myös kasvillisuuden mallintaminen on tärkeää, sillä kasvillisuus vaikuttaa merkittävästi turbulentsiin voihin (Ward et al., 2016). Kaupunkien kasvillisuus on monimuotoista, joten on hyvä mallintaa usempaa eri kasvillisuustyyppiä. Kaupungeissa käytettäviä pintavuomalleja ovat esimerkiksi SURFEX (*Surface Externalisée*, Masson et al. 2013) ja tässä työssä käytettävä SUEWS (*Surface Urban Energy and Water Balance Scheme*, Järvi et al. 2011). SURFEX yhdistää kasvillisuudelle käytettävän ISBA-mallin (*Interaction between Soil, Biosphere and Atmosphere*, Noilhan and Planton 1989) ja kaupunkialueille käytettävän TEB-mallin (*Town Energy Balance*, Masson 2000). SUEWS on varta vasten luotu kaupunkialueille ottane huomioon erilaiset maankäytöt, kun moni muu malli on aluksi luotu luonnolliselle ekosysteemille ja siitä muokattu kaupunkialueille.

Usein ihmisperäiset aktiviteetit katsotaan suoraan päästöinventaariorista eikä niitä mallinneta itse malleissa. Ongelmana on, että niissä huomioidaan vain ihmisperäisiä päästöjä eikä ollenkaan kasvillisuuden vaikutusta. Inventaarioilla ei myös saada korkeaa paikallista ja ajallista vaihtelua, koska usein inventaariot julkaistaan vain kaupunki- ja vuositasolla. Hiilidioksidin vuon eri komponenttien mallintaminen pintavuomallissa mahdollistaisi yhtenäisen mallin, joka ottaisi sekä kasvillisuuden että ihmisperäiset komponentit huomioon sekä yhdistäisi sen kaupunkien energia- ja vesitaseisiin, jotka riippuvat samoista ihmisperäisistä komponenteista. Tästä syystä olen lisännyt SUEWS-pintavuomalliin hiilidioksidin vuon kasvillisuuden ja ihmisperäiset komponentit. Mikään muu malli ei tällä hetkellä mallita sekä kasvillisuutta ja ihmisten aktiviteetteja yhtä aikaa varsinkaan alueellisesti korkealla resoluutiolla (>100 m). Mallia tullaan ajamaan alueellisesti Helsingissä 6×9 km² alueella vuosina 2005-2012. Hiilidioksidin vuon mallia tullaan arvioimaan vertaamalla Helsingissä Kumpulan SMEAR III-aseamalla (*Station for Measuring Ecosystem-Atmosphere Relationships*) ja Hotelli Tornissa pyörrekovarianssi-menetelmällä tehtyihin mittauksiin. Pyörrekovarianssi-menetelmä on paras tapa mitata hiilidioksidin vuota, mutta on olemassa muitakin tapoja kuten ehdollisen keräyksen menetelmä (REA, *Relaxed Eddy Accumulation*, Businger and Oncley 1990) ja ajoittaisen näytteenoton kovarianssimenetelmä (DEC, *Disjunct eddy covariance*, Aubinet et al. 2012). Hotelli Tornin mittausasema edustaa tiheästi rakennettua ydinkeskustaa ja Kumpulan asema kanta-kaupungin sekalaisempaa maankäyttöä. Tämän työn tarkoitus on arvioida kehittämäni hiilidioksidin vuon mallin toimivuutta, mutta myös käyttää sitä tutkimaan hiilidioksidin vuositaseita Helsingin alueella ja kuinka ne potentiaalisesti muuttuisivat viherkattojen ja aurinkopaneelien lisäämisen seurauksena.

2. Teoria

2.1 Turbulenttinen kuljetus rajakerroksessa

Virtaus nesteessä tai kaasussa voi olla joko laminaarista tai turbulenttista tai niiden väli-
muotoa. Turbulenttinen virtaus koostuu kaaottisesta pyörteisestä liikkeestä ja laminaari-
nen virtaus pyörteettömästä suoraviivaisesta liikkeestä. Virtauksen luonnetta voi kuvata
Reynoldsin luvulla, joka on dimensioton suhde inertiavoimien ja viskositeetin välillä:

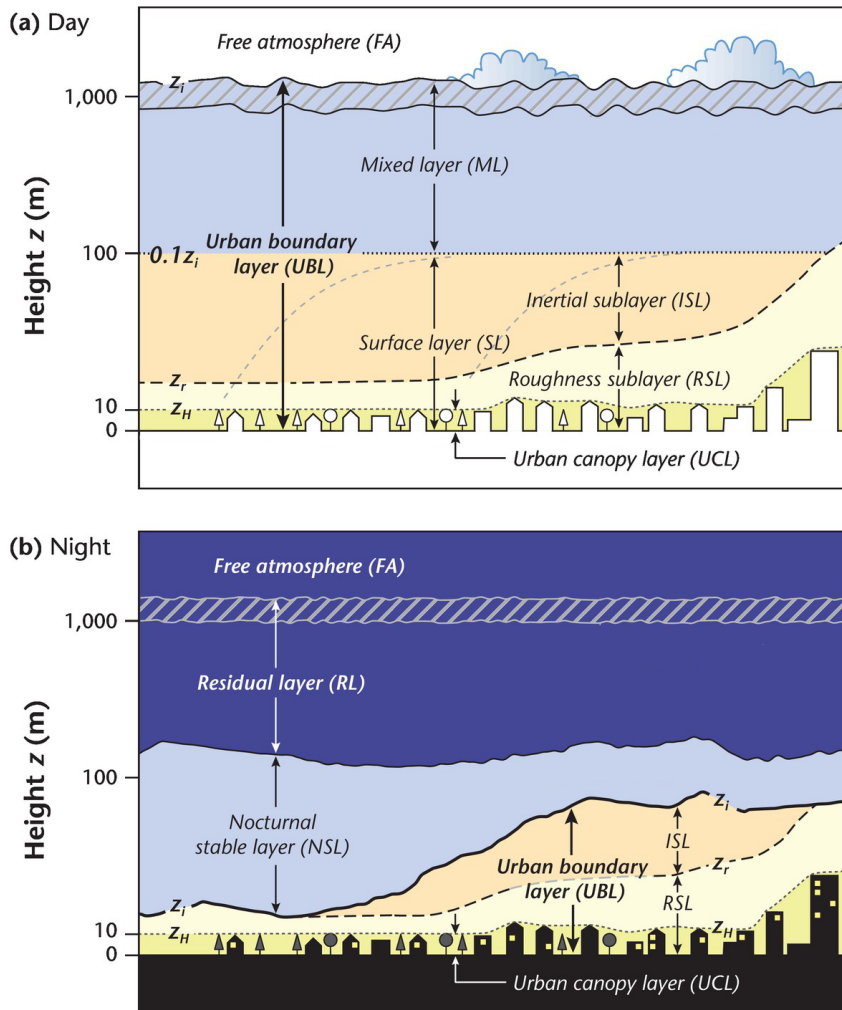
$$Re = \frac{UL}{\nu}, \quad (2.1)$$

missä U on virtauksen nopeus, L on virtausta kuvaava pituuskaala ja ν on kinemaattinen
viskositeetti. Suurilla Reynoldsin luvuilla virtauksessa on enemmän pyörteitä ja virtaus on
voimakkaammin turbulenttinen. Pintojen lähellä virtausnopeus on nolla, jolloin pinta luo
sen lähelle rajakerroksen, jossa virtausnopeus on muuta virtausta heikompi. Maanpinta
luo ilmakehään rajakerroksen, jossa virtaus on turbulenttista.

2.1.1 Rajakerroksen rakenne

Ilmakehä voidaan jakaa yläpuoliseen vapaaseen ilmakehään (kuvassa 2.1 FA), jossa vir-
taus on geostrofista, sekä rajakerrokseen, jossa virtaus on usein turbulenttista. Ilmake-
hässä turbulenssi on kaaottista pyörteiden aiheuttamaa ilman liikettä, jonka pyörteiden
koko voi vaihdella pienemmistä 1 mm kokoisista jopa 2 km suuruisiin pyörteisiin. Pyörtei-
den kokoa rajoittaa rajakerroksen korkeus. Turbulenssia voi syntyä rajakerroksessa sekä
lämpöön liittyvistä että mekaanisista prosesseista. Pinnan lämpeneminen aiheuttaa nos-
tevoiman avulla konvektiota eli lämmin ilma nousee ylöspäin suhteessa kylmempään il-
maan. Mekaanista turbulenssia syntyy tuuliväänteen seurauksesta, sillä tuulen nopeus on
pienempi mitä lähempänä maata ollaan. Kaupungeissa turbulenssi voi olla voimakkaam-
paa epätasaisen pinnan ja korkeimpien lämpötilojen takia kuin luonnollisten pintojen yllä
(Oke et al., 2017). Turbulenssin voimakkuus ja rajakerroksen rakenne riippuu voimak-
kaasti vuorokaudenajasta. Päivällä pinnan lämpenemisen aiheuttama konvektio kuljettaa
lämpöä ylöspäin ja aiheuttaa epästabiilin sekoituskerroksen (ML). Sekoituserroksessa il-
makehän ominaisuuksien kuten potentiaalisen lämpötilan, vesihöyryn ja tuulen nopeuden

pystyprofiilit pyrkivät tasoittumaan. Yöllä sekoituskerroksen yläosa muuttuu residuaalikerrokseksi (RL), joka on hyvin sekoittunut, mutta turbulenssi on heikkoa. Yöllä pinnan jäähtyttyä, rajakerroksen alaosaan muodostuu yöllinen stabiilikerros (NSL), jossa turbulenssia harvoin havaitaan. Rajakerroksen alimpaa osaa, noin 10 % maanpinnasta, kutsutaan pintakerrokseksi (SL). Pintakerroksessa kitka, lämmönvaihto pinnan kanssa ja haihtuminen pinnasta vaikuttavat suuresti tuulen nopeuteen, lämpötilaan ja kosteuteen. Pintakerrosta kutsutaan myös vakiovuokerrokseksi, koska turbulenttiset vuot ovat



Kuva 2.1: Rajakerroksen rakenne kaupungin yläpuolella (a) päivällä ja (b) yöllä. Rajakerroksen eri kerrokset: vapaa ilmacehä (FA), sekoituskerros (ML), residuaalikerros (RL), yöllinen stabiilikerros (NSL), pintakerros (SL), rosoisuusakerros (RSL), inertiaalikerros (ISL), kaupunkialueiden rajakerros (UBL), kaupunkialueiden latvuserros (UCL). (Muokattu Oke et al. 2017)

suhteellisen vakioita korkeudesta riippumatta (Stull, 2000). Pintakerros voidaan jakaa maanpinnan läheisyydessä olevaan rosoisuusakerrokseen (RSL) ja sen yläpuolella olevaan inertiaalikerrokseen (ISL). Rosoisuusakerrokseen vaikuttavat esimerkiksi pinnan muodot, rakennukset ja kasvusto. Kaupunkialueiden rajakerroksen (UBL) rosoisuusakerroksesta voidaan erotella vielä kaupunkialueen latvusterros (UCL), joka ylittää maan-

pinnasta keskimääräiseen rakennuskorkeuteen asti (Oke, 1976).

2.1.2 Kovarianssitermit

Kaaottisen luonteensa takia, turbulenssia usein kuvataan tilastollisien keskiarvojen avulla, kuten Reynoldsin keskiarvoistamisella hetkellinen arvo ($X(t)$) ajanhetkellä t voidaan jakaa häiriöosaan (x') ja keskiarvoon (\bar{X}):

$$X(t) = \bar{X} + x'(t). \quad (2.2)$$

Kahden parametrin keskenäistä korrelaatiota voidaan kuvata kovarianssilla. Kovarianssi on positiivinen, kun molemmat parametrit kasvavat tai laskevat yhtä aikaa. Kovarianssia kuvataan häiriöosien keskiarvona:

$$\text{cov}(y, x) = \overline{y'x'}, \quad (2.3)$$

missä x' ja y' ovat jonkin suureen häiriöosia. Ilmakehän rajakerroksessa monet eri turbulenttiset parametrit korreloivat keskenään (Stull, 2000). Pystytuulen häiriöosan w' ja jonkin muun suureen häiriöosan avulla voidaan määrittää pystysuuntainen vuo. Vuo kuvastaa kuinka paljon tiettyä suuretta kulkeutuu tietyssä ajassa pinnan läpi. Turbulenttista liikemäärän (τ , $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$), latentin lämmön (Q_{LE} , W m^{-2}), havaittavan lämmön (Q_H , W m^{-2}) ja kaasun pitoisuuden (F_c , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) vuot voidaan kuvata kovarianssien avulla vastaavasti:

$$\tau = -\overline{\rho w' u'} \quad (2.4)$$

$$Q_{LE} = L_v \overline{\rho w' q'} \quad (2.5)$$

$$Q_H = -\rho c_p \overline{w' \theta'_v} \quad (2.6)$$

$$F_c = -\overline{\rho w' c'}, \quad (2.7)$$

missä ρ on ilman tiheys, L_v on veden höyrystymislämpö, c_p on ilman ominaislämpökapasiteetti ja u' , q' , θ'_v ja c' ovat häiriöosat horisontaalisesta keskimääräisestä tuulesta, ominaiskosteudesta, virtuaalisesta potentiaalilämpötilasta ja kaasun pitoisuudesta. Rajakerroksessa liikemäärän vuo on tyypillisesti kohti maata, koska tuulen nopeudet ovat korkeampia ylhäällä. Latentin ja havaittavan lämmönvuot kuljettavat kosteutta ja lämpöä pois maan pinnalta ja näin ollen pitävät pinnan energiataseen tasapainossa (Oke, 1987). Kaupunkien lämmönvuot voivat olla hyvin erilaiset kuin maaseudulla. Latentin ja havaittavan lämmönvuon osuuksia määrää kosteuden saatavuus ja kaupungeissa on paljon läpäisemättömiä pintoja. Näin ollen suurin osa vedestä valuu pois, pinta pystyy

kuivumaan nopeammin ja havaittavan lämmönvuo pystyy kasvamaan (Oke, 1982). Kaupungeissa myös ihmisten asuminen, työ ja matkustaminen tuottavat lämpöä (Oke et al., 2017), joka täytyy ottaa huomioon energiataseen kuvauksessa:

$$Q_N + Q_F = Q_H + Q_{LE} + \delta Q_S, \quad (2.8)$$

missä vasemmalla puolella on nettosäteily (Q_N , $W m^{-2}$) ja ihmisperäinen lämmönvuo (Q_F , $W m^{-2}$) ja oikealla on latentin ja havaittavan lämmönvoiden lisäksi nettovaraston lämmönvuo (δQ_S , $W m^{-2}$). Energiataseeseen vaikuttaa myös advektion kuljettama lämpö, mutta usein se yritetään jättää huomiotta olettamalla kaupunkialueen olevan mahdollisimman homogeeninen. Ihmisperäistä lämmönvuota ei voida suoraan mitata kaupungeissa, joten sitä täytyy arvioida toisella tavalla. Sailor and Vasireddy (2006) ja Järvi et al. (2011) mukaisesti, ihmisperäistä lämmönvuota voidaan mallintaa lämmitys- ja jäähdytyspäivien avulla vastaavasti:

$$Q_F = (a_0 + a_1 CDD + a_2 HDD) \cdot pop, \quad (2.9)$$

missä a_0 on perusarvo ihmisperäiselle lämmölle ($W m^{-2}(as.ha^{-1})^{-1}$). Se perustuu ihmisen mukavuuslämpötilan pohja-arvoon $18.2^\circ C$ (Sailor and Vasireddy, 2006), jolloin se ei sisällä lämmitykseen liittyviä termejä. a_0 sisältää ainoastaan liikenteestä, ihmisten aineenvaihdunnasta ja kulutussähköstä aiheutuvat lämmönvuot. a_1 ($W m^{-2} K^{-1}(as.ha^{-1})^{-1}$) on jäähdytyksen riippuvuus lämpimistä päivistä (CDD , K) ja a_2 ($W m^{-2} K^{-1}(as.ha^{-1})^{-1}$) on lämmityksen riippuvuus kylmistä päivistä (HDD , K). pop on mallitettavan alueen keskimääräinen asukastiheys ($as. ha^{-1}$).

2.2 Hiilidioksidin vuo

Hiilidioksidin vuo F_{CO_2} , eli vaihto ilmakehän ja maan pinnan välillä, on luonnollisessa ekosysteemissä riippuvainen kasvillisuudesta ja maaperästä. Kasvillisuuden fotosynteesi eli yhteyttäminen vähentää ilmakehän hiilidioksidia eli toimii ilmakehän hiilidioksidin nieluna. Ekosysteemin respiraatio eli soluhengittäminen voidaan jakaa kasvillisuudesta ja maaperästä tulevaan hiilidioksidin vuohon ja se toimii hiilidioksidin lähteenä ilmakehään. Ihmisen toiminta muokkaa merkittävästi luonnollista hiilidioksidin vuota olemalla suuri lähde ilmakehään varsinkin kaupungeissa (Grimmond and Oke, 2002). Biogeenisen vuon lisäksi, hiilidioksidin vuo koostuu kaupungeissa lähinnä liikenteestä, rakennusten lämpötilan säätelystä ja ihmisten ja eläinten metabolismista eli aineenvaihdunnasta:

$$F_{CO_2} = F_{C,r} + F_{C,p} + F_{C,v} + F_{C,b} + F_{C,m}, \quad (2.10)$$

missä oikean puolen termit kuvaavat soluhengityksestä $F_{C,r}$, fotosynteesistä $F_{C,p}$, liikenteestä $F_{C,v}$, rakennuksista $F_{C,b}$ ja ihmisen metabolismista $F_{C,m}$ aiheutuvia hiilidioksidin

voita. Maailmanlaajuisesti myös voimalaitokset, tehtaot ja lento- ja laivaliikenne aiheuttavat suuria hiilidioksidipäästöjä ilmakehään.

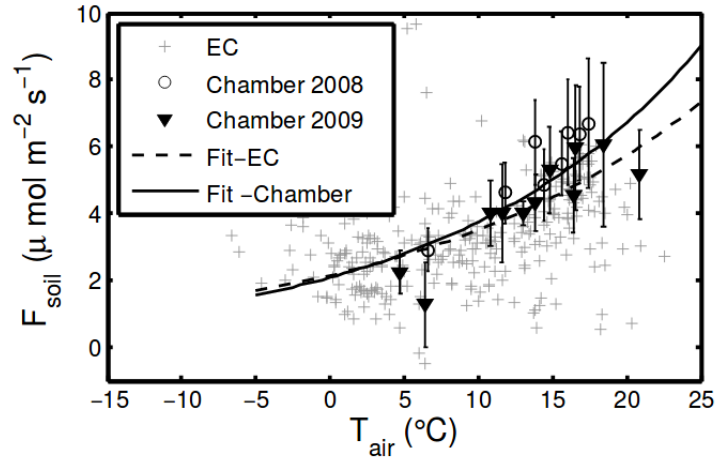
2.2.1 Biogeeninen hiilidioksidin vuo

Ekosysteemin soluhengitys koostuu kasvien lehtien, varsien ja juurien vapauttamasta hiilidioksidista (autotrofinen soluhengitys) ja maaperän orgaanisten aineksien mikrobien hajoitessa vapautuvasta hiilidioksidista (heterotrofinen soluhengitys). Maaperän soluhengitys vapauttaa maaperään sitoutuneen hiilen hiilidioksidin muodossa takaisin ilmakehään. Maaperän hiilidioksidin vuon lähde ilmakehään koostuu heterotrofisesta soluhengittämisestä ja kasvien juurien autotrofisesta soluhengittämisestä (Hanson et al., 2000). Maaperän soluhengittämisen määrä riippuu maaperän lämpötilasta, sen kosteudesta ja orgaanisen materiaalin laadusta (Trumbore, 2006). Kaupungeissa maaperää muokkaa myös ihmisten aktiviteetit, jotka vaikuttavat myös maaperän soluhengittämiseen. Näitä ovat esimerkiksi maaperän peitto täyteaineilla sekä hoitokäytännöt kuten kastelu ja lannoitus (Weissert et al., 2014). Ihmisen toiminnan takia asuinalueen maaperän soluhengittämisen on mitattu olevan jopa kaksinkertainen läheisen maaseudun soluhengittämiseen verrattuna (Decina et al., 2016). Yleisin tapa mitata maaperän soluhengittämisestä aiheutuvaa hiilidioksidin vuota on kammiomittaukset (*Chamber*, Kuva 2.2), joilla voidaan mitata pienempiä yksittäisiä kohteita. Laajempaa ekosysteemin soluhengitystä voidaan arvioida pyörrekovarianssi-menetelmällä (EC, Kuva 2.2), jolla mitataan kokonaishiilidioksidin vuota. EC-menetelmällä voidaan arvioida kokonais soluhengitystä käyttämällä vain yöllisiä arvoja, sillä tällöin fotosynteesiä ei tapahdu ja ihmisten aktiviteetit voidaan olettaa pieniksi. Molemmilla mittaustavoilla soluhengityksen hiilidioksidin vuon arvoihin voidaan sovittaa eksponentiaallinen käyrä ja Järvi et al. (2012) näytti millainen ero eri mittaustavoilla voi olla. Hiilidioksidin vuo maaperän soluhengittämistä riippuu maaperän lämpötilasta, mutta mallintamisessa voi käyttää myös ilman lämpötilaa, koska maaperän lämpötila on harvemmin saatavilla. $F_{C,r}$ kasvaa eksponentiaalisesti ilman lämpötilan T_{ilma} kasvaessa:

$$F_{C,r} = a \cdot e^{b \cdot T_{ilma}}, \quad (2.11)$$

missä a on soluhengittämisen pohja-arvo ja b on ilman lämpötila riippuvuuteen liittyvä soluhengityksen vakio. Kasvillisuuden soluhengityksen oletetaan noudattavan samaa eksponentiaallista yhtälöä (2.11) kuin maaperän soluhengitys. Soluhengitystä tapahtuu ympäri vuoden, mutta sillä on myös vuodenaikaisvaihtelua, koska se riippuu eksponentiaalisesti lämpötilasta. Talvella soluhengitys on vähäisempää alhaisten lämpötilojen takia, mutta maaperän hiilidioksidi pääsee talvella myös kertyneen lumen läpi ilmakehään (Monson et al., 2006).

Fotosynteesissä eli yhteyttämässä hiilidioksidista ja vedestä muodostuu hiilihy-



Kuva 2.2: Maaperän hiilidioksidin vuon riippuvuus päivittäisestä ilman lämpötilasta. Kammiomittaukset vuosilta 2008 ja 2009 (ympyrät ja kolmiot) ja niihin sovitettu musta eksponentiaalinen käyrä. Vertauksena harmaalla läheisen EC-mittauspisteen antama yöllinen hiilidioksidin vuo, johon on sovitettu eksponentiaalinen käyrä mustalla katkoviivalla. (Järvi et al., 2012).

draatteja ja happea. Fotosynteesin kaasujen vaihto tapahtuu kasvien lehtien ilmarakojen kautta. Ilmaraot voivat avautua tai sulkeutua riippuen kuinka paljon ne saavat valoa ja kuinka kuivaa ilma tai maaperä on. Näin ollen fotosynteesin voimakkuus on riippuvainen valosta, mutta myös ilman lämpötilasta, ravintoaineista ja vesivarjoista. Valovastekäyrien avulla voidaan tutkia fotosynteesin riippuvuutta fotosynteettisesti aktiiviseen säteilyyn PAR . Valovastekäyriin voi sovittaa monia eri yhtälöitä, joista yleisimpiä ovat suorakulmainen hyperbeli RH (Ruimy et al. 1995, Schmid et al. 2000, Flanagan et al. 2002) ja ei-suorakulmainen hyperbeli NRH (Rabinowitch, 1951). NRH -yhtälöllä on tapana vertautua paremmin mittauksiin kuin RH -yhtälö. Bellucco et al. (2017) mukaisesti, NRH -yhtälön sovituksella saadaan yhtälö fotosynteesin hiilidioksidin vuolle:

$$F_{C,p}(PAR, \lambda_V, LAI) = -\frac{1}{2 \cdot \theta(\lambda_V)} \cdot (\alpha \cdot (PAR) + \beta(LAI, \lambda_V)) - [(\alpha \cdot (PAR) + \beta(LAI, \lambda_V))^2 - 4\alpha\beta(LAI, \lambda_V) \cdot \theta \cdot (PAR)]^{0.5}, \quad (2.12)$$

missä λ_V on kasvipeitteen osuus ja LAI ($m^2 m^{-2}$) on lehtialaindeksi. α ($\mu mol CO_2 \mu mol photons^{-1}$) on keskimääräinen ekosysteemin kvanttituotto eli se kuvaa valovastekäyrän alkukaltevuutta, β ($\mu mol CO_2 m^{-2}s^{-1}$) kuvaa katon kokonais fotosynteesin valon kylläisyyttä ja θ kyllästyneen valon käyrän kuperuutta (Bellucco et al., 2017). PAR voidaan olettaa olevan 0.46 suuruinen osuus globaalista auringon säteilystä R_g ($W m^{-2}$) (Tsubo and Walker, 2005).

Kaupunkien kasvillisuus voi mahdollisesti vaikuttaa hiilen kiertoon olemalla jopa kaksi kertaa nopeampi verrattuna kaupungin ulkopuoliseen kasvillisuuteen (Hardiman et al., 2017). Kaupunkien lämpösaarekeilmion takia kaupungin ilman lämpötila on korkeampi kuin maaseudun ja sen seurauksena kasvillisuuden kasvukausi on pidempi (Imhoff

et al., 2004). Fotosynteesin määrä voi kasvaa lisääntyneen lannoituksen, kastelun ja hiilidioksidipitoisuuden takia, kun taas altistuminen otsonille vähentää fotosynteesin määrää (Fuhrer, 2003). Maaperän soluhengitys voi muuttua lämpötilan, läpäisemättömien pintojen alueen ja ihmisen lisäämän hiilen määrän kasvun seurauksena.

2.2.2 Ihmisperäinen hiilidioksidin vuo

Liikenteestä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt johtuvat polttoaineiden, kuten bensiinin, palamisesta. Bensiini on hiilivetyseos, jonka täydellisen palamisen palamistuotteita ovat hiilidioksidi ja vesi. Kilometrikohtaiset liikenteen päästöt riippuvat ajoneuvosta, ruuhkasta ja ympäristön sääolosuhteista. Ajoneuvojen päästöt riippuvat ajoneuvotyypistä, eli onko kyseessä henkilöauto, linja-auto, pakettiauto vai rekka, polttoaineen laadusta ja ajoneuvon valmistusvuodesta. Polttoaineiden laatua on valvottu eri tasoisesti eri vuosikymmeninä, joten ei ole olemassa yhtä mitta-asteikkoa, joilla niitä olisi valvottu. Ruuhka vaikuttaa ajoneuvojen nopeuteen hidastaen ja aiheuttaen kiihdytyksiä ja hidastuksia, jotka kuormittavat enemmän moottoria ja näin ollen kuluttavat enemmän polttoainetta. Sääolosuhteet vaikuttavat moottorin palamisen suorituskykyyn ja päästöjenhallintalaitteistoon (Gately et al., 2017). Ajoneuvojen päästökerroin riippuu näin ollen monesta eri tekijästä, joiden alueesta tai ajasta riippuvaisuutta on hankala määrittää, koska usein näitä mittauksia tehdään isommassa skaalassa. Ilman näitä tietoja liikenteen päästöjen mallintaminen on haastavaa ja joudutaan tekemään yksinkertaistuksia. Esimerkiksi väestötiheyttä ja teiden määrää on käytetty arvioimaan liikenteen päästöjä (Huang et al., 2011) tai liikennemääriä on arvioitu matkustuksen kysynnän mukaisesti kaupunkialueilla ja nopeuden saamiseksi käytetty hyväksi GPS-matkapuhelimista saatua tietoa (Gately et al., 2017). Keskimääräinen hiilidioksidin päästökerroin (EF_{CO_2} , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ km}^{-1}$) on mahdollista arvioida, jos tiedetään mallinnettavan alueen ajoneuvotyypijakauma ja kuinka paljon kyseinen tyyppi kuluttaa mitään polttoainetta (Järvi et al., 2012). Arvio liikenteestä aiheutuvasta hiilidioksidin vuosta $F_{C,v}$ saadaan kertomalla keskimääräinen liikennemäärä (TR , $\text{veh km m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) hiilidioksidin päästökertoimella:

$$F_{C,v} = TR \cdot EF_{CO_2}, \quad (2.13)$$

missä TR voidaan saada mitatusta liikennemäärästä (T , veh s^{-1}), joka kerrotaan mallinnettavalla alueella ajettavilla kilometreillä ja jaetaan mallinnettavan alueen pinta-alalla. Kaupungeissa liikenne saa usein arkipäivisin ruuhkapiikit aamuin ja illoin. Viikonloppuna liikenne on tasaisempaa saaden maksimiarvonsa keskipäivän jälkeen. Liikennemäärien mittauksista saatuja vuorokausiprofileja voidaan käyttää hiilidioksidin vuon mallintamisessa (Sailor and Lu, 2004).

Sekä ihmiset että eläimet hengittävät ja ovat näin ollen osa metabolismista tulevaa hiilidioksidin vuota. Kuitenkin eläinten vaikutus jätetään usein huomioimatta puutteel-

lisen tiedon vuoksi. Hiilidioksidin vuon yhteydessä ihmisten metabolismi oletetaan usein pieneksi, mutta suurissa kaupungeissa se täytyy ottaa huomioon. Suuren väestötiheyden seurauksena, paikallinen hiilidioksidin vuo voi olla hyvin suuri. Metabolismin hiilidioksidin vuo voidaan arvioida yhden ihmisen hiilidioksidipäästön (C_m , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ s}^{-1}$) sekä väestötiheyden (PD , as. m^{-2}) yöllisen minimin (N) ja päivän maksimin (D) arvojen avulla:

$$F_{C,m} = PD_{(N,D)} \cdot C_{m(N,D)}. \quad (2.14)$$

Populaation (P_{Prof}) ja aktiivisuuden (A_{Prof}) vuorokausiprofiileilla valitaan käytetäänkö yöllistä minimiä vai päivän maksimi arvoja. Ihmisen hengityksen hiilidioksidipäästöt (C_m) riippuvat ihmisen aktiivisuudesta. Moriwaki ja Kanda (2004) määrittivät hengityksestä tulevan hiilidioksidin levossa olevalle ihmiselle, käyttämällä hyväksi ihmisten keuhkojen tilavuutta ja hengitystahtia sekä olettamalla, että ihmisen uloshengityksestä noin 4 % on hiilidioksidia. Ward et al. (2013) määritteli samalla menetelmällä hiilidioksidipäästöt aktiiviselle ihmiselle.

Rakennuksien hiilidioksidipäästöt tulevat maakaasun, kivihiilen, öljyn ja puun poltosta. Suurin osa rakennusten hiilidioksidin päästöistä johtuu rakennuksien lämmityksestä. Rakennuksien lämmitystarve riippuu ilmastosta. Korkeammilla leveysasteilla lämmityksen tarve on suurempi ja näin ollen näillä alueilla lämmityksestä aiheutuva hiilidioksidin vuo on myös suurempi. Ihmisen mukavuuslämpötilan pohja-arvo on arvioitu olevan $18.2 \text{ }^\circ\text{C}$ (Sailor and Vasireddy, 2006). Tämän lämpötilan alempia arvoja ihmisellä on tapana lämmittää ja tästä korkeimpia arvoja mahdollisesti jäädyttää, mutta jäähdtyystä ei kuitenkaan tapahdu paljoa Suomessa. Pohjoismaiden kaupungeissa käytetään myös usein kaukolämpöä, jolloin hiilidioksidipäästöjä ei synny itse kaupunkiin vaan voimalaitoksien ympärille, jotka usein sijaitsevat kaupunkien ulkopuolella. Maakaasun käyttö suurkaupungeissa on yleistä ja sen hiilidioksidipäästöt ovat pienemmät kuin kivihiilen ja öljyn poltossa, koska sama lämpömäärä saavutetaan nopeammin. Kuitenkin maakaasun poltosta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt voivat kasvaa suuriksi (Moriwaki and Kanda, 2004). Rakennuksien lämmityksestä aiheutuvaa hiilidioksidin vuota voidaan arvioida ihmisperäisen lämmönvuon mallin (yhtälö 2.9) avulla käyttäen hyväksi ainoastaan rakennusten lämmitykseen liittyvää osaa:

$$F_{C,b} = a_2 \cdot HDD \cdot pop \cdot FH \cdot FF, \quad (2.15)$$

missä FF on käytettävän polttoaineen päästökerroin ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ J}^{-1}$) ja FH on fossiilisten polttoaineiden poltosta tuleva lämmön osuus.

2.3 Pyörrekovarianssi-menetelmä

Pyörrekovarianssi-menetelmä (EC, *Eddy Covariance*) on yleisin tapa mitata turbulenttisia voita. EC-menetelmä perustuu pystytuulen muutoksien korrelaatioon mitattavan suureen kanssa kuten hiilidioksidin sekoitusasteen tai ilman lämpötilan (Yhtälö 2.3). Mittaustaajuuden täytyy olla tarpeeksi suuri, tyypillisesti $>1-10$ Hz, jotta pienten pyörteiden mittaaminen olisi mahdollista. Mittaaminen vaatii myös tarpeeksi suuren mittauskorkeuden, jotta mittaukset tehtäisiin rajakerroksen pintakerroksessa. Pintakerroksessa vuot ovat korkeuden suhteen lähes vakiot ja siellä turbulenssi on hallitseva kuljetusmekanismi. Näin ollen mitattavat vuot edustavat hyvin alla olevan pinnan voita. EC-mittauksia on tehty monissa eri ekosysteemeissä, kuten metsien, viljelysalueiden, niittyjen, tundran, järvien, soiden ja kaupunkialueiden yllä (Aubinet et al., 2012). EC-menetelmä mahdollistaa pitkien ajanjaksojen mittaamisen ja jolloin voista saadaan tietoa monilta vuosilta ja pystytään laskemaan vuositaselta. EC-menetelmällä mitattu vuo kuvastaa paikallisten lähteiden ja nielujen kokonaisvuota ja näin ollen sitä ei voi verrata yksittäisen prosessin malliin. Jotta mallia pystyttäisiin vertaamaan EC-menetelmällä tehtyihin mittauksiin, täytyy mallien sisällyttää kaikki prosessit, jotka vaikuttavat vuohon kyseisessä ekosysteemissä.

EC-menetelmällä mittaamiseen tarvitaan ultraäänianemometri ja infrapunakaasuanalysaattori. Ultraäänianemometrillä mitataan tuulen kolmea eri komponenttia (u, v, w) ja soonista lämpötilaa. Anemometri mittaa ultraäänipulssin kulku-aikaa antureiden välillä, joiden etäisyys toisistaan on tunnettu. Kulku-aika riippuu äänennopeudesta ja ilman nopeudesta sen reitillä. Infrapunakaasuanalysaattorilla (IRGA, *Infrared gas analyzer*) mitataan kaasujen kuten CO_2 :n ja vesihöyryn H_2O moolipitoisuuksia. Kaasu aiheuttaa valon absorptiota ja valon intensiteetin heikentyminen pystytään havaitsemaan. IRGA mittaa valon absorptiota kapelta absorptiovyöhykkeeltä. IRGA voi olla suljettu tai avoin systeemi. Avoin systeemi on alttiimpi vallitseville sääolosuhteille, koska valo kulkee anturin rungon ulkopuolella (Aubinet et al., 2012). Se täytyy myös sijoittaa kauemmaksi ultraäänianemometriltä, jotta se ei häiritse mittaamista. Suljetun systeemin näyteputken pää imee ilman läheltä ultraäänianemometriä ja mittaa kaasun konsentraation suljetussa kammiossa. Näyteputki aiheuttaa aikaviivettä ja häviötä, mutta niitä pystytään korjaamaan.

2.4 Kammiomittaukset

Kammiomittauksilla tutkitaan maa-alueen ja kasvien aiheuttamia kaasujen voita sulkemalla haluttu alue kammion sisään. Kammiomittaukset voivat olla joko suljettuja tai avoimia. Yleisemmässä suljetussa systeemissä, kaasun vuo on verrannollinen kaasun pitoi-

suuden kasvuun suljetussa tilassa ajan funktiona. Avoimessa systeemissä vuo lasketaan pitoisuuden erotuksena sisään- ja ulosvirtaavasta ilmasta (Weissert et al., 2014). Suurimmaksi osaksi kammiomittauksia on tehty luonnollisessa ekosysteemissä, mutta myös muutamia mittauksia on tehty kaupunkiympäristössä kuten Helsingissä (Järvi et al., 2012). Kammiomittauksissa ongelmana on, että haluttu kasvillisuus pitää saada suljetun kammion sisälle. Esimerkiksi metsien voiden mittaaminen onnistuu paremmin EC-menetelmällä, mutta niiden aluskasvillisuuden ja maaperän mittaaminen onnistuu myös kammiolla tai latvuksen alaisella EC-mittauksella.

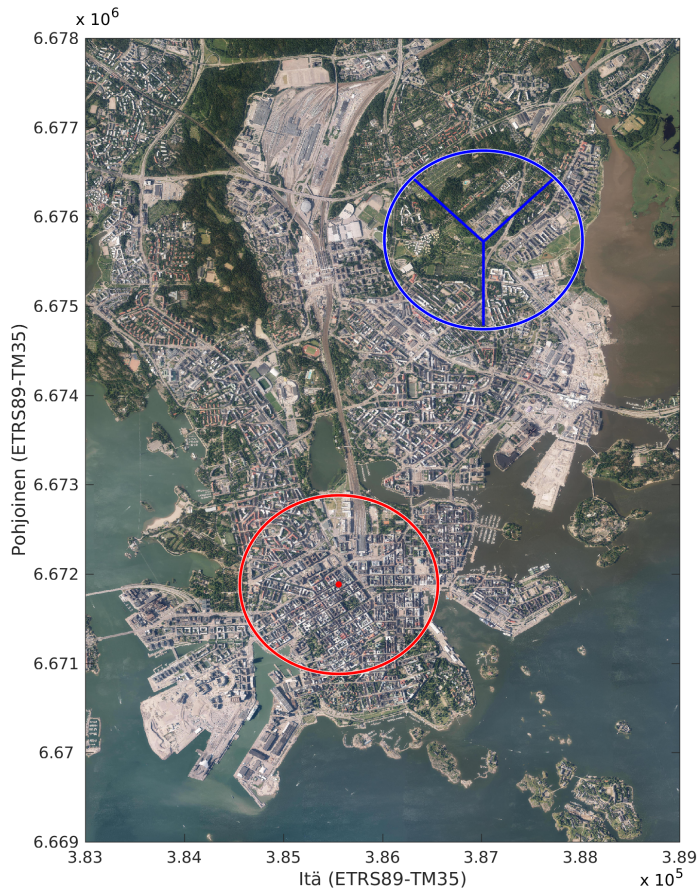
3. Menetelmät

Tässä työssä ajan SUEWS-mallia Kumpulan ja Hotelli Tornin EC-laitteistojen lähdealueilla sekä alueellisesti $6 \times 9 \text{ km}^2$ kokoisella alueella Helsingin keskustan ja kantakaupungin alueella. Ensimmäisten ajojen tarkoituksena on verrata mallin antamaa hiilidioksidin vaihtoa EC-mittauksia vastaan, kun taas jälkimmäisellä tutkitaan hiilidioksidin vuon alueellista jakaumaa, sen vuosien välistä vaihtelua ja eri skenaarioiden vaikutusta hiilidioksidin vuohon.

3.1 Mittausasemat ja mittalaitteet

Meteorologisia mittauksia tehdään Helsingissä Kumpulan SMEAR III-aseamalla ja keskustassa Hotelli Tornin katolla. Turbulenttisia voita mitataan asemilla EC-menetelmällä (kappale 2.3). Molemmilla asemilla mitataan hiilidioksidin vuota ja voiden lähdealueeksi on arvioitu yhden kilometrin säteinen ympyrä (kuva 3.1a). Kumpulan SMEAR III-mittausasema ($60^{\circ}12'10.14''\text{N}$, $24^{\circ}57'40.06''\text{E}$) sijaitsee noin neljän kilometrin päässä ydinkeskustasta koilliseen. Mittausasema on perustettu vuonna 2004 ja siitä lähtien siellä on tehty jatkuvia meteorologisia mittauksia. Turbulenttisia voita varten Kumpulassa mitataan pystytuulta (w) 3D-ultraäänianemometrillä (USA-1, Metek GmbH, Saksa). Hiilidioksidin pitoisuutta on mitattu tässä työssä käytettävällä suljetun polun infrapunakaasuanalysaattorilla (LI-7000, LI-COR, Lincoln, NE, USA) kesästä 2007 kesään 2017 asti. Tässä työssä käytettävät Kumpulassa mitattavat suureet ja niiden mittalaitteet näkyvät taulukossa (3.1). SMEARIII-aseman mittausmasto on 31 metriä maanpinnan yläpuolella ja yhteensä 60 metriä merenpinnan yläpuolella (Järvi et al., 2009). Aseman approksimaatiivinen lähdealue on hyvin heterogeeninen ja se voidaan jakaa hallitsevan maankäytön perusteella kolmeen eri sektoriin (kuva 3.1b): 1. rakennussektori ($320\text{-}40^{\circ}$), 2. tiesektori ($40\text{-}180^{\circ}$), 3. kasvillisuussektori ($180\text{-}320^{\circ}$). Rakennussektorilla sijaitsee Kumpulan kampus, Ilmatieteen laitos, kerrostaloja, omakotitaloja, siirtolapuutarha ja sektorin itäisen reunan läpi kulkee Helsingin keskustaan kulkeva pääväylä Kustaa Vaasan tie. Tiesektorilla on kerrostaloja ja sama keskustaan menevä pääväylä kulkee tiesektorin läpi muutuen Hämeentieksi. Kasvillisuussektorilla sijaitsee Kumpulan kasvitieteellinen puutarha, Vallilan siirtolapuutarha ja kauempana mittausasemasta kerrostaloja.

Hotelli Tornin mittauspiste sijaitsee Helsingin ydinkeskustassa ($60^{\circ}10'04.09''\text{N}$, $24^{\circ}56'19.28''\text{E}$). Tornin mittausaseman ympäristössä on paljon kerrostaloja ja teitä sekä Helsingin päärautatieasema. Kasvillisuuden osuus keskustassa on noin 22 % ja se koostuu lähinnä katupuista ja pienistä puistoista. Hiilidioksidin pitoisuutta on mitattu vuodesta 2010 puolisoljetulla LI-7200 infrapunakaasuanalysaattorilla. Pystytuulta mitataan 3D-ultraäänianemometrillä (USA-1, Metek GmbH, Saksa). Tornissa mitattavat suureet näkyvät taulukossa (3.2). Mittausmaston korkeus on 60 metriä maanpinnan yläpuolella ja yhteensä 75.2 metriä merenpinnan yläpuolella (Nordbo et al., 2013).



(b) Kumpulan mittausten lähdealue ja sektorit: 1. rakennussektori ($320-40^{\circ}$), 2. tiesektori ($40-180^{\circ}$), 3. kasvillisuussektori ($180-320^{\circ}$).

(a) EC-mittausasemat Helsingissä. Kumpulan (sininen) ja Hotelli Tornin (punainen) mittausten lähdealue (säde 1 km).

Kuva 3.1: Ilmakuva Helsingin keskustasta (©2017 Kaupunkimittaussosasto, Helsinki, Suomi). Mittausasemat Kumpulan SMEARIII-asemalla ja Hotelli Tornissa.

Taulukko 3.1: SMEARIII-asemalla tehdyt mittaukset (Karsisto et al., 2015).

| Mitattava suure | Mittalaite, malli ja valmistaja |
|--|--|
| Tuulen komponentit (u , v , w) Sooninen-lämpötila | 3D-ultraäänianemometri, USA-1, Metek GmbH, Saksa |
| Vesihöyryn pitoisuus, hiilidioksidin pitoisuus | Infrapunakaasuanalysointori (Closed path), LI-7000, LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA |
| Ilman lämpötila | Lämpömittari, Pt-100 |
| Tuulen nopeus | 2D-ultraäänianemometri, Thies Clima 2.1x, Goettingen, Saksa |
| Alas- ja ylöspäin suuntautuvat lyhyt- ja pitkäaaltoisen säteilyn komponentit | Nettoradiometri, CNR1, Kipp & Zonen, Delft, Alankomaat |
| Ilmanpaine | Painemitteri, DPA500, Vaisala Oyj, Vantaa, Suomi |
| Suhteellinen kosteus | Kosteusmittari, HMP243, Vaisala Oyj, Vantaa, Suomi |
| Sademäärä | Sademittari, Pluvio2, Ott Messtechnik GmbH, Saksa |

Taulukko 3.2: Hotelli Tornissa tehdyt mittaukset (Karsisto et al., 2015).

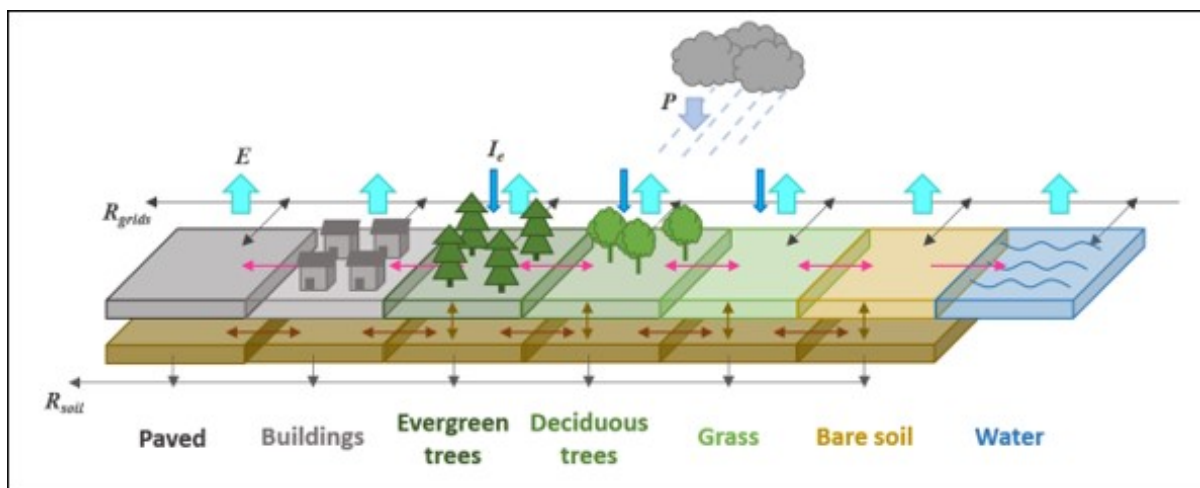
| Mitattava suure | Mittalaite, malli ja valmistaja |
|---|--|
| Tuulen komponentit (u , v , w) Sonic-lämpötila | 3D-ultraäänianemometri, USA-1, Metek GmbH, Saksa |
| Vesihöyryn pitoisuus, hiilidioksidin pitoisuus | Infrapunakaasuanalysointori (Enclosed path), LI-7200, LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA |
| Ilman lämpötila ^[1] | Lämpömittari, HMP45D, Vaisala Oyj, Vantaa, Suomi |

[1] Lämpömittari sijaitsee Elisan tornissa 550 m kaakkoon Hotelli Tornista.

3.2 SUEWS

SUEWS (*Surface Urban Energy and Water Balance Scheme*) on pintavuomalli, joka laskee energia- ja vesitaseet kaupunginosa- tai paikallismittakaavassa (10^2 - 10^4 m) (Järvi et al., 2011). SUEWS on kehitetty kaupungin vesitaseen mallista (Grimmond and Oke, 1986) ja kaupungin haihtumisprosessi mallista (Grimmond and Oke, 1991). Se sisältää nykyisin monia eri alimalleja kuten OHM-mallin (*Objective Hysteris Model*, Grimmond and Oke 1991), joka laskee ΔQ_S :n, NARP-mallin (*Net All-wave Radiation Parametrisation*, Offerle et al. 2003), joka laskee Q_N :n ja LUMPS-mallin (*Local-scale Urban Meteorological Parametrisation Scheme*, Grimmond and Oke 2002), joka arvioi ensimmäisen lähtöarvon ilmakehän stabiilisuudelle. SUEWS ottaa erityisesti huomioon kaupunkien pintatyypit ja kasvillisuuden sisältäen seitsämän eri pintatyyppiä: päällystetyt tiet, rakennukset, havupuut ja -pensaat, lehtipuut ja -pensaat, nurmikon, paljaan maan sekä vesialueet (kuva

3.2). Pintatyyppien, paitsi veden, alla on yksi kerros varastoivaa maaperää. Pintatyypeille täytyy määrittää pinnan ominaisuuksia kuten albedo, emissiivisyys, jokaisen pintatyyppin pinta-alan osuus ja puitten ja rakennusten keskimääräinen korkeus. Kolmelle eri kasvillisuuden tyyppille voidaan määrittää myös omat ominaisuudet. Mallille voidaan antaa myös tietoa ihmisten käyttäytymisestä kuten asukkaiden määrästä ja energian- ja vedenkäytöstä. Mallia pakotetaan yleisesti mitattavilla meteorologisilla parametreilla kuten tuulen nopeudella U , suhteellisella kosteudella RH , ilman lämpötilalla T_{ilma} , paineella p , sademäärällä P ja lyhytaaltoisella säteilyllä K_{\downarrow} . Mallia voi pakottaa myös uudelleen analysoidulla meteorologialla, jolloin menneiden vuosien ajaminen tai mallintaminen kaupungeissa, joissa ei ole mittauksia, tulee mahdollisuudeksi (Kokkonen et al., 2018). Mallin aika-askel voi olla viidestä minuutista tuntiin ja tuloksia voi olla yhteensä päivistä vuosiin. SUEWS-malli on kehitetty käytettäväksi myös korkeiden leveysasteiden kaupungeissa, sillä se sisältää lumen (Järvi et al., 2014).



Kuva 3.2: SUEWS-mallin eri pintatyyppit ja veden kierto. E on haihtuminen, I_e kastelu, P sademäärä, R_{grids} valuma pintojen välillä ja R_{soil} valuma maaperässä (Sun et al., 2018).

3.2.1 Hiilidioksidin vuon malli

Olen lisännyt SUEWS-malliin hiilidioksidin vuon (2.10) eri komponentit ottaen huomioon sekä biogeeniset että ihmisperäiset tekijät kaupungeissa. Biogeenisia komponentteja ovat fotosynteesi ja soluhengitys. Fotosynteesin hiilidioksidin nielua mallinnetaan NRH-yhtälön avulla (2.12), jota on kehitetty kaupungeissa ja arvioitu Helsingissä (Bellucco et al., 2017). Fotosynteesin vuodenaikaisvaihtelut otetaan huomioon painottamalla NRH-yhtälöä aktiivisen kasvillisuuden osuudella λ_{act} , joka arvioidaan lehtialaindeksin LAI avulla. SUEWS-mallissa on vaihtoehto myös RH-yhtälölle (kappale 2.2.1), jota tässä työssä ei käytetä. Kasvillisuuden ja maaperän soluhengityksestä tulevaa hiilidioksidin vuota mallinnetaan eksponentiaalisella yhtälöllä, joka riippuu ilman lämpötilasta (2.11).

Vuota painotetaan biogeenisen pinnan osuudella eli kasvillisuuden λ_v ja maaperän λ_s osuuksilla. Mallille annetaan myös pienin mahdollinen soluhengityksestä tuleva hiilidioksidin vuo $F_{C,r,min}$ (Järvi et al. 2018, lähetetty arvioitavaksi julkaisusarjaan). SUEWS-mallissa on kaksi eri tapaa mallintaa ihmisperäistä hiilidioksidin vuota: inventaariomenetelmällä tai ihmisperäisen lämmönvuon (2.9) avulla. Tässä työssä käytetään ainoastaan inventaariomenetelmää, jolloin kaupunkialueiden ihmisperäisiä komponentteja mallinnetaan yhtälöillä liikenteelle (2.13), ihmisten aineenvaihdunnalle (2.14) ja rakennusten lämmitykselle (2.15).

3.3 Malliajoissa käytettävät aineistot

Käyn läpi seuraavissa kappaleissa aineistoja, joita tarvitaan biogeeniseen ja ihmisperäiseen hiilidioksidin vuon malliin. Molemmat komponentit tarvitsevat tietoa pintatyypeistä, mutta ihmisperäisen hiilidioksidin vuon mallintamista varten SUEWS-mallille annetaan myös erityisesti tietoa ihmisten aktiviteeteista kuten liikenteestä, väestöstä, rakennusten lämmityksestä ja vuorokausiprofileista.

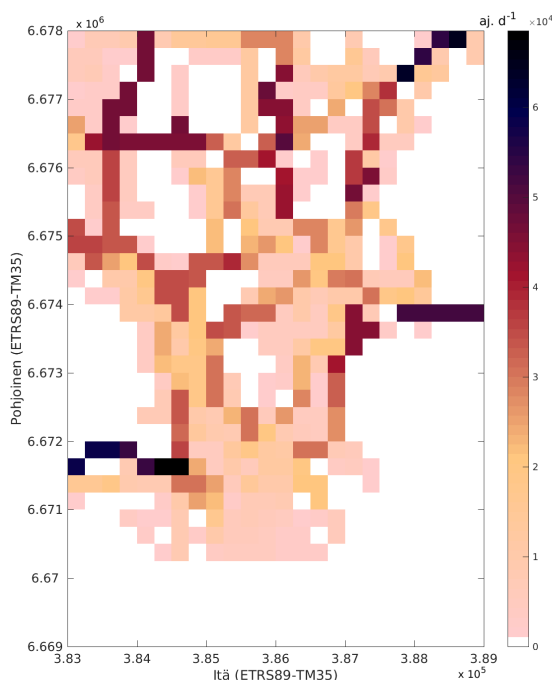
Pintatyyppit

Mallialueiden pintatyyppien pinta-alan osuudet sekä puiden ja rakennusten korkeudet on määritetty laserkeilausaineistosta 2 metrin tarkkuudella (Nordbo et al., 2015). Laserkeilaus on tehty Helsingissä lentokoneesta käsin neljällä eri lennolla vuonna 2008. Laserkeilaus perustuu LiDAR-menetelmään (*Light detection and ranging*), jossa näkyvän valon tai lähi-infrapunataajuuden alueella lähetetään pulsseja. Pintatyyppien määrittämisessä hyödynnetään lasersäteiden mittaamia etäisyyseroja, paluusignaalin voimakkuutta eli intensiteettiä, kuinka monta paluusignaalia saadaan yksittäisestä pulssista ja näiden paluusignaalien korkeuseroja.

Liikenne

Helsingissä liikennemääriä lasketaan monissa eri laskentapisteissä, jotka on koottu Helsingin kaupunkimittausosaston liikennemäärä-aineistoon (HEL, 2017a). Liikennemäärä-aineistoon on kerätty liikennemääriä useammalta vuosikymmeneltä, mutta aineiston uusimmat päivitetty arvot ovat vuodelta 2016. Tämän vuoksi oletan kaikkien liikennemäärien olevan uusimmalta vuodelta 2016 saadakseni kattavan alueellisen liikennemääräjakauman. Liikennemäärien saaminen laskentapisteistä mallille annettavaan hilakokoon ei ole mahdollista tehdä tästä aineistosta summaamalla liikennemääriä automaattisesti. Laskentapisteitä saattoi olla useampi samalla tiellä saman hilan sisällä tai useampi laskentapiste yhdistyi yhdeksi tieksi, jolla myös oli oma laskentapisteensä. Näin ollen mallitetta-

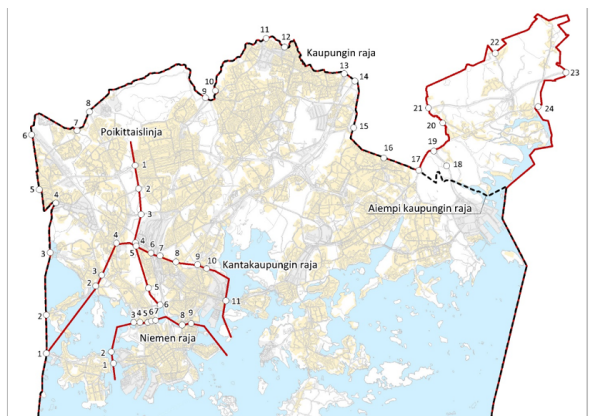
van alueen päivittäiset liikennemäärät on määritetty katsomalla liikennemäärä-aineiston tuottamasta kartasta. Kuvassa (3.3) on tästä aineistosta johdetut alueellisen ajon päivittäiset liikennemäärät. Liikennemääriä on myös mitattu yksittäisissä pisteissä useita viikkoja kerrallaan, jolloin liikennemääriä mitataan myös viikonloppuisin. Kumpulassa vuotena 2012 mittauksia tehtiin Hämeentien sillalla ja Helsingin keskustassa Lönnrotinkadulla muutamina viikkoina vuosina 2011 ja 2012. Näistä mittauksista saadaan johdettua liikenteen arkipäivän ja viikonlopun suhde, jotka ovat kantakaupungille 68 % ja keskustalle 77 %.



Kuva 3.3: Keskimääräiset vuorokausiliikennemäärät Helsingissä. (Sovellettu Helsingin kaupunkimitausosasto, 2017a)

Arvioin liikennemäärien vuosien välisen kehityksen Helsingin kaupungin liikennemäärien laskentalinjoista, joita päivitetään vuosittain (HEL, 2017b). Tässä työssä käytettävälle mallialueelle sopivia laskentalinjoja ovat niemen raja ja kantakaupungin raja (kuva 3.4). Laskelmat perustuvat syyskuun arkivuorokausiliikenteeseen (ma-to klo 0-24). Liikennemäärät ovat olleet Helsingissä nousussa vuosien 1993-2007 välillä, mutta taloudellisen taantumisen seurauksena vuonna 2008 liikennemäärät vähenivät. Vaikka liikenne on vähentynyt niemen ja kantakaupungin rajalla, Helsingin kaupungin rajalla liikenne on kasvanut 13 % vuosien 2002-2012 aikana. Ruuhka-aikojen (klo 6-9, 15-18) osuudet vuorokausiliikenteestä ovat niemen rajalla 40 %, kantakaupungin rajalla 49 % ja Helsingin kaupungin rajalla 47 %. Tässä työssä käytän laskentalinjojen liikennemääriä määrittämään liikennemäärät vuosille 2006-2012 verrattuna vuoteen 2016. Liikenteen muutokset

suhteessa vuoteen 2016 on kerätty taulukkoon (3.3), josta nähdään, että liikennemäärät ovat olleet laskussa vuosien 2006-2012 välillä ja ovat aina olleet suuremmat kuin vuonna 2016. Liikennemäärät muutetaan haluttuun yksikköön (aj. km m⁻² d⁻¹) kertomalla ajoneuvojen (aj.) keskimääräinen päivän lukumäärä (T , aj. d⁻¹) mallinnettavalla alueella ajettavilla kilometreillä (s) ja jakamalla mallinnettavan alueen pinta-alalla (A). Oletan ajoneuvon ajavan suoraan mallitettavan alueen läpi.



Kuva 3.4: Liikennemäärien laskentalinjat Helsingissä (HEL, 2018).

Taulukko 3.3: Liikennemäärien kehitys verrattuna vuoteen 2016. Sovellettu HEL (2017b) raporteista.

| Vuosi | Niemen raja | Kantakaupungin raja |
|-------|-------------|---------------------|
| 2005 | 1.17 | 1.09 |
| 2006 | 1.18 | 1.09 |
| 2007 | 1.17 | 1.08 |
| 2008 | 1.13 | 1.06 |
| 2009 | 1.11 | 1.04 |
| 2010 | 1.11 | 1.03 |
| 2011 | 1.10 | 1.03 |
| 2012 | 1.08 | 1.01 |

Ajoneuvojen hiilidioksidin päästökertoimen (EF_{CO_2}) arvioimiseksi tarvitaan tietoa ajoneuvotyypin jakaumasta ja ajoneuvotyypille arvioiduista päästökertoimista. Suomessa henkilöauton päästökerroin on 200 g km⁻¹, linja-autojen 1240 g km⁻¹, pakettiautojen 280 g km⁻¹ ja rekkujen 1500 g km⁻¹ (VTT, 2010). Helsingissä henkilöautojen osuus kaikista autoista on 83 %, linja-autojen 4 %, pakettiautojen 10 % ja rekkujen 3 %. Näin ollen EF_{CO_2} on Helsingissä 0.285 kg km⁻¹.

Väestö

Käytän tässä tutkimuksessa väestötiheyden saamiseksi SeutuCD:n rakennustasoinen väestö -aineistoja (HSY, 2012a), jotka perustuvat Väestörekisterikeskuksen väestötietojärjestelmään. Aineistoja on saatavilla vuodesta 2008 eteenpäin, joten arvioin aikaisempien vuosien väestötiheydet samansuuruisiksi kuin vuoden 2008. Oletuksena tämä on pieni yliarvio alueellisten ajojen varhaisimmille vuosille. Helsingin asukasmäärä on ollut kasvussa kaupungistumisen ja tiheimmän asumisen seurauksena. Taulukossa (3.4) nähdään mallinnettavan alueen kokonaisasukasmäärät. Väestötiheys saadaan, kun rakennustasoiset väestöt summataan hilan sisällä ja jaetaan hilan pinta-alalla.

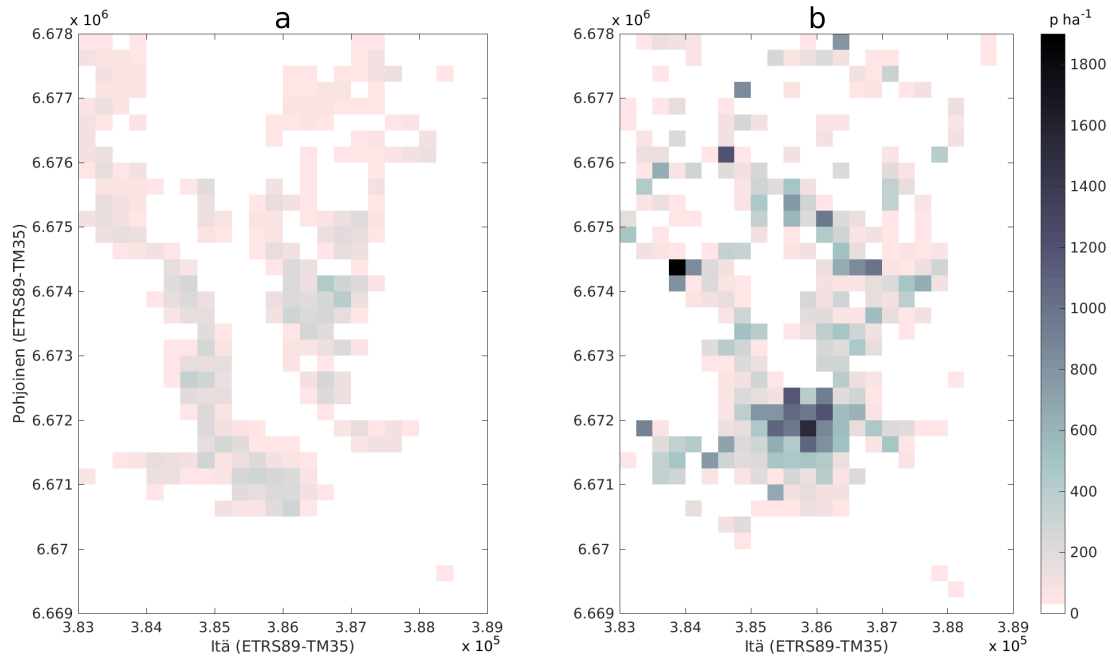
Taulukko 3.4: Mallinnettavan alueen väestökehitys.

| Vuosi | Asukasmäärä |
|-------|-------------|
| 2005 | 167123 |
| 2006 | 167123 |
| 2007 | 167123 |
| 2008 | 167123 |
| 2009 | 172367 |
| 2010 | 173924 |
| 2011 | 176293 |
| 2012 | 179530 |

Helsingissä väestötiheys on eri yöllä ja päivällä. Ihmisiä lähtee ja tulee päivisin töihin, kouluihin ja ostoksille tai yöaikaan kaupungille. Käytän YKR:n liikkuvuus -aineistoa (Ristimäki, 1999), joka ottaa huomioon ihmisten työssäkäynnin, sisältäen ihmismäärän, jotka lähtevät tai tulevat tiettyyn hilaan. Päiväaikainen väestötiheys on saatu joko lisäämällä tai vähentämällä vuoden 2010 yöaikaiseen väestötiheyteen liikkuvuudesta saatu ihmismäärä. Suurimmassa osassa mallinnettavaa aluetta väestötiheys kasvaa. Erityisesti keskustan ja Meilahden kampuksen alueelle siirtyy päivällä paljon ihmisiä. Mallitettavan alueen kokonais väestömäärä kasvaa yöllisestä noin 179 000 asukkaasta päivän noin 466 000 ihmismäärään. Ihmiset liikkuvat eri tavalla arkisin ja viikonloppuisin, joten viikonloppun päiväaikaista väestötiheyttä skaalataan liikenteestä saadun arkipäivän ja viikonloppun osuuden mukaisesti. Yölliset väestötiheydet ovat samat arkipäivinä ja viikonloppuina, koska on vaikea arvioida yöaikaista aktiviteettia. Tämä huomioidaan kuitenkin vuorokausiprofileilla, asettaen ihmisten aktiviteetin hieman myöhäisemmäksi viikonloppuisin.

Rakennusten lämmitys

Rakennuksia lämmitetään Helsingissä suurimmaksi osaksi kaukolämmöllä. Ainoastaan 5 % lämmityksestä on puunpolttoa, joka aiheuttaa paikallisia päästöjä. Arvioin, että vain pientalot (alueen keskimääräinen rakennuskorkeus < 9 m) ja niemen rajan yläpuolella käyttävät puuta lämmitykseen. SUEWS-malli ei sisällä paikallaan olevia yksittäisiä lähteitä, kuten voimalaitoksia. Tuloksia tarkastellessa yksittäiset lähteet pitää lisätä jälkikäteen. HSY:n inventaarioista lisätään CO₂-ekvivalentit asumis- ja palvelusektorin kulutussähkö ja rakennusten lämmitys kaukolämmöllä (HSY, 2018). CO₂-ekvivalentti ottaa huomioon hiilidioksidin, metaanin ja dityppioksidin. Ekvivalentti ei ole suoranaisesti vain hiilidioksidipäästöjä vaan metaani ja dityppioksidit muutetaan ilmastonlämmityspotentiaaliltaan vastaavaksi määräksi hiilidioksidia.

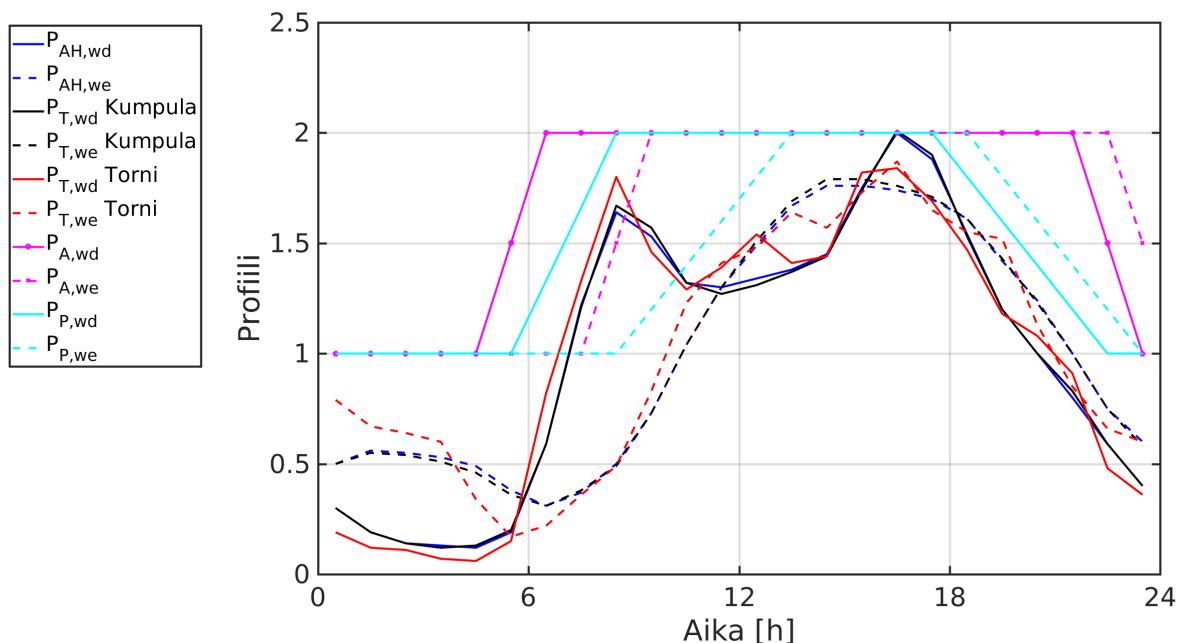


Kuva 3.5: SUEWS-mallille annettavat väestötiheydet a) yöllä ja b) päivällä. (Sovellettu HSY 2012a ja Ristimäki 1999)

Profiilit

Ihmisperäisen hiilidioksidin vuon malli ei laske suoraan tuntiarvoja vaan mallille annetaan eri vuorokausiprofiileja muuttamaan päiväarvot tuntiarvoiksi. Mallissa on kaksi erilaista profiilityyppiä: numeroiden 1-2 välillä vaihtelu, joka määrittää käytetäänkö mallissa 1: yöarvoa vai 2: päiväarvoa minäkin tuntina tai niiden välimuotoa siirtymäaikoina; numeroiden 0-2 välillä vaihtelu, joka skaalaa vuorokauden keskimääräistä arvoa eri tunneille. Mallille voidaan antaa erikseen arkipäivän (*wd*) ja viikonlopun (*we*) profiilit. Kuvassa (3.6) on seuraavat mallille annettavat profiilit: ihmisperäisen lämmön P_{AH} , liikenteen P_T , aktiivisuuden P_A ja populaation P_P profiilit. Liikenneprofiilit perustuvat mitattuihin liikennemääriin Kumpulassa ja Lönnrotinkadulla. Aktiivisuusprofiili arvioi milloin ihmiset heräävät ja menevät nukkumaan. Populaatioprofiili arvioi milloin ihmiset ovat liikkeellä eli lähinnä milloin ihmiset menevät töihin ja tulevat kotiin.

Ainoastaan liikenteen profiili on eri kantakaupungille ja keskustalle. Kantakaupungissa käytetään Kumpulassa mitattua liikenteen profiilia ja keskustassa käytetään Tornin lähellä mitattua liikenteen profiilia. Molemmissa sijainneissa näkyy selvät aamun ja iltapäivän ruuhkat. Tornin liikenteen profiilissa nähdään myös keskipäivällä luultavasti lounasajan liikennettä.



Kuva 3.6: SUEWS-mallille annettavat vuorokausiprofiilit. P_{AH} on ihmisperäisen lämmönvuon profiili, P_T on liikenteen profiili, P_A on ihmisen aktiivisuuden profiili ja P_P on populaation profiili.

3.4 Malliajot

Seuraavissa kappaleissa käyn läpi EC-laitteistojen lähdealueilla tehtävien malliajot ja alueellisten vuosiajot yksityiskohtia.

3.4.1 Mallin arviointi Kumpulassa ja Tornissa

Ajan SUEWS-mallia EC-menetelmällä tehtyjen hiilidioksidin vuon mittauksien approksimatiivisilla lähdealueilla Kumpulassa ja Hotelli Tornissa. Kumpula on jaettu hallitsevan maankäytön sektoreihin (Kuva 3.1b), joita mallinnetaan erikseen. Mallinnettavaa sektoria verrataan mittauksiin vallitsevan tuulensuunnan mukaisesti. Ajan mallia vuodet 2011-2012 ja vertaan vuotta 2012 EC-menetelmällä tehtyihin hiilidioksidin vuon mittauksiin. Ensimmäistä vuotta ei tarkastella, jotta mallista voi tulla itsenäinen alkuoletuksiin nähden. Käytän mallin meteorologisenä pakotteena Kumpulan mittauksia tunnin aika-asteleella molemmilla mallitettavilla alueilla. Hotelli Tornin malliajoissa käytetään ainoastaan ilman lämpötilaa asemalta läheltä Tornia, mutta muuten pakotteet ovat Kumpulasta. Hiilidioksidin vuon mallia arvioidaan tilastollisin keinoin kuten keskiharhavirheen MBE:n, keskineliövirheen nRMSE:n ja korrelaatiokertoimen R^2 avulla. Tässä työssä nRMSE on normalisoitu mitattujen arvojen vaihteluvälillä.

Pinnan parametrit

Sekä Kumpulan että Hotelli Tornin väestötiheydet (PD), keskimääräiset päivän liikennemäärät (T), liikennemäärän vuot (TR), pintatyyppien osuudet (λ), rakennusten (z_h) ja puiden (z_t) korkeudet sekä pinta-alat (A) ovat taulukossa (3.5). Mallialueiden pintatyyppit on määritetty laserkeilausaineistosta 2 metrin tarkkuudella (Nordbo et al., 2015). Väestötiheydet on jaettu päivään (D) ja yöhön (N), liikenteet arkipäivään (wd) ja viikonloppuun (we). Rakennus- ja kasvillisuussektorin liikennemäärät on arvioitu liikennemääräaineistosta (HEL, 2017a). Rakennussektorin liikennemäärää painotetaan lisäksi vuoden 2012 tuulensuunnilla, jotta sen itäisen reunan suuremmin liikennöity tie ei painottuisi liikaa. Tuulensuunnista 340° - 30° liikennemäärä on 4200 aj. d^{-1} ja 30° - 40° liikennemäärä on 36800 aj. d^{-1} . Kumpulan tiesektorin liikenne on arvioitu mittauksista vuotena 2012 Hämeentien sillalta ja siihen on lisätty liikennemäärä-aineiston avulla sivuteiltä 14000 aj. d^{-1} . Mallialueilla ajettavat ajokilometrit arvioidin tässä työssä olevan Kumpulan sektoreilla 1.5 km ja keskustassa 2 km. Ajoissa käytetään vuorokausiprofileja muuttamaan

Taulukko 3.5: Malliajossa käytettävät maankäytön parametrit EC-mittausten lähdealueella Kumpulassa ja Hotelli tornissa. aj. on lyhenne ajoneuvosta. (Kts. kappaleet 2.2.1 ja 2.2.2)

| Parametri | Arvo | | | | Yksikkö |
|--------------------------|----------|--------|--------------|--------|--|
| | Rakennus | Tie | Kasvillisuus | Torni | |
| $PD_D^{[1]}$ | 8.9 | 40.9 | 28.8 | 344.5 | as. ha ⁻¹ |
| $PD_N^{[1]}$ | 30.65 | 37.5 | 43.6 | 80.9 | as. ha ⁻¹ |
| T_{wd} | 8471 | 51820 | 3700 | 144470 | aj. d ⁻¹ |
| T_{we} | 5772 | 25526 | 2521 | 111240 | aj. d ⁻¹ |
| TR_{wd} | 0.0182 | 0.0637 | 0.0045 | 0.0920 | aj. km m ⁻² d ⁻¹ |
| TR_{we} | 0.0124 | 0.0434 | 0.0031 | 0.0706 | aj. km m ⁻² d ⁻¹ |
| $\lambda_{pav}^{[1]}$ | 0.42 | 0.39 | 0.30 | 0.40 | - |
| $\lambda_{bldg}^{[1]}$ | 0.20 | 0.15 | 0.11 | 0.37 | - |
| $\lambda_{veg}^{[1]}$ | 0.38 | 0.46 | 0.59 | 0.22 | - |
| $\lambda_{everg}^{[1]}$ | 0.01 | 0 | 0.01 | 0.00 | - |
| $\lambda_{dec}^{[1]}$ | 0.21 | 0.20 | 0.30 | 0.15 | - |
| $\lambda_{igrass}^{[1]}$ | 0.15 | 0.20 | 0.21 | 0.00 | - |
| $\lambda_{grass}^{[1]}$ | 0.01 | 0.06 | 0.10 | 0.07 | - |
| $\lambda_{water}^{[1]}$ | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 | - |
| $z_h^{[1]}$ | 10.4 | 11.5 | 12.6 | 17.9 | m |
| $z_t^{[1]}$ | 10 | 8.8 | 8.5 | 8.3 | m |
| Area ^[1] | 70 | 122 | 122 | 314 | ha |

[1] Järvi et al. (2014)

ihmisperäisten komponenttien keskimääräiset päiväarvot tuntiarvoiksi.

Hiilidioksidin vuon parametrit

Bellucco et al. (2017) määrittä Helsingille fotosynteesin hiilidioksidin vuon parametrit α , β ja θ , käyttämällä Kumpulän kasvillisuussektorista kapeampaa sektoria (200-270°) ja 800 metrin sädettä. Kasvillisuuden osuus tällä alueella oli 60 %. Hiilidioksidin vuo soluhengityksestä on arvioitu Järvi et al. (2012) kahdella eri tavalla, joita molempia tarkastelen jatkossa. Hiilidioksidin päästökerroin liikenteestä on arvioitu Helsingille vuodelle 2012 (Järvi et al., 2012). Arvioin, että rakennuksia lämmitetään Kumpulassa 5 % puunpoltolla ja 0 % keskustassa. Poltettavan aineen päästökertoimen on arvioinut Moriwaki and Kanda (2004). Helsingissä käytetään suurimmaksi osaksi kaukolämpöä rakennuksien lämmittämiseen, jolloin paikallisia päästöjä on vähän. Ihmisen aineenvaihdunnan hiilidioksidipäästöt (C_m) oletetaan levossa olevalle ihmiselle $200 \mu\text{mol CO}_2 \text{ s}^{-1}$ (Moriwaki and Kanda, 2004) ja aktiiviselle ihmiselle $280 \mu\text{mol CO}_2 \text{ s}^{-1}$ (Ward et al., 2013). Aktiivisuuden vuorokausiprofililla kerrotaan kumpaa arvoa käytetään.

Taulukko 3.6: Mallissa käytettävät yleiset parametrit. (Kts. kappaleet 2.2.1 ja 2.2.2)

| Parametri | Arvo | Yksikkö | Lähde |
|----------------|-----------|---|---------------------------|
| $a_{2(wd)}$ | 0.01 | $\text{Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}(\text{as.ha}^{-1})^{-1}$ | Järvi et al. (2014) |
| $a_{2(we)}$ | 0.01 | $\text{Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}(\text{as.ha}^{-1})^{-1}$ | Järvi et al. (2014) |
| α | 0.031 | $\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol pho.}^{-1}$ | Bellucco et al. (2017) |
| β | 29.169 | $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ | Bellucco et al. (2017) |
| θ | 0.723 | - | Bellucco et al. (2017) |
| a | 2.1 | - | Järvi et al. (2012) |
| b | 0.05/0.06 | - | Järvi et al. 2018 |
| $F_{C,r,min}$ | 0.6 | $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ | Järvi et al. (2012) |
| EF_{CO_2} | 0.285 | kg km^{-1} | Järvi et al. (2012) |
| FF | 1.159 | $\mu\text{mol CO}_2 \text{ J}^{-1}$ | Moriwaki and Kanda (2004) |
| $FH_{Kumpula}$ | 0.05 | - | HSY (2018) |
| FH_{Torni} | 0 | - | HSY (2018) |
| $C_{m(N)}$ | 200 | $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ | Moriwaki and Kanda (2004) |
| $C_{m(D)}$ | 280 | $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ | Ward et al. (2013) |

Soluhengityksestä johtuvaa hiilidioksidin vuota on tutkittu Kumpulassa sekä kammio- mittauksilla että EC-mittauksilla. Helsingissä Järvi et al. (2012) toteutti saman- aikaisesti mittauksen molemmilla tavoilla ja vertasi soluhengityksen riippuvuutta lämpö- tilasta. Suurimmat erot kahdessa eri menetelmässä ilmeni korkeammilla lämpötiloilla. EC-mittaukset arvioitiin Kumpulän SMEARIII- asemalla yöllisistä arvoista ja kammio-

mittauksia tehtiin vuosina 2008 ja 2009 päiväsaikaan. Kammiomittauksia tehtiin Kumpulassa SMEARIII-aseman ympäristössä useissa paikoissa (kolme niityllä, 11 metsässä, neljä nurmikoilla ja 10 viljellyllä maalla). Kumpulassa saadut sovitetut eksponentiaaliset käyrät kammiomittauksilla:

$$F_{kammio} = (2.1 \pm 0.8)e^{(0.06 \pm 0.03)T_{ilma}}, \quad (3.1)$$

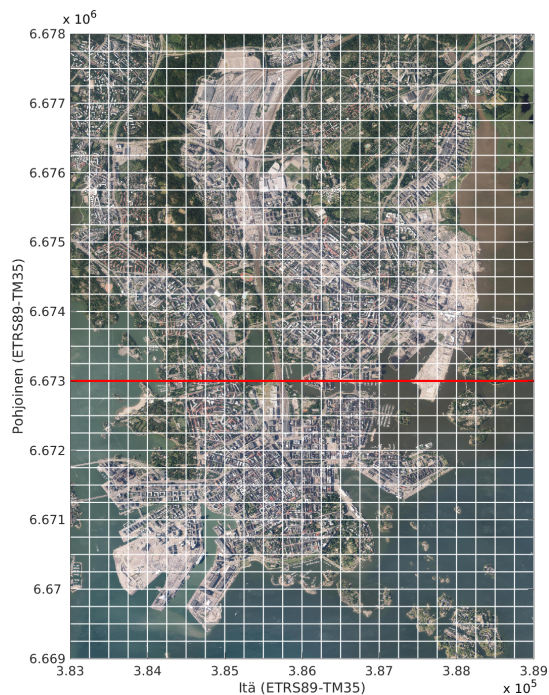
ja EC-menetelmällä:

$$F_{EC} = (2.1 \pm 1.7)e^{(0.05 \pm 0.05)T_{ilma}}, \quad (3.2)$$

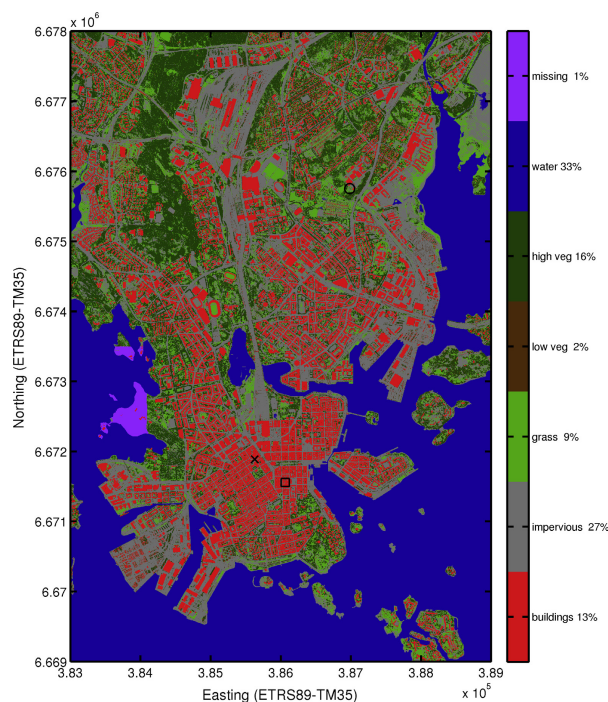
ovat lähellä toisiaan saaden saman perusarvon $a = 2.1$. Lämpötilariippuvuudessa on vain pieni ero, ollen $b = 0.06$ kammiomittauksille ja $b = 0.05$ EC-menetelmälle. Näin pieni ero on kuitenkin suuri eksponentiaalisesti ja ero kasvaa mitä korkeammat lämpötilat ovat. Vertailen eri menetelmällä saatuja lämpötilariippuvaisuuksia Kumpulassa kasvillisuus-sektorilla kesällä ja vertaan niitä ympärivuotisiin yöaikaisiin hiilidioksidin vuon mittauksiin.

3.4.2 Alueelliset vuosiajot

Mallitan kuvan (3.7a) mukaista $6 \times 9 \text{ km}^2$:n kokoista aluetta Helsingissä, joka on jaettu $250 \times 250 \text{ m}^2$:n kokoihin hiloihin. Ajan SUEWS-mallia erikseen näillä 864:llä hilalla vuodet 2005-2012 viiden minuutin aika-askeleella tutkiakseni hiilidioksidin vuon alueellista ja ajallista vaihtelua. Malliajot ensimmäistä vuotta ei tarkastella, jotta mallista voi tulla itsenäinen mallille annettaviin alkuoletuksiin nähden. Koko mallialueen meteorologisenä pakotteena käytän mittauksia SMEAR III-asemalta Kumpulasta tunnin aika-askeleella. Mallille annettavat pintatyypit on määritetty samasta laserkeilausaineistosta (Nordbo et al., 2015) kuin aikaisemmin ja niiden osuudet on nähtävissä kuvassa (3.7b). Mallialueella on 13 % rakennuksia, 27 % päällystettyjä teitä, 9 % nurmikkoja, 2 % matalaa kasvillisuutta, 16 % korkeaa kasvillisuutta, 33 % vettä ja 1 % puuttuu kokonaan. Mallille ei anneta erikseen matalaa ja korkeaa kasvillisuutta vaan mallille erotellaan onko kasvillisuus ainavihanta- vai kesävihantakasvillisuutta. Helsingissä voidaan olettaa, että matala kasvillisuus on pääsääntöisesti kesävihantaa ja korkeasta kasvillisuudesta 60 % kesävihantapuita ja loput ainavihantapuita (Korhonen et al., 2015). Ihmisperäiselle hiilidioksidin vuon mallille annetaan kuvan (3.3) mukaiset liikennemäärät, joita vaihdellaan vuosien välillä taulukon (3.3) mukaisesti. Mallille annetaan myös kuvan (3.5) mukaiset päivä- ja yöaikaiset väestötiheydet. Liikenteen mittauksista saatujen arkipäivä ja viikonloppu osuuksien avulla painotetaan viikonloppujen liikennettä ja väestötiheyttä. Kumpulaa käytetään kuvan (3.7a) punaisen viivan yläpuolella ja keskustasta saatua osuutta punaisen viivan alapuolella.



(a) Malliajosten alue Helsingissä jaettuna 250x250 m²:n hilioihin. Punainen viiva jakaa keskustan naapurustosta, joilla on eri malliparametreja.



(b) SUEWS-mallille annettavat pintatyytit Helsingissä (Nordbo et al., 2015).

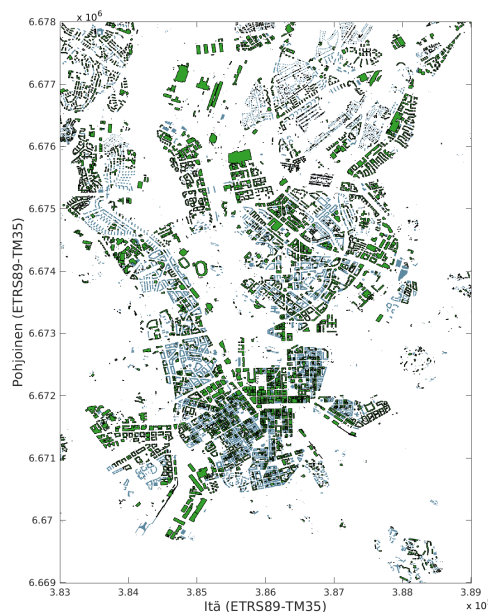
Kuva 3.7: SUEWS-malliajosten alue Helsingissä. Koko alueen koko 6x9 km². Ilmakuva Helsingin keskustasta (©2017 Kaupunkimittausosasto, Helsinki, Suomi).

3.5 Skenaarioajot

SUEWS-mallia kehitetään meteorologiseksi tutkimuksen ja kaupunkisuunnittelun apuvälineeksi. Muuttamalla parametrien arvoja mallissa, voidaan selvittää muutoksien vaikutusta useampaan eri mallitettavaan meteorologiseen parametriin. Tässä työssä keskityn pelkästään hiilidioksidin vuon eri komponenttien muutoksiin. Ajan kahta skenaarioria vuonna 2012 ja vertaan skenaarioiden vuositasaita perusajoon. Ensimmäisessä skenaariossa lisään Helsinkiin potentiaaliset viherkatot muuttamalla rakennuksia nurmikoksi. Toisessa skenaariossa potentiaalisia viherkattoja vähennetään potentiaalisten aurinkopaneelien paikalta, jolloin nurmikkoja muutetaan takaisin rakennuksiksi. Mallitettava alue on sama kuin alueellisen ajon alue kuvassa (3.7a).

3.5.1 Potentiaaliset viherkatot

SUEWS-malli ei tällä hetkellä sisällä viherkattoja omana pintatyyppinä. Sen sijaan rakennuksia voidaan korvata nurmikolla, koska SUEWS on kaksiulotteinen malli. Tyypillisesti



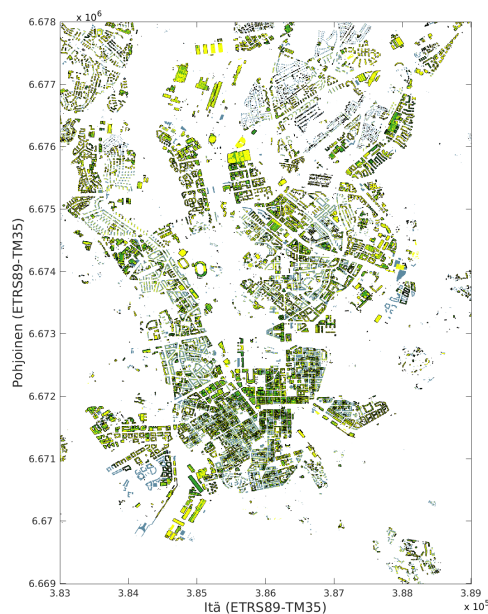
Kuva 3.8: Potentiaaliset viherkatot Helsingissä (vihreä) ja taustalla Helsingin rakennukset (sininen). (Muokattu HSY, 2016)

viherkatot ovat maksaruohoa (*Sedum* sp.), mutta tässä työssä korvaan SUEWS-mallissa rakennukset, joilla on potentiaalia toimia viherkattoina, nurmikolla. Potentiaaliset viherkatot on määrittänyt Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY, 2016). Pääkaupunki-seudun viherkatot -aineisto sisältää potentiaaliset, rakennetut ja spontaanisti syntyneet viherkatot. Viherkaton tunnistus on tehty siten, että tasaiseksi katoksi on ensin määritetty alle 12 asteen kaltevuudet. Tasaista kattoa täytyy olla riittävä osa katon pinta-alasta. Mahdollisia viherkattoja ovat ne joiden kattoa on tasaista yli 10 % pinta-alan ollen alle 100 m², ja 5 % tästä suuremmilla katoille. Kattojen kasvillisuus on tunnistettu vuoden 2013 seudullisen vääräväriortokuvasta, jos kasvillisuutta on yli 10 % katon pinta-alasta. Potentiaalisia viherkattoja ovat tasaiset katot, joilla vielä ei ole kasvillisuutta riittävästi. Kuvassa (3.8) nähdään potentiaalisten viherkattojen määrä rakennuksiin mallitettavalla alueella.

3.5.2 Aurinkopanealeilla painotettu tapaus

Kaupungeissa katoille voidaan sijoittaa kahta eri ympäristöystävällistä vaihtoehtoa: viherkattoja tai aurinkopaneeleja. Tutkin tässä työssä miten potentiaalisten viherkattojen asettelu ja osan niistä korvaaminen potentiaalisilla aurinkopaneeleilla vaikuttaisi hiilidioksidin vuohon Helsingissä. Kasvillisuuden määrä muuttuisi, mutta myös voimalaitoksien tuottama energiaa voitaisiin vähentää aurinkopaneelien tuottaman energian verran ja tutkia kuinka paljon tämä vähentäisi hiilidioksidin päästöjä. Aurinkopaneeleille sopivat

sijainnit pääkaupunkiseudulla -aineisto (HSY, 2015) esittää sopivat sijainnit rakennusten katoista, jotka toimisivat potentiaalisina paikkoina aurinkopaneeleille. Sopiva osa katosta täytyy saada auringon säteilyä yli $847 \text{ kWh m}^{-2} \text{ y}^{-1}$. Yhtenäistä pinta-alaa täytyy olla vähintään 5 m^2 ja aurinkopaneelin etäisyys katon reunasta on oltava yli 0.5 metriä.



Kuva 3.9: Potentiaaliset aurinkopaneelit Helsingissä (keltainen) ja taustalla potentiaaliset viherkatot Helsingissä (vihreä) ja Helsingin rakennukset (sininen). (Muokattu HSY, 2015 ja HSY, 2016)

4. Tulokset

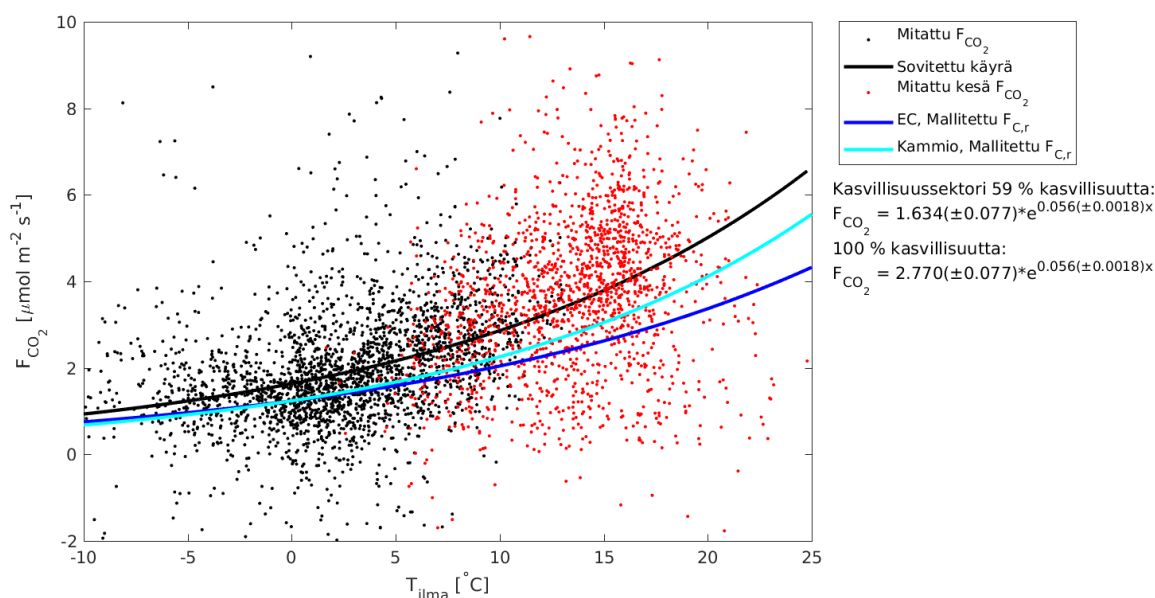
Käsittelen tuloksissa hiilidioksidin vuon mallin testaamista, hiilidioksidin vuon alueellista jakaumaa Helsingissä, sen vuosien välistä vaihtelua ja vaihtelua kahden eri skenaarion välillä. Käyn ensin läpi lyhyesti mitä soluhengityksen parametrisointia kannattaa käyttää hiilidioksidin vuon mallintamisessa Helsingissä.

4.1 Soluhengityksen parametrisointi

Soluhengityksestä tulevaa hiilidioksidin vuota on mitattu Kumpulassa kammiomittauksilla ja arvioitu EC-menetelmällä. Kammiomittauksia on tehty useammalla eri kasvilisustyypillä Kumpulän kasvillisuussektorilla (Järvi et al., 2012), jolloin on mahdollista olettaa, että se on edustava otos kasvillisuuden soluhengityksen hiilidioksidin vuon riippuvuudesta lämpötilaan. Kuitenkin mittauksia ei kuitenkaan tehty ollenkaan talviaikana, jolloin kylmemmät lämpötilat jäävät huomiotta. Kammiomittaukset sijoittuvat maan päälle, jolloin puista tulevaa hiilidioksidin vuota ei voida mitata. Teoriassa, EC-menetelmä on yleisin tapa mitata suoraan isomman alueen hiilidioksidin vuota. Soluhengityksen hiilidioksidin vuon eristämisestä vuosta on kuitenkin haastavampaa. Tällöin EC-mittauksia voi tarkastella vain yöllä, jolloin fotosynteesiä ei ole ja ihmisten aktiviteetit voidaan olettaa pieniksi. Kuitenkin tarkasteltavalla alueella on aina ihmisiä, jolloin ihmisisten aktiviteeteista tulee hiilidioksidia ilmakehään. Yöllisten arvojen lämpötilariippuvuuteen voi myös vaikuttaa rakennusten lämmityksestä aiheutuvat hiilidioksidin päästöt kylmemmillä lämpötiloilla, mutta vain vähän. Kuitenkin lämmitys voi nostattaa hiilidioksidin vuon arvoja talvella, jolloin soluhengityksen arvioiminen yöllisistä arvioista olisi lievä yliarvio. Suuremmilla ilman lämpötiloilla EC-menetelmä antaa hieman pienempiä hiilidioksidin vuon arvoja kuin mitä kammioilla mitatut (Kuva 2.2). Ero johtuu EC-menetelmän lähdealueen ja kammiomittauksien otoksien eroista. EC-torni on myös mäen päällä korkeassa tornissa, jonne kaikki hiilidioksidi ei välttämättä kulkeudu, joten erot menetelmissä ovat mahdollisia.

Soluhengityksen parametrisointi eri menetelmillä tuottaa jonkin verran erilaisia tuloksia mallissa varsinkin korkeammilla lämpötiloilla. Kuvassa (2.2) on mittauksia vain kesäajalta, mutta EC-mittauksia on saatavilla ympäri vuoden. Kuvassa (4.1) on vuosien

2007-2012 Kumpulan kasvillisuussektorin tuulensuunnista EC-menetelmällä mitattu hiilidioksidin vuo öisin (klo 0-4) kun mallinnettava fotosynteesin hiilidioksidin vuo on nolla. Näihin ympärivuotisiin EC-mittauksiin on sovitettu eksponentiaalinen käyrä. Kuvassa (4.1) näkyy myös EC-menetelmästä ja kammiomittauksista saadut mallinnetut soluhengityksestä tulevat hiilidioksidin vuot, jotka on johdettu kuvasta (2.2). Näistä kahdesta kesäaikana tehdystä menetelmästä kammiomittauksilla saatu muistuttaa enemmän ympärivuotisiin EC-mittauksiin sovitettua eksponentiaalista käyrää. Sovitetun käyrän ilman lämpötilariippuvuuteen liittyvä soluhengityksen vakio b on 0.056. Sovitetun ja kammio-mittauksista saadun käyrän ero tulee luultavasti ihmisperäisistä aktiviteeteista tulevas-ta hiilidioksidista ja talvella mahdollinen rakennusten lämmitys voi vääristää sovitetun käyrän kaltevuutta saaden liian suuria arvoja talvella. Näin ollen käytän tässä työssä kammio-mittauksista saatuja parametreja.

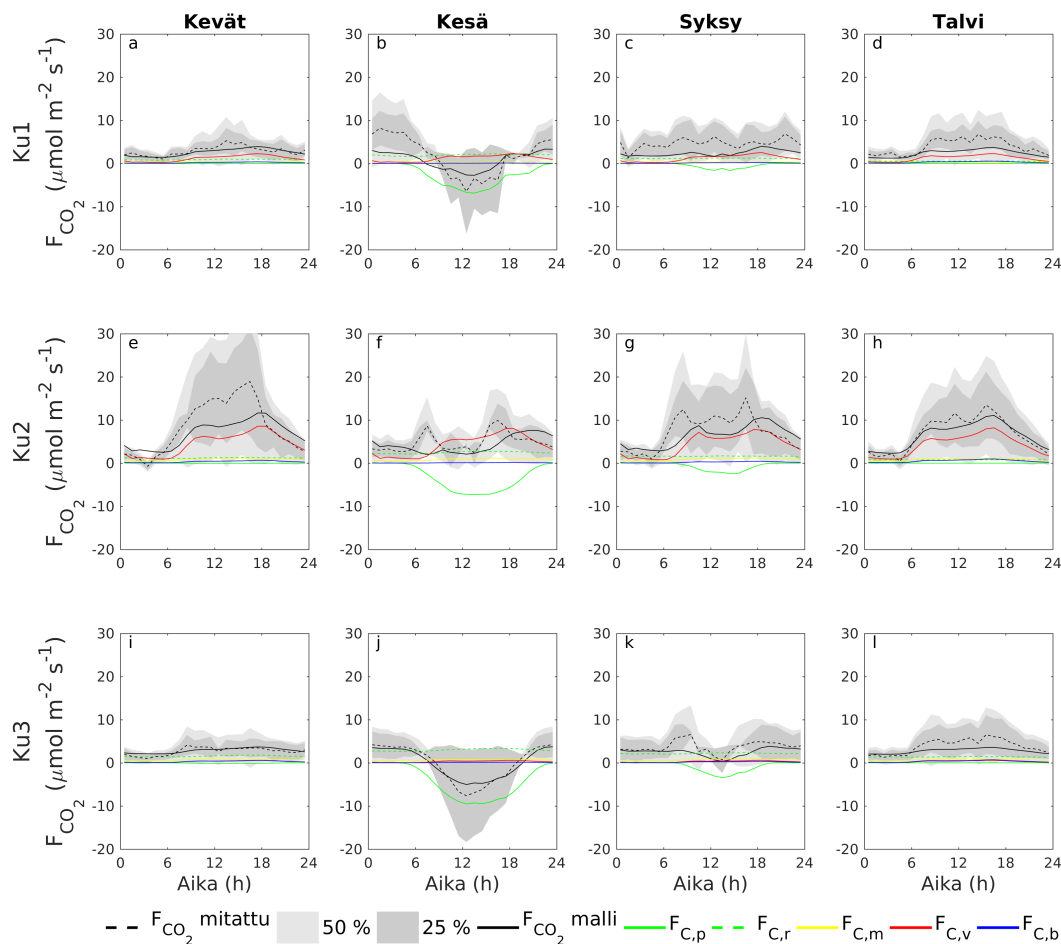


Kuva 4.1: EC-menetelmällä mitattuun hiilidioksidin vuohon (mustat ja punaiset pisteet) on sovitettu eksponentiaalinen käyrä (musta viiva + yhtälöt sivussa) vuosille 2007-2012. Mallitetut soluhengityksen hiilidioksidin vuot käyttäen EC-menetelmällä (tumman sininen) ja kammio-mittauksilla (vaalean sininen) saatuja parametrisointeja.

4.2 Mallin evaluointi

Arvioin SUEWS:n mallintamaa hiilidioksidin vuota vertaamalla sitä vuoden 2012 hiilidioksidin vuon mittauksiin Kumpulan kolmella eri sektorilla ja Hotelli Tornissa. Vuosi 2012 on jaettu termisiin vuodenaikoihin viiden päivän ilman lämpötilan keskiarvolla, jolloin talvi sijoittuu päivien 27.10-28.2.2012 välille, kevät 1.3-7.5.2012, kesä 8.5-22.9.2012

ja syksy 23.9-26.10.2012 välille. Kuvassa (4.2) on hiilidioksidin vuon vuorokausiprofiilit sekä mittauksista että mallista Kumpulassa eri sektoreilla. Kuvassa on myös mallin viisi eri hiilidioksidin vuon komponenttia. Kuvasta (4.2) nähdään, että hiilidioksidin vuon



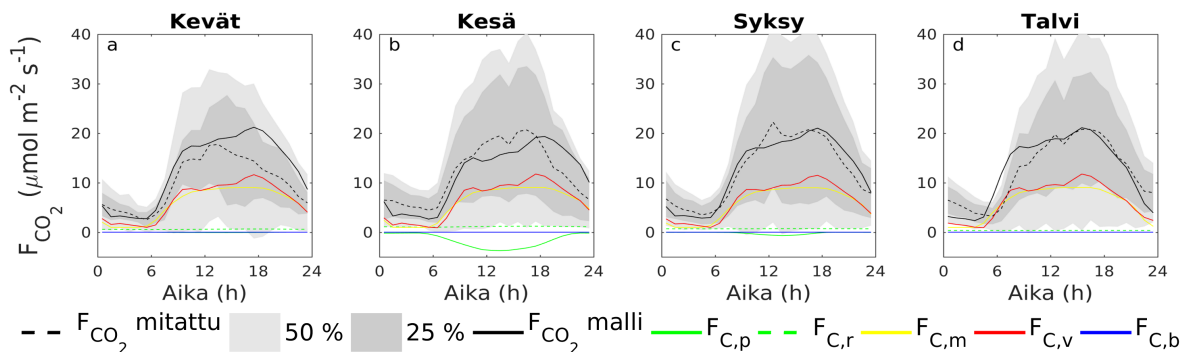
Kuva 4.2: Mitattu ja mallitettu hiilidioksidin vuo ja sen komponentit termisinä vuodenaikoina vuonna 2012 Kumpulassa. F_{CO_2} mitattu hiilidioksidin vuo ja harmailta alueilla mittauksen 25- ja 50-persentiilit, F_{CO_2} malli on mallitettu hiilidioksidin vuo ja sen eri komponentit: $F_{C,p}$ fotosynteesistä, $F_{C,r}$ soluhengityksestä, $F_{C,m}$ aineenvaihdunnasta, $F_{C,v}$ liikenteestä ja $F_{C,b}$ rakennusten lämmityksestä. Ku1: rakennussektori, Ku2: tiesektori ja Ku3: kasvillisuussektori.

mallin vuorokausikäyttäytyminen vertautuu hyvin mittauksiin nRMSE:n ollen kaikilla sektoreilla alle 0.12 päiväarvoista ja alle 0.27 tunti-arvoista. Rakennussektorilla mallitettu hiilidioksidin vuo aliarvioi mittauksia noin $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ syksyllä ja talvella. Aliarvion syy on luultavasti liikenteen aliarvioitu määrä alueella tai mahdollinen rakennusten lämmitys fossiilisilla polttoaineilla. Kesällä rakennussektorin öisin mitatut hiilidioksidin vuon arvot ovat paljon korkeammat kuin millään muulla sektorilla ollen jopa $8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Nämä korkeat arvot eivät voi johtua liikenteestä tällä alueella. Mittauksista voi huomata, että yölliset korkeammat arvot tulevat lähinnä luoteesta, jolloin läheisen met-

sän soluhengitys tai mahdollinen pientalojen puunpoltto esimerkiksi saunan lämmitykseen voi aiheuttaa korkeamman hiilidioksidin vuon. Tiesektorilla liikenne on merkittävin komponentti hiilidioksidin vuon mallintamisessa ollen noin 70 % päiväsaikaan kokonais hiilidioksidin vuosta. Erityisesti talvella, jolloin kasvillisuuden hiilidioksidin vuo on pieni, liikenne aiheuttaa suurimman osan hiilidioksidipäästöistä ollen noin $8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Myös tiesektorin aamu- ja iltapäiväruuhka suoriutuu hyvin mallissa. Kasvillisuussektorin kesän mallitettava hiilidioksidin vuo vertautuu todella hyvin mittauksiin sekä yöllä että päivällä. Yöllä ainoastaan kasvillisuuden soluhengitys tuottaa hiilidioksidin vuon ollen noin $4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, joten soluhengityksen hiilidioksidin vuo malliutuu hyvin. Päivällä fotosynteesin vaikutus hiilidioksidin vuohon on suuri ollen mallissa $-10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Mallitettu hiilidioksidin vuo malliutuu tällöin hyvin ollen $-5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, vaikka täyttänein huippua ($-7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) malli ei saavutakaan. Kuitenkin mittausten hajonnasta nähdään, että hiilidioksidin vuo vaihtelee todella paljon tänä aikana luultavasti juuri kasvillisuuden fotosynteesin voimakkuudesta riippuen. Talvella EC-mittausten lähdealue voi kasvaa suuremmaksi (Ripamonti et al., 2013), jolloin kasvillisuussektorin reunamilla sijaitsevalta suuremmalta tieltä voi kantautua enemmän hiilidioksidipäästöjä, joita mallissa ei huomioitu. Näin ollen kasvillisuussektorin talven päiväsaikaisen hiilidioksidin vuon voi olettaa tulevan liikenteestä, jota mallille ei ole annettu.

Kuvassa (4.3) hiilidioksidin vuota mallinnetaan Hotelli Tornissa termisinä vuodenaikoina vuonna 2012. Hotelli Torni sijaitsee Helsingin keskustassa, jonne saapuu paljon ihmisiä erityisesti päiväsaikaan. Tämän seurauksena ihmisten aineenvaihdunta aiheuttaa yhtä suuria hiilidioksidipäästöjä kuin liikenne, molempien ollen noin $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ päivällä. Kasvillisuuden pienen määrän seurauksena fotosynteesin vaikutus on kesäisinkin pieni ollen noin $-4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Mitattu ja mallinnetut hiilidioksidin vuot ovat saman suuruisia ollen noin $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ aamupäivisin ja $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ iltaruuhkan aikana. Mittausten hajonta on myös Tornin mittauksissa suurta. Hiilidioksidin vuon malli ei pysty mallintamaan hajontaa eri päivien välillä, koska se todennäköisesti johtuu ihmisperäisten aktiviteettien muutoksista päivien välillä eikä kasvillisuudesta tai meteorologiasta. Kuitenkin malli toimii todella hyvin mallintamaan keskimääräistä päiväarvoa, jolloin vuoden yli lasketut vuositasot edustavat hyvin aluetta.

Kumpulassa ja Hotelli Tornissa mallitettuja päiväarvoja on verrattu mittauksiin taulukossa (4.1). Tilastot on jaettu termisiin vuodenaikoihin kuten aiemmissa kuvissa. Ihanteellisessa tilanteessa nRMSE ja MBE ovat lähellä nollaa ja R^2 lähellä ykköstä. nRMSE kuvaa mallin virhettä verrattuna mittauksiin. Taulukosta (4.1) nähdään kuinka kaikilla sektoreilla nRMSE saa suurimmat ja näin ollen huonoimmat arvonsa syksyisin (0.08-0.15). Muina vuodenaikoina ainoastaan kasvillisuussektorilla kesällä nRMSE on 0.10 ja muulloin se on tätä pienempi. Keskimäärin talvi näyttää malliutuvan parhaiten eri vuodenaajoista. Negatiiviset MBE arvot kertovat mallin aliarvoivan hiilidioksidin vuota. Suu-



Kuva 4.3: Mitattu ja mallitettu hiilidioksidin vuo ja sen komponentit termisinä vuodenaikoina vuonna 2012 Hotelli Tornissa. F_{CO_2} mitattu hiilidioksidin vuo ja harmailla alueilla mittauksen 25- ja 50-persentiilit, F_{CO_2} malli on mallitettu hiilidioksidin vuo ja sen eri komponentit: $F_{C,p}$ fotosynteesistä, $F_{C,r}$ soluhengityksestä, $F_{C,m}$ aineenvaihdunnasta, $F_{C,v}$ liikenteestä ja $F_{C,b}$ rakennusten lämmityksestä. Ku1: rakennussektori, KU2: tiesektori ja Ku3: kasvillisuussektori.

Taulukko 4.1: Hiilidioksidin vuon mallin evaluointitilastot verrattuna mittauksiin termisten vuodenaikojen päiväarvoista Kumpulán eri sektoreilla ja Hotelli Tornissa vuonna 2012. nRMSE on keskineliövirheen neliöjuuri, MBE keskihajarhvirhe, R^2 korrelaatiokerroin ja N käytettyjen tuntien lukumäärä.

| Vuodenaika | Alue | nRMSE | MBE ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) | R^2 | N (h) |
|------------|------|-------|--|-------|----------|
| Kevät | 1 | 0.06 | -0.40 | 0.14 | 342 |
| | 2 | 0.06 | -1.68 | 0.31 | 409 |
| | 3 | 0.04 | 0.19 | 0.01 | 814 |
| | HT | 0.02 | 2.78 | 0.04 | 1569 |
| Kesä | 1 | 0.04 | -2.58 | 0.38 | 372 |
| | 2 | 0.04 | -0.62 | 0.21 | 904 |
| | 3 | 0.10 | -0.16 | 0.56 | 1918 |
| | HT | 0.04 | -0.45 | 0.14 | 3042 |
| Syksy | 1 | 0.12 | -2.33 | 0.00 | 197 |
| | 2 | 0.08 | -0.70 | 0.04 | 228 |
| | 3 | 0.10 | -1.27 | 0.13 | 369 |
| | HT | 0.15 | 0.08 | 0.05 | 1578 |
| Talvi | 1 | 0.04 | -1.38 | 0.33 | 562 |
| | 2 | 0.05 | -0.43 | 0.60 | 1342 |
| | 3 | 0.02 | -1.05 | 0.20 | 1009 |
| | HT | 0.03 | 0.24 | 0.03 | 2111 |

Sektorit 1: Rakennussektori, 2: Tiesektori, 3: Kasvillisuussektori, HT: Hotelli Torni

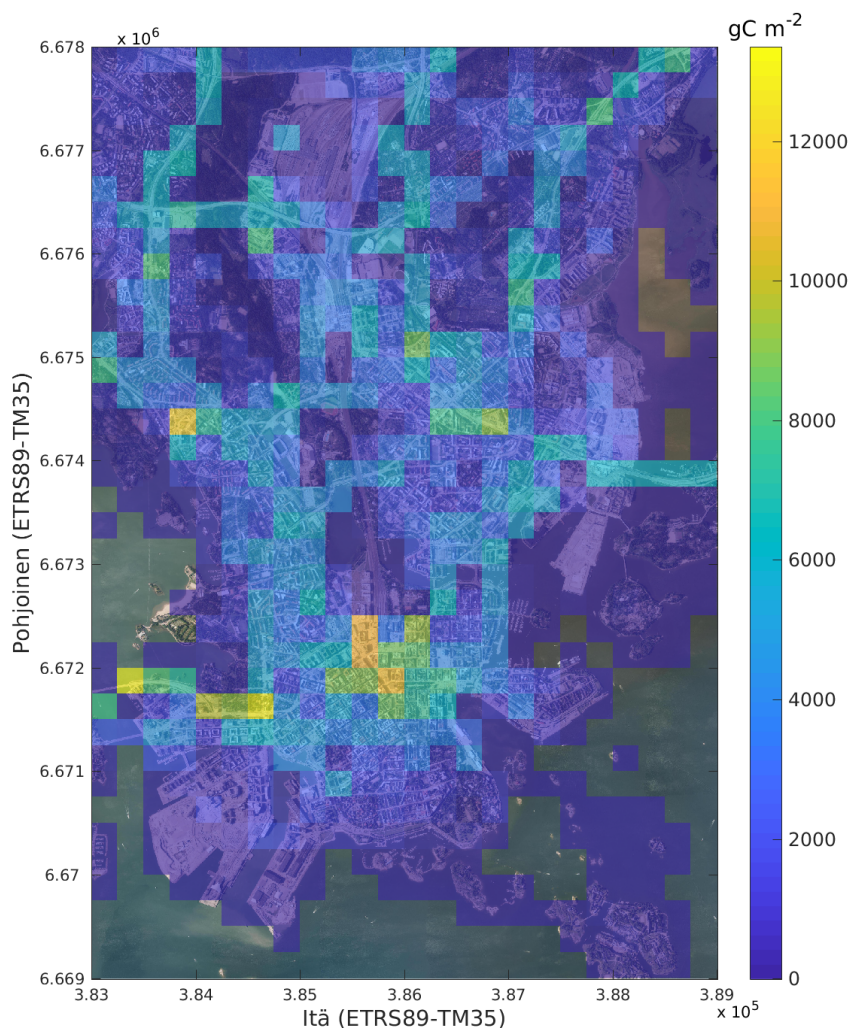
rinnaksi osaksi malli näyttää yliarvioivan hiilidioksidin vuota. Suurin aliarvio tapahtuu syksyllä rakennussektorilla ollen noin $-2.33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ja yliarvio $2.78 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

keväällä Hotelli Tornissa. Parhaiten malliutuvat kasvillisuussektori keväällä ja kesällä sekä Hotelli Torni syksyllä ja talvella. Korrelaatio mallin ja mittauksen välillä on on suuri, jos R^2 on lähellä yhtä. Parhaiten korreloivat kasvillisuussektorin kesä ollen 0.56 ja tie-sektorin talvi ollen 0.60. Kevät ja syksy korreloivat kaikkein huonoiten ollen jopa nolla syksyllä rakennussektorilla.

4.3 Alueellinen hiilidioksidin vuo

Ajan hiilidioksidin vuon mallia vuodelle 2012 alueellisesti Helsingissä kuvan (3.7a) mukaisesti. Kuvassa (4.4) hiilidioksidin CO_2 vuo on muutettu hiilen C vuoksi. Kuvasta nähdään, että tarkasteltava alue toimii vuositaseessa lähteenä koko alueelle. Mallitettavan alueen hiilidioksidipäästöt ovat yhteensä 91.3 kt C y^{-1} vuonna 2012. Hiilidioksidin vuo saa suurimmat arvonsa keskustassa, Meilahdessa ja Helsingin sisääntuloväylillä (yli $10000 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$). Kuvassa (4.5) on eroteltu hiilidioksidin vuon biogeeniset ja ihmisperäiset komponentit. Fotosynteesi toimii ainoana hiilidioksidin vuon nieluna, koska vesialueita ei mallineta. Mallitettavalla alueella fotosynteesi on voimakkainta Keskuspuiston alueella ($-1100 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$) suuren kasvillisuuden määrän seurauksena. Koko alueen fotosynteesin nielu oli vuonna 2012 $-16.2 \text{ kt C y}^{-1}$. Maaperän ja kasvillisuuden soluhengitys kumooa fotosynteesin vaikutusta ollen 18.1 kt C y^{-1} . Näin ollen biogeeniset komponentit toimivat lähteenä tällä alueella ollen 1.9 kt C y^{-1} . Helsingissä on lyhyt kasvukausi, joten fotosynteesi on aktiivista vain osan vuodesta. Soluhengitystä tapahtuu ympäri vuoden ollen kuitenkin heikompi talvella, jolloin ilma ja maaperä ovat kylmempiä. Kesällä päiväsaikaan fotosynteesi on suurempaa kuin soluhengitys, jolloin kasvillisuus voi toimia hiilidioksidin nieluna.

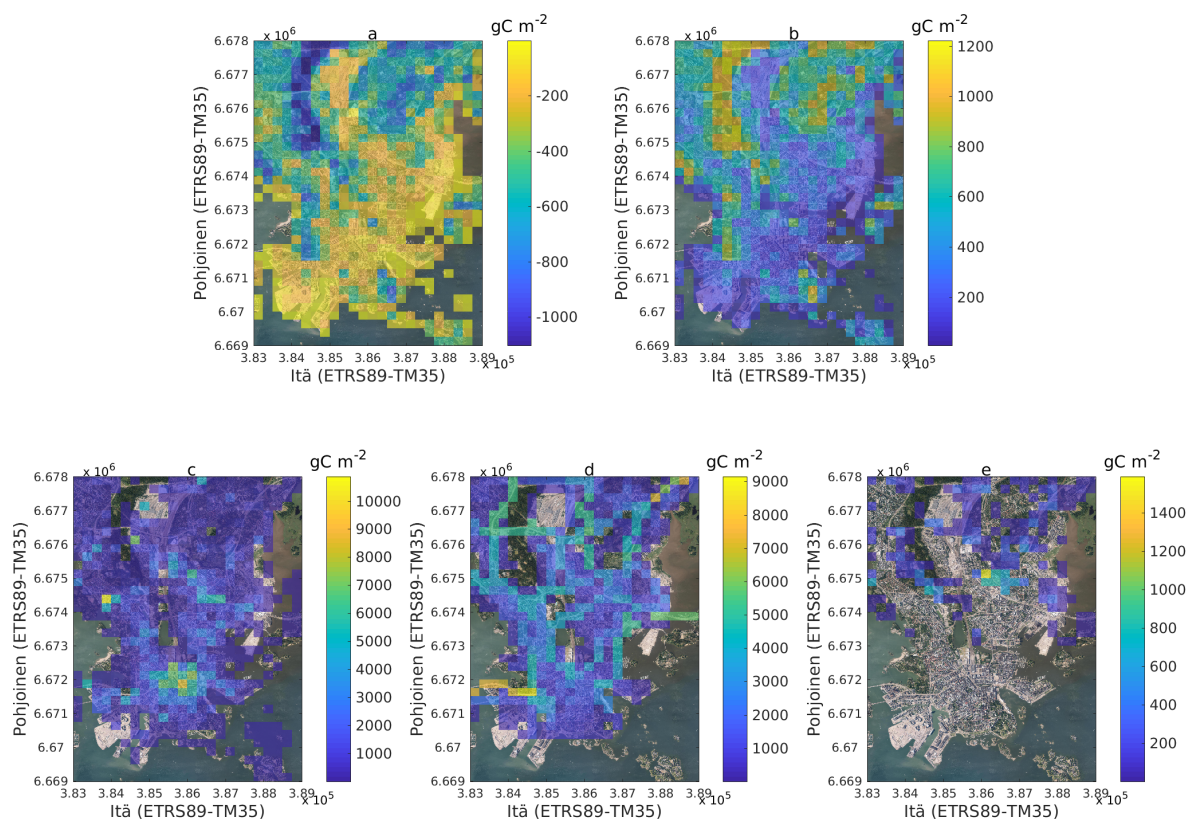
Helsingissä asuu paljon ihmisiä, mutta ihmisiä tulee myös töihin muualta ympäröivältä alueelta. Näin ollen ihmistiheys voi olla hyvin suuri päivisin ja heidän aiheuttama hiilidioksidin vuo merkittävä. Erityisesti keskustan alueella ja Meilahden sairaalassa nähdään ihmisten aineenvaihdunnan vaikutus hiilidioksidin vuohon. Meilahden väestötiheys on kuitenkin yliarvio päiväsaikaan, koska malli ei ota huomioon sairaalan kolmivuorotyötä. Tämä kuitenkin tasoittuu, kun lasketaan vuositaseita, koska yöaikainen väestötiheys on asetettu vain asukkaiksi eli hyvin pieneksi verrattuna työntekijöihin. Koko alueen ihmisten aineenvaihdunnan tuottamat hiilidioksidipäästöt ovat 31.6 kt C y^{-1} . Liikenne on selvästi suurin lähde hiilidioksidille tälle mallitettavalle alueelle. Suuret liikennemäärät sisääntuloväylillä kulkeutuvat muille alueille hillitymmiin. Koko alueen liikenteestä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ovat 56.3 kt C y^{-1} . Rakennuksien puun poltosta tulevat hiilidioksidin päästöt ovat hyvin pienet noin 1.6 kt C y^{-1} . Mallitettavalle alueelle täytyy kuitenkin lisätä Helsingin voimalaitoksien hiilidioksidipäästöt, jotka syntyvät esimerkiksi kivihiilen poltosta rakennuksien lämmitykseen kaukolämmöllä ja kulutussähköksi (1926



Kuva 4.4: Alueellinen hiilidioksidin vuo Helsingissä vuonna 2012.

kt CO₂-ekv. y⁻¹; HSY, 2018). Voimalaitoksien päästöissä on mukana myös muut kasvihuonekaasupäästöt, jotka on muokattu CO₂-ekvivalenteiksi. Jakamalla koko Helsingin hiilidioksidipäästöt tasaisesti Helsingin maa-alueelle (215.16 km²) saadaan mallialueen voimalaitoksien hiilidioksidipäästöistä noin 131.8 kt C y⁻¹. Tällöin koko alueen hiilidioksidipäästöt olisivat 221.6 kt C y⁻¹ ja rakennusten lämmityksestä tulevat hiilidioksidipäästöt olisivat merkittävin tekijä hiilidioksidin taseessa. Komponenttien osuudet hiilidioksidin vuositaseesta ovat tällöin: soluhengityksestä 8.2 %, fotosynteesistä 7.3 %, ihmisten aineenvaihdunnasta 14.3 %, liikenteestä 25.4 % ja rakennusten lämmityksestä 59.5 %.

Vielä vasta muutamissa tutkimuksissa on mallitettu hiilidioksidin vuota alueellisesti kaupungeissa varsinkin korkeammalla resoluutiolla ja usein silloinkin vain liikenteen avulla. Bostonin alueella USA:ssa on mallitettu liikenteestä tulevia hiilidioksidipäästö-



Kuva 4.5: Hiilidioksidin vuon eri komponentit vuonna 2012 Helsingissä. a) Fotosynteesi, b) soluhengitys, c) ihmisten metabolismi, d) liikenne ja e) rakennusten lämmitys.

jä alueellisesti $1 \times 1 \text{ km}^2$ hilakoolla (Bronfield et al., 2012). Bostonin keskustassa keskimäärin päivässä voi tulla yli $25000 \text{ kg CO}_2 \text{ km}^{-2}$ hiilidioksidia mikä on vuodessa noin 2500 g C m^{-2} . Keskimäärin Bostonin alueella on arvioitu tulevan hiilidioksidia 770 g C m^{-2} (Gately and Hutyra, 2017). Vastaavasti Helsingissä keskimäärin liikenne tuottaa hiilidioksidia 1030 g C m^{-2} ja maksimissaan noin 9150 g C m^{-2} . Bostonin alueen liikennepäästöt ovat siis samaa suuruusluokkaa kuin Helsingissä mallitetut. Norwichissa UK:ssa on mallinnettu liikenteen hiilidioksidipäästöjä alueellisesti ottamalla huomioon eri teiden liikennekuormat. Alueen (4000 ha) hiilidioksidipäästöt vuodessa on 69100 t CO_2 , jolloin aikaisempia arvoja vastaavaksi liikennepäästökseksi saadaan 460 g C m^{-2} (Nesjadkoorki et al., 2008). Alueellista hiilidioksidin vuota ihmisen aineenvaihdunnasta ei ole vastaavalla tavalla ennen mallinnettu. Moriwaki ja Kanda (2004) osoittivat kuitenkin kuinka tärkeä komponentti se voi olla kaupunkien keskustassa ollen 17-38 % kokonais hiilidioksidipäästöistä riippuen vuodenajasta Tokion asuinalueella Japanissa. Helsingissä osuus on hieman pienempi (14.3 %), mutta samaa suuruusluokkaa. Lontoon keskustassa ihmisperäisistä päästöistä ihmisten aineenvaihdunta on arvioitu olevan 14 %, liikenteen 70 % ja rakennuksien aktiviteetin 16 % (Björkegren and Grimmond, 2018). Vancouve-

rissa arvioitiin vastaavat luvut ihmisen aineenvaihdunnasta olevan 8 %, liikenteestä 47 %, rakennuksista 40 % ja lisäksi soluhengityksestä 5 %. Liikenteellä on näin ollen paljon suurempi merkittävyys Lontoossa ja Vancouverissa kuin Helsingissä. Helsingin seudun ympäristöpalvelut ovat arvioineet Helsingin hiilidioksidipäästöt tieliikenteestä (561.6 kt CO₂-ekv. y⁻¹; HSY, 2018) ja voimalaitoksista (1926 kt CO₂-ekv. y⁻¹; HSY, 2018). Tällöin liikenne tuottaa 22.6 % ja voimalaitokset 77.4 % Helsingin fossiilisista hiilidioksidipäästöistä. Mallitetun alueen fossiilisten hiilidioksidipäästöjen suhde on liikenteestä 29.7 % ja rakennuksista 70.3 %. Jälkikäteen lisätyt hiilidioksidipäästöt voimalaitoksista voi olla aliarvio mallitettavan alueen todellisesta kulutuksesta, sillä alue on paljon tiheämpään asutettua kuin muu Helsinki. Sillä saadaan kuitenkin suhteellisen saman arvoinen suhde kuin koko Helsingissä on arvioitu.

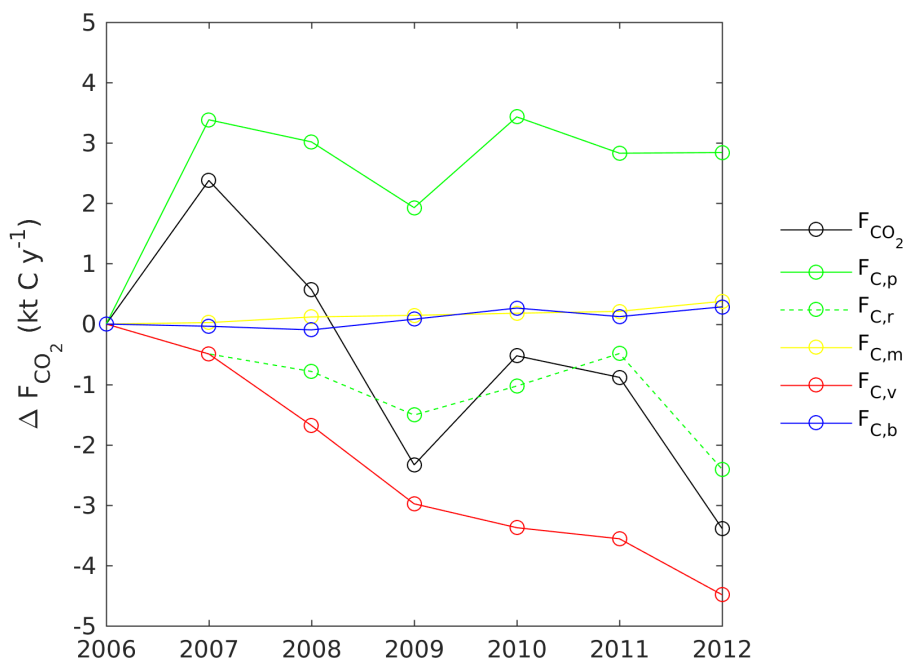
4.3.1 Hiilidioksidin vuon kehitys eri vuosina

Hiilidioksidin vuositase muuttuu vuosien välillä sekä ilmaston vaikutuksesta kasvillisuuden aktiivisuuteen että ihmisten aktiviteettejen muuttuessa. Hiilidioksidin vuon ja sen eri komponenttien vuositaseet mallinnettavalla alueella vuosina 2006-2012 näkyvät taulukossa (4.2). Hiilidioksidin vuositaseiden eri komponenttien muutos verrattuna ensimmäiseen vertailuvuoteen eli vuoteen 2006 näkyy kuvassa (4.6). Liikenteen ja kasvillisuuden muutokset vuosien välillä on samaa suuruusluokkaa eli noin pari kilotonnia hiiltä vuodessa. Metabolismin ja rakennusten lämmityksen ero vuosien välillä on alle puoli kilotonnia hiiltä. Liikenteestä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ovat vähentyneet melkein 4.5 kt C y⁻¹ vuosien aikana pelkästään liikennemääriä vähentämällä. Tässä työssä ei ole huomioitu mahdollisia päästökertoimen muutoksia. Ihmisen aineenvaihdunnasta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ovat kasvaneet 0.37 kt C y⁻¹ ja rakennusten lämmityksestä aiheutuvat 0.28 kt C y⁻¹ ainoastaan asukkaiden määrän kasvun seurauksesta. Kasvillisuuden muutoksiin on vaikuttanut ainoastaan vallitsevan vuoden meteorologia. Fotosynteesin hiilidioksidin nielun ero vuosien välillä on isoimmillaan 3.44 kt C y⁻¹. Soluhengityksen hiilidioksidipäästöjen vastaava ero on pienempi eli 2.4 kt C y⁻¹. Biogeeniset hiilidioksidipäästöt ovat vaihdelleet 1.44 kt C y⁻¹ ja 4.33 kt C y⁻¹ välillä, mutta ollen keskimäärin 2.97 kt C y⁻¹. Kokonaishiilidioksidipäästöt ovat olleet laskussa liikennemäärien vähene-
misen seurauksena, mutta samanaikaisesti biogeeniset tekijät muuttuvat vuosittain riippuen vuoden lämpötilasta, jolloin laskeva trendi ei näy niin selvästi kokonaispäästöissä. Biogeeniset komponentit olivat molemmat suurimmillaan vuonna 2006, jolloin oli keski-
vertoa lämpimämpi kesä (IL, 2018). Myös vuosi 2011 oli yksi lämpimämmistä vuosista (IL, 2018) ja näin ollen soluhengityksestä tuleva hiilidioksidi oli keski-
vertoa suurempaa. Fotosynteesi on heikoin (absoluuttisesti suurin luku) vuonna 2010, koska lyhytaaltoista auringonsäteilyä on tullut vähemmän maanpinnalle. Vuoden 2010 kesä oli keskimääräistä

lämpimämpi ja kosteampi, johon liittyy paljon pilvisyyttä ja rajuilmoja (Mäntykangas, 2017).

Taulukko 4.2: Mallinnettavan alueen hiilidioksidin komponenttien kehitys eri vuosina (kt C y^{-1}). F_{CO_2} mallitettu hiilidioksidin vuo ja sen eri komponentit: $F_{C,p}$ fotosynteesistä, $F_{C,r}$ soluhengityksestä, $F_{C,m}$ aineenvaihdunnasta, $F_{C,v}$ liikenteestä ja $F_{C,b}$ rakennusten lämmityksestä.

| Vuosi | F_{CO_2} | $F_{C,p}$ | $F_{C,r}$ | $F_{C,m}$ | $F_{C,v}$ | $F_{C,b}$ |
|-------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2006 | 94.72 | -19.07 | 20.50 | 31.18 | 60.81 | 1.30 |
| 2007 | 97.10 | -15.86 | 20.01 | 31.20 | 60.31 | 1.26 |
| 2008 | 95.29 | -16.05 | 19.72 | 31.30 | 59.12 | 1.20 |
| 2009 | 92.39 | -17.14 | 19.00 | 31.32 | 57.83 | 1.38 |
| 2010 | 94.19 | -15.63 | 19.48 | 31.36 | 57.43 | 1.56 |
| 2011 | 93.84 | -16.24 | 20.01 | 31.39 | 57.25 | 1.42 |
| 2012 | 91.33 | -16.22 | 18.10 | 31.55 | 56.32 | 1.58 |



Kuva 4.6: Hiilidioksidin vuositasen kehitys. Tarkasteltavasta vuodesta vähennetty ensimmäinen vuosi 2006. F_{CO_2} mallitettu hiilidioksidin vuo ja sen eri komponentit: $F_{C,p}$ fotosynteesistä, $F_{C,r}$ soluhengityksestä, $F_{C,m}$ aineenvaihdunnasta, $F_{C,v}$ liikenteestä ja $F_{C,b}$ rakennusten lämmityksestä.

HSY:n inventaarioista voidaan arvioida koko Helsingin liikenteen ja rakennuksien hiilidioksidipäästöjen kehitystä (taulukko 4.3). Mallin antamaa rakennusten lämmitystä ei voi verrata HSY:n inventaarioihin, koska päästöt tulevat eri lähteistä. Inventaa-

rion mukaan Helsingissä rakennusten hiilidioksidipäästöt ovat olleet laskussa ja Helsingin kaukolämmön tuotanto on pidemmällä aikavälillä siirtymässä vähäpäästöisemmäksi (Lounasheimo, 2012b). Vuoden 2010 sähkönkulutuksen päästöt kasvoivat keskimääräistä kylmemmän talven seurauksena (Lounasheimo, 2011). Mallissa liikenteen päästöt ovat vähentyneet, koska Helsingin keskustan liikennemäärät ovat vähentyneet. Muualla Helsingissä liikennemäärät ovat kasvaneet, mutta se ei näy HSY:n inventaariossa, koska liikennevälineiden ominaishiilidioksidipäästöt ovat vähentyneet (Lounasheimo, 2012b).

Taulukko 4.3: HSY:n hiilidioksidipäästö inventaariot (kt CO₂-ekv. y⁻¹) asumis- ja palvelusektorien kaukolämmöstä ja kulutussähköstä sekä tieliikenteestä vuosina 2006-2012.

| Vuosi | Rakennukset | Liikenne |
|-------|-------------|----------|
| 2006 | 2424 | 608 |
| 2007 | 2228 | 626 |
| 2008 | 1928 | 580 |
| 2009 | 1945 | 564 |
| 2010 | 2077 | 583 |
| 2011 | 1961 | 560 |
| 2012 | 1926 | 562 |

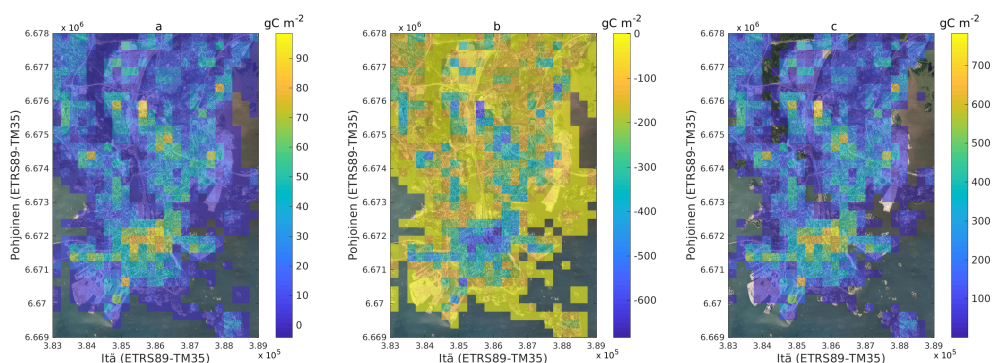
4.4 Skenaarioajot

Viherkatot ja aurinkopaneelit ovat molemmat ilmasto- ja ympäristöystävällisiä vaihtoehtoja sijoittaa rakennuksien katoille kaupungeissa. Viherkattojen päälle voi sijoittaa aurinkopaneeleja, mutta niin on tehty vielä hyvin harvoin. Tällöin viherkatto voisi hyötyä aurinkopaneelien tuomasta varjostuksesta ja aurinkopaneelit viherkattojen aiheuttamasta jäädytyksestä (Schindler et al., 2016). Usein molempia ei kuitenkaan voi soveltaa yhtä aikaa samaan kohtaan ja näin ollen tässä työssä yhdessä kohtaa voi olla vain viherkattoa tai aurinkopaneeleja. Tarkastelen kummankin ratkaisun potentiaalia vähentää hiilidioksidia ilmakehässä joko kasvillisuuden fotosynteesiä lisäämällä tai aurikoenergian säästämien hiilidioksidipäästöjen kannalta. Malliajoissa asetan mallialueelle Helsingissä kaikki potentiaaliset aurinkopaneelit ja viherkatot. Tarkastelen ensin tilannetta, jossa ensisijaisesti katoille laitetaan potentiaaliset viherkatot sekä toiseksi tilannetta, jossa potentiaaliset aurinkopaneelit ovat ensisijaisia.

Viherkatot

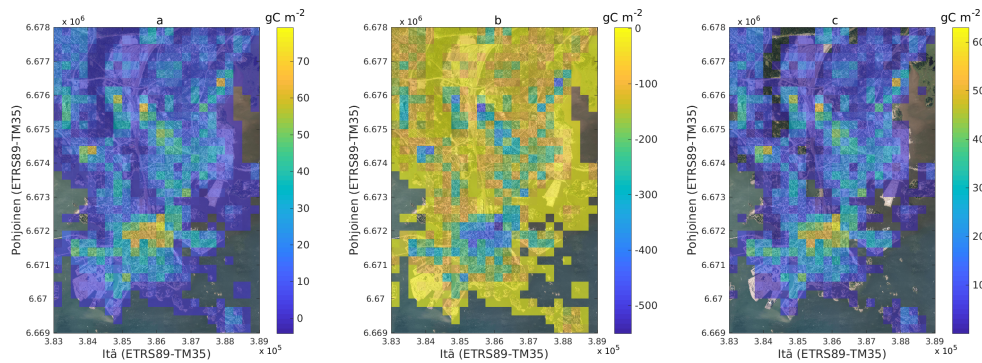
Mallialueen rakennuksista 69 % on sopivia viherkatoiksi. Kaikkien potentiaalisten viherkattojen (6.1 km²) muuttaminen nurmeksi kasvattaa hiilidioksidipäästöjä 0.9 kt C vuo-

tena 2012. Fotosynteesin hiilidioksidin nielu kasvoi 5.9 kt C ja soluhengityksen vuo 6.8 kt C verrattuna perusajoon. Kasvillisuuden lisäämisen aiheuttamaan hiilidioksidipäästöjen kasvuun kannattaa kuitenkin suhtautua varauksella. Viherkattojen maaperän soluhengitys ei välttämättä mallitu oikein sillä maaperää on paljon ohuempi kerros katolla kuin mitä sitä olisi maassa. Helsingissä viherkatot ovat yleensä maksaruohoa tai niittyä. Maksaruoholle riittää noin 5 cm:n kerros alustaa ja niittymäisille kasveille 15-25 cm (Gabrych et al., 2016). Soluhengitykselle laskettu lämpötilariippuvuus on tehty Helsingissä vain maanpäällä eikä oikeiden viherkattojen päällä. Näin ollen mallitettu soluhengitys viherkatoille voi olla yliarvio. Kasvillisuuden fotosynteesi ja soluhengitys riippuvat myös mitä kasvillisuutta viherkatoille laitetaan, mutta tällä hetkellä en huomioi mallissa eri lajien erillaisuutta. Kasvillisuuden lisääminen kasvattaa fotosynteesin määrää kaupungissa ja näin ollen enemmän hiilidioksidia sitoutuu kasvillisuuteen. Suurimmat muutokset tapahtuvat Helsingin keskustan alueella (kuva 4.7), jossa on paljon tasaista kattoa ja alunperin vähemmän kasvillisuutta. Fotosynteesin hiilidioksidin nielu on keskustassa suurimmillaan jopa 684 g C m^{-2} suurempi vuodessa, kun kaikki potentiaaliset viherkatot ovat nurmea. Keskimäärin hiilidioksidin nielu on mallialueella $110 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ suurempi. Verrattuna kasvillisuuden vuosien väliseen muutokseen, potentiaalisten viherkattojen lisäyksellä on samansuuruinen vaikutus hiilidioksidin vuositaseseen.



Kuva 4.7: Viherkatto skenaarioajosta vähennetty perusajo a) kokonais hiilidioksidille b) fotosynteesille ja c) soluhengitykselle.

Potentiaalisten viherkattojen korvaaminen potentiaalisilla aurinkopaneeleilla vähentää viherkattojen määrän 4.0 km^2 . Jäljelle jäävät viherkatot kasvattavat hiilidioksidipäästöjä 0.6 kt C vuotena 2012, jossa fotosynteesin hiilidioksidin nielu kasvoi 4.2 kt C ja soluhengityksen lähde 4.8 kt C . Fotosynteesin hiilidioksidin vuo on suurimmillaan 550.6 gC m^{-2} suurempi kuin perusajossa (kuva 4.8). Kuitenkin keskimääräinen muutos mallialueella on 78.4 gC m^{-2} , mikä on paljon pienempi verrattuna toiseen skenaarioajoon, jossa viherkatot olivat ensisijaisia. Tässä skenaariossa onkin noin 30 % vähemmän viherkattoja ja näin ollen niiden vaikutus myös paljon pienempi.



Kuva 4.8: Aurinkopaneeli skenaarioajosta vähennetty perusajo a) Kokonais hiilidioksidille b) fotosynteesille ja c) soluhengitykselle.

Aurinkopaneelit

Pääkaupunkiseudulla on suuri potentiaali käyttää aurinkoenergiaa. Keskimääräinen Helsinkiin saapuva auringonsäteily on vuodessa noin 980 kWh m^{-2} (Motiva, 2018a), joka on samaa suuruusluokkaa kuin mitä Pohjois-Saksassa saadaan (Lindfors et al., 2014). Suomessa auringonsäteily painottuu kesäkuukausille ja uskomus siitä, että Suomessa ei voitaisi käyttää aurinkoenergiaa pimeiden talvien takia on muuttumassa. Aurinkoenergian lisääminen Suomessa tukisi hiilineutraalisuuden tavoittelua ja uusiutuvien energialähteiden lisäämistä. Tällä hetkellä aurinkoenergian hyötykäyttö on vasta alussa ja aurinkoenergian hinta kaukoenergiaan nähden on vielä liian kallista.

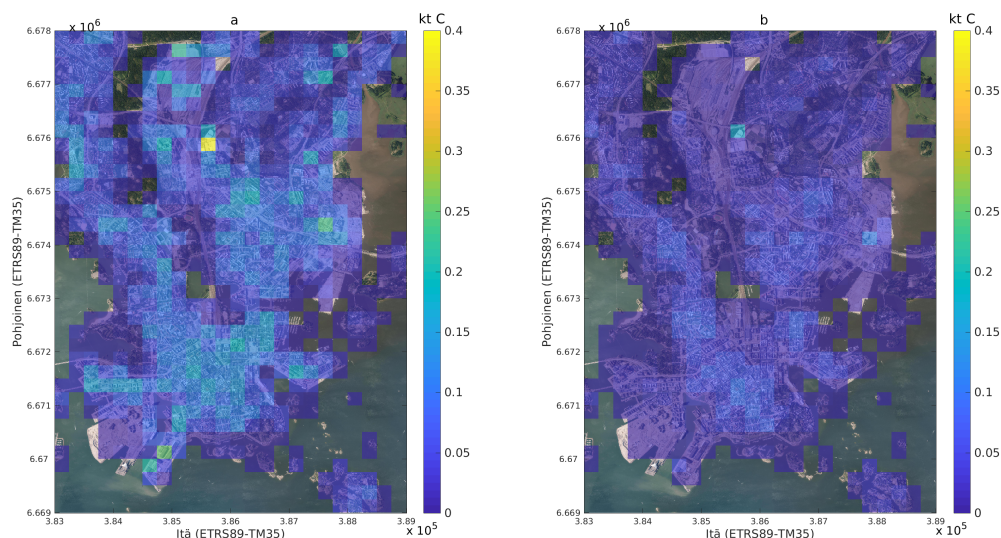
Aurinkopaneelien tuottama energiamäärä pystytään arvioimaan kertomalla Helsingin saama keskimääräinen auringonsäteily vuodessa (980 kWh m^{-2}) aurinkopaneelien hyötysuhteella (16-21.5 %, CER, 2018). Aurinkopaneeleilla säästetty hiilidioksidin määrä saadaan arvioitua kertomalla aurinkopaneeleilla tuotettu energiamäärä kaukolämmön ja sähkönkulutuksen keskimääräisellä hiilidioksidin päästökertoimella. Kaukolämmön hiilidioksidin päästökerroin on piententynyt vuosien varrella ollen $217 \text{ kg CO}_2 (\text{MWh})^{-1}$ vuonna 2012 (Motiva, 2012) ja $188 \text{ kg CO}_2 (\text{MWh})^{-1}$ vuonna 2016 (Motiva, 2018b). Myös sähkönkäytön hiilidioksidin päästökerroin on piententynyt vuosien 2012 ($210 \text{ kg CO}_2 (\text{MWh})^{-1}$, Motiva, 2012) ja 2016 ($164 \text{ kg CO}_2 (\text{MWh})^{-1}$, Motiva, 2018b) välillä. Käyttäen vuoden 2012 HSY:n inventaarion kaukolämmön (67.45 %) ja sähkönkulutuksen (32.55 %) osuuksia painottamaan päästökertoimia saadaan vuodelle 2012 $214.7 \text{ kg CO}_2 (\text{MWh})^{-1}$ ja 2016 $180.2 \text{ kg CO}_2 (\text{MWh})^{-1}$ hiilidioksidin päästökertoimet. Helsingissä on rakennusten katoilla potentiaallista aurinkopaneelien sijaintia jopa 7.45 km^2 , jotka voisivat tuottaa energiaa tässä työssä käytettävillä hyötysuhteilla noin 1168-1570 GWh ja vähentää kaukolämmön ja sähkönkulutuksen tuottamia hiilidioksidipäästöjä 57-92 kt C, riippuen minkä vuoden päästökertoimia käytetään. Vähennys olisi 3-5 % HSY:n arvioimasta rakennuksien inventaariosta vuonna 2012. HSY:n inventaariot ovat kuitenkin

vain CO₂-ekvivalentteja, jolloin itse hiilidioksidin päästöt ovat matalammat. Kaukolämpöä tuotettiin HSY:n mukaan Helsingissä vuonna 2012 arviolta noin 5527 GWh, josta voidaan arvioida pelkät hiilidioksidipäästöt kaukolämmön hiilidioksidipäästökertoimella. Tällä määrällä kaukolämpöä aiheutetaan näin ollen noin 327 kt C y⁻¹ hiilidioksidipäästöjä. Mallitettavalle alueelle tämä tarkoittaisi noin 82 kt C y⁻¹ hiilidioksidipäästöjä kaukolämmöstä. Pelkällä vuoden 2012 kaukolämmön hiilidioksidipäästökertoimella laskettuna kaukolämmön korvaaminen aurinkopaneeleilla vähentäisi kaukolämmön hiilidioksidipäästöjä 21-28 % koko Helsingin alueella.

Potentiaalisia aurinkopaneeleja on mallitettavalla alueella 3.0 km², joiden käyttäminen tuottaisi vuodessa energiaa 470-632 GWh riippuen aurinkopaneelien hyötysuhteesta. Näin ollen vuoden 2012 kaukolämmön hiilidioksidin päästökerrointa käyttäen, hiilidioksidipäästöt olisivat vuodessa 27.5-37.0 kt C vähemmän ja vuoden 2016 päästökerrointa käyttäen 23.1-31.0 kt C vähemmän. HSY:n CO₂-ekv. inventaarioista päästövähennys olisi mallialueen rakennuksista 20.9-28.1 % ja ottamalla huomioon ainoastaan kaukolämmön CO₂-päästöjen vähennys olisi 33.6-45.1 %. Kuvassa (4.9a) on potentiaalisilla aurinkopaneeleilla saavutetun hiilidioksidipäästön vähennyksen alueellinen jakauma. Suurimmillaan yhdessä hilassa on tuotettu aurinkoenergiaa niin paljon, että 0.4 kt C y⁻¹ hiilidioksidia säästyisi. Muualla potentiaaliset aurinkopaneelit ovat jakautuneet tasaisemmin ja hiilidioksidia säästyisi noin 0.1-0.15 kt C y⁻¹.

Viherkattojen lisäämisen jälkeen jäljelle jääviä aurinkopaneeleja on alueella 0.9 km², jotka tuottaisivat tällä alueella energiaa 141-190 GWh. Näin ollen vuoden 2012 päästökerrointa käyttäen, hiilidioksidipäästöt olisivat 8.3-11.1 kt C vähemmän ja vuoden 2016 päästökerrointa käyttäen 6.9-9.3 kt C vähemmän verrattuna perusajoon. CO₂-ekvivalentista vähennys olisi vuonna 2012 6.3-8.4 % ja pelkän kaukolämmön vähennys noin 10.1-13.5 %. Ilmastolle on tietenkin ystävällisempää, että kaukolämmön ja sähkönkulutuksen hiilidioksidipäästökerroin on pienentynyt, vaikka tämän seurauksena aurinkopaneeleilla saatu hiilidioksidin vähentämisen hyöty pienenee. Kuitenkin voidaan myös olettaa, että aurinkopaneelien hyötysuhde paranee koko ajan, jota tässä työssä ei huomioitu erikseen vuosien välillä. Kuvasta (4.9b) nähdään viherkattojen sijoittamisen vaikutus aurinkopaneelien alueelliseen jakaumaan. Alueellinen jakauma on muuttunut painottuen enemmän keskustan alueelle, jossa aurinkopaneelien säästämät hiilidioksidipäästöt ovat noin puolet pienemmät ollen noin 0.1 kt C y⁻¹. Muualla mallialueella potentiaalisia aurinkopaneeleja on jäljellä hyvin vähän.

Helsingissä aurinkopaneelien hyödyt ovat moninkertaiset viherkattoihin nähden. Potentiaalisten sijaintien perusteella aurinkopaneelien on mahdollista vähentää kulutussähköä ja kaukolämmöstä jopa 37.0 kt C y⁻¹ mikä on 28 % mallialueen rakennusten arvioidusta päästöistä. Vastaavasti viherkatoilla on mahdollista kasvattaa hiilidioksidin nielua 5.9 kt C y⁻¹, vaikkakin kokonaisuudessaan biogeeninen hiilidioksidin vaihto kasvaisi 0.9



Kuva 4.9: Laskettu potentiaalisilla aurinkopaneeleilla saavutettu vähennys kaukolämmön ja sähkönkulutuksen hiilidioksidipäästöissä a) kaikilla potentiaalisilla aurinkopaneeleilla ja b) viherkattojen lisäyksestä jäljelle jäävillä potentiaalisilla aurinkopaneeleilla vuonna 2012.

kt C y^{-1} . Kuitenkin pelkkä hiilidioksidin nielukin on noin 84 % vähemmän kuin mitä aurinkopaneeleilla voitaisi saavuttaa. Potentiaalisia aurinkopaneelin sijainteja oli myös mallialueella noin 60 % vähemmän, joten ne vähentävät hiilidioksidipäästöjä enemmän kohti pinta-alaa. Mallialueen yhteenlasketut potentiaalit vähentää hiilidioksidia olivat viherkattoja suosivassa ajossa 10.2 kt C y^{-1} ja aurinkopaneeleja suosivassa 36.4 kt C y^{-1} . Näin ollen Helsingin keskustassa kannattaisi suosia aurinkopaneeleja viherkattojen sijaan. Toisaalta aurinkopaneelien hyödyn laskemisessa voi tulla paljon virhettä, koska säteilymäärät eri katoilla vaihtelevat ja tässä työssä käytettiin vain keskimääräistä Helsingille arvioitua auringon säteilyä vuodessa. Viherkattoja mallintaessa virhettä antaa soluhengityksen parametrisointi.

5. Johtopäätökset

Lisäsin tässä työssä hiilidioksidin vaihdon komponentit kaupungeille suunniteltuun meteorologiseen SUEWS-pintavuomalliin. Uusi malli ottaa huomioon sekä ihmisperäiset että biogeeniset hiilidioksidin vuon komponentit ja näin ollen kykenee mallintamaan kaupunkien moninaista rakennetta. Uudella mallilla pystytään myös kuvaamaan hiilidioksidin vuota korkealla paikallisella (250 m) ja ajallisella (1 h) resoluutiolla. Tämän työn tavoitteena oli tutkia uuden mallin toimivuutta ja selvittää sen avulla eri komponenttien osuuksia hiilidioksidin vuositaseesta $6 \times 9 \text{ km}^2$ kokoisella mallialueella Helsingissä. Lisäksi tavoitteena oli tutkia Helsingin potentiaalia vaikuttaa hiilidioksidin vuohon viherkatoilla ja aurinkopaneeleilla.

Vertasin uutta hiilidioksidin vuon mallia pyörrekovarianssi-menetelmällä tehtyihin hiilidioksidin vuon mittauksiin Kumpulassa ja Hotelli Tornissa. Hiilidioksidin vuon biogeenisten ja ihmisperäisten komponenttien vuorokausikäyttäytyminen Kumpulassa ja Helsingin keskustassa vertautuu todella hyvin mittauksiin. Kasvillisuuden fotosynteesi voi toimia hiilidioksidin nieluna kesäisin Kumpulassa, lieventäen ihmisperäisten päästöjen vaikutusta. Liikenteen aamu- ja iltapäiväruuhkat malliutuvat hyvin molemmilla mitausasemilla ja keskustan suuret ihmismäärät päivällä aiheuttavat yhtä suuren lähteen hiilidioksidille kuin liikenne.

Mallialueen hiilidioksidin vuositaseeksi saatiin $221.6 \text{ kt C y}^{-1}$ eli $41.0 \text{ t C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ vuonna 2012. Hiilidioksidin vuositaseesta soluhengityksestä on 8.2 %, fotosynteesistä 7.3 %, ihmisten aineenvaihdunnasta 14.3 %, liikenteestä 25.4 % ja rakennusten lämmityksestä ja käytösähköstä 59.5 %. Hiilidioksidin alueellista jakaumaa hallitsee liikenteen päästöt ja ihmisten aineenvaihdunta. Ihmisen aineenvaihdunnan voi olettaa kuuluvan luonnolliseen hiilidioksidin vaihtoon, mutta se täytyy ottaa huomioon, kun mallia verrataan mittauksiin. Helsingissä ihmisten liikkuvuus on jopa asumistiheyttä tärkeämpi sillä ihmisiä saapuu töihin ympäröivältä alueelta keskustaan paljon enemmän kuin mitä siellä asuu. Liikenteen päästöt painottuvat Helsingin sisääntuloväylille, joiden suuret liikennemäärät jakautuvat muualle tasaisemmin. Liikenteen päästöt Helsingissä ovat mallialueella pudonneet liikennemäärien vähentyessä. Todellisuudessa hiilidioksidipäästöt olisivat vielä pienemmät, koska hiilidioksidin päästökertoimet ovat pienentyneet vuosien aikana, mitä en huomionut tässä työssä. Liikenteen päästöt ovat pudonneet noin 1 % vuosivauhtia pel-

kästään liikennemääriä vähentämällä. Kuitenkin koko Helsingin liikennemäärät ovat kasvussa. Rakennuksien aiheuttamat hiilidioksidipäästöt eivät ole niin jakautuneet mallissa, koska ne ovat hyvin pienet. Tuloksiin lisättiin jälkikäteen HSY:n inventaarioista arvioitu kaukolämmön ja kulutussähkön aiheuttamat CO₂-ekvivalenttipäästöt, joista nähdään rakennuksien ja liikenteen päästöjen väheneminen vuosien aikana. Liikenteen päästöjen väheneminen johtuu suurimmaksi osaksi ajoneuvojen ominaishiilidioksidipäästöjen pienenemisestä.

Hiilidioksidin vuo on lisätty SUEWS-malliin, jotta erilaisia kaupunkisuunnittelustrategioita voitaisiin tutkia hiilidioksidin kannalta. HSY on määrittänyt sekä potentiaalisten viherkattojen että aurinkopaneelien sijainnit ja näitä mallintamalla arvioin niiden potentiaalia vähentää tai kompensoida hiilidioksidipäästöjä Helsingissä. Muutin SUEWS:ssa kaikki potentiaaliset viherkatot rakennuksista nurmikoksi ja tällöin hiilidioksidin vaihto kasvoi 0.9 kt C y⁻¹. Soluhengityksen lähde kasvoi enemmän (6.8 kt C y⁻¹) kuin fotosynteesin nielu (5.9 kt C y⁻¹), mutta soluhengityksen mallintamiseen kannattaa suhtautua varauksella sillä se voi olla yliarvio. Tällöin viherkatoilla on mahdollisuus toimia myös pienenä hiilidioksidin nieluna, vaikka kokonaisuudessaan mallialueen kasvilisuus ja maaperä toimisi luultavasti hiilidioksidin lähteenä. Jäljelle jäävät potentiaaliset aurinkopaneelit säästäisivät Helsingin voimalaitosten hiilidioksidipäästöistä 11.1 kt C y⁻¹ ja yhteenlaskettu hyöty olisi 10.2 kt C y⁻¹. Aurinkopaneelien vaikutus on paljon suurempi kuin viherkattojen, vaikka viherkattoja oli paljon enemmän tässä tilanteessa. Viherkattojen biogeeniset lähteet ovat kuitenkin melkein yhtä suuret kuin nielut, jolloin viherkattojen vaikutus on hyvin pieni. Tarkastelin myös tilannetta, jossa potentiaaliset aurinkopaneelit olivat ensisijaisia ja jäljelle jääville katoille asetettiin potentiaaliset viherkatot. Tällöin hiilidioksidin vaihto kasvoi 0.6 kt C y⁻¹, mutta aurinkopaneelit vähentäisivät voimalaitosten päästöjä jopa 37.0 kt C y⁻¹, joten yhteenlaskettu hyöty olisi 36.4 kt C y⁻¹ ja näin ollen aurinkopaneelit voisivat potentiaalisesti vähentää hiilidioksidipäästöjä enemmän Helsingissä. Viherkattojen hyödyt liittyvätkin enemmän kaupunkien ilmanlaatuun ja tulvien hillitsemiseen kuin hiilidioksidin vähentämiseen, vaikka pienempikin vaikuttaminen hiilidioksidin vuositaseeseen on hyödyksi. Ihmisperäiset päästöt kaupungeissa ovat kuitenkin niin valtavia, että ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi tärkeintä olisi vähentää suoraan ihmisten aiheuttamia päästöjä. Aurinkopaneelien käyttö vähentää selvästi fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja näin ollen vähentää myös kaupunkien hiilidioksidipäästöjä. Paras ratkaisu olisi, jos aurinkopaneelija ja viherkattoja sijoitettaisiin päällekkäin, jotta molempien ratkaisujen hyödyt toteutuisivat. Kaikkien potentiaalisten viherkattojen ja aurinkopaneelien toteuttaminen Helsingissä ei kuitenkaan koskaan tule tapahtumaan. On kuitenkin hyödyllistä tutkia molempien ratkaisujen vaikutusta hiilidioksidiin ja Helsingin potentiaalia käyttäen näitä ratkaisuja. Helsingin kaupunki on kiinnostunut ja alkanut asentamaan lisää viherkattoja ja aurinkopaneelija Helsingin rakennusten katoille.

Ilmastolle ystävällisten ratkaisujen tutkiminen on hyödyllistä myös edistämään näitten ratkaisujen toteuttamista käytännössä.

Tässä työssä keskityttiin Helsingin keskustan alueeseen, mutta olisi mielenkiintoista tutkia koko Helsingin hiilidioksidin alueellista vaihtoa ja kuinka potentiaaliset aurinkopaneelit ja viherkatot kykenisivät vaikuttamaan siihen isommassa mittakaavassa. Koko kaupungin tutkiminen mahdollistaisi myös mallivertailun erinäisten tahojen julkaisemiin päästöinventaarioihin.

Kiitokset

Kiitän Leena Järveä ja Timo Vesalaa työn ohjaamisesta ja tarkastamisesta. Kiitän myös Tuuli Toivosta ihmisten liikkuvuusdatasta ja Sue Grimmondia käyttämästäni SUEWS-mallista. Lisäksi kiitän ICOS-Suomea Kumpulan mittauksista ja Hotelli Tornia keskustan mittauksista. Lopuksi kiitän myös Helsingin kaupunkia ja HSY:tä avoimen datan julkaisemisesta.

Kirjallisuutta

- M. Aubinet, T. Vesala, and D. E. Papale. *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer Science & Business Media., 2012.
- V. Bellucco, S. Marras, C. Grimmond, L. Järvi, C. Sirca, and D. Spano. Modelling the biogenic co₂ exchange in urban and non-urban ecosystems through the assessment of light-response curve parameters. *Agricultural and Forest Meteorology*, 236:113–122, 2017.
- A. Björkegren and C. S. B. Grimmond. Net carbon dioxide emissions from central london. *Urban Climate*, 23:131–158, 2018.
- M. N. Brondfield, L. R. Huttyra, C. K. Gately, S. M. Raciti, and S. A. Peterson. Modeling and validation of on-road co₂ emissions inventories at the urban regional scale. *Environmental pollution*, 170:113–123, 2012.
- J. A. Businger and S. P. Oncley. Flux measurement with conditional sampling. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7(2):349–352, 1990.
- CER. Clean energy reviews, highest quality and most efficient solar panels - solar panel efficiency. *Viitattu: 22.11.2018*, 2018. URL <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/best-quality-solar-panels-manufacturers>.
- B. Crawford, C. S. B. Grimmond, and A. Christen. Five years of carbon dioxide fluxes measurements in a highly vegetated suburban area. *Atmospheric Environment*, 45(4): 896–905, 2011.
- S. M. Decina, L. R. Huttyra, C. K. Gately, J. M. Getson, A. B. Reinmann, A. G. S. Gianotti, and P. H. Templer. Soil respiration contributes substantially to urban carbon fluxes in the greater boston area. *Environmental pollution*, 212:433–439, 2016.
- L. Flanagan, L. Wever, and P. Carlson. Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology*, 8:599–615, 2002.

- J. Fuhrer. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 97(1–3):1–20, 2003.
- M. Gabrych, D. J. Kotze, and S. Lehvavirta. Substrate depth and roof age strongly affect plant abundances on sedum-moss and meadow green roofs in Helsinki, Finland. *Ecological Engineering*, 86:95–104, 2016.
- C. Gately, L. Huttyra, S. Peterson, and I. Wing. Urban emissions hotspots: Quantifying vehicle congestion and air pollution using mobile phone GPS data. *Environmental Pollution*, 229:496–504, 2017.
- C. K. Gately and L. R. Huttyra. Large uncertainties in urban-scale carbon emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(20), 2017.
- C. Grimmond and T. Oke. Urban water balance 2: results from a suburb of Vancouver, British Columbia. *Water Resour. Res.*, 22:1404–1412, 1986.
- C. Grimmond and T. R. Oke. An evapotranspiration-interception model for urban areas. *Water Resour. Res.*, 27(7):1739–1755, 1991. doi: doi:10.1029/91WR00557.
- C. S. B. Grimmond and T. R. Oke. Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (lumps). *Journal of Applied Meteorology*, 41(7):792–810, 2002.
- C. S. B. Grimmond, T. S. King, F. D. Cropley, D. J. Nowak, and C. Souch. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. *Environmental Pollution*, 116:S243–S254, 2002.
- P. Hanson, N. Edwards, C. Garten, and J. Andrews. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48(1):115–146, 2000.
- B. S. Hardiman, J. A. Wang, L. R. Huttyra, C. K. Gately, J. M. Getson, and M. A. Friedl. Accounting for urban biogenic fluxes in regional carbon budgets. *Science of The Total Environment*, 592:366–372, 2017.
- HEL. Kaupunkimittausosasto, syksyn arkivuorokauden liikenne helsingissä 2016. Viitattu: 22.11.2018, 2017a. URL <https://www.hel.fi/hel2/ksv/Aineistot/Liikennesuunnittelu/Liikennetutkimus/Liikennemaarat.pdf>.
- HEL. Helsingin kaupunki / kaupunkiympäristön toimiala, liikenteen kehitys helsingissä 2016. Viitattu: 22.11.2018, 2017b. URL <https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/julkaisu-05-17.pdf>.

- HEL. Moottoriajoneuvoliikenteen määrät. *Viitattu: 22.11.2018*, 2018. URL <https://www.hel.fi/helsinki/fi/kartat-ja-liikenne/kadut-ja-liikennesuunnittelu/tutkimus-ja-tilastot/moottoriajoneuvoliikenteen-maarat/>.
- HSY. Seutucd'12 database. *Helsinki Region Environmental Services Authority*, 2012a.
- HSY. *Helsingin seudun ympäristöpalvelut, Aurinkopaneeleille sopivat sijainnit pääkaupunkiseudulla*. 2015.
- HSY. *Helsingin seudun ympäristöpalvelut, Pääkaupunkiseudun viherkatot*. 2016.
- HSY. Pääkaupunkiseudun kasvihuonekaasupäästöt. *Viitattu: 22.11.2018*, 2018. URL <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/ilmastonmuutos/hillinta/seuranta/Sivut/Paastot.aspx>.
- C. Huang, C. Chen, L. Li, Z. Cheng, H. Wang, H. Huang, D. Streets, Y. Wang, G. Zhang, and Y. Chen. Emission inventory of anthropogenic air pollutants and voc species in the yangtze river delta region, china. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(9):4105–4120, 2011.
- IL. Ilmatieteen laitos, vuositilastot. *Viitattu: 22.11.2018*, 2018. URL <https://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>.
- M. L. Imhoff, L. Bounoua, T. Ricketts, C. Loucks, R. Harriss, and W. T. Lawrence. Global patterns in human consumption of net primary production. *Nature*, 429(6994):870, 2004.
- L. Järvi, H. Hannuniemi, T. Hussein, H. Junninen, P. P. Aalto, R. Hillamo, and M. Kulmala. The urban measurement station smear iii: Continuous monitoring of air pollution and surface–atmosphere interactions in helsinki, finland. *Boreal Env. Res.*, 14 (suppl. A):86–109, 2009.
- L. Järvi, C. Grimmond, and A. Christen. The surface urban energy and water balance scheme (suews): Evaluation in los angeles and vancouver. *J. Hydrol.*, 411:219–237, 2011.
- L. Järvi, A. Nordbo, H. Junninen, A. Riikonen, J. Moilanen, E. Nikinmaa, and T. Vesala. Seasonal and annual variation of carbon dioxide surface fluxes in helsinki, finland in 2006-2010. *Atmos. Chem. Phys.*, 12:8475–8489, 2012. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-12-8475-2012>.
- L. Järvi, C. Grimmond, M. Taka, A. Nordbo, H. Setälä, and I. Strachan. Development of the surface urban energy and water balance scheme (suews) for cold climate cities. *Geosci. Model Dev.*, 7:1691–1711, 2014.

- L. Järvi, M. Havu, H. Ward, V. Bellucco, J. McFadden, T. Toivonen, V. Heikinheimo, and C. Grimmond. Spatial modelling of biogenic and anthropogenic carbon dioxide emissions in helsinki. *lähetetty arvioitavaksi julkaisusarjaan, Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018.
- P. Karsisto, C. Fortelius, M. Demuzere, C. Grimmond, R. Oleson, K.W. and Kouznetsov, V. Masson, and L. Järvi. Seasonal surface urban energy balance and wintertime stability simulated using three land-surface models in the high-latitude city helsinki. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2015.
- T. V. Kokkonen, C. S. B. Grimmond, O. Rätty, H. C. Ward, A. Christen, T. R. Oke, S. Kotthaus, and L. Järvi. Sensitivity of surface urban energy and water balance scheme (suews) to downscaling of reanalysis forcing data. *Urban Climate*, 23:36–52, 2018.
- K. T. Korhonen, A. Ihalainen, T. Packalen, O. Salminen, H. Hirvelä, and K. Härkönen. Uudenmaan metsävarat ja hakkuumahdollisuudet. *Luonnonvarakeskus (LUKE)*, 2015.
- A. Lindfors, A. Riihelä, A. Aarva, J. Latikka, and J. Kotro. Auringonsäteily helsingin Östersundomissa. *Ilmatieteen laitos, Raportteja*, 5, 2014.
- J. Lounasheimo. Pääkaupunkiseudun ilmastoraportti - päästöjen kehitys 2010. *Viitattu: 22.11.2018*, 2011. URL https://www.hsy.fi/sites/Esitteet/EsitteetKatalogi/Julkaisusarja/9_2011_Paakaupunkiseudun_ilmastoraportti_paastot2010_lr.pdf.
- J. Lounasheimo. Pääkaupunkiseudun ilmastoraportti - päästöjen kehitys 2011. *Viitattu: 22.11.2018*, 2012b. URL https://www.hsy.fi/sites/Esitteet/EsitteetKatalogi/Julkaisusarja/14_2012_paakaupunkiseudun_ilmastoraportti.pdf.
- V. Masson. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer meteorology*, 94(3):357–397, 2000.
- V. Masson, P. Le Moigne, E. Martin, S. Faroux, A. Alias, R. Alkama, S. Belamari, A. Barbu, A. Boone, and F. Bouyssel. The surfexv7. 2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, 6:929–960, 2013.
- R. K. Monson, D. L. Lipson, S. P. Burns, A. A. Turnipseed, A. C. Delany, M. W. Williams, and S. K. Schmidt. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature*, 439(7077)(711), 2006.

- R. Moriwaki and M. Kanda. Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor, and carbon dioxide over a suburban area. *Journal of Applied Meteorology*, 43(11): 1700–1710, 2004.
- Motiva. Yhteenvetojen co₂-päästöjen laskentaohjeistus sekä käytettävät co₂-päästökertoimet. *Viitattu: 22.11.2018*, 2012. URL https://www.motiva.fi/files/8887/CO2-laskentaohje_Yhteenvedot.pdf.
- Motiva. Auringonsäteilyn määrä suomessa. *Viitattu: 22.11.2018*, 2018a. URL https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa.
- Motiva. Co₂-päästökertoimet. *Viitattu: 22.11.2018*, 2018b. URL https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energiankulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet.
- M. Mäntykangas. Vaarallisen voimakkaita ukkosia lauantaina etelään [blogikirjoitus]. *Viitattu: 22.11.2018*, 2017. URL <http://blogi.foreca.fi/2017/08/vaarallisen-voimakkaita-ukkosia-lauantaina-etelaan/>.
- F. Nejadkoorki, K. Nicholson, I. Lake, and T. Davies. An approach for modelling co₂ emissions from road traffic in urban areas. *Science of the total environment*, 406(1–2): 269–278, 2008.
- J. Noilhan and S. Planton. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly weather review*, 117(3):536–549, 1989.
- A. Nordbo, L. Järvi, S. Haapanala, J. Moilanen, and T. Vesala. Intra-city variation in urban morphology and turbulence structure in helsinki, finland. *Boundary-layer meteorology*, 146(3):469–496, 2013.
- A. Nordbo, P. Karsisto, L. Matikainen, C. R. Wood, and L. Järvi. Urban surface cover determined with airborne lidar at 2 m resolution—implications for surface energy balance modelling. *Urban Climate*, 13:52–72, 2015.
- B. Offerle, C. S. B. Grimmond, and T. R. Oke. Parameterization of net all-wave radiation for urban areas. *Journal of Applied Meteorology*, 42(8):1157–1173, 2003.
- T. Oke. *Boundary layer climates*. routledge, london, uk. 1987.
- T. R. Oke. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14(4):268–277, 1976.

- T. R. Oke. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455):1–24, 1982.
- T. R. Oke, G. Mills, A. Christen, and J. A. Voogt. Urban climates. *Cambridge University Press*, 2017.
- E. Rabinowitch. Photosynthesis and related processes. *Interscience Publishers, New York, NY*, 1951.
- G. Ripamonti, L. Järvi, B. Mølgaard, T. Hussein, A. Nordbo, and K. Hämeri. The effect of local sources on aerosol particle number size distribution, concentrations and fluxes in helsinki, finland. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 65(1):19786, 2013.
- M. Ristimäki. Yhdyskuntarakenteen seurantajärjestelmä - ehdotus yhdyskuntarakenteen seurannan järjestämiseksi ja kehittämiseksi. *Suomen Ympäristö*, 344, 1999.
- A. Ruimy, P. Jarvis, D. Baldocchi, and B. Saugier. Co2 fluxes over plant canopies and solar radiation: A review. *Advances in Ecological Research*, 26:1–68, 1995.
- D. Sailor and L. Lu. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment*, 38:2737–2748, 2004.
- D. J. Sailor and C. Vasireddy. Correcting aggregate energy consumption data to account for variability in local weather. *Environmental Modelling & Software*, 21(5):733–738, 2006.
- B. Y. Schindler, L. Blank, S. Levy, G. Kadas, D. Pearlmutter, and L. Blaustein. Integration of photovoltaic panels and green roofs: review and predictions of effects on electricity production and plant communities. *Israel Journal of Ecology & Evolution*, 62(1–2):68–73, 2016.
- H. Schmid, C. Grimmond, F. Cropley, B. Offerle, and H. Su. Measurements of co2 and energy fluxes over a mixed hardwood forest in the midwestern united states. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103:355–373, 2000.
- K. C. Seto, S. Dhakal, A. Bigio, H. Blanco, G. Delgado, L. Huang, A. Inaba, A. Kansal, S. Lwasa, J. McMahan, D. Müller, J. Murakami, H. Nagendra, and A. Ramaswamand Dewar. Human settlements, infrastructure and spatial planning. *In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.*, 2014.

- R. Stull. *Meteorology for scientists and engineers*. Brooks/Cole, 2000.
- T. Sun, L. Järvi, M. Havu, H. Ward, S. Onomura, F. Lindberg, F. Olofson, A. Gabey, and C. Grimmond. Suews manual v2018a. *Department of Meteorology, University of Reading, Reading, UK*, 2018.
- T. Suni, J. Rinne, A. Reissell, N. Altimir, P. Keronen, U. Rannik, M. Maso, M. Kulmala, and T. Vesala. Long-term measurements of surface fluxes above a scots pine forest in hyytiala, southern finland, 1996-2001. *Boreal Environment Research*, 8(4):287–302, 2003.
- S. Trumbore. Carbon respired by terrestrial ecosystems—recent progress and challenges. *Global Change Biology*, 12(2):141–153, 2006.
- M. Tsubo and S. Walker. Relationships between photosynthetically active radiation and clearness index at bloemfontein, south africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 80(1):17–25, 2005.
- UN. World urbanization prospects: The 2018 revision. *Viitattu: 22.11.2018*, 2018. URL <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf>.
- T. Vesala, L. Järvi, S. Launiainen, A. Sogachev, Ü. Rannik, I. Mammarella, E. S. Ivola, P. Keronen, J. Rinne, A. Riikonen, et al. Surface–atmosphere interactions over complex urban terrain in helsinki, finland. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 60(2): 188–199, 2008.
- H. C. Ward, J. G. Evans, and C. S. B. Grimmond. Multi-season eddy covariance observations of energy, water and carbon fluxes over a suburban area in swindon, uk. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(9):4645–4666, 2013.
- H. C. Ward, S. Kotthaus, L. Järvi, and C. S. B. Grimmond. Surface urban energy and water balance scheme (suews): development and evaluation at two uk sites. *Urban Climate*, 18:1–32, 2016.
- L. F. Weissert, J. A. Salmond, and L. Schwendenmann. A review of the current progress in quantifying the potential of urban forests to mitigate urban co2 emissions. *Urban Climate*, 8:100–125, 2014.

A. Biogeeninen hiilidioksidin vuon malli

```
SUBROUTINE CO2_biogen( EmissionsMethod , id , ndays , ivConif , ivDecid ,&
    ivGrass , ConifSurf , DecidSurf , GrassSurf , BSoilSurf ,&
    snowFrac , nsurf , NVegSurf , avkdn , Temp_C , sfr , LAI , LaiMin ,&
    LaiMax , alpha_bioCO2 , beta_bioCO2 , theta_bioCO2 ,&
    alpha_enh_bioCO2 , beta_enh_bioCO2 , resp_a , resp_b ,&
    min_res_bioCO2 , Fc_biogen , Fc_respi , Fc_photo ,&
    notUsed , notUsedI )
```

```
IMPLICIT NONE
```

```
INTEGER, INTENT( in ) :: EmissionsMethod
```

```
INTEGER, INTENT( in ) ::&
```

```
    id ,&      !Day of year
```

```
    ndays ,& !Max no. days in a year
```

```
    ivConif , ivDecid , ivGrass ,&      !Vegetation counters
```

```
    ConifSurf , DecidSurf , GrassSurf , BSoilSurf ,& !Surface types
```

```
    nsurf , nvegSurf ,& !All surface types and vegetation
```

```
    notUsedI
```

```
REAL( KIND( 1d0 ) ) , INTENT( in ) ::&
```

```
    avkdn ,&      !Average downward shortwave radiation
```

```
    Temp_C ,&      !Air temperature
```

```
    notUsed
```

```
REAL( KIND( 1d0 ) ) , DIMENSION( nsurf ) , INTENT( in ) ::&
```

```
    sfr , snowFrac      !Surface fractions , snow fraction
```

```
REAL( KIND( 1d0 ) ) , DIMENSION( -4:ndays , nvegsurf ) , INTENT( in ) :: LAI
```

```

REAL(KIND(1d0)), DIMENSION( nvegsurf ), INTENT( in ) :: &
  LaiMin, LaiMax, &           ! [m2 m-2]
  alpha_bioCO2, beta_bioCO2, theta_bioCO2, & ! Photosynthesis
  alpha_enh_bioCO2, beta_enh_bioCO2, &       ! parameters
  resp_a, resp_b, min_res_bioCO2             ! Respiration

REAL(KIND(1D0)), INTENT( out ) :: &
  Fc_biogen, &                 ! Result output
  Fc_respi, Fc_photo           ! Component output

INTEGER :: iv ! Counter

REAL(KIND(1d0)) :: &
  PAR_umolm2s1, &
  Bellucco2017_Pho, &         ! Photosynthesis
  Bellucco2017_Res, &         ! Respiration
  Bellucco2017_Res_surf, & ! Respiration
  VegFracSum                ! Sum of veg fractions without water.

REAL(KIND(1d0)), DIMENSION( nvegsurf ) :: &
  active_veg_fr, &           ! Active vegetation fraction
  Fc_photo_surf, &           ! Photosynthesis
  Bellucco2017_Pho_surf     ! Photosynthesis

REAL(KIND(1d0)), DIMENSION( nvegsurf ) :: &
  alpha_bioCO2_v2, &
  beta_bioCO2_v2, &
  theta_bioCO2_v2

REAL(KIND(1d0)), PARAMETER :: &
  JtoulPAR = 4.6, &
  KdntoPAR = 0.46

! Calculate PAR from Kdown
PAR_umolm2s1 = JtoulPAR * KdntoPAR * avKdn

VegFracSum = sfr( ConifSurf ) + sfr( DecidSurf ) + sfr( GrassSurf )

```

```

! Calculate active vegetation surface
!Snow included although quite often LAI will be in its minimum
!when snow on ground
DO iv=ivConif ,ivGrass
    active_veg_fr(iv) = (sfr(iv+2)*(1-snowFrac(iv+2)))*&
        (lai(id-1,iv)-LaiMin(iv))/(LaiMax(iv)-LaiMin(iv))
ENDDO

!Local model, Bellucco et al. (2017)
IF(EmissionsMethod>=21 .AND. EmissionsMethod<=26) THEN
    ! Calculate carbon uptake due to photosynthesis
    ! EQ. 2.12
    Bellucco2017_Ph0 = 0
    DO iv=ivConif ,ivGrass
        Bellucco2017_Ph0_surf(iv) = -(1/(2*theta_bioCO2(iv))*&
            (alpha_bioCO2(iv)*PAR_umolm2s1+beta_bioCO2(iv)- &
            sqrt((alpha_bioCO2(iv)*PAR_umolm2s1+beta_bioCO2(iv))**2-4*&
            alpha_bioCO2(iv)*beta_bioCO2(iv)*theta_bioCO2(iv)*&
            PAR_umolm2s1)))
        ! For active vegetation fraction only
        Bellucco2017_Ph0 = Bellucco2017_Ph0 + &
            Bellucco2017_Ph0_surf(iv)*active_veg_fr(iv)
    ENDDO
    Fc_photo = Bellucco2017_Ph0
    Fc_photo = Bellucco2017_Ph0*active_veg_fr(ConifSurf-2)+ &
        Bellucco2017_Ph0*active_veg_fr(DecidSurf-2)+ &
        Bellucco2017_Ph0*active_veg_fr(GrassSurf-2)
ENDIF

! Calculate carbon uptake due to respiration
! EQ. 2.11
Bellucco2017_Res = 0.0
Bellucco2017_Res_surf = 0.0
IF (VegFracSum>0.01) THEN
    DO iv=ivConif ,ivGrass
        IF (sfr(2+iv)>0.005) THEN
            Bellucco2017_Res_surf = MAX(min_res_bioCO2(iv), &

```

```
    resp_a(iv)*exp(resp_b(iv)*Temp_C))
    Bellucco2017_Res = Bellucco2017_Res + &
    Bellucco2017_Res_surf * sfr(2+iv)/VegFracSum
  ENDIF
ENDDO
ENDIF
Fc_respi = Bellucco2017_Res * &
(sfr(ConifSurf)+sfr(DecidSurf)+sfr(GrassSurf)+sfr(BSoilSurf))

! Combine to find biogenic CO2 flux
Fc_biogen = Fc_photo + Fc_respi
RETURN
ENDSUBROUTINE CO2_biogen
```

B. Ihmisperäinen hiilidioksidin vuon malli

```
SUBROUTINE AnthropogenicEmissions( EmissionsMethod,&
    id , it , imin , DLS, nsh , DayofWeek_id , ndays,&
    EF_umolCO2perJ , FcEF_v_kgkm , EnEF_v_Jkm , TrafficUnits ,&
    FrFossilFuel_Heat , FrFossilFuel_NonHeat ,&
    MinQFMetab , MaxQFMetab,&
    NumCapita , PopDensDaytime , PopDensNighttime ,&
    Temp_C , HDD, Qf_A , Qf_B , Qf_C ,&
    AH_MIN , AH_SLOPE_Heating , AH_SLOPE_Cooling ,&
    T_CRITIC_Heating , T_CRITIC_Cooling ,&
    TrafficRate , QF0_BEU , QF_SAHP ,&
    Fc_anthro , Fc_metab , Fc_traff , Fc_build ,&
    AHProf_tstep , HumActivity_tstep , TraffProf_tstep ,&
    PopProf_tstep , notUsed , notUsedI )
```

```
IMPLICIT NONE
```

```
INTEGER, INTENT(in) :: EmissionsMethod
```

```
INTEGER, INTENT(in) ::&
```

```
    id ,&                !Day of year
    it ,&                !Hour
    imin ,&              !Minutes
    DLS ,&               !day lightsavings
    nsh ,&               !Number of timesteps per hour
    ndays ,&            !Max no. days in a year
    notUsedI
```

```
INTEGER, DIMENSION(3) , INTENT(in) :: DayofWeek_id
```

```

!Heating Degree Days
REAL(KIND(1d0)),DIMENSION(-4:ndays, 6),INTENT(in):: HDD

REAL(KIND(1d0)),DIMENSION(2),INTENT(in)::&
  Qf_A,Qf_B,Qf_C,&      !Qf coefficients
  AH_MIN,&              !Minimum ant. heat flux
  AH_SLOPE_Heating,&    !Slope of the ant. heat flux
  AH_SLOPE_Cooling,&
  NumCapita,&           !Number of people in the study area per ha
  PopDensDaytime,&      !Daytime population density [ha-1]
  T_CRITIC_Heating,&    !Critical temperature
  T_CRITIC_Cooling,&    !Critical cooling temperature
  TrafficRate,&         !Traffic rate
  QF0_BEU

REAL(KIND(1d0)),DIMENSION(24*nsh,2),INTENT(in)::&
  AHProf_tstep,&
  HumActivity_tstep,&
  TraffProf_tstep,&
  PopProf_tstep

REAL(KIND(1D0)),INTENT(in):: &
  EF_umolCO2perJ,&
  FcEF_v_kgkm,&        !CO2 Emission factor
  EnEF_v_Jkm,&         !Energy Emission factor
  TrafficUnits,&       !Traffic Units choice
  FrFossilFuel_Heat,&  !Fraction of Fossil Fuel heat
  FrFossilFuel_NonHeat,&!Fraction of Fossil Fuel non heat
  MinQFMetab,&        !Minimum QF Metabolism
  MaxQFMetab,&        !Maximum QF Metabolism
  PopDensNighttime,&  !Nighttime population density [ha-1]
  Temp_C,&            !Air temperature
  notUsed

REAL(KIND(1D0)),INTENT(out):: &
  QF_SAHP,&
  Fc_anthro,&
  Fc_metab,Fc_traff,Fc_build

```

```

INTEGER::&
    iu ,&                !1=weekday OR 2=weekend
    ih

REAL(KIND(1D0)):: &
    DP_x_RhoPop, DP_x_RhoPop_traff,&
    MinFcMetab, MaxFcMetab,&
    QF_build ,QF_metab ,QF_traff,&
    QF_SAHP_base,&      !Ant. heat flux (temp independent part)
    QF_SAHP_heat,&     !Ant. heat flux (heating part only)
    QF_SAHP_ac,&       !AC contribution
    PopDorNorT,&      !Population
    ActDorNorT,&      !Human activity
    TraffDorNorT,&   !Traffic
    AHDorNorT        !Anthropogenic heat

! Account for Daylight saving
ih=it-DLS
IF (ih < 0) ih=2
iu=1      !Set to 1=weekday
IF (DayofWeek_id(1)==1.OR. DayofWeek_id(1)==7) iu=2 !2=weekend

! 1=night , 2=day , 1-2=transition
PopDorNorT   = PopProf_tstep ((NSH*(ih+1-1)+imin*NSH/60+1),iu)
ActDorNorT   = HumActivity_tstep ((NSH*(ih+1-1)+imin*NSH/60+1),iu)
! normalise so the AVERAGE of the multipliers is equal to 1
TraffDorNorT = TraffProf_tstep ((NSH*(ih+1-1)+imin*NSH/60+1),iu)
AHDorNorT    = AHProf_tstep ((NSH*(ih+1-1)+imin*NSH/60+1),iu)

! Diurnal profile times population density [cap ha-1]
DP_x_RhoPop = AHDorNorT * NumCapita(iu)
! Calculate CO2 from human metabolism
MinFcMetab = 8/5. * MinQFMetab
MaxFcMetab = 8/5. * MaxQFMetab ! Sailor & Lu (2004)

QF_metab = (PopDensNighttime*MinQFMetab*((2-ActDorNorT)+&
(2-PopDorNorT))/2 + PopDensDaytime(iu)*MaxQFMetab*&

```

```

((ActDorNorT-1)+(PopDorNorT-1))/2)/10000 ! [W m-2]
! EQ. 2.14
Fc_metab = (PopDensNighttime*MinFcMetab*((2-ActDorNorT)+&
(2-PopDorNorT))/2 + PopDensDaytime(iu)*MaxFcMetab*&
((ActDorNorT-1)+(PopDorNorT-1))/2)/10000 ! [umol m-2 s-1]

IF (EmissionsMethod==2 .OR. EmissionsMethod==5 .OR. &
EmissionsMethod==12 .OR. EmissionsMethod==15 .OR. &
EmissionsMethod==22 .OR. EmissionsMethod==25 .OR. &
EmissionsMethod==32 .OR. EmissionsMethod==35) THEN
! Jarvi et al. (2011) JH Eq 3 using HDD and CDD
! This contains QF from all three sources:
! buildings, metabolism and traffic!
! EQ. 2.9
QF_SAHP = (Qf_a(iu)+Qf_b(iu)*HDD(id-1,2))+&
Qf_c(iu)*HDD(id-1,1))*DP_x_RhoPop
! Temperature-independent contribution
QF_SAHP_base = (Qf_a(iu)) * DP_x_RhoPop
! Heating contribution
QF_SAHP_heat=(Qf_c(iu)*HDD(id-1,1))*DP_x_RhoPop
! Cooling (AC) contribution
QF_SAHP_ac=(Qf_b(iu)*HDD(id-1,2))*DP_x_RhoPop

ENDIF

IF (EmissionsMethod>=4 .AND. EmissionsMethod<=6 .OR. &
EmissionsMethod>=14 .AND. EmissionsMethod<=16 .OR. &
EmissionsMethod>=24 .AND. EmissionsMethod<=26 .OR. &
EmissionsMethod>=34 .AND. EmissionsMethod<=36) THEN
! QF and Fc from building energy use and transport statistics

! Calculate energy released from traffic
IF (TrafficUnits==1) THEN ! [veh km m-2 day-1]
! Calculate using mean traffic rate*emission factor [J km-1]
QF_traff=TrafficRate(iu)/(60*60*24)*EnEF_v_Jkm*TraffDorNorT
! EQ. 2.13
Fc_traff=TrafficRate(iu)/(60*60*24)*FcEF_v_kgkm*1e3*1e6&
/44*TraffDorNorT

```

```
ELSE !If TrafficUnits doesn't match possible units
  CALL ErrorHint(75,'Check SUEWS_AnthropogenicEmissions.txt',&
    TrafficUnits, notUsed, notUsedI)
ENDIF

!Energy released from buildings only
QF_build=QF_SAHP_base+QF_SAHP_heat+QF_SAHP_ac

!Calculate Fc_build
Fc_build=QF_SAHP_heat*FrFossilFuel_Heat*EF_umolCO2perJ
!And a temperature-independent contribution
!from building energy use
! EQ. 2.15
Fc_build=Fc_build+QF_SAHP_base*QF0_BEU(iu)*&
FrFossilFuel_NonHeat * EF_umolCO2perJ

!Add other QF components to QF_SAHP_base
QF_SAHP_base = QF_SAHP_base + QF_traff + QF_metab

!Sum components to give anthropogenic heat flux [W m-2]
QF_SAHP = QF_metab + QF_traff + QF_build
!Sum components to give anthropogenic CO2 flux [umol m-2 s-1]
Fc_anthro = Fc_metab + Fc_traff + Fc_build

ENDIF
RETURN
ENDSUBROUTINE AnthropogenicEmissions
```